ОРГАНИЗАТОРЫ:
АО «НИИМЭ»
АО «НИИМА «Прогресс»

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:
Министерство промышленности и торговли Российской Федерации
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ ПАРТНЕРЫ:
ПАО «Сбербанк»
НИЦ «Курчатовский институт»,
Госкорпорация «Росатом»,
Фонд перспективных исследований

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАРТНЕР:
АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»

РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2025

РОССИЙСКИЙ ФОРУМ «МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2025»

11-я Научная конференция
«ЭКБ и микроэлектронные модули».
Сборник тезисов

ФТ «Сириус»
Научно-технологический университет «Сириус»
21-27 сентября 2025 г.

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2025

УДК 621.3.01/.09
ББК 38.843
Р76

Р76 Российский форум «Микроэлектроника 2025»
11-я Научная конференция
«ЭКБ и микроэлектронные модули».
Сборник тезисов
Научно-технологический университет «Сириус»,
21-27 сентября 2025 г.
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2025. – 1686 с.

В выпуск включены тезисы докладов конференции, освещающие актуальные вопросы разработки, производства и применения электронной компонентной базы и электронных модулей.

УДК 621.3.01/.09
ББК 38.843

© АО «НИИМЭ», 2025
© АО «НИИМА «Прогресс», 2025
© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2025

Качество рисунков соответствует предоставленным авторами материалам.

Содержание

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ 63

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы — российская технология на глобальном рынке
Гольцман Г. Н. 63

НАВИГАЦИОННО-СВЯЗНЫЕ СБИС И МОДУЛИ 64

Помехоустойчивость локальной системы навигации в проекте «КОНСУЛ»
Корнеев И., Кондрашов З., Корнеев А. 64

Семейство навигационных модулей NaviMatrix
Чижиков Д. В., Бабенко С. М., Харченко Д. С., Агапов А. Ю. 68

Повышение помехоустойчивости радионавигационных систем методами пространственной обработки сигналов
Глушанков Е. И., Кирик Д. И., Горобцов И. А. 70

Обзор решений беспроводной связи и навигации для применения в робототехнике и беспилотных транспортных средствах (ТС)
Чикваркин И. Б. 72

Комплекс «НАП Синхро-1Т» для формирования шкалы времени по сигналам ГНСС в условиях помех
Якубович П. Р., Семенов С. А., Долгих И. О., Климов В. Н. 74

Тенденции развития элементной базы аппаратуры навигационных и связных космических аппаратов
Стешенко В. Б. 75

Локальные навигационные системы для обеспечения посадки и поиска возвращаемых изделий ракетно-космической техники
Старовойтов Е. И. 76

Исследование газонаполненных МЭМС-ячеек в составе макетов квантовых генераторов частоты нового поколения
Гусев С. В., Горский Л. Г., Думчиков К. А. 79

Разработка электронного модуля 3-осевого магнитометра для систем навигации БПЛА малого и среднего классов на основе отечественной ЭКБ
Полевиков В. В., Юров А. С. 82

Особенности применения высокоточной спутниковой навигационной аппаратуры для частотно-временной синхронизации
Вейцель А. В. 83

Практический опыт перевода микросхем на отечественное микроэлектронное производство
Игошин А. В., Лебедев А. В., Степанова А. С. 85

Временное мультиплексирование корреляционных каналов в интегральных схемах приемников глобальных навигационных спутниковых систем: методы реализации и оптимизации
Александров А. В. 87

Разработка алгоритма повышения точности геопозиции транспортного средства в условиях многолучевого распространения GPS с использованием инерциальных систем
Цуканова Е. Е., Токарев Е. П., Клоков В. А., Каргин Н. И. 92

Текущий статус и планы освоения технологий CSP- и WLP-корпусирования фильтров на ПАВ
Машинин О. В., Синицына Т. В., Сиротин М. С., Халфин Т. М. 94

Фильтры на ПАВ для обработки РЧ-сигнала повышенной мощности
Груздев А. С., Гарифулина А. Т., Дорофеева С. С., Егоров Р. В., Синицына Т. В. 96

Универсальная платформа программно-определяемого радио РИТМ-SDR-USRP
Кащенко И. Е., Ольховский А. А., Ламкова Н. С., Яковлев Г. А. 98

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ 100

Процессорный сложнофункциональный блок с внеочередным исполнением команд 2-го поколения, совместимый с системой команд RISC-V
Козлов А. В. 100

Трехъядерный микроконтроллер для систем промышленной автоматизации
Мякочин Ю. О., Хренов Г. Ю. 101

Микроархитектура высокопроизводительного GPGPU для задач искусственного интеллекта
Маслов М. В. 103

Алгоритмический синтез предметно-ориентированных аппаратных ускорителей
Советов П. Н. 105

Аппаратные средства реализации нейронных сетей, кратно снижающие их время задержки и площадь на кристалле
Буренева О. И., Миронов С. Э., Шичкина Ю. А. 107

Высокопроизводительные отечественные ускорители для инференса нейронных сетей в реальном времени
Фролов М. А. 109

Архитектуры специализированных ускорителей вычислений на основе массового параллелизма для создания программно-аппаратных комплексов на базе процессоров «Эльбрус»
Тарасов И. Е. 112

Разработка контроллера оперативной памяти DDR5 для многоядерных процессоров
Петров И. А. 114

Современные методы моделирования многоядерных процессоров
Недбайло Ю. А. 116

Применение одноплатных компьютеров в основе сети связи робототехнических комплексов
Бычков И. Н., Коренев П. В. 118

Анализ производительности специализированной СУБД для многослойных технических объектов
Федоткин А. С. 120

Аппаратные решения для реализации высокопроизводительной системы межпроцессорных обменов
Аряшев С. И., Токарев И. В. 122

Высокочастотная система тактирования сигнала для четырехканального мультистандартного последовательного 28 Гб/с приемо-передатчика по технологии КМОП 28 нм
Ларионов А. В., Буякова О. Н., Сысоева О. В., Тарасов И. В., Токарев И. В., Прозорова А. Г. 124

Интеллектуальные системы адаптивной настройки параметров DDR на базе машинного обучения
Земков С. И., Корниленко А. В., Гревцев Н. А., Чибисов П. А. 126

Применение гибридных методов машинного обучения для ускорения верификации на блочном уровне
Манеркин А. Д., Гревцев Н. А., Чибисов П. А. 128

Потоковые процессоры для обработки массивов данных в реальном масштабе времени
Бобков С. Г., Левченко Н. Н., Климов А. В. 130

Оптимизированная программная модель комплексных вычислительных систем с динамической настройкой
Ладин О. И. 132

Аналитический подход к оценке задержек в mesh-сети в вычислительной системе с распределенной памятью
Хайдуков Д. И., Алексеев А. А. 134

Применение высокоскоростных линков CXL/UCIe для решения проблем с хранением данных в современных гетерогенных системах
Белянин И. В., Кудрявцев А. Н. 136

Перспективы использования открытых архитектур в отечественных микропроцессорах
Хренов Г. Ю. 139

Решение оптимизационных задач на FPGA
Старожилов И. В. 141

Технологии аппаратной трассировки для архитектуры RISC-V
Кашканов А. О. 142

Возможности стандарта Ultra Ethernet для решения задач ИИ
Кирюшкин С. Б. 144

Балансировщик нагрузки DS Proxima для кластеризации средств информационной безопасности и серверов приложений
Руткевич А. В. 146

Российский накопитель microSD: снижение технологических рисков
Шкляев Е. А. 147

Обзор и сравнение встраиваемых систем на процессорах с интегрированными ИИ-ускорителями
Медведев А. В. 148

Выявление общих характеристик периферийных модулей микроконтроллеров
Рыбкин С. В., Захаров А. М., Черкасов М. С. 151

Роль лаборатории R&D «РТК-ЦОД» в электронной промышленности РФ
Власов А. В. 152

Экосистема для встраиваемых решений
Сушков А. В., Рыбкин С. В. 153

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ 154

Система управления, обработки и синхронизации РСА космического базирования
Гришин В. Ю., Еремеев П. М., Лось В. О. 154

Антенная система многофункционального РСА космического базирования на базе АФАР
Цветков В. К., Лялин К. С., Переверзев А. Л., Кузьмин И. А., Орешкин В. И. 156

Кластеризованное антенное полотно для малогабаритных АФАР
Демшевский В. В., Аникин Г. С. 158

Исследование возможности создания АФАР X-диапазона на основе многоканальных приемо-передающих модулей
Коротаев Н. А., Демшевский В. В., Карасев М. С. 159

Метод адаптивного формирования радиолокационных портретов в крупноапертурных РЛС для оперативной классификации космических аппаратов
Перлов А. Ю. 161

Программно-аппаратный комплекс для имитации канала распространения сигнала
Балакин Д. А. 163

Конфигурируемые IP-ядра для систем связи и телекоммуникаций
Кащенко И. Е., Ткач А. А., Дубровко А. Ю., Цымбал М. Р., Пантелеева П. В. 164

Построение унифицированного комплекта разработчика АСУ СТО электронного машиностроения
Переверзев А. Л., Петров В. Ф., Симонов С. Б., Терентьев А. И. 166

ПЛК в автоматизированных системах управления специализированным технологическим оборудованием
Аряшев С. И. 168

Программный комплекс ELPLC-LOGIC — платформа для программирования ПЛК
Глухов А. В. 169

Средства промышленной автоматизации АО «ЭЗАН». SCADA-система «Соната»
Лущевский С. С. 170

Особенности реализации медицинской аппаратуры электроимпульсной терапии
Нестеренко И. В. 172

Нелинейное управление концентрацией глюкозы в интерфейсах живых технических систем
Пожар К. В. 174

Разработка антенной системы секторного MIMO-радиолокатора
Мелёшин Ю. М. 176

Разработка MIMO-радиолокатора K-диапазона частот
Мелёшин Ю. М., Карпов В. Н., Лялин К. С. 178

Обнаружение воздушных целей с помощью болометрического приемника
Ракитин А. В., Костров В. В. 179

Возможности модульной радиолокационной платформы ДЗЗ при решении задач интерферометрии
Кузьмин И. А., Цветков В. К., Кислый С. А. 181

Радиомодем стандарта DVB-S2 для широкополосной системы связи российской орбитальной станции
Шевченко Р. А., Конев С. В. 183

Цифровые компоненты китайского производства для применения в цифровой обработке сигналов
Неяскин К. В. 186

Выработка требований к ЭКБ для систем питания и управления аппаратуры радиолокатора с синтезированной апертурой на базе АФАР для малого космического аппарата
Вислоус П. А., Съедин М. В. 188

Система нейростимулятора с замкнутым контуром управления болевыми реакциями
Коняева А. П., Пожар К. В., Нестеренко И. В., Жило Н. М. 191

Оценка влияния схемотехнических решений в электрической схеме устройства нейростимуляции на срок его службы
Маслова В. Ю. 192

Разработка интеллектуального ЭБУ ТС в соответствии с требованиями ASIL D
Храмов С. О., Клоков В. А. 194

Российская программно-аппаратная платформа для систем автоматического управления БАС мультироторного типа
Анохин Д. В., Брюков С. Б., Янакова Е. С. 196

Многоканальная обработка сигналов как способ повышения точности и надежности сопровождения БПЛА
Брюков С. Б., Дмитриев А. В., Янакова Е. С. 198

Ускоритель импульсного ИИ для встраиваемой и мобильной электроники
Переверзев А. Л., Силантьев А. М., Примаков Е. В. 200

Опыт прототипирования контроллера PCI Express от стороннего производителя на ПЛИС AMD/Xilinx
Павлов К. 202

Построение мультикластерных сред на базе российских СнК для потоковой обработки информации
Брюков С. Б., Янакова Е. С., Дмитриев Д. В. 203

От калибровки к позиционированию: использование инерциальных и магнитных датчиков для определения ориентации
Якунин А. Н., Савчиц А. С. 204

Разработка высокопольного сверхпроводящего магнитно-резонансного томографа
Демихов Е. И., Киселев Н. К., Шумм А. Б., Глушаев А. В., Ковальчук О. Н. 205

Разработка подсистемы энергообеспечения нейростимулятора с выходной характеристикой источника напряжения
Гуров К. О., Миндубаев Э. А., Данилов А. А. 206

Разработка отечественной интегрированной среды автоматизированного проектирования и измерения широкополосных устройств для радиотехнических систем
Полторыхин К. М., Семенов Э. В. 208

Аттенюаторы и оконечные нагрузки для задач проектирования и измерения радиоэлектронных устройств
Малышев И. Н., Еремеев Ю. В., Белков И. Г. 211

Аппаратно-программный мишенный комплекс для автоматизации регистрации результатов стрелковых упражнений
Литманович Д. М., Куделин А. И., Литманович А. М. 213

Построение автоматизированной системы тестирования бортовой аппаратуры с интеллектуальными модулями распределенной вычислительной сети
Былинкин И. К. 215

ТЕХНОЛОГИИ И КОМПОНЕНТЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ 217

Перспективные технологические решения в области высокотемпературного обжига плат при изготовлении металлокерамических корпусов
Ахметгалиев Р. Ш., Ермолаев Е. В., Жуков И. А., Егошин В. А., Шугаепов Ш. Н. 217

Оптимизация процесса гальванического осаждения золота для снижения стоимости конечного продукта на основе составных полупроводников
Суханов Д. А. 219

Технологические возможности сборки многокристальных модулей на уровне пластины
Лачинов А. А., Подковыров А. А., Салынский Н. А. 222

Особенности технологии изготовления гетеробиполярных транзисторов на основе структур InGaP/GaAs
Осипов А. М., Егорова Е. И., Захарова Н. Ю., Захаров С. И., Козловский Э. Ю. 224

Разработка технологического процесса GaN/SiC с топологической нормой 0,25 мкм в АО «ОКБ-Планета»
Желаннов А. В., Казанцева З. С., Алмазов О. Б. 225

Создание буферного N-стоп-слоя в кремниевых силовых полупроводниковых приборах с использованием легирования ионами водорода
Вренев Я. А., Кравчук Е. А., Быкова А. В., Романов Д. А., Полохов А. М. Машевич П. Р. 226

Формирование газопроницаемого микропрофиля поверхности молибденовых подложек высокоинтенсивным электронно-лучевым воздействием
Шугаепов Ш. Н., Жуков И. А., Бабаев А. С., Егошин В. А., Ахметгалиев Р. Ш., Ермолаев Е. В. 228

Разработка цифрового двойника суб-100-нм многозатворных МОП-транзисторов
Петросянц К. О., Силкин Д. С., Попов Д. А. 230

Разработка и оптимизация приборов силовой электроники от 0,4-го до 17-го класса в целях получения их предельных целевых параметров с помощью приборно-технологического моделирования
Кравчук Е. А., Вренев Я. А., Полохов А. М., Романов Д. А., Горбунова А. И., Машевич П. Р. 232

Пластиковые корпуса с открытой полостью: преимущества, проблемы и решения
Воробьёв С. А. 234

Контроль процессов формирования ONO-структур для применения в приборах с энергонезависимой памятью
Волоховский А. Д. 236

Сегнетоэлектрический полевой транзистор памяти на основе $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ и двумерного MoS_2
Черникова А. Г., Козодаев М. Г., Хакимов Р. Р., Забросаев И. В, Колинько К. С., Маркеев А. М. 238

Алгоритм детектирования критической степени деградации остаточной поляризации и ошибок чтения в дифференциальных ячейках FeRAM на основе $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$
Константинов В. С., Захаров П. С. 240

Разработка и оптимизация конструкции 65-В n-канального LDMOS-транзистора для 130-нм BCD-технологии
Лапин А. Е., Ларионова Д. С., Гурковский Б. В., Козлов Е. В. 242

Сравнение эффективности механизмов горячих носителей и туннелирования при программировании ячеек энергонезависимой памяти SONOS
Червонный Д. В., Арилин Р. А., Захаров П. С., Ермаков И. В., Зубов И. А. 244

Мемристивные стуктуры на основе энергонезависимых фазопеременных материалов и оксидов переходных металлов
Михалевский В. А. 246

Использование термически разлагаемого полимера, нанесенного газофазным осаждением, для травления low-k-диэлектрика с малым повреждением
Резванов А. А., Горохов С. А. 248

Атомно-слоевое осаждение TiO_2 нанометровой толщины на двумерные полупроводниковые материалы: MoS_2
Маркеев А. М., Романов Р. И., Забросаев И. В., Лебединский Ю. Ю., Смирнова В. В., Ли В., Смирнова В. В., Завидовский И. А., Большаков А. Д. 251

Структура и электрические свойства пленок MoS_2, синтезированных методом металлоорганического химического осаждения из газовой фазы
Романов Р. И., Смирнова В. В., Ли В., Маркеев А. М. 253

Метод проведения процесса проявления фоторезиста для уменьшения количества дефектов на областях с низкой плотностью рисунка в изготовлении ИС по технологическим нормам 130 нм
Рудометов Я. А., Шелкунов Д. Ю. 255

Исследование влияния параметров глубокого реактивного ионного травления на профиль боковых поверхностей при изготовлении элементов МЭМС
Петрова С. В., Коломийцев А. С., Ильин О. И., Житяева Ю. Ю., Гусев Е. Ю., Чебанов М. А. 257

Определение параметров технологических операций плазменного травления и метода химической очистки для удаления полимерной высадки при изготовлении ИС по технологическим нормам 250 нм и ниже
Сафронова Ю. С., Шелкунов Д. Ю., Артамонова К. В., Рудометов Я. А., Селезнева А. В., Русанова К. Д. 259

Методология оперативного контроля надежности наноразмерных МОП-транзисторов при воздействии горячих электронов
Воеводин А. В., Селецкий А. В., Михайлов А. А., Матвеев Н. Н., Скоморохов Д. В. 261

Методология оценки состояния базовых технологий и PDK в условиях изменений
Панасюк В. Н., Королева А. Н., Шипицин Д. С., Потупчик А. Г., Селецкий А. В. 263

Исследование компенсации проявления эффекта искажения элементов фоторезистивной маски при разрушающем РЭМ-анализе
Рудометов Я. А., Шелкунов Д. Ю., Демидова Ю. Б. 266

Разработка режима ионной полировки большой площади для разрушающего анализа контактов ИС с помощью РЭМ
Рудометов Я. А., Русанова К. Д. 268

Моделирование деградации p-канального МОП-транзистора, вызванной эффектом температурной нестабильности при отрицательном смещении затвора
Шарипов А. И., Лапин А. Е., Псху Д. А. 270

Исследование особенностей испытаний МОП-транзисторов на стойкость к эффекту термополевой нестабильности
Псху Д. А., Максимов Д. А. 271

Исследование влияния температуры и мощности на интенсивность отказов транзистора
Чашкин Л. Б., Полесский С. Н., Тумковский С. Р. 273

Потеря состояния во FRAM-устройствах на основе тонких пленок оксида гафния-циркония при низких рабочих напряжениях
Калика Е. Б., Марголин И. Г., Чуприк А. А. 275

Влияние условий формирования лазерных граней на надежность полупроводниковых лазеров с гребневой конструкцией волновода
Симонов А. В. 277

Прямой гидрофильный бондинг алмаза (100) с напылением подложками из SiO_2
Губкин А. А. 279

Технические требования к фотошаблонам критических литографических слоев технологии уровня 28 нм и методы их оценки
Балан Н. Н., Васин А. А., Иванов В. В., Клочкова Е. Л., Панкратов А. Л., Соколова Е. В. 280

Особенности решения некоторых задач вычислительной литографии для критических слоев технологии уровня 28 нм
Балан Н. Н., Иванов В. В., Клочкова Е. Л., Соколова Е. В. 282

Расчет электрических характеристик режимов записи/стирания элементов энергонезависимой памяти на основе транзисторов с плавающим затвором
Сорокин Д. В., Шелепин Н. А. 284

Особенности конструкции и технологии производства кристаллов для кремниевой силовой ЭКБ
Романов Д. А., Кравчук Е. А., Чернышев Ю. П., Быкова А. В., Машевич П. Р. 286

ДОВЕРЕННЫЕ ПАК И ЭКБ ДЛЯ КРИТИЧЕСКОЙ ГРАЖДАНСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ 288

Эффекты ионизирующего излучения в сдвоенном микромощном компараторе напряжения
Кульченков Е. А., Рыбалка С. Б., Демидов А. А. 288

Особенности проектирования наноразмерных КМОП СБИС объемного кремния с повышенной радиационной стойкостью
Герасимов Ю. М., Краснюк А. А. 290

Импульсное лазерное испытательное оборудование и его возможности для определения чувствительности полупроводниковых приборов к воздействию ионизирующего излучения
Ватуев А. С., Шарапов А. А., Рубанов П. В. 292

Влияние рассеяния ионизирующего излучения космического пространства на дозу за многослойной защитой
Рубанов П. В., Шарапов А. А., Ватуев А. С. 295

Особенности проектирования радиационно стойких и сбоеустойчивых микросхем
Шеховцов Д. В., Шишаев А. И., Смерек В. А., Зольников В. К. 298

Формирование комплекта разработчика аналоговых микросхем с использованием платформы БМК на основе библиотеки схемотехнических и топологических решений
Дворников О. В., Попов А. Э., Прокопенко Н. Н., Кузнецов Д. В., Клейменкин Д. В. 300

Опыт разработки высоконадежных аппаратных платформ для гетерогенных вычислений на основе коммутаторов Switch Fabric
Кругляк К. В. 302

Интеграция полупроводниковых чувствительных элементов радиационной нагрузки в бортовые электронные системы космических аппаратов
Бакеренков А. С. 304

Сильноточная 3D GaN микросборка с двухсторонним теплоотводом, предназначенная для применения в модулях высокоплотных DC-DC преобразователей
Доценко В. В., Кодорова И. Ю., Полынцев Е. С., Кагадей В. А., Аксёнов А. А., Зиятдинов Р. М. 305

Малошумящие усилители, изготовленные по технологическому процессу GA05-D-L-01
Кулиш А. М., Фазылханов О. Р. 307

Моделирование воздействия электростатического разряда на полупроводниковое устройство защиты в кремниевом интерпозере
Емельяненко Ю. А., Россов А. С. 309

Программно-аппаратные модули для макетирования ЛЧМ-радара на платформе «СВЧ КИТ»
Будяков А. С., Бриль Д. С., Дранцев С. А. 311

Автоматизированный стенд для комплексной проверки силовых датчиков тока
Махотин И. Д., Ширин А. О., Леухин И. Б., Давыдов Г. Г., Кессаринский Л. Н., Телец В. А. 312

Монолитная интегральная схема синтезатора частоты мм-диапазона длин волн
Баландин Д. А., Евлампиев А. Ю., Брынцев И. В. 314

Операционные усилители на отечественном комплементарно-биполярном техпроцессе (БиКМОП): технология, вызовы и перспективы
Семихатов И. А. 315

Открытая модульная платформа для полунатурного тестирования доверенных систем блоков малых космических аппаратов
Суринович А. Д., Егорова А. М., Ширин А. О., Леухин И. Б., Кессаринский Л. Н., Никифоров А. Ю. 317

Комбинированная система синхронизации открытой многоканальной модульной платформы
Златин С. А., Суринович А. Д., Егорова А. М., Леухин И. Б., Ширин А. О., Грицаенко Д. И., Кессаринский Л. Н., Телец В. А. 320

Разработка архитектуры открытой многоканальной модульной платформы
Шевлягин М. С., Суринович А. Д., Леухин И. Б., Ширин А. О., Кессаринский Л. Н., Никифоров А. Ю. 323

Методологическая основа выявления троянов и уязвимостей в СФ-блоках процессорных подсистем прикладного класса при разработке доверенных СБИС
Сидорин Ю. Ю., Кессаринский Л. Н., Никифоров А. Ю., Телец В. А. 326

Рациональный статистический подход к радиационному контролю партий пластин изделий микроэлектроники в доверенном производстве
Московская Ю. М., Никифоров А. Ю., Телец В. А., Бойченко Д. В., Кессаринский Л. Н. 328

Актуальность ДИС и вопросы возникающие в практической плоскости нового направления электроники
Харченко М. Э. 331

Zero-Client — доверенное взаимодействие в инфраструктуре виртуальных рабочих столов пользователей
Шелупанов А. А., Брагин Д. С., Конев А. А. 334

Эмуляция механизмов защиты адресных пространств периферийных устройств в доверенной среде
Гревцев Н. А., Чибисов П. А., Зубковский П. С., Аряшев С. И. 336

Вычисления с применением операций на эллиптических кривых на основе ПЛИС
Турбин Д. С., Краснюк А. А. 338

Построение ФДСЧ с заданными теоретико-вероятностными свойствами
Лагутенко Д. В., Соколов Н. С. 341

Физически неклонируемая функция в программируемой логике и аналоговых схемах
Лукьянова Я. А., Певцов Е. Ф., Лебедев В. Р., Коротаев Ю. А. 343

Гибридная подготовка специалистов: информационная безопасность + радиоэлектроника — уникальное сочетание на рынке труда
Дураковский А. П., Марков А. С. 345

Анализ энергопотребления ARM-микроконтроллеров при реализации российских стандартов симметричного шифрования
Маро Е. А. 347

Научно-технические и экономические проблемы производства отечественных пассивных электронных компонентов для применения в составе объектов критической гражданской инфраструктуры
Верник П. А. 350

Доверенные ПАК на основе отечественной ЭКБ
Аряшев С. И. 353

Обеспечение информационной безопасности значимых объектов КИИ с использованием доверенных аппаратных платформ
Юсупов Р. Р. 354

Оценка доверия к ПАК с помощью мутации встроенного программного обеспечения
Овасапян Т. Д., Грибков Н. А. 355

Обеспечение доверия к встроенному программному обеспечению защищенных микроконтроллеров на всем жизненном цикле изделия
Шелупанов А. А., Брагин Д. С., Конев А. А. 357

Доверенные микросхемы: принципы разработки доверенных микросхем
Лебедев А. В. 359

СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И СИСТЕМ 361

Размерные эффекты в нелинейных моделях AlGaN/GaN HEMT
Торхов Н. А., Шутов Д. Г., Колковский Ю. В., Манько А. С. 361

Анализ линий передачи и переходных отверстий на печатных платах и интегральных схемах на основе современного математического аппарата
Кухарук В. С., Ухин В. А. 363

Применение маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ как программное обеспечение
Верник П. А., Аряшев С. С. 365

Подходы к интеграции отечественных инструментов проектирования цифровых СБИС на основе Единой проектной среды
Переверзев А. Л., Коршунов А. В., Седов А. Ю., Фаворов М. Ю. 367

Метод синтеза топологии СВЧ монолитных интегральных усилительных каскадов
Сальников А. С., Билевич Д. В., Степанов В. И., Добуш И. М., Метель А. А., Горяинов А. Е., Калентьев А. А. 369

Моделирование аналогового тракта радиотехнических систем в Engee-РТС
Балакин Д. А. 371

Топологический редактор для аналогового маршрута: пути развития
Ерохин Р. В., Шеблаев М. В., Яхонтов А. Н. 372

Инженерный анализ электроники от T1: технологии опережения
Харитонович А. И. 374

Нормирование полосы предельной погрешности АЦП в проективной модели измерения
Цыбульский О. А. 376

Моделирование объемных эффектов при проектировании элементов фоточувствительных микросхем
Ельников Д. С., Кононов А. А., Маклаков А. М., Пугачёв А. А., Соколов С. В. 379

Основные положения физико-математической модели элемента памяти с плавающим затвором в режимах записи-стирания
Шелепин Н. А. 381

Повышение тестопригодности аналоговых и аналого-цифровых микросхем
Куликов Д. В., Савельев Д. И., Дедов С. М. 384

ПАК «Вентилятор» для ускорения моделирования RTL-систем на кристалле с Linux
Лукьянченко Г. А., Монахов А. М., Уманский М. В., Елизаров С. Г. 386

Разработка интегрированного метода трансформации топологии в процессе генерации фиктивных областей для достижения повышенных требований к планаризации отечественных КМОП КНИ-технологий
Милютин С. В., Надин А. С., Шипицин Д. С. 387

Результаты выполнения работ 2024–2025 гг. по проекту РНФ «Разработка и внедрение модифицированных SPICE-моделей и программно-аппаратных средств для экстракции их параметров для компонентов ИС и полупроводниковых приборов гражданского и специального назначений»
Петросянц К. О., Куратов С. Е. 390

Эффективность применения временных моделей в цифроаналоговых маршрутах проектирования
Савин С. В., Чекмазов П. Ю., Шипицин Д. С. 392

Цифровые двойники и программно-аппаратные комплексы для конструкторско-технологической поддержки производства полупроводниковых компонентов от исходных материалов до готовых приборов (на примерах отечественной ЭКБ)
Петросянц К. О. 395

Практический опыт применения и особенности отечественной платформы портирования топологий IP
Калашников В. С., Керре А. Л., Михайлова Е. А., Розенфельд В. П., Семенов М. Ю., Сотников М. А. 396

Нейросетевые модели для оценки длины цепей на этапе размещения в СФ-блоках СБИС
Желудков Н. В. 399

Применение интервальных подходов к моделированию элементов энергонезависимой памяти ReRAM, FeRAM и MRAM
Морозов А. Ю., Абгарян К. К., Журавлев А. А., Ревизников Д. Л. 401

Реализация расширенных инструментов верификации дизайнов СнК в САПР микроэлектроники: анализ покрытия кода (Code Coverage), цифроаналоговое моделирование (Verilog-AMS), моделирование с учетом временных задержек (SDF)
Малышев Н. М. 403

Одна модель СВЧ-транзистора в разных САПР: миф или реальность?
Попов А. А., Добуш И. М. 405

Особенности отечественной платформы характеризации библиотек, применение и сравнение с зарубежными аналогами
Сорокин Т. М., Макаров Г. Н., Глущенко Д. В., Бабинцев А. В., Калашников В. С., Семенов М. Ю. 407

Опыт разработки программного обеспечения экстракции паразитных компонентов интегральных микросхем
Сазонов В. В., Хапаев М. М., Шишаев А. И. 409

SPICE-моделирование фотодиода
Осыкин А. А., Потупчик А. Г. 410

Перспективный подход в области разработки CAE-систем — универсальный открытый API САПР
Лучин Д. В., Минаев А. А., Трофимов А. П., Филиппов Д. В. 412

Интеграция маршрутов проектирования аналоговых и СВЧ-микросхем. Планы развития САПР
Иванова Е. Н. 414

Отладка Tcl-скриптов: «современные» подходы и решения для сред разработки FPGA и ASIC
Коробков М. А. 415

Опыт разработки элементов CAE-системы электродинамического моделирования с использованием инструментария C3D Toolkit
Лучин Д. В., Минаев А. А., Трофимов А. П., Филиппов Д. В. 416

Применение метода дифференцируемых алгоритмов размещения и трассировки к задаче автоматического создания топологии аналоговых интегральных схем
Щепетов Д. С., Тимошенко А. Г., Цепилова А., Горинов А. А. 418

Контролируемый маршрут проектирования для разработки доверенных СБИС в составе объектов критической информационной инфраструктуры
Аряшев С. И. 420

Создание IBIS-моделей
Бабинцев А. В., Никончук С. В., Гриценко О. В. 422

Комплексная параметризация топологии иерархических микроэлектронных объектов
Буренева О. И., Миронов С. Э., Ширяев И. А., Шичкина Ю. А. 424

SPICE-моделирование мощных МОП-транзисторов
Петросянц К. О., Харитонов И. А., Исмаил-заде М. Р., Самбурский Л. М., Кожухов М. В., Хлынов П. А., Лаптев Д. С., Бутин А. В., Бутин И. В. 427

Создание отечественного инструмента для приборно-технологического моделирования интегральных схем
Красюков А. Ю. 430

Программные средства для моделирования и проектирования элементов дифракционной и интегральной оптики и оптоэлектроники
Игошин В. Д., Чугунов С. С., Макаренко А. О., Спиридонов С. И., Сахно Д. И., Кохановский А. Ю., Щербаков А. А. 432

СВЧ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И МОДУЛИ 434

Разработка многоканального приемо-передающего модуля со встроенным многоканальным IQ-модемом
Цыпленков Ю. С., Баранов В. В., Овчинников В. Г. 434

Локализация передающего тракта базовых станций сетей связи стандартов LTE/5G
Долгов С. П., Евстигнеев А. А., Романовский С. М., Савченко Е. М., Першин А. Д., Евлампьев А. Ю., Дудин А. Л., Шуков И. В. 438

GaN-усилитель мощности Ku-диапазона для использования в составе линии связи
Редька Ал. В., Радченко А. В., Матвеев А. Д. 439

Оценка коэффициента усиления СВЧ-тракта приемного канала с помощью положительной обратной связи
Карасев М. С., Алексеев О. С., Щёголев С. А., Кинденов Д. С. 440

Мероприятия по совершенствованию технологических процессов, трудоемкости и материалоемкости серийно выпускаемых СВЧ-модулей
Кузьмина Ю. В., Щербаков С. В. 441

Проблемы и особенности проектирования систем вторичного электропитания для приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток РЛС
Вялов А. А., Дмитриков В. Ф., Исаев В. М., Шушпанов Д. В. 443

Схемотехнические способы купирования условий электрических деградаций в GaN HEMT
Миннебаев В. М. 445

Передача информации в бортовые системы с ограниченным потреблением
Богомолов Е. С., Медеев Д. А. 447

Компонентная база терагерцевой электроники
Галдецкий А. В., Кичаева Н. А., Щербаков С. В. 448

Некоторые решения для измерения и настройки параметров ЭКБ в интервале температур
Глазунов Р. В. 450

Измерения транзистора методом LOAD-PULL с применением активной инжекции
Суконкин С. А., Куртеев Е. Е., Кириллов А. В., Синогин М. В. 451

Отечественная платформа широкополосного измерительного оборудования
Галдин И. В., Елизаров С. Г. 452

Анализ параметров переходных процессов для устройств с пристройкой частоты в полосе свыше 25 ГГц
Румянцев К. В. 455

Алгоритм измерений S-параметров калибровочных пластин с использованием специального эталона единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи микроэлектронных устройств на пластине
Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Михайлов П. Д., Пивак А. В., Раков А. В., Семёнов В. А., Смотрова Д. А. 458

Сравнение способов реализации нелинейной модели СВЧ-транзистора в САПР
Попов А. А., Добуш И. М., Дудинов К. В., Зыков Д. Д. 460

Опыт разработки технологического процесса изготовления GaAs СВЧ монолитно-интегральных схем на основе малошумящего транзистора с длиной Т-образного затвора 150 нм
Ерофеев Е. В. 462

Реализация интегрированного механизма учета изменчивости технологического процесса в комплексном инструменте проектирования PDK SVR pHEMT05D
Медведев Р. С., Пушница И. С., Филаретов А. Г. 463

Результаты исследования СВЧ нитрид-галлиевых транзисторов по технологическому процессу D025GH
Дудинов К. В., Красник В. А., Рогачёв И. А., Добров А. В., Куликов П. В., Орехова О. А., Котосонова А. В., Берников Б. О. 464

Технологический процесс GaN на кремнии с топологической нормой 0,25 мкм в НИЦ «Курчатовский институт»
Занавескин Максим Леонидович 470

ИИ в проектировании СВЧ МИС: глобальные тренды и вызовы 2025 года
Горяинов А. Е., Добуш И. М., Калентьев А. А., Сальников А. С., Файль Т. Н., Юлаев А. А., Метель Ю. А., Набережнев Н. А., Швоев В. С., Кабанова Е. В., Лубов Г. П., Метель А. А. 471

Практическое внедрение ИИ для автоматизации проектирования СВЧ-трактов от документации до расчета
Будяков А. С. 474

Исследование частотно-временных параметров запросного сигнала твердотельного РСА на A^3B^5 компонентной базе при проведении натурных испытаний
Воронков О. В., Каевицер Е. В.,. Лемперт П. И., Лычагин А. Ю. 476

Разработка комплекта усилителей на основе GaN для front-end приемо-передающих модулей X-диапазона частот
Чибирев Р. А., Баранов Г. В., Дорофеев А. А., Мясников С. Ю., Россов А. С., Панасенко П. В. 477

Разработка диаграммообразующих кремниевых СВЧ ИС для применения в ППМ АФАР X-диапазона частот
Баранов Г. В., Гусев С. С., Котляров Е. Ю., Маркасов Е. Д., Панасенко П. В. 479

СВЧ МИС IQ-демодулятора
Перепелица Д. Г. 481

Статический СВЧ-делитель частоты миллиметрового диапазона длин волн
Баландин Д. А., Брынцев И. В., Евлампьев А. Ю. 482

Практический опыт перевода микросхемы UHF-метки на отечественное производство
Беневоленский Д. В., Кириллова Е. В. 484

Результаты разработки широкополосного усилителя СВЧ-диапазона с внешним смещением и повышенной энергоэффективностью
Терехин В. В. 486

Разработка и экспериментальное исследование SPDT-переключателя диапазона DC 6 ГГц на основе КНИ-технологии
Борисов Д. В., Коколов А. А., Шеерман Ф. И. 488

Исследование характеристик СВЧ монолитной интегральной схемы приемника на основе модели топологии
Кабаев Н., Перепелица Д. Г. 490

Разработка технологии электрохимического осаждения защитного покрытия серебро — сурьма в окнах фоторезистивной маски на слой меди при изготовлении СВЧ-плат
Трофимова М. А. 491

Разработка алгоритма фильтрации данных по концентрации компонентов электролита в гальванической ванне
Земова Ю. С., Почтарь А. А., Чолах С. О. 493

МИКРОСИСТЕМЫ. СЕНСОРЫ И АКТЮАТОРЫ 495

Перспективы развития малогабаритных многофункциональных МЭМС
Тимошенков С. П., Гончаров А. А., Тимошенков А. С. 495

Применение полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения для создания приборов нового поколения
Яшин В. С., Федоренко В. В. 497

Высокоточные чувствительные элементы на основе кварцевых камертонов
Анцев И. Г., Богословский С. В., Сапожников Г. А. 499

Разработка микроэлектромеханических логических вентилей
Соловьев А. А., Певцов Е. Ф., Колчужин В. А. 501

Конструктивно-технологическое решение для создания многослойного керамического модуля с безопасной передачей данных на основе интегрированных трансформаторов и оптических линий связи
Косевской В. А. 503

Микромеханический СВЧ-переключатель с контактом металл — металл
Уваров И. В., Белозеров И. А., Морозов М. О. 505

Разработка МЭМС-сенсоров физических величин на основе тонкопленочных термопар
Чиненков М. Ю., Дюжев Н. А., Орешкин Г. И., Парамонов В. В. 507

Механика ультратонких элементов МЭМС
Дюжев Н. А. 508

Резонатор на основе одиночного наностержня ZnO
Криштоп В. Г., Евстафьева М. В., Дудкин П. В., Фахртдинов Р. Р., Князев М. А., Якимов Е. Е., Мусабиров И. И., Орлов А. П., Коледов В. В., фон Гратовски С. В., Корепанов В. И. 510

Сборка печатных плат: от огромных до миниатюрных. Проблемы и их решения
Савченко В. В. 513

Разработка двойной фотолитографии для формирования многоуровневых отверстий в MEMS-структурах
Платонов Д. Д., Юркин Н. О., Пигулевская Т. С., Иванова О. К. 514

Исследование тонких пленок нитрида кремния с низкими внутренними напряжениями для изготовления МОЭМС-устройств
Иванова О. К., Соловьев А. А., Платонов Д. Д., 515

Синтез нелинейных моделей пониженного порядка в задачах проектирования Н/МЭМС
Лукин А. В., Попов И. А., Пискун Н. В., Удалов П. П., Антуфьев Д. В., Астапов Я. К., Селин В. А. 517

Микронасос на основе электрохимического мембранного актюатора
Шлепаков П. С., Световой В. Б., Уваров И. В. 519

Селективное травление SiO_2 к Si_3N_4 в гидрофторуглеродной плазме CHF_3 + Ar с добавлением O_2 для МОЭМС-применения
Дятлов В. Д., Иванова О. К., Соловьев А. А., Ткаченко А. В., Юркин Н. О., Платонов Д. Д. 521

Мелкосерийная широкономенклатурная технология изготовления керамических сенсоров и актюаторов
Самотаев Н. Н., Облов К. Ю., Литвинов А. В., Этрекова М. О., Образцов И. С., Цыганок Н. Д. 523

Исследование и разработка матричного МЭМС-преобразователя для устройств машинного обоняния
Николаева А. В., Поломошнов С. А., Ameличев В. В., Кривецкий В. В. 525

Матричные микромеханические зеркала: результаты исследований и перспективы применения в системах адаптивной оптики
Козлов Д. В., Смирнов И. П., Мокшанов В. Н., Куфтерин В. А., Боголюбов И. А. 528

Разработка технологии создания многоуровневых микроэлектромеханических систем
Баклыков Д. А., Стукалова В. Е., Курочкина Ю. А., Пильник И. С., Юдин А. И., Родионов И. А. 530

Алмазные акустоэлектронные устройства с операционными частотами СВЧ- и КВЧ-диапазонов для систем мобильной связи, радиолокации и сенсоров
Сорокин Б. П., Асафьев Н. О., Яшин Д. В., Аксененков В. В., Кравчук К. С., Голованов А. В., Лупарев Н. В. 532

Электрофизические характеристики структур металл — диэлектрик — полупроводник и их влияние на чувствительность и быстродействие газовых МДП-сенсоров
Самотаев Н. Н., Облов К. Ю., Литвинов А. В. Подлепецкий Б. И., Этрекова М. О., Володин П. О. 534

Двухканальный акустический датчик фазовых переходов жидкость — пар и жидкость — лед
Воронова Н. В., Горнев Е. С., Тельминов О. А., Анисимкин В. И. 536

Технология тонкопленочной инкапсуляции элементов МЭМС
Коломийцев А. С., Ильин О. И., Житяева Ю. Ю., Петрова С. В., Денисенко М. А., Гусев Е. Ю., Чебанов М. А. 539

Исследование особенностей взаимного расположения в пространстве пары магниторезистивных преобразователей тока
Литвиненко Э. О., Чеплаков А. А. 541

Ресемплинговый метод прогнозирования выхода годных изделий в технологии МЭМС
Жукова С. А., Грабов А. Б., Суздальцев С. Ю. 542

Цифровой микросистемный АМР-магнитометр ММ-3 для систем ориентации и навигации
Баранов А. А., Грабов А. Б., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Ульянов С. А. 544

Изготовление встречно-штыревого актюатора с боковым движением методом плазмохимического травления до стоп-слоя Ti/Al
Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Суздальцев С. Ю., Чуканова Т. С., Ульянов С. А. 546

Электрохимическое конструирование гибких сенсоров на основе диоксида марганца для бесферментного определения глюкозы
Филимоненков И. С., Мохова А. И., Урванов С. А., Куржумбаев Д. Ж. 549

Технологические проблемы изготовления массива термочувствительных элементов по МЭМС-технологии с критическим минимальным размером менее 300 нм
Мелехин М. А., Платонов Д. Д., Ткаченко А. В., Юркин Н. О. 551

Исследование технологии травления жертвенных слоев в МЭМС-структурах микроболометрических матричных детекторов
Бетрозов С. Б., Сильницкая О. А., Шилейко Н. А., Соколов К. В. 552

Особенности МЭМС-технологии формирования субволновых метаповерхностей для ультракомпактной оптики инфракрасного диапазона
Жукова С. А., Шашкин И. В. 554

Автоматизированный подход к выявлению и устранению микродефектов кремниевых пластин при производстве МЭМС
Мелехина П. И., Герасимов Д. Л., Иванова О. К. 556

Разработка технологического процесса сращивания пластин из боросиликатного стекла
Бикаев Р. И., Антонов Е. О., Фролова А. О. 558

Оптимизация процессов проекционной фотолитографии при внеосевом режиме засветки освещения в UV-фотолитографии для изготовления МОЭМС-устройств
Пигулевская Т. С., Платонов Д. Д., Юркин Н. О. 559

Автономный модуль регистрации гидроакустической обстановки на основе электрохимического гидрофона
Зайцев Д. Л., Гордеев Я. А., Дудкин П. В., Криштоп В. Г., Горина Е. В., Горемыкин И. А., Янченко С. Г., Горчаков И. В., Рожников Д. Ю. 560

Исследование синтеза стабилизированного терморезистивного слоя для применения в МОЭМС-устройствах
Данила А. В., Иванова О. К., Юркин Н. О., Платонов Д. Д. 562

СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ 564

Тенденции развития оборудования для промышленного выращивания монокристаллов карбида кремния методом сублимации
Бородин А. В., Бородин В. А., Юдин М. В., Смирнов К. Н. 564

Анализ конструктивных решений оптико-механического оборудования ОАО «Планар» для работы с SIC-пластинами
Плебанович В. И., Аваков С. М. 566

Отечественная система автоматизации технологического процесса установки эпитаксии карбида кремния на подложках диаметром до 150 мм методом химического газофазного осаждения (CVD)
Барков В. Н. 569

Очистители газов в точке использования как фактор повышения выхода годных в микроэлектронике
Сажнев С. В., Попенко В. Ф. 570

Реализация разработки производственно-ориентированного отечественного эпитаксиального и планарного оборудования для материалов A^3B^5
Алексеев А. Н., Гердт А. Д., Новиков С. А., Петров С. И., Литвинов М. А. 572

Особенности конструкции полировальной головы, используемой в оборудовании для химико-механической планаризации слоев диэлектрика и металла
Плотников Д. С., Гурьянов Т. В., проф. Бокова Е. С. 574

Развитие линейки отечественных регуляторов расхода реагентов для повышения стабильности работы технологического оборудования
Бирюков М. Г., Щуренкова С. А., Пугачёв Д. Ю., Сажнев С. В., Князев В. И. 576

Горизонтальные МОС-гидридные реакторы. Развитие концепции и кооперации
Лундин В. В., Заварин Е. Е., Николаев А. Е., Сахаров А. В., Цацульников А. Ф., Смирновский А. А., Базаревский Д. С., Бирюков М. Г., Пугачев Д. Ю., Алексеев А. Н., Петров С. И., Слипченко С. О., Пихтин Н. А. 578

Разработка установки электронно-лучевой литографии
Шаталин А. А. 580

Анализ современных кластерных установок азиатского рынка для проведения технологических операций с тонкими пленками на полупроводниковых пластинах
Соболев А. М. 582

Разработка отечественного оборудования ионной имплантации для полупроводникового производства: текущий статус
Авдиенко А. А., Аверьянов Е. В., Азаров А. А., Бирюков М. Г., Кузьмич К. В., Мамедов Н. В., Третьяков Е. В., Шпаков А. Н. 585

Статус разработки ионных ускорителей для среднетокового и высокоэнергетического имплантеров
Старостенко А. А., Авдиенко А. А., Вахрушев Р. В., Девятайкина Т. А., Докутович В. А., Драничников А. Н., Константинов С. Г., Краснов А. А., Кремнев Н. С., Лопаткин И. А., Орешонок В. В., Павлюченко В. А., Рыбицкая Т. В., Рябченко К. К., Семенов Е. П., Сеньков Д. В., Скляров В. Ф., Сорокин А. В., Стешов А. Г., Субаев Е. А., Тягнирядно Л. О., Усов П. В., Цыганов А. С., Чуркин И. Н., Шиянков С. В. 587

Испытания технологических модулей кластерных комплексов плазмохимического травления и осаждения для пластин диаметром 300/200 мм
Ерицян Г. С., Щуренкова С. А. 588

Разработка технологического модуля установки высокотемпературной активации примеси для обработки пластин при температуре до 2000 °С ООО «САВТЭК»
Зюбер Д. И. 590

Расширение библиотеки базовых технологических процессов, реализуемых на отечественном технологическом оборудовании для производства ЭКБ
Новиков С. А., Петров С. И., Алексеев А. Н., Гердт А. Д., Литвинов М. А. 592

Магнетронные распылительные системы со сканирующими магнитными полями: современное состояние и перспективы внедрения в отечественное оборудование
Черкунов В. И., Трактирщиков В. С., Ширяев М. Е., Конохов К. А. 594

О синергии разработки мощных IGBT-транзисторов, диодов и тестеров FORMULA® TXI для метрологического обеспечения функциональных испытаний новейших полупроводниковых приборов
Постников А. С. 596

Разработка установки измерения рассовмещения технологических слоев на кремниевых пластинах диаметром 200 мм
Андрианов С. Л., Василевкин Е. В., Горовой К. В., Дон А. К., Михайлова И. В., Сухорослова Ю. В. 597

Состояние и перспективы разработки оборудования для зондового контроля кристаллов на пластине
Малышев Р. А., Семенищев Е. А. 599

Актуальные вопросы вакуумных измерений в электронном машиностроении
Тетерук Р. А., Чернышенко А. А. 601

Дорожная карта развития модульного ATE FORMULA® RXI на основе российского стандарта тестеростроения RXI
Бахвалов П. А. 603

Проектирование специальных инженерных сетей для специального технологического оборудования, применяемого для кристального производства
Ткешелашвили Г. Д. 604

Инспекция проводников распайки кристалла на подложке
Вертопрахов В. В. 605

Разработка растрового электронного микроскопа для анализа дефектов
Гордиенко А. М., Заноско А. И. 607

Применение машинного зрения в лазерных системах для задач микроэлектронной промышленности
Афонюшкин А. А. 610

Исследование процесса выращивания монокристаллов бета-оксида галлия β-Ga_2O_3 из расплава для приборов силовой электроники
Бородин А. В., Бородин В. А., Юдин М. В., Мошаров Т. А., Ушницкий Я. И. 611

Развитие технологического оборудования для DUV- и EUV-фотолитографии в ходе производственных процессов микроэлектронной промышленности
Закшевский Р. В. 613

Практический опыт производства технологического оборудования для предприятий микроэлектроники
Фролов Г. Ю. 615

Технологические решения для прецизионного монтажа кристаллов в условиях ограниченного доступа к западному оборудованию
Богословский В. А. 616

Современные подходы к одностороннему утонению кремниевых пластин с сохранением прецизионных структур
Якухина А. В. 618

Исследование подложек $ScAlMgO_4$ для эпитаксиального роста GaN и ZnO
Загоскин М. О. 620

Оптимизация теплового поля в установке выращивания монокристаллов карбида кремния большого диаметра
Белых А. И. 623

Разработка отечественного оборудования и технологии выращивания монокристаллов SiC диаметром 150 мм
Бородин А. В., Бородин В. А., Юдин М. В., Смирнов К. Н., Мошаров Т. А., Оганесян В. А. 625

Установка «УМКА» для автоматического монтажа полупроводниковых кристаллов
Лисов В. С., Малышев Р. А., Семенищев Е. А. 628

Оборудование для лазерной обработки в микроэлектронике
Васильев О. С. 630

Исследования однородности температуры подложки в установке вакуумно-плазменного травления
Горностаев П. А. 631

Разработка электронно-оптической системы для установки электронно-лучевой литографии
Кубраков Р. В. 633

Совмещение оптического и электронного изображения в РЭМ и электронных литографах
Казьмирук В. В., Курганов И. Г. 634

Лазерные системы с ультракороткими импульсами и перспективы технологий в микрообработке
Жданова Е. Ю., Васильев О. С., Горный С. Г. 636

Модернизация систем управления термодиффузионных каналов DFS-250
Корнеева М. А., Трактирщиков В. С., Цуканов В. В. 638

Столы для удержания полупроводниковых пластин
Корячко В. В., Челапкин Д. Г. 640

Об унификации требований к АТЕ на основе отечественного проприетарного стандарта тестеростроения FormRXI
Турлаев Е. В. 642

НЕЙРОМОРФНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ 643

Перспективы использования нейроморфных вычислений для обработки слабоструктурированной информации
Мещеряков Р. В. 643

Микроэлектронные нейроинтерфейсы: от моделирования к нейрозамещению
Казанцев В. Б. 645

Мемристорные микросхемы для технологий искусственного и гибридного интеллекта
Михайлов А. Н. 647

Разработка программного обеспечения для многомасштабного моделирования работы элементов энергонезависимой памяти на основе технологий ReRAM, FeRAM, MRAM
Абгарян К. К. 649

Мемристивная ЭКБ для аналоговых вычислений в памяти: оптимизация рабочих параметров устройств на этапе КМОП-интеграции и прототипирования ИС
Андреева Н. В., Мазинг Д. С., Рындин Е. А., Петров М. О. 651

КМОП-ReRAM-логика для вычислений в памяти
Рындин Е. А., Мазинг Д. С., Дудкин А. П., Хамитов К. А., Андреева Н. В. 653

Предиктивная аналитика отказов на основе технологий искусственного интеллекта в беспилотных авиационных системах
Кагадей В. А., Петров Е. К., Шашев Д. В., Колоев М. И., Полынцев Е. С., Зиятдинов Р. М., Вязовская А. С., Лембей А. С., Аксенов А. А., Подзорова И. В., Падей С. А., Кодорова И. Ю., Мищенко Л. С., Бондарчук А. С., Винокуров К. А. 656

Оптические нейронные сети
Сайгин М. Ю., Страупе С. С. 658

Возможности разработки и отечественного производства элементов нейроморфных систем центром нанофабрикации компании «Росатом Квантовые технологии»
Салынский Н. А., Лачинов А. А. 659

Мемристорные и селекторные свойства структур конденсаторного типа нанокомпозит — диэлектрик при добавлении туннельно-прозрачных диэлектрических прослоек
Ситников А. В., Шакуров А. Р., Бабкина И. В., Никонов А. Е., Рыльков В. В. 661

Гибридные квантово-классические нейросети для классификации медицинских изображений
Рафиков А. С., Лаптева Т. В., Бастракова М. В., Иванченко М. В. 663

Транзисторы с электролитическим затвором для нейроморфных вычислений: роль аномальной диффузии ионов
Сибатов Р. Т., Савицкий А. И., Кицюк Е. П., Рязанов Р. М., Шаман Ю. П., Сыса А. В., Переверзева С. Ю., Лебедев Е. А., Шаманаев А. А., Светухин В. В. 665

Теоретический и экспериментальный анализ управления роботом-собакой
Горобцов А. С., Данилевич В. М., Зубко М. В., Титов Л. В., Судовиков Е. И., Климов К. В., Капытов Д. В., Данилов В. А., Рогачев А. А. 667

Фотомемристорные сенсорные структуры для энергоэффективной и быстрой обработки визуальной информации
Панин Г. Н. 669

Аппаратно-программные комплексы для демонстрации функций памяти и нейроморфных вычислений на базе КМОП-интегрированных кроссбар-массивов мемристивных устройств
Щаников С. А. 672

Разработка и исследование устройств нанопьезотроники для нейроморфных систем
Ильина М. В., Соболева О. И., Рудык Н. Н., Ильин О. И. 674

Прозрачные мемристивные структуры для нейроморфных систем машинного зрения
Саенко А. В., Козюменко К. А., Шиховцов И. А., Смирнов В. А. 676

Синаптическая пластичность мемристивных структур на основе нанокристаллических пленок ZnO для нейроморфных систем ИИ
Томинов Р. В., Вакулов З. Е., Варганов В. И., Попова А. И., Смирнов В. А. 678

Особенности получения и исследование пленок $BaTiO_3$ для нейроморфных применений
Вакулов З. Е., Томинов Р. В., Родригес Д. С. Х., Смирнов В. А. 680

Фоточувствительные мемристоры парилен-PbTe для приложений в нейроморфной сенсорике
Емельянов А. В., Трофимов А. Д., Мацукатова А. Н., Несмелов А. А., Демин В. А. 682

Симуляция процесса фотолитографии в конвейере ОРС обработки топологического слоя для фотошаблона
Фёдоров И. Ю., Тагиев Э. Р., Метельников А. А. 684

Кодирующее и декодирующее устройства на основе мемристорно-диодного кроссбара и КМОП-логики для импульсных нейросетей
Бусыгин А. Н., Удовиченко С. Ю., Ибрагим А. Х. А. 686

Проектирование сверхбольших интегральных схем с использованием больших языковых моделей
Колонин А. Г. 689

Моделирование аппаратного дофаминоподобного обучения импульсной нейросети с мемристорными синаптическими весами
Аляев И. В., Суражевский И. А., Ильясов А. И., Рыльков В. В., Демин В. А. 691

Модель для классификации ноцицептивных состояний на основе спинальных и кортикальных вызванных потенциалов при лазерной и холодовой стимуляциях
Рябкин Д. И., Путовит Г. М., Герасименко А. Ю. 693

Численное моделирование отказоустойчивости мемристорного кроссбар-массива при деградации его электрических параметров
Неустроев А. А., Бусыгин А. Н., Удовиченко С. Ю. 695

Квазифрактальные пленки серебра вблизи порога перколяции для нейроморфных вычислений
Ксенофонтова П. О., Сибатов Р. Т., Рязанов Р. М., Савицкий А. И. 698

Механизм универсальной компиляции вычислительного графа нейросетевых моделей для специализированных отечественных аппаратных платформ искусственного интеллекта
Баулин Ф. А., Бабинцев Л. В., Рожин А. К., Щукин А. А., Губазов Д. Д., Нефедов С. И. 700

Новые мемристорные структуры конденсаторного типа диэлектрик — нанокомпозит
Шакуров А. Р., Ситников А. В., Бабкина И. В., Никонов А. Е. 702

Искусственный интеллект для совместного проектирования программно-аппаратных нейроускорителей
Дорофеев В. П. 704

Варианты нейроподобной реализации многоагентного управления роботом
Тельминов О. А. 706

Нестандартные коннектомы К-систем и нейросетей и химерные состояния на них
Матюшкин И. В., Тельминов О. А., Локтионов А. Д. 707

Селенсодержащие фазопеременные материалы с низкими оптическими потерями для приложений ИК-фотоники
Киселев А. В., Бурцев А. А., Михалевский В. А., Ионин В. В., Невзоров А. А., Гребенев В. В., Лотин А. А. 709

Специализированная аппаратная архитектура расчета нелинейных функций для отечественной вычислительной платформы под задачи искусственного интеллекта
Баулин Ф. А., Бабинцев Л. В., Рожин А. К., Губазов Д. Д., Нефедов С. И. 711

КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 713

Особенности систем квантового распределения ключей с учетом актуальных подходов к защите информации
Науменко А. П. 713

Архитектура магистральных сетей квантовых коммуникаций
Соколов В. В., Смирнов К. В., Самбурская К. С., Демидова А. Л. 716

Перспективы использования квантовых коммуникаций в центрах обработки данных
Ханенков С. В. 717

Квантовозащищенные каналы связи: от теории к практике
Малявкин А. С., 718

Перспективы коммерциализации квантовых коммуникаций и оценка экономических эффектов
Лобов Д. С. 719

Квантовые компьютеры: вызовы и решения для корпоративной кибербезопасности
Кузьмин Д. С. 721

Применение квантовой криптографии для повышения киберустойчивости компаний
Хараск М. А. 722

Практическое применение многопользовательских квантовых сетей с промежуточными доверенными узлами для задач защиты информации
Сантьев А. А., Яшин Д. А., Рогов Р. И., Алексеев А. Л. 723

Космические квантовые коммуникации
Белинский А. А., Кулик С. П., Оседло В. И., Калинкин А. А., Шатский Н. И. 725

Орбитальные испытания лазерной системы связи на МКА «Импульс-1»: результаты и перспективы
Мерзлинкин В. Е., Бахшалиев Р. М., Левашов С. Д. 726

Протокол квантового распределения ключа с использованием векторных оптических вихрей с аксиально-симметричной поляризацией
Вашукевич Е. А., Решетников Д. Д., Малютина Е. В., Король Т. К., Голубева Т. Ю. 728

Фотонный квантовый интерфейс для гибридных квантовых коммуникаций
Моисеев С. А., Гилязов Л. Р., Мельник К. С., Моисеев Е. С., Перминов К. С. 729

Оптимизация архитектуры системы распределения квантово-защищенных ключей для мобильных потребителей
Герасимова А. Г., Емельянов В. М., Росликов А. Н., Третникова Е. Н. 731

Создание многокубитных квантовых вычислителей на ионной платформе для выполнения практико-ориентированных алгоритмов
Колачевский Н. Н. 733

Применение ядерных методов для задач квантового машинного обучения
Киктенко Е. О., Марданова А., Семёнов С., Лопес-Сальдивар Х. А. 734

Модель связанных квантовых мемристоров, закодированных в электронных состояниях одиночного иона Yb+
Стремоухов С. Ю., Форш П. А., Хабарова К. Ю., Колачевский Н. Н.* 736

Методы оптимального управления квантовыми системами
Печень А. Н. 738

Результаты экспериментальных исследований аппаратуры синхронизации для дальнепролетной системы квантового распределения ключа
Нефедов С. И., Ожегов Р. В., Елезов М. С., Коновальцев А. В. 740

Влияние развития квантовых вычислений на эволюцию криптографических алгоритмов для устройств с ограниченными ресурсами
Кот М. А., Панасенко С. П., Турченко О. Ю. 742

Формализм производящих функций амплитуд вероятностей в оптических квантовых информационных технологиях
Богданов Ю. И., Богданова Н. А. 744

Интерференция ультракоротких оптических импульсов в интерферометре Маха – Цендера
Попов В. Г., Самарин С. С. 746

Управление флаксониум-кубитом на основе сверхпроводниковой цифровой электроники
Бастракова М. В., Пашин Д. С. 748

Столетний юбилей квантовой механики и перспективы развития квантовых информационных технологий
Богданова Н. А., Богданов Ю. И., Лукичев В. Ф. 750

Сенсоры на базе центров окраски в алмазе
Акимов А. В. 752

Моделирование ОДМР одиночных NV-центров в магнитном и электрическом полях
Калошин М. М., Вергелес С. С., Гусев А. С., Косогорова Т. А., Маргушин Р. Е., Низовцев А. П., Салказанов А. Т., Каргин Н. И. 753

Квантовые сенсоры на основе высокодобротных оптических микрорезонаторов
Биленко И. А. 755

Квантовый сенсор на основе ультрахолодных атомов: компактный гравиметр
Афанасьев А. Е., Быкова Д. В., Калмыков А. С., Идрисова А. А., Балыкин В. И. 757

Транспортируемый квантовый гравиметр на основе интерференции ультрахолодных атомов рубидия
Прудников О. Н., Капуста Д. Н., Гончаров А. Н., Тайченачев А. В., Юдин В. И. 759

Инфракрасное фотодетектирование в гетероструктурах Ван-дер-Ваальса
Шуплецов А., Мыльников Д., Бандурин Д., Свинцов Д., Гайдученко И., Чернов А. 761

Массивы сверхпроводящих RFTES-детекторов для анализа квантовых цепей и терагерцевой сенсорики
Шитов С. В., Чичков В. И., Ермаков Ан. Б., Руденко Н. Ю., Соломатов Л. С. 763

Атомный интерферометр в условиях микрогравитации
Сутырин Д. В., Слюсарев С. Н., Белотелов Г. С., Семенко А. В., Вялых А. П. 765

Разработка сверхкомпактного цифрового лазерного гироскопа
Крючков Д. С., Сошенко В. В., Колачевский Н. Н. 766

От конечного нуль-поглощающего класса логики F_0 к отказоустойчивым кутрит-каналам
Есин А. А., Калимулина Э. Ю. 767

Замкнутые классы трехзначной логики как инструмент синтеза квантовых qutrit-каналов
Есин А. А., Калимулина Э. Ю. 769

Разработка квантовой сети на запутанности с оптическими повторителями на многомодовых когерентных состояниях
Гончаров Р. К., Киселев А. Д., Егоров В. И. 771

От конечного нуль-поглощающего класса логики F_0 к отказоустойчивым кутрит-каналам
Есин А. А., Калимулина Э. Ю. 773

Программно-аппаратный комплекс для обеспечения мобильных абонентов квантово-защищенными ключами шифрования
Зайцев Д. Л., Стрижак Д. В., Задиран Н. В., Кожанов И. А., Криштоп В. Г., Поздняков А. М., Сантьев А. А., Дудкин П. В., Андреев С. Н. 775

Возможности сопряжения систем квантового распределения ключа с системами и сетями связи
Нефедов С. И., Крук Е. А. 777

Анализ вариантов топологии и архитектуры сетей КРК: повышение отказоустойчивости и эффективности
Росликов А. Н., Емельянов В. М. 779

ОДМР NV-центров в алмазе с различным содержанием ^{13}C
Салказанов А. Т., Вергелес С. С., Гусев А. С., Косогорова Т. А., Маргушин Р. Е., Низовцев А. П., Калошин М. М., Каргин Н. И. 781

Физический генератор случайных чисел на основе кольцевых генераторов на КМОП-технологии
Лебедев А. В., Лысенко Е. В. 783

ТЕХНОЛОГИИ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ. ОПТО- И ФОТОЭЛЕКТРОНИКА» 785

Перспективы создания фоточувствительных материалов для высокотемпературных матричных детекторов ИК-диапазона на основе материалов A^3B^5 содержащих сурьму
Чернопицский М. А., Клековкин А. В., Ерошенко Г. Н., Ченцов С. И., Пашкеев Д. А., Савин К. А., Кривобок В. С., Николаев С. Н., Аминев Д. Ф., Дубовая А. Р., Шевченко М. А., Минаев И. И. 785

Основные направления развития современных фотоприемников, выпускаемых АО «ЦНИИ «Электрон»
Татаурщиков С. С., Вязников А. Н. 787

Фотоприемники длинноволнового ИК-диапазона на основе QWIP-структур
Болтарь К. О., Власов П. В., Бурлаков И. Д., Старцев В. В., Лазарев П. С., Терентьев Д. С. 789

Методы реализации поляризационной чувствительности в оптико-электронных системах с микроболометрическими матричными детекторами
Соколов К. В., Хафизов Р. З., Шилейко Н. А., Москвичев В. Ю., Солодков А. А. 791

Квантово-каскадные детекторы для среднего инфракрасного диапазона
Дюделев В. В., Соколовский Г. С. 793

Электродинамически усиленное ИК-фотодетектирование структурами на основе двумерного материала с асимметричной сингулярной метаповерхностью
Сёмкин В. А., Шабанов А. В., Капралов К. Н., Кащенко М. А., Соболев А. С., Мазуренко И. М., Мыльцев В. Н., Мыльников Д. А., Никулин Е. И., Чернов А. И., Каменева Е. И., Бочаров А. Ю., Свинцов Д. А. 795

Проблемы при серийном изготовлении матричных фотоприемных устройств на основе InSb и пути их решения
Мирофянченко А. Е., Мирофянченко Е. В., Якушев Т. Ю., Новиков И. В., Атрашков А. С. 798

Зависимость дефектности, выявляемой при селективном травлении пластин антимонида индия, от кристаллографической ориентации поверхности пластин и направления выращивания исходных слитков
Фазилова И. Э., Фазилов Д. Э., Андрейчиков К. С., Астахов В. П., Карпов В. В., Козлов Р. Ю. 800

Получение фоточувствительных барьерно-диодных структур и их исследования с помощью микроскопии сопротивления растекания тока
Минаев И. И., Клековкин А. В., Ерошенко Г. Н., Свиридов Д. Е., Савин К. А., Кривобок В. С., Николаев С. Н. 802

Разработка конструкции ЧЭ МЭМС ИК-сенсора на основе термопар с высокой чувствительностью и поглощающей способностью
Ткаченко А. В., Платонов Д. Д., Юркин Н. О. 804

Оптико-электронный модуль средневолнового ИК-диапазона спектра на основе отечественного матричного фотоприемного устройства InSb формата 640×512
Старцев В. В., Бурлаков И. Д., Полесский А. В., Хамидуллин К. А., Ляпустин М. Ю., Драгунов Д. Э., Лазарев П. С., Юдовская А. Д. 806

Фотоприемные матрицы инфракрасного диапазона на основе наноразмерных материалов
Попов В. С., Пономаренко В. П. 808

Матричный фотосенсор 640×512 на основе коллоидных квантовых точек из сульфида свинца для области спектра 0,4–2,0 мкм
Пономаренко В. П., Попов В. С., Панков М. А., Хамидуллин К. А., Деомидов А. Д., Федоров А. А., Деев Г. Ю., Драгунов Д. Э., Епифанов О. В., Зарипов Ш. И., Лазарев П. С., Мирофянченко Е. В., Ильинов Д. В., Петрушина В. А., Кузнецов П. А., Кузнецов А. Н., Бурлаков И. Д., Полесский А. В., Старцев В. В., Бричкин С. Б., Спирин М. Г., Товстун С. А., Гапанович М. В., Гак В. Ю., Гадомская А. В., Певцов Д. Н., Кацаба А. В., Кириченко А. С., Демкин Д. В., Иванова В. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. 810

PECVD-синтез пленок КРТ для ИК-детекторов
Телегин С. В., Карпова А. С., Слаповская Е. А., Мочалов Л. А. 812

Комплексные исследования объемных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs (100)
Климов Е. А., Виниченко А. Н., Васильевский И. С., Грекова А. А., Гладышева К. А., Клочков А. Н., Родина А. М., Бурлаков И. Д. 814

Оценка предельных характеристик матричных микроболометрических приемников ИК-излучения с шагом элементов 12 мкм, применяемых для создания тепловизионных приборов высокого разрешения
Бетрозов С. Б., Ерастов Д. А., Москвичев В. Ю., Попов В. К., Сильницкая О. А., Серов В. В., Соколов К. В., Солодков А. А., Худаяров З. Ф., Шилейко Н. А. 817

ИК-фотодиоды российского производства для оптоволоконных линий связи и сенсоров различного назначения
Воропаев К. О., Воропаева И. О., Васильев А. А., Соболев М. С., Пирогов Е. В., Василькова Е. И., Карачинский Л. Я., Новиков И. И. 818

Планаризация поверхности различных материалов и топологических рельефов для изготовления приборов фотоники нового поколения
Трофимов А. А., Андрусов Ю. Б., Косякова А. М., Гладышева К. А., Кондрахин А. С., Ильинов Д. С., Кузнецов Г. В., Андреева М. Ю. Мирофянченко Е. В., Попов В. С., Панков М. А. 822

Синтез высокочистых базовых материалов для опто и фотоэлектроники
Мочалов Л. А., Телегин С. В., Слаповская Е. А. 824

ИК-фоторезисторы на основе гетероструктур HgCdTe с множественными квантовыми ямами
Давлетшин Р. В., Болтарь К. О., Михайлов Н. Н., Дворецкий С. А., Трухачев А. В., Менщиков Р. В., Ремесник В. Г., Кучин Д. С. 826

Тенденции в разработках интегральных микросхем для матричных приемников
Аткин Э. В., Бочаров Ю. И., Бутузов В. А., Головин И. О., Громов И. С., Двинских П. Д., Лобанков Д. С., Малятина О. В., Норманов Д. Д., Чербов А. Д., Юровский В. О., Ямалиев С. И. 828

Исследование процесса плазменного травления альфа-кремния для МЭМС-применений
Соловьев А. А., Юркин Н. О., Платонов Д. Д. 830

Технология производства плоскопанельных дисплеев и развитие индустрии OLED-технологий в дисплейной отрасли
Нуриев А. В., Стахарный С. А. 831

Перспективные технологии создания микродисплеев
Кнышев С. Р. 833

Применение методов фотолитографии и прямой печати при создании фоточувствительных структур на основе ККТ PbS
Мирофянченко Е. В., Петрушина В. А., Тальвеже В. В., Попов М. А., Ильинов Д. В., Арсенов П. В., Иванова В. А., Мирофянченко А. Е., Федоров А. А., Деомидов А. Д., Попов В. С., Панков М. А., Пономаренко В. П. 836

Оптико-электронный канал тепловой пеленгации на основе микроболометрического ФПУ
Серов В. В., Ракитин А. В., Попов В. К., Хафизов Р. З. 838

Технологические аспекты понижения дефектности контактного анкера в массиве термочувствительных элементов, изготавливаемых по МЭМС-технологии
Юркин Н. О., Платонов Д. Д., Мелехин М. А., Соловьев А. А., Ткаченко А. В. 840

Инженерный анализ в разработке и конфигурировании стендов и систем стыковки оптических каналов ФИС
Новиков Е. С., Белокрылов М. Е. 841

Отечественные МКС для серийных перспективных матричных ФПУ
Бабенко Д. Д., Банников М. В., Болтарь К. О., Коротаев Е. Д., Некрасов Г. И., Сычева Е. Д. 843

Разработка МКС типа «Сплит-Стирлинг»
Оганесян Н. Н., Тельнов И. Р., Кононов А. Я., Родин М. С. 845

ИК-сенсоры в условиях глобальной конкуренции: анализ технологий, сравнение мировых решений и прикладное использование
Бокатый И. О. 847

Анализ характеристик различения тепловых объектов оптико-электронными системами с микроболометрическими матричными детекторами
Шилейко Н. А., Соколов К. В., Хафизов Р. З. 849

Характеристики матричных ИС считывания для перспективных приложений опто- и фотоэлектроники
Болтунов Д. В. 850

Комплексные соединения ртути (II) для синтеза коллоидных квантовых точек HgTe
Медведев А. Г., Королева Т. В., Хакимов К. Т., Сапцова О. А., Яковлев В. О., Попов В. С. 852

Синтез высокочистого поликристаллического арсенида галлия с высокой подвижностью носителей
Мочалов Л. А., Слаповская Е. А., Телегин С. В. 854

Деградация ватт-вольтных характеристик гетероструктур AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами
Орлова К. Н., Градобоев А. В. 856

ТЕХНОЛОГИИ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОТОНИКА, ВОЛОКОННЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 858

Мощные квантово-каскадные лазеры среднего инфракрасного диапазона
Соколовский Г. С. 858

Жесткая бинарная и троичная интегральная оптическая логика на основе ядер фотонного вектор-матричного умножения
Крылов А. А., Светиков В. В., Певчих К. Э. 860

Оптический волноводный каскадный спектрометр на чипе
Стебельков А. Н., Абросимов В. Ю., Резаева А. Д., Ивонин И. А., Светиков В. В., Певчих К. Э. 862

Газовые и микрофлюидные сенсоры на основе фотонных интегральных схем из нитрида кремния
Ковалюк В. В., Кузин А. Ю., Флоря И. Н., Чернышев В. С., Васильев С. Н., Ан П. П., Голиков А. Д., Рожков К. Ю., Зайцев В. Д., Горин Д. А., Гольцман Г. Н. 864

Исследование методов увеличения чувствительности микрорезонаторной интегрально-оптической структуры с модифицирующим слоем функционализированных углеродных нанотрубок для создания газовых сенсоров
Митрофанова А. Е., Ромашкин А. В., Светиков В. В. 866

Перспективные технологии производства микродисплеев, основанных на различных физических принципах
Стахарный С. А., Нуриев А. В. 868

Центр Сколтеха по прототипированию интегрально-оптических устройств: результаты и перспективы на 2025–2030 гг.
Денисов А. А. 870

Перестраиваемые фотонные интегральные схемы на нитриде кремния со сверхмалыми потерями для прототипирования оптоэлектронных устройств
Бузаверов К. А. 871

Моделирование элементов фотонных интегральных схем на основе тонкопленочного ниобата лития
Москалев Д. Н., Салгаева У. О., Лихачев Б. В. 873

Кремниевые фотоумножители для сцинтилляционных детекторов систем радиационного контроля
Виноградов С. Л., Бужан П. Ж., Каракаш А. И., Теверовский Ю. Л. 875

Кремниевые микронные фотонные интегральные схемы как основа локальных бортовых сетей летательных аппаратов
Байшев О. Д., Козлов Д. В., Смирнов И. П., Новиков В. М., Гончаров А. А. 877

Автоматизация оптической и оптоэлектронной характеризации ФИС и компонентов на их основе
Новиков Е. С., Белокрылов М. Е., Кожевников В. С., Паньков А. С., Пономарев Р. С. 879

Интегральные электрооптические модуляторы на основе нитрида кремния и прозрачных проводящих оксидов
Лотков Е. С. 881

Эндогенная биофотоника на основе оптического излучения биологических систем
Ильин В. К., Майбуров С. Н., Демихов Е. И., Дунин Н. В. 883

Ультрафиолетовые лазерные источники Российского производства «УЛЬТРА»
Акулов В. А., Телегин И. А. 885

Интегрированные на волновод сверхпроводниковые однофотонные детекторы с близкой к единице эффективностью поглощения
Степанов И. А. 887

Технологии фотонных интегральных схем для криогенных приложений
Родионов И. А. 889

Критерии оптимизации электродов бегущей волны для сверхвысокочастотной модуляции оптического излучения в фотонных интегральных схемах на подложках ниобата лития
Парфенов М. В., Варламов А. В., Тронев А. В., Агрузов П. М., Ильичев И. В., Шамрай А. В. 890

Разработка и экспериментальное исследование отечественного GaAs трансимпедансного усилителя и оптического приемника 5 Гбит/с на его основе
Коряковцев А. С., Коколов А. А., Ходжиков Д., Бабак Л. И. 892

Технология МОС-гидридной эпитаксии для современных задач фотоники и оптоэлектроники
Ладугин М. А., Мармалюк А. А., Сабитов Д. Р., Телегин К. Ю. 894

Особенности определения диэлектрических постоянных тонких пленок в терагерцевом диапазоне частот в условиях сильного изменения проводимости
Конникова М. Р., Шкуринов А. П. 895

Киральные метаматериалы для фотоники на основе наноструктурированных тонких пленок
Трушин О. С., Фаттахов И. С., Попов А. А., Мазалецкий Л. А., Федоров А. С., Логунов М. В. 897

Сопроцессоры на основе фотонных интегральных схем для матричной обработки данных
Бабурин А. С. 899

Разработки систем радиационного контроля на основе современных волоконно-оптических и фотодетекторных технологий
Бужан П. Ж., Виноградов С. Л., Каракаш А. И., Теверовский Ю. Л. 900

Отечественные вертикально излучающие лазеры спектрального диапазона 1300–1550 нм
Воропаев К. О., Воропаева И. О., Блохин С. А., Карачинский Л. Я., Новиков И. И., Егоров А. Ю. 902

Генерация ТГц-излучения в тонкопленочных спинтронных слоистых структурах на основе антиферромагнетиков, полученных методом ИЛО
Николаева И. Н., Гусев Д. С., Паршина Л. С., Синько А. С., Дмитриев А. И., Дмитриева М. С., Конникова М. Р., Новодворский О. А., акад., Шкуринов А. П. 905

Технологии фотонных интегральных схем для магистральных ВОЛС
Артемов Д. Е., Старых Д. Д., Самоделкин Л. А., Наний О. Е., Трещиков В. Н. 907

Фазовые шумы высококогерентных лазеров на основе технологий интегральной оптики, волоконной оптики и микрооптики
Артемов Д. Е., Кондаков А. А., Фомиряков Э. А., Резников А. В., Иванов Г. Ю., Никитин С. П., Наний О. Е., Трещиков В. Н. 909

Оптические межсоединения для ЦОД на базе технологии microLED
Дорофеев В. П. 911

Тонкопленочные оптические покрытия, получаемые по технологии молекулярного наслаивания
Кольцов Ю. С., Меш М. В., Волков Д. Ю., Карцева Т. Ю. 913

Метод обнаружения препятствий на пути движения наземного транспортного средства
Попова И. В., Шулекин С. Ф., Афонин А. В. 915

Адаптация нейронных сетей для вычисления на фотонных ячейках умножения с накоплением
Щепетов Д. С., Седунов С. М., Пятибратов К. Н., Хмелев Е. Д. 917

МАТЕРИАЛЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ 919

Компоненты литографических материалов и инновационные продукты для органической и гибридной электроники
Кузнецов И. Е., Заморецков Д. С., Агапитова М. М., Живчикова А. Н., Сидельцев М. Е., Новиков А. С., Теплякова М. М., Аккуратов А. В. 919

Опыт ФИЦ ПХФ и МХ РАН в разработке материалов для микроэлектроники
Алдошин С. М., Бадамшина Э. Р., Малков Г. В. 921

Разработка полимерной основы для i-line-фоторезистов
Пугачёва Т. А., Кузнецова Н. А., Мухаметшин С. В., Малков Г. В., Курбатов В. Г. 923

Разработка и исследование электронно-лучевых резистов на основе сополимеров ММА-МАК
Бороздина А. А., Малков Г. В., Князев М. А., Рощупкин Д. В., Курбатов В. Г. 925

Дозовые характеристики электронно-лучевых резистов на основе сополимеров метилметакрилата и метакриловой кислоты
Князев М. А., Бороздина А. А., Курбатов В. Г. 927

Моделирование траекторий электронов с учетом образования каскадов и дискретности взаимодействия
Свинцов А. А., Зайцев С. И. 928

Технология производства ПАВ для безметального проявителя
Тарасов А. Е., Курбатов В. Г., Пугачева Т. А., Подвальная Ю. В., Ершов А. А., Варламов Д. А., Сенченко Н. С., Бадамшина Э. Р. 930

Разработка и серийное освоение производства материалов для корпусирования микросхем в многовыводные полимерные корпуса
Пахомов К. С., Малков Г. В., Курбатов В. Г., Пугачёва Т. А., Бадамшина Э. Р., Прудскова Т. Н., Вертянов Д. В. 932

Исследование процесса плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения тонких пленок оксида тантала для применения их в качестве активных слоев элементов хранения резистивной памяти
Ганыкина Е. А., Резванов А. А., Зюзин С. С., Резник А. А. 933

Оптимизация микроструктуры и свойств глубокопрокаленного глинозема для металлокерамических корпусов интегральных схем
Егошин В. А., Жуков И. А., Ахметгалиев Р. Ш., Ермолаев Е. В., Шугаепов Ш. Н. 935

Применение синхротронного излучения для диагностики акустоэлектронных устройств
Рощупкин Д. В., Фахртдинов Р. Р., Иржак Д. В., Пундиков К. С. 937

Диагностика материалов и устройств микроэлектроники с использованием синхротронного излучения
Солдатов А. В. 939

Применение вакуумного ультрафиолетового излучения в микро- и наноэлектронике
Бокарев В. П., Красников Г. Я. 941

Динамический краевой угол как мера смачиваемости материалов
Лоскутов В. В. 943

Силовые эпитаксиальные структуры 4H-SiC диаметром до 150 мм
Артюшенко М. Н., Федотов С. Д., Стаценко В. Н., Яковлев Е. В., Смирновский А. А., Базаревский Д. С. 945

Влияние размерных факторов на свойства ультратонких металлических пленок, полученных методом магнетронного напылении для серийного производства МЭМС
Божко С. А., Темирова Т. И., Иванова О. К. 947

Изолирующие теплоотводящие основания из поликристаллического алмаза для приемо-передающих модулей СВЧ
Ларина П. М., Смирнова А. К., Щёголев С. А. 948

III-N-гетероструктуры диаметром до 150 мм для СВЧ-транзисторов
Цацульников А. Ф., Сахаров А. В., Николаев А. Е., Заварин Е. Е., Родин С. Н., Лундин В. В., Артеев Д. С. 950

Адаптация мирового опыта применения алмаза для отечественной микроэлектроники в контексте укрепления технологического суверенитета Российской Федерации
Городецкий Э. Р., Туев Д. В., Панкратов А. А., Теплова Т. Б. 952

Автоматизированный измерительный комплекс на основе улучшенной конструкции щелевого резонатора для измерения диэлектрических свойств подложек в СВЧ-диапазоне
Фасхудинова В. А., Зинченко И., Чуб А., Шеерман Ф. И. 954

Электрохимическая емкость композитных электродов на основе пористого кремния, углерода и оксида марганца (IV)
Коротицкая-Седловец Д. М., Ульянова В. В., Старков В. В. 957

Композитные материалы на основе многостенных углеродных нанотрубок и полифталоцианинов для применения в гибких портативных источниках энергии
Митина А. А., Руднева Т. Н. 959

Разработка пьезоэлектрического преобразователя энергии на основе вертикально ориентированных углеродных нанотрубок, легированных азотом
Ильин О. И., Рудык Н. Н., Полывянова М. Р., Хомленко Д. Н., Ильина М. В. 961

Микроплоттерная печать полевых транзисторов на углеродных нанотрубках
Лизунова А. А., Власов И. А., Волков И. А., Кеpечанина М. Ф., Каменева Е. И., Новосёлов А. К., Лошкарёв А. А., Иванов В. В. 963

Перспективы применения углеродных наноструктур в экстремальной электронике и медицинских малоинвазивных устройствах
Мордкович В. З. 965

Современные методы исследований и диагностики материалов элементов ЭКБ с резистивным переключением
Дудин А. А., Рудаков Г. А., Теплов Г. С. 967

Синхротронные и нейтронные исследования в России: текущий статус и перспективы
Марченков Н. В., Благов А. Е., Ковальчук М. В. 970

Зондовые и оптические технологии в задачах метрологии и инспекции современной микроэлектронной промышленности
Козодаев Д. А., Трусов М. А. 973

Новая технология германия оптического, микроэлектронного и детекторного качества
Корнев Р. А. 975

Мониторинг состава электролита в ванне для электрохимического осаждения меди в технологии формирования межсоединений
Кирюшина И. В. 977

Метод оценки стабильности термической обработки тонкопленочных алюминиевых структур, осажденных методом магнетронного распыления
Темирова Т. И., Бикаев Р. И., Божко С. А. 979

Разработка полимерной основы для негативного резиста
Букреева К. С., Курбатов В. Г. 981

Влияние морфологии самоорганизованных массивов Ag-наночастиц на эффективность усиления сигнала ГКР
Гришин Т. С., Волкова Л. С., Дудин А. А., Меденков Г. А., Дубков С. В., Громов Д. Г. 983

Самоочищающиеся гибридные структуры на основе наностолбиков TiO_2 и Ag/Cu-наночастиц для автономных ГКР-сенсоров
Волкова Л. С., Гришин Т. С., Дудин А. А., Латипов Е. В., Назаркина Ю. В., Дубков С. В., Громов Д. Г. 985

Разработка биосовместимых нанокомпозитов на основе ОУНТ и n-бутилбороновой кислоты для сенсорных приложений
Едельбекова П. А., Шаман Ю. П., Герасименко А. Ю., Гаврилов С. А. 987

Разработка технологии синтеза эпоксидных олигомеров на основе замещенного бифенила
Давыдова Е. С., Митрофанова Е. В., Курбатов В. Г. 989

Расчет зонной структуры сегнетоэлектрического $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ для определения механизма токового транспорта
Марголин И. Г., Савичев И. А., Чуприк А. А. 991

Экспериментальное исследование HEMT-транзисторов на основе гетероэпитаксиальных соединений нитридов III группы
Цунваза Д. М., Рыжук Р. В., Гусев А. С., Захарченко Р. В., Каргин Н. И. 993

Технологические решения для достижения высокого отношения ON/OFF в транзисторах на основе двухслойного графена
Домарацкий И. К., Кащенко М. А., Титова Е. И., Мыльников Д. А., Свинцов Д. А. 996

Технология промышленной чистоты и современное полупроводниковое производство
Александров П. А., Калечиц В. И., Ковбасюк И. Е., Хозяшева С. Е., Шахов М. Н., Весёлый Л. В., Макавеев П. Ю. 998

Радиационная стойкость. Об отказоустойчивых системах управления
Беклемишева А. В., Александров П. А., Макавеев П. Ю., Шемардов С. Г., Васильев А. Л., Беклемишев В. Н., Макавеев П. Ю. 1000

Разработка имплантационной технологии изготовления структур «кремний на изоляторе»
Беклемишева А. В., Шемардов С. Г., Беклемишев В. Н., Александров П. А. 1002

Стохастическая составляющая ошибки позиционирования при формировании фотолитографического изображения
Шарапов А. А., Горнев Е. С. 1004

Новый метод и устройство измерения теплового сопротивления керамических корпусов для интегральных микросхем
Лоскутов В. В. 1006

ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ 1007

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ 1007

Новый подход формирования элементов микроэлектроники методом сухой аэрозольной печати
Иванов В. В. 1007

Цифровые двойники в микроэлектронном производстве
Петросянц К. О. 1009

Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы в фотонике
Большаков А. Д. 1010

Перспективы развития и применений МЭМС-технологий при создании приборов фотоники
Лысенко И. Е. 1011

СЕКЦИЯ № 1 «МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУР, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ» 1013

Система теплоотвода приемо-передающего модуля СВЧ-диапазона на принципе адиабатического расширения газа
Пяточкин М. Д., Баранов Г. В., Болгов С. Ю., Панасенко П. В. 1013

Особенности распространения спиновых волн под действием спинового тока в бислоях типа магнитный материал / тяжелый металл
Лобанов Н. Д., Морозова М. А. 1015

Атомистическое моделирование магнитного поведения нанопленок α-Fe различной толщины
Саломатина А. Ю., Федотов А. Ю., Северюхина О. Ю. 1017

Разработка конструкции пьезоэлектрического наногенератора на основе массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок
Полывянова М. Р., Хомленко Д. Н., Ильина М. В., Ильин О. И. 1019

Моделирование конструктивных особенностей верхнего электрода пьезоэлектрического наногенератора на основе углеродных нанотрубок
Хомленко Д. Н., Ильин О. И., Ильина М. В. 1022

Атомистическое моделирование работы элементов энергонезависимой памяти на основе технологии FeRAM
Павлишин К. Ю., Абгарян К. К. 1024

Физико-математическая модель MIM-селектора ReRAM для САПР TCAD
Курьянов А. О., Федотов М. И., Теплов Г. С. 1026

Взаимодействие молекул H_2O, NH_3 и HCl с поверхностью нитевидных нанокристаллов кремния: DFT-моделирование и эксперимент
Свинкин Н. А., Кондратьев В. М., Полозков Р. Г., Большаков А. Д. 1028

Оптимизация рецептов плазмохимического травления кремния в среде SF_6/O_2 с использованием нейронных сетей
Кузьмин В. О., Седунов С. М., Шаманков Н. О. 1030

Молекулярно-динамическое моделирование распыления монокристаллического кремния
Назаров А. А., Юнин П. А., Михайленко М. С., Пестов А. Е., Орлова А. Н. 1032

Численное моделирование лазерного отжига кремниевых IGBT
Джавадов Р. Р., Маринов Д. Л., Ковалев А. С. 1034

Исследование влияние геометрии наноразмерной матричной полевой эмиссионной ячейки с лезвийными катодами на основе карбида кремния и графена на распределение напряженности электрического поля вблизи эмитирующей поверхности
Ковалец А. И., Путря М. Г. 1036

Агрегированные цифровые двойники электронных модулей
Чашкин Л. Б. 1038

Моделирование электрических характеристик нанослойных полевых транзисторов с учетом температурных факторов
Бабурин А. И., Силкин Д. С., Попов Д. А. 1040

Анализ различных Spice-симуляторов в части точности и скорости электротеплового расчета схем при работе с цифровыми двойниками электронных компонентов (ЭК)
Зубкова А. И., Харитонов И. А. 1042

Технологическое и приборное моделирование карбидокремниевого МОП-транзистора траншейного типа
Десятов Л. Д., Потапов М. А., Спутай Н. Р., Шевченко С. А. 1045

Моделирование процесса переключения элемента энергонезависимой памяти на основе технологии FeRAM
Журавлев А. А., Абгарян К. К., Ревизников Д. Л. 1047

Термофотоэлектрическая ячейка, работающая в ближнем поле с термоэмиссионным усилением
Простодушев А. О., Захаров Ф. А., Яшин М. С. 1049

Пределы определения отклонения от стехиометрии в халькогенидах кадмия и цинка по составу равновесной паровой фазы
Стрельцов Н. А., Кобелева С. П. 1051

Исследование технических характеристик МЭМС-микрофонов
Разгуляева Н. Г., Малкин А. И., Чечеткин В. А. 1053

Исследование параметров и состава плазмы бромистого водорода и его смесей с кислородом
Цепкин М. В., Ефремов А. М. 1055

О влиянии управляющих параметров плазмохимического травления на пространственную однородность плазмы в реакторе
Захаров Ю. А., Ефремов А. М. 1057

Исследование влияния управляющих параметров на результат плазмохимического травления поликремния в индуктивно связанной плазме Cl_2/HBr/Ar
Оксаниченко Ф. В., Ефремов А. М. 1060

Обучение межатомных потенциалов для молекулярного моделирования low-k-диэлектрика на основе оксида кремния с добавлением бензольных и метильных групп
Кадыров А. Д., Резник А. А., Резванов А. А. 1062

Рост алмазных покрытий методом PE CVD: моделирование и реализация
Лавреченко В. Д., Сухоцкий А. Е., Адамчук Д. В., Быченок Д. С., Демиденко М. И. 1064

Моделирование элемента хранения резистивного переключения на основе HfO_2
Козлов А. К, Ганыкина Е. А., Резванов А. А. 1066

Вклад точечных дефектов в механизм резистивного переключения в тонких пленках титаната бария
Левичев М. В., Вилков О. Ю., Андреева Н. В. 1068

Оптимизация электрооптического эффекта в структурах с квантовыми ямами на технологической платформе InP
Мустафин А. Д., Гришаков К. С., Васильевский И. С. 1070

Исследование влияния тепловых режимов на характеристики предфрактальных микросистем
Зинченко Л. А., Михайличенко С. С., Терехов В. В., Магомедов Г. А. 1072

Разработка математической модели автоматического построения топологии микроэлектромеханического гироскопа RR-типа
Шалаев В. А., Матишов В. С., Лысенко И. Е. 1074

СЕКЦИЯ № 2 «ШКОЛА НИИМЭ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ЛИТОГРАФИИ» 1076

Снижение искажений на стыках расчетных областей при коррекции эффектов оптической близости в фотолитографии
Московцев А. Ф., Клочкова Е. Л., Капкин И. Д., Иванов В. В. 1076

Определение констант скоростей реакций фоторезистов с химическим усилением для этапа постэкспозиционной сушки
Литаврин М. В., Фортунова Е. А., Шишлянников А. В., Шарапов А. А., Горнев Е. С. 1078

Определение констант скорости проявления для химически усиленных фоторезистов
Фортунова Е. А., Литаврин М. В., Шишлянников А. В., Шарапов А. А., Горнев Е. С. 1081

Исследование и разработка метода формирования нейро-операторов для программной платформы цифровых двойников
Вологжанин Н. А. 1083

Разработка нейросетевого симулятора процесса формирования контура фоторезистивной маски
Кошлаков А. В., Метельников А. А., Соловьева В. Д. 1085

Влияние состава масочного стека на формирование воздушного изображения в EUV-литографии
Скворцова А. А., Клочкова Е. Л. 1087

Проведение коррекции эффектов оптической близости для проектирования фотошаблонов в среде kLayout
Колупаев М. Е., Капкин И. Д. 1089

Кремниевый детектор электронов для интеграции в электронно-лучевой литограф
Григорьева Т. В., Голубков С. А., Петушков В. Л., Лавренов В. А. 1091

Реконструкция геометрии поверхности фоторезиста по снимку с электронного микроскопа
Семенова Ю. А., Герасимов И. В. 1093

Точная симуляция распространения света в ближнем поле маски с использованием нейронной сети, основанной на уравнениях Максвелла (PINN)
Баянов И. В., Федоров И. Ю. 1095

Построение нейросетевого ILT-фреймворка на основе сверточных и физически информированных нейронных сетей
Николаев Я. Д., Фёдоров И. Ю. 1097

Разработка алгоритма оптимизации топологических структур на основе обучения с подкреплением
Первунецких А. А., Фёдоров И. Ю. 1099

Метод статистической оценки основных составляющих дозовой погрешности проекционной фотолитографии
Балан Н. Н., Васин А. А., Иванов В. В. 1101

Оптимизация толщины антиотражающего покрытия для улучшения окна процесса фотолитографии
Кирпичев Д. М., Шишлянников А. В., Литаврин М. В. 1103

СЕКЦИЯ № 3 «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ» 1105

Структурно-технологические неоднородности слоев оксида кремния, осаждаемых из газовой фазы
Евдокимов В. Л. 1105

Изготовление транзисторов на основе углеродных нанотрубок методом микроплоттерной печати
Керечанина М. Ф., Лизунова А. А., Власов И. С., Каменева Е. И., Лошкарев А. А., Новосёлов А. К., Костина Д. Е., Арутюнян Н. Р., Образцова Е. Д., Иванов В. В. 1108

Диффузия примеси меди в кристаллическом гексагональном рутении
Горохов С. А., Резванов А. А. 1111

Исследование элемента хранения резистивной энергонезависимой памяти на основе нитрида кремния, нанесенного методом атомно-слоевого осаждения
Резник А. А., Резванов А. А. 1113

Импульсное лазерное напыление тонких полупроводниковых пленок A^3B^5
Никулин Д. А. 1115

Характеристики диодов Шоттки Au/n-Si, сформированных методом электрохимического осаждения
Вайсбеккер М. С., Малаховский О. Ю., Минин О. Н., Бекезина Т. П., Таловская А. А. 1117

Оптимизация параметров процесса магнетронного распыления пленки алюминия 5 мкм с целью минимизировать нагрузку на оборудование
Малинина К. А., Кузин А. С. 1120

Технология получения эвтектического припоя AuSn на основе процессов фотолитографии и электрохимического осаждения
Шестериков А. Е., Шестерикова Д. А. 1122

Разработка функциональных сплавов на основе переходных металлов с заданными свойствами
Рахматуллаев Т. Р., Саповский И. М., Пинчук К. Е., Крайнова Г. С., Пашев С. Р. 1126

Оптимизация параметров измерительной установки для регистрации слабых сигналов электромагнитного излучения ближнего и средневолнового ИК-диапазонов с помощью фотосенсоров на основе ККТ
Сапцова О. А., Яковлев В. О., Короннов А. А., Королева Т. В., Хакимов К. Т., Попов В. С. 1129

Использование роданид-содержащего комплекса ртути и ацетилацетоната ртути в качестве прекурсоров для синтеза коллоидных квантовых точек HgTe для фотосенсоров
Королева Т. В., Хакимов К. Т., Миленкович Т., Сапцова О. А., Яковлев В. О., Попов В. С. 1131

Двумерные полифталоцианины — перспективные материалы для печатной электроники
Рыжкова Г. Г., Курочкин И. Ю., Руднева Т. Н., Корепанов В. И. 1133

Увеличение фотоотклика ультрафиолетовых фотодетекторов на основе GaN благодаря использованию Ag-нанонитей и Au-наночастиц
Синицкая О. А., Шугабаев Т., Кузнецов А., Шубина К. Ю., Гридчин В. О., Мизеров А. М., Уваров А. В., Котляр К. П., Большаков А. Д., Цырлин Г. Э., Никитина Е. В. 1135

Наследуемость шероховатости нижнего электрода функциональным слоем на основе HfO_2
Паймурзин Д. М., Гришин Т. С., Горячев А. В., Теплов Г. С., Рудаков Г. А., Дудин А. А. 1138

Исследование влияния параметров образцов, полученных атомно-слоевым осаждением, на фазовый состав слоев оксидов металлов
Раводина А. М., Зюзин С. С., Резванов А. А. 1142

Исследование зависимости сопротивления проводящих никелевых дорожек от количества линий и от температуры
Санатулина А. Ф., Новоселов А. К., Лизунова А. А. 1144

Исследование характеристик жидких полупроводниковых материалов для создания печатных полевых транзисторов
Ульянова М. И., Резник А. Ю., Винник Д. А., Лизунова А. А. 1146

Влияние способа формирования слоя коллоидных квантовых точек халькогенидов ртути на характеристики гетероперехода и конечного фотодиода
Хакимов К. Т., Королева Т. В., Миленкович Т., Сапцова О. А., Яковлев В. О., Попов В. С. 1150

Исследование электрофизических свойств углеродсодержащих паст в токопроводящих каркасах для суперконденсаторов
Жукова Д. Н., Морозов М. В. 1152

Применение ионной имплантации для модификации параметров приборов на основе микро- и наноструктур (на примере оксидных мемристоров)
Окулич Е. В., Окулич В. И., Тетельбаум Д. И., Михайлов А. Н. 1154

Методы постростовой обработки гетероструктур при изготовлении фотоэлектрических преобразователей солнечного и лазерного излучения
Романчук А. К., Малевская А. В., Калюжный Н. А., Солдатенков Ф. Ю., Нахимович М. В., Шварц М. З. 1156

Разработка технологии изготовления электродов на основе графеновых нанотрубок
Карпович А. Е., Бодяго Е. В. 1158

Ионно-пучковые методики изготовления подложек зеркал проекционного объектива ЭУФ-литографа на длину волны 11,2 нм
Михайленко М. С., Оськин И. Д., Пестов А. Е., Торопов М. Н., Чернышев А. К., Чхало Н. И. 1160

Пространственные измерения зондовым методом параметров HBr/Cl_2 плазмы в индустриальном TCP-реакторе травления poly-Si
Глотов А. В., Лопаев Д. В., Шибанов Д. Р., Гиниятуллин Р. М. 1161

Получение и характеризация тонких пленок титаната стронция для сверхвысокочастотных применений
Богдан А. Р., Тумаркин А. В., Сапего Е. Н. 1164

Влияние малых концентраций легирующих примесей Al на свойства активного слоя мемристоров на основе HfO_2
Шулаев Н. А., Бобылев А. Н., Азарапин Н. О., Григорьев М. В., Удовиченко С. Ю. 1166

Измерение толщин наноразмерных слоев фазосдвигающего фотошаблона с применением цифровой обработки изображений просвечивающей электронной микроскопии
Киреев Г. С., Боргардт Н. И. 1168

Влияние структурных дефектов в антимониде индия на качество тепловизионного изображения фотодиодных матриц
Новиков И. В., Мирофянченко Е. В., Мирофянченко А. Е. 1170

Исследование влияния электрического тока на свойства и морфологию ГКР-активной пленки Ag-Nb-N-O для фотонной сенсорики
Чумаченко Ю. В., Новиков Д. В., Дубков С. В., Громов Д. Г., Волкова Л. С., Гаврилов С. А. 1172

Особенности формирования топологического рисунка при изготовлении матричных фоточувствительных структур на основе коллоидных квантовых точек
Петрушина В. А., Мирофянченко Е. В., Тальвеже В. В., Попов М. А., Еремкин Н. В., Ильинов Д. В., Гришина А. Н., Атрашков А. С., Панков М. А., Попов В. С., Пономаренко В. П. 1174

Анализ межфазных контактов в спин-поляризованных структурах ферромагнетик MnSb — полупроводники антимониды Al, Ga, In. Синтез тонкой пленки композита InSb—MnSb (50:50)
Биктеев А. А., Маренкин С. Ф., Нечушкин Ю. Б. 1176

Создание бета-вольтаических источников питания непрерывного и импульсного принципа действия для маломощных устройств
Брацук А. В., Фёдоров Е. Н., Шадский А. С., Варданян Д. М., Урусов А. А. 1179

Зависимость тока утечки и усилия прижима от напряжения ЭКУ
Калугин В. В., Трактирщиков В. С., Ширяев М. Е. 1181

Оптимизация параметров плазмохимического травления для получения анизотропного профиля металлических межсоединений с использованием газовой смеси $C_4F_8 + O_2 + CO + Ar$
Михайлова А. В., Леготин С. А. 1184

Усиление SERS-сигнала тонких пленок органических красителей с использованием плазмонных наноструктур, формируемых наночастицами металлов
Долгов В. А., Корнюшин Д. В., Борисов В. И., Иванов М. С., Мусаев А. Г., Ворошилова В. А., Иванов В. В. 1186

Высокоэффективная система передачи мощности для системы ионной имплантации
Руднев Д. Н., Сеньков Д. В. 1189

Дизайн пространственно-разрешенной оптической эмиссионной спектроскопии для оценки однородности плазмы в плазмохимических реакторах
Зиганшин И. И., Лопаев Д. В., Кириллов Е. А., Брюшков М. М., Рахимов А. Т. 1190

Исследование процесса плазменного травления нитрида кремния с вертикальным профилем для фотонных интегральных схем
Куринная А. А., Соловьёв А. А., Дятлов В. Д. 1192

СЕКЦИЯ №4 «ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОТОНИКА» 1193

Оптически активные дефектные центры в матрице Si для КМОП-совместимых устройств квантовой фотоники
Юрасов Д. В., Яблонский А. Н., Захаров В. Е., Михайлов А. Н., Никольская А. А., Новиков А. В. 1193

Вычислительная оптоэлектроника и новые возможности электрически управляемых фотодетекторов
Сёмкин В. А., Мазуренко И. М., Капралов К. Н., Мыльцев В. Н., Кайдашев В. Е., Домарацкий И. К., Кащенко М. А., Борисенко Д. П., Кононенко О. В., Бочаров А. Ю., Свинцов Д. А. 1195

Использование оптических волокон со сверхвысокой числовой апертурой при вводе излучения в чипы фотонных интегральных схем: опыт применения и полученные результаты
Паньков А. С., Пономарев Р. С. 1198

Генерация групп связанных солитонов в эрбиевом волоконном лазере с пассивной синхронизацией мод на основе одностенных углеродных нанотрубок
Исмаил Алмикдад, Крылов А. А., Образцова Е. Д. 1200

Генерация сжатых состояний света в LNOI-волноводах
Пошевкина А. А., Шарапова П. Р. 1202

Применение модуляционных методов фурье-спектроскопии в исследовании гетероструктур GeSiSn/Ge/Si для приборов интегральной фотоники
Чуманов И. В., Фирсов Д. Д., Коляда Д. В., Комков О. С., Скворцов И. С., Тимофеев В. А. 1204

Численное моделирование зависимости эффективного показателя преломления SiN-волновода от концентрации водорода в атмосфере
Кузнецов И. В., Перин А. С. 1206

Новые подходы к созданию материалов с управляемыми оптическими свойствами на основе кремнийорганических полимеров и нитевидных нанокристаллов фосфида галлия
Козко И. А., Кондратьев В. М., Татмышевский М. К., Кузнецов А., Резник И. А., Зюзин М. В., Большаков А. Д. 1209

Теоретическая разработка и экспериментальная реализация одновременно трех сверточных фильтров на интегрально-оптическом чипе для ускорения сверточных нейронных сетей
Аргенчиев А. С., Кондратьев И. В., Урусова К. Н., Скрябин Н. Н., Дьяконов И. В., Страупе С. С., Кулик С. П. 1211

Исследование процессов генерации второй оптической гармоники в мезопористых наночастицах Si/SiO_2
Фунтикова А. С., Можаров А. М., Шаров В. А., Федоров В. В., Мухин И. С., Новикова К. Н., Дворецкая Л. Н. 1214

Эффективность люминесцентных взаимодействий в гетероструктуре многопереходного солнечного элемента
Корниенко П. Д., Левина С. А., Минтаиров М. А., Нахимович М. В., Шварц М. З. 1216

Собственные моды периодической круговой цепочки N малых плазмонных сферических частиц с электрическим дипольным взаимодействием
Крылов А. А., Барабаненков М. Ю. 1218

Методы реализации вычислительных устройств на основе фотонных компонент
Мокшин П. В. 1220

Контроль активной терагерцевой метаповерхности на основе VO_2 при помощи поверхностных акустических волн
Очкуров М. В., Карапетьян Г. Я., Кайдашев В. Е. 1222

Источники излучения на основе гидротермального оксида цинка
Кадинская С. А., Кондратьев В. М., Николаева А. В., Гец Д. С., Большаков А. Д. 1224

СЕКЦИЯ № 5 «НЕЙРОМОРФНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ» 1226

Системный подход к построению цифрового двойника изделия для оптимизации управления производством электронной техники
Кузнецова Е. С. 1226

Мультимодальная нейронная сеть для анализа спектров рамановского рассеяния и дерматоскопических изображений новообразований кожи
Матвеева И. А. 1228

КМОП-интегрированные мемристоры на основе двухслойного диэлектрика Al_2O_3/ZrO_2(Y)
Серов Д. А., Круглов А. В., Белов А. И., Коряжкина М. Н., Лукоянов В. И., Грязнов Е. Г., Котомина В. Е., Котина А. Ю., Антонов И. Н. Щаников С. А., Борданов И. А., Таран Д. А., Королев Л. Я., Жарков Г. Д., Тютина Е. Р., Михайлов А. Н. 1230

Исследование производительности магнонной резервуарной вычислительной системы
Гапончик Р. В., Никитин А. А., Костылев М. П., Устинов А. Б. 1232

Применение сверточных архитектур в моделировании нейросетевых квантовых состояний для задач оптимизации
Кулешов И. А., Бажанов Д. И. 1234

Мемристивные структуры на основе поли-п-ксилилена: от электрофизических свойств до синаптических функций с нейроморфными применениями в конденсаторной одиночной и кроссбар-геометрии на твердой и гибкой подложке
Швецов Б. С., Юкляевских Г. А., Емельянов А. В. 1236

Адаптивный гетерогенный нейронаблюдатель состояния системы
Кузнецов М. А. 1239

Мемристоры на основе нанокомпозита поли-(п-ксилилен)-MoO_x на гибких подложках для носимой нейроморфной электроники
Рябова М. А., Мацукатова А. Н., Емельянов А. В. 1241

Исследование и статистический анализ параметров ячеек памяти в мемристорных кроссбарах на основе диоксида циркония, стабилизированного иттрием
Жарков Г. Д., Белов А. И., Большаков Д. И., Лукоянов В. И., Грязнов Е. Г., Сафонов А. В., Михайлов А. Н. 1243

Мемристорные структуры с односторонней проводимостью на основе оксида меди для нейроморфной кроссбар-ЭКБ
Дзюба Д. А., Саенко А. В., Томинов Р. В., Вакулов З. Е., Смирнов В. А. 1245

Система предсказания параметров цифровых схем с использованием методов машинного обучения
Зиазетдинов А. А., Подгорный Л. Е., Зунин В. В. 1247

Исследование возможностей обучения импульсной нейронной сети с учетом особенностей функционирования мемристивного кроссбар-массива
Дудкин А. П., Андреева Н. В., Рындин Е. А. 1249

Исследование влияния вольт-амперных характеристик элементов ячейки мемристорно-селекторного кроссбар-массива на форму выходного сигнала
Неустроев А. А., Бусыгин А. Н., Удовиченко С. Ю. 1252

Исследование латентного пространства моделей глубокого обучения применительно к задачам входного контроля полевых транзисторов
Чернова А. С., Мещанинов Ф. П., Жевненко Д. А., Горнев Е. С. 1254

Обзор современного состояния мемристорных структур применительно к энергонезависимой памяти и нейроморфным вычислениям
Мизгинов Д. С., Тельминов О. А., Горнев Е. С. 1256

Влияние коалесценции на динамику проводимости и мемристивные свойства ансамблей наночастиц серебра
Василевская Ю. О., Чумаченко Ю. В., Новиков Д. В., Сибатов Р. Т. 1258

Методы оптимизации алгоритмов ML для микроконтроллеров
Аманов А. У., Старостенко В. И., Попов Д. А. 1260

Прогнозирование нештатных ситуаций на промышленных объектах
Голубева И. А. 1262

Исследование и моделирование процессов резистивного переключения в оксидах металлов
Ванькаев А. С., Клюкина Е. В., Федотов М. И., Ковешников С. В. 1264

Фоточувствительное резистивное переключение структур на основе композита парилен–PbTe
Трофимов А. Д., Емельянов А. В. 1266

Макет двухполюсника на основе микроконтроллера, эмулирующий работу мемристора
Николаева Е. А., Писарев А. Д. 1268

Нейроморфные подходы к решению проблем с большими данными
Щанькин К. Д., Сафронова А. В., Козырева Н. И. 1271

Сравнение моделей и методов предиктивного кодирования в задаче восстановления мультимодальных сигналов
Хакимов А. Т., Батуев Б. Б. 1273

Моделирование показателей надежности с применением нейросетевого подхода
Мещанинов Ф. П., Жевненко Д. А., Селецкий А. В., Московцев А. Ф., Клочкова Е. Л., Горнев Е. С. 1276

Нейросетевое сопоставление признаков и оценка гомографии на RISC-V-платформе для задач выравнивания изображений
Яковлев Р. А. 1278

СЕКЦИЯ № 6 «RISC-V И СИСТЕМНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ» 1280

Применение алгоритмов обучения с подкреплением в автоматизированной настройке оптимизирующих преобразований компилятора как оптимизационной задаче с ограничениями
Ефанов Н. Н. 1280

Оптимизация функции умножения симметричной ленточной матрицы на вектор под архитектуру RISC-V
Воденеева А. А., Мееров И. Б., Волокитин В. Д., Козинов Е. А., Пирова А. Ю. 1283

Оптимизация функции minigemm с использованием 256-битных векторных регистров на платформе RISC-V
Лылова С. С. 1285

Особенности реализации экспоненты под архитектуру RISC-V
Панова Е. А., Волокитин В. Д., Мееров И. Б. 1286

Применение неправильных клеточных автоматов для задачи распределения регистров на архитектуре RISC-V
Голубович Т. С., Владимиров К. И. 1288

Расширения F, D в RISC-V на примере вычислителя с плавающей точкой FPnew
Протасова Е. А. 1291

Повышение эффективности обработки изображений в OpenCV на RISC-V: интеграция векторных инструкций и алгоритмическая оптимизация
Кузьмин Р. С., Пшеницына П. С., Шагалова П. А., Соколова Э. С. 1292

Система анализа изображений микроскопии на базе одноплатного компьютера с процессорной архитектурой RISC-V
Симонова Д. В., Савкин А. Е., Шагалова П. А., Соколова Э. С. 1294

Разработка системы автоматизированной проверки лабораторных работ по программированию RISC-V
Кондратенко К. Е., Тиняков С. А., Горский К. Д., Заславский М. М. 1297

SCR1 на платформе Tang Primer 20k: поддержка периферии
Луконенко Н. И., Смирнов К. К. 1299

Интеграция процессорного ядра SCR1 в платформу LiteX для запуска на ПЛИС Colorlight i9
Муковенков Р. С., Смирнов К. К. 1301

Реализация аппаратного механизма сбора точных архитектурных событий для вычислительной системы с архитектурой RISC-V
Зайцев В. Л., Хайдуков Д. И. 1303

Анализ эффективности параллельного исполнения команд на уровне конвейера RISC-V-микропроцессора
Воложинов Д. С., Сенин А. С. 1305

Использование Coremark в регрессионном тестировании процессорного ядра RISC-V
Карпухин М. С. 1308

Реализация аппаратного блока предвыборки в кеш для RISC-V-ядра
Левонюк А. А., Тищук Б. Ю. 1309

Реализация предсказателей ветвления для процессоров с архитектурой RISC-V
Тарасова А. Н., Примаков Е. В. 1311

Верификация средств виртуализации и защиты памяти RISC-V
Петров Д. В. 1313

Реализация и отладка через Debug-mode RISC-V-ядра в составе СнК
Гуржов Н. А. 1314

Реализация RISC-V Debug SPEC 1.0 в отладчике GDB
Тарасов Ю. В. 1316

Экспериментальное исследование SoC Cheshire: методика и результаты
Матюхин А. В., Примаков Е. В. 1318

Поддержка архитектуры RISC-V в упаковщике исполняемых файлов UPX
Храповицкий Т. А., Иртегов Д. В., Власов А. А. 1320

Оценка функциональности современных инструментов контейнерной оркестрации на процессорной архитектуре RISC-V
Черепанов Н. И., Ребдев П. А., Чистяков В. М., Мадьяров Г. С., Степина Н. О. 1322

Уменьшение времени сборки образов в Yocto Project за счет модификации взаимодействия с кеш-зеркалами
Денисова О. К., Тиняков С. А., Гаврилов А. В., Заславский М. М. 1324

Раскрутка доверенных дистрибутивов Linux
Фролов Т. С. 1327

Исследование проблем алгоритмов блочной компрессии в ядре Linux
Сичкар Г. К., Кутуев В. А., Васенина А. И. 1329

Исследование реализаций лог-структурированного блочного устройства в ядре Linux
Гавриленко М., Васенина А. И. 1331

Организация межпроцессного взаимодействия через разделяемую память
Устюжанина М. А., Шиповский В. А. 1333

Обработка исключений режима безопасных вычислений платформы «Эльбрус»
Титов Е. М., Ярапов Д. В., Жмурин А. В. 1335

Декларативное программирование в Rust: разработка библиотеки для упаковки и распаковки записей в плотный бинарный формат, сравнение с другими языками и анализ работы на различных архитектурах
Сперанская Я. А. 1337

СЕКЦИЯ № 7 «СВЧ И СИЛОВЫЕ ПРИБОРЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ» 1339

Фазовращатели СВЧ-диапазона на основе векторных модуляторов
Балашов Е. В., Коротков А. С., Румянцев И. А. 1339

Способы реализации широкополосных трансимпедансных усилителей на полупроводниковых технологиях
Коряковцев А. С., Коколов А. А. 1341

Исследование и разработка топологии микросхем программно-определяемого радио-СВЧ-диапазона на одном кристалле
Сердюков В. В., Коротков К. С., Строганова Е. В., Пузановский К. В., Голан А. В., Никитин Д. Д. 1343

Структуры метаматериалов и их свойства
Бучинская Д. Д., Малкин А. И. 1345

Гетероструктуры InGaAlAs со стоп-слоями InGaP, изготовленные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подожках GaAs, для применений в СВЧ-микроэлектронике
Андрюшкин В. В., Гладышев А. Г., Егоров А. Ю., Панасенко П. В. 1347

Металлоорганическая газофазная эпитаксия и характеризация III-N-гетероструктур для транзисторов с высокой подвижностью электронов
Артеев Д. С., Сахаров А. В., Николаев А. Е., Заварин Е. Е., Родин С. Н., Лундин В. В., Цацульников А. Ф. 1349

Усилитель мощности с динамической модуляцией нагрузки
Филипюк И. А., Искаков Б. А., Туральчук П. А. 1351

Разработка монолитной интегральной схемы гомодинного приемо-передающего модуля миллиметрового диапазона длин волн
Макарцев И. В., Беляков В. А., Дюков Д. И., Власов В. В., Воробьев А. К. 1353

Параметры прохождения СВЧ-сигнала субгигагерцевого диапазона через наносекундный фотопроводящий полупроводниковый ключ (PCSS) на основе GaAs
Бармин В. В., Романченко И. В. 1355

Влияние подзатворного диэлектрика на характеристики силового нормально-закрытого GaN-транзистора
Чуканова О. Б., Царик К. А., Лашков А. В. 1357

Исследование влияния конструктивно-технологических параметров на электрические характеристики силового МДП-транзистора щелевого типа на основе GaN
Беляев А. О., Баранов Г. В., Дорофеев А. А., Леоненков Е. И., Панасенко П. В. 1359

Сравнение переходов NiO/β-Ga_2O_3 и Ni/β-Ga_2O_3, полученных на объемном кристалле оксида галлия
Матрос Н. Р., Поляков А. Я., Николаев В. И., Щемеров И. В., Васильев А. А., Черных А. В., Саранин Д. С., Алексанян Л. А., Романов А. А. 1361

Аппаратно-программный комплекс для измерения электрических характеристик полупроводниковых компонентов большой мощности
Хлынов П. А., Самбурский Л. М. 1363

Радиационная стойкость и оптимизация конструкции силовых n-канальных MOSFET Trench-транзисторов технологии 180 нм при гамма-облучении
Степанов М. А. 1365

Исследование механизма деградации тока утечки коллектора высоковольтных IGBT во время HTRB-теста
Абрашин П. С. 1367

Разработка GaAs IPD-технологии
Смирнов Ю. Ю., Мишарин Д. М., Шуленков А. С., Драгуть М. В., Лукин В. А. 1369

Разработка технологии плазмохимического осаждения пленки Si_3N_4 для конденсаторов СВЧ МИС различных типов
Рыкова В. В., Смирнов Ю. Ю., Орлова Д. А., Драгуть М. В. 1372

СЕКЦИЯ № 8 «КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» 1373

Использование тензорных сетей для моделирования эволюции квантовых состояний света в элементах нелинейной оптики и фотоники
Капридов Н. А., Тиунов Е. С., Чермошенцев Д. А. 1373

Исследование итерационного алгоритма максимального правдоподобия в задачах реконструкции квантовых состояний
Шарапов А. Е., Голышев И. К., Богданова Н. А., Шарапов А. А., Богданов Ю. И. 1376

Линейно-оптическая генерация многокубитных GHZ-подобных состояний с помощью модифицированных операций слияния
Мелкозеров А. А., Сайгин М. Ю., Страупе С. С. 1378

Генерация трехкубитного запутанного состояния GHZ в интегральном оптическом чипе, изготовленном методом фемтосекундной лазерной записи
Урусова К. Н., Кондратьев И. В., Аргенчиев А. С., Скрябин Н. Н., Дьяконов И. В., Страупе С. С., Кулик С. П. 1380

Приготовление состояний фотонов с переменной перепутанностью путем модифицированного метода многократного отщепления
Фолджян С. А., Сайгин М. Ю., Страупе С. С. 1383

Эффективная устойчивая к шумам томография многомодовых линейно-оптических интерферометров одиночными фотонами
Бирюков Ю. А., Морозов Р. Д., Дьяконов И. В., Страупе С. С., Кулик С. П. 1385

Высокоточная томография поляризационных квантовых состояний с учетом инструментальных ошибок измерений
Голышев И. К., Богданова Н. А., Шарапов А. А., Богданов Ю. И. 1387

Отражатели на направленных ответвителях для слабонаправляющих волноводов
Костюченко Н. С., Журавицкий С. А., Скрябин Н. Н., Сайгин М. Ю., Дьяконов И. В., Калинкин А. А., Корнеев А. А., Страупе С. С., Кулик С. П. 1389

Изучение фазовых переходов в ван-дер-Ваальсовых гетероструктурах: на пути создания квантового симулятора
Чиглинцев Э. О., Абрамов А. Н., Кравцов В., Чернов А. И. 1391

Исследование спектров ОДМР системы NV-^{13}C в решетке алмаза
Косогорова Т. А., Вергелес С. С., Гусев А. С., Калошин М. М., Маргушин Р. Е., Салказанов А. Т., Каргин Н. И. 1393

Экспериментальный ключевой центр для мобильных устройств
Зайцев Д. Л., Стрижак Д. В., Задиран Н. В., Сантьев А. А., Кожанов И. А., Приютов А. А., Поздняков А. М. 1395

Обучение тензорной модели квантового состояния с использованием нескольких однокубитных измерений
Кузьмин С. С., Михайловна В. И., Дьяконов И. В., Страупе С. С. 1397

Управление распространением спиновых волн в гибридных структурах ЖИГ/ЖР путем термоиндуцированной модуляции намагниченности
Пташенко А. С., Садовников А. В. 1399

Проектирование и реализация схемы безопасного распределения ключей для мессенджера на основе протокола ProtoQa
Зайцев Д. Л., Кожанов И. А., Стрижак Д. В., Задиран Н. В., Сантьев А. А., Поздняков А. М. 1402

СЕКЦИЯ № 9 «ФИЗИКА МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПРИБОРОВ» 1404

Способы повышения эффективности преобразования энергии солнечных элементов на основе допированных перовскитных ячеек
Муратова Е. Н., Мошников В. А., Врублевский И. А., Алешин А. Н. 1404

Радиационная устойчивость гибридных перовскитов — материалов солнечных ячеек третьего поколения
Катков Е. В., Жидков И. С., Озерова В. В., Трошин П. А. 1406

ГКР-подложки на основе металл-диэлектрических микрорезонаторов
Шестопалова М. С., Сарычев А. К., Иванов А. В., Быков И. В., Смык А. Ф., Шурыгин А. В., Коржов Д. С., Олейников В. А., Мочалов К. Е. 1408

Эффективная температурно-чувствительная ТГц-генерация в структурах на основе сплавов NixCi1-x в парамагнитной и ферромагнитной фазах
Лебедева Е. Д., Авдеев П. Ю., Алферьев А. Л., Караштин Е. А., Пашенькин И. Ю., Сапожников М. В., Буряков А. М. 1410

Прототип источника импульсного питания для низкодобротного винтового ондулятора ТГц-излучателя
Макаренко Ю. А., Крылов А. А., Дмитриев М. С. 1412

Метод исследования процессов накопления и релаксации радиационно-индуцированного заряда в подзатворных оксидах МОП-структур
Земцов А. Э., Петров А. С., Таперо К. И. 1413

Исследование механизма восстановления параметров транзистора ***n***-типа после деградации, вызванной инжекцией горячих носителей, путем подачи смещения на затвор
Исаева Ю. С., Соловьев А. В., Арилин Р. А. 1416

Исследование процессов разложения органо-неорганических гибридных галогенидных перовскитов при облучении низкоэнергетическим электронным пучком
Куланчиков Ю. О., Якимов Е. Е., Вергелес П. С., Якимов Е. Б. 1418

Переходные характеристики и реактивный импеданс кремниевых диодов, облученных высокоэнергетичными ионами
Горбачук Н. И., Поклонский Н. А., Ермакова Е. А., Шпаковский С. В., Скуратов В. А. 1420

Влияние газовой среды, температуры и облучения на электрофизические свойства наноструктурированного TiO_2
Кружалина М. Д., Сорокина Л. И., Якубов А. О., Федянина М. Е., Дубков С. В., Громов Д. Г. 1422

Исследование влияния подслоя титана и длительности финишного отжига на ресурс переключений элемента хранения FeRAM на основе оксида гафния
Прищепчук Г. А., Захаров П. С., Быковский К. С. 1424

Экспериментальное исследование резистивного переключения биомемристора на основе крови
Клюкина Е. В., Ванькаев А. С., Ковешников С. В. 1426

Особенности спектров фотолюминесценции в гетероструктурах со связанными слоями квантовых колец и квантовых ям GaAs/AlGaAs
Романов Н. Р., Васильевский И. С. 1428

Исследование влияния обработки поверхности и наночастиц LSP на характеристики синих микро- и наносветодиодов GaN/InGaN
Алексанян Л. А., Поляков А. Я., Ли И.-Х., Ph.D, Чо Ё.-Х., Скориков М. Л., Якимов Е. Б., Васильев А. А., Романов А. А., Матрос Н. Р., Пиртон С. Дж., Ph.D 1431

Пьезоэлектрическое управление генерацией ТГц-излучения в структуре W/FeGa/Pt на подложке PMN-PT
Авдеев П. Ю., Лебедева Е. Д., Алферьев А. Л., Климов А. А., Караштин Е. А., Гусев Н. С., Сапожников М. В., Буряков А. М. 1435

Двухфункциональный сенсор температуры и света на основе монокристаллического кремния, легированного марганцем
Ибодуллаев Ш. Н., Зикриллаев Н. Ф. 1437

Разработка датчика деформации на основе легированных азотом углеродных нанотрубок
Соболева О. И., Ильин О. И., Ильина М. В. 1439

Импульсное лазерное осаждение тонких пленок оксида ванадия для нейроморфных приложений
Трунов К. Б., Ханас А. Р., Зенкевич А. В., Лебединский Ю. Ю., Завидовский И. А. 1442

1D/0D-гетероструктура ZnO/g—C_3N_4: синтез и сенсорные свойства
Буй К. Д., Налимова С. С. 1444

Сравнительный анализ многочастичных возбуждений в поверхностно-легированных коллоидных нанокристаллах CdSe и CdS
Ипатов А. Н., Куприянов Г. А. 1446

Газочувствительные сенсоры на основе полупроводниковых слоев станната цинка, декорированных серебряными наночастицами
Рыбина А. А., Бузовкин С. С. 1448

Влияние концентрации поверхностных состояний на стойкость мощных МОПТ к электростатическому разряду
Бакеренкова Д. М., Петров А. С. 1450

СЕКЦИЯ № 10 «БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА» 1453

Имплантируемая медицинская электроника: от фундаментальных исследований к технологическому лидерству
Пожар К. В. 1453

Эксплуатация уязвимостей нейроморфных чипов
Тишин А. С. 1455

Система детекции эпизодов глубокого сна и эпилепсии у крыс линии WAG/Rij с использованием ЭКоГ-данных
Ковалёв А. Е., Тарасенко А. В. 1458

Искусственные органы: сделано в России, или Введение в биомедицинскую инженерию искусственных органов
Пьянов И. В. 1460

Технология изготовления фантома церебральных сосудов с аневризмой для исследования характеристик кровотока методами оптической визуализации потока
Горина А. В., Галястов А. А., Ставцев Д. Д., Коновалов А. Н., Гребенев Ф. В., Телышев Д. В. 1462

Исследование и разработка спинтронного сверхчувствительного датчика на основе магнитных туннельных переходов для сканирования магнитных полей мозга
Лобкова М. Д., Скирдков П. Н., Звездин К. А. 1464

Усиление чувствительности инвазивного датчика магнитного поля до фемтопорядков для определения патологий мозга на ранних стадиях
Киктева В. Р., Лобкова М. Д., Кичин Г. А., Скирдков П. Н., Звездин К. А. 1466

Формирование сложных атомно-молекулярных топологий на нано- и микроуровнях на основе углеродных наноматериалов, используемых для формирования биоподобных интерфейсов
Мурашко Д. Т., Курилова У. Е., Суетина И. А., Руссу Л. И., Мезенцева М. В., Герасименко А. Ю. 1468

Нитевидные нанокристаллы кремния для детектирования биологических маркеров здоровья человека: эксперимент и DFT-модель
Кондратьев В. М., Большаков А. Д. 1471

Сухие электроды на основе углеродных наноматериалов для электроэнцефалографии
Куксин А. В., Морозова А. С., Василевская Ю. О., Герасименко А. Ю. 1473

Лазерно-индуцированное восстановление биологических тканей с использованием нанокомпозитных материалов на основе углеродных нанотрубок
Сучкова В. В., Галиченко К. А., Рябкин Д. И., Блинова Е. В., Телышев Д. В., Селищев С. В., Герасименко А. Ю. 1475

Оценка влияния органических поверхностно-активных веществ на гомогенность углеродной дисперсной среды для разработки биосовместимых покрытий в биомедицинской электронике
Попович К. Д., Кузнецова Е. А., Василевский П. Н., Герасименко А. Ю. 1477

Методика создания тонкопленочного нейроимплантата для задач биосенсорики и нейромодуляции
Исаев Н. Р., Юсуповская Е. А., Марков А. Г., Телышев Д. В. 1479

Исследование свойств электропроводящего композиционного гидрогеля для биомедицинской электроники
Оцупко Е. П., Савельев М. С., Герасименко А. Ю. 1481

Автоматизированный стенд для измерения проводимости жидкости с использованием акустоэлектронного датчика на волнах в пластинах
Дацук Е. Р., Горбачев И. А., Смирнов А. В., Кузнецова И. Е. 1482

Закономерности формирования нейроинтенфейсов из наноматериалов и органических материалов для создания пассивных и активных устройств
Герасименко А. Ю. 1485

Состояние исследований в области проектирования и производства нейрочипов
Гончарова А. В. 1487

Разработка нейросетевого алгоритма управления бионическим протезом руки при повышении каналов входных данных
Алямовская А. А., Гончарова А. В. 1489

Разработка алгоритма непрерывного распознавания движений на основе многоканальных данных в системах протезирования верхних конечностей
Павлова Т. Д., Гончарова А. В. 1491

Стимулятор на базе органического полупроводника для восстановления периферических нервов
Юсуповская Е. А., Исаев Н. Р., Марков А. Г., Телышев Д. В. 1493

Сверхчувствительные тонкопленочные сенсоры для носимых и имплантируемых устройств непрерывного мониторинга физиологических сигналов и состояния внутренних органов
Морозова А. С., Герасименко А. Ю. 1495

Влияние корпуса катушки на выходные параметры системы индуктивной передачи энергии к имплантатам
Аубакиров Р. Р., Данилов А. А. 1497

Формирование пространственного профиля лазерного луча в дисперсных средах с углеродными нанотрубками для трехмерной печати биосовместимых композитов
Василевский П. Н., Савельев М. С., Герасименко А. Ю. 1499

Формирование структур на основе коллоидных сверхрешеток для SERS-подложек
Ибрагимова О. М., Панфилова Е. В., Ибрагимов А. Р. 1501

Калибровка проточного счетчика — анализатора субмикронных частиц
Герасименко А. Ю., Паскалов С. И. 1503

Модификация поверхности стимулирующего имплантируемого электрода при помощи наносекундного лазерного излучения
Круковский Н. С., Попович К. Д., Герасименко А. Ю. 1504

Система мониторинга фаз сна на основе анализа электроокулограммы с использованием классификатора XGBoost и характеристик движений глаз
Козырев Г. В., Ефремов И. О. 1506

СЕКЦИЯ № 11 «ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ, ВСТРАИВАЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ И КОНЕЧНЫХ УСТРОЙСТВ» 1508

Исследование эффективности мер защиты аппаратной реализации криптографического алгоритма AES от анализа энергопотребления
Алексеев В. Д., Тишин А. С., Михайлов В. Ю. 1508

Применение подходов непрерывной интеграции и доставки (CI/CD) из методологии DevOps в маршруте разработки PDK
Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С. 1510

Алгоритмы цифровой коррекции ошибок в SAR АЦП
Ямалиев С. И., Лобанков Д. С., Головин Д. О., Двинских П. Д., Громов И. С., Аткин Э. В. 1513

Сложнофункциональный блок однократно программируемой ПЗУ
Головин И. О., Громов И. С., Ямалиев С. И., Лобанков Д. С., Двинских П. Д. 1515

Сложнофункциональный блок POR с функцией BOR
Громов И. С., Юровский В. О., Лобанков Д. С., Ямалиев С. И., Двинских П. Д., Головин И. О. 1517

Разработка и исследование стабильного генератора тактового сигнала с частотой 10 МГц и низким энергопотреблением
Исаченко Д. А., Ермаков И. В. 1519

Маломощный динамический компаратор с полным диапазоном входных сигналов для канальных применений
Лобанков Д. С., Ямалиев С. И., Двинских П. Д., Головин И. О., Громов И. С. 1522

Разработка микросхемы квадратурного энкодера положения
Лоос В. 1524

Источник опорного напряжения для линейного стабилизатора напряжения
Лукьянова Я. А. 1526

Особенности проектирования многоразрядных триггеров для уменьшения потребляемой мощности в базисе отечественной полупроводниковой технологии с проектными нормами 250 нм
Ильин С. А., Ласточкин О. В., Харламова М. В. 1528

Подход к разработке библиотек стандартных цифровых элементов для проектирования энергоэффективных ИС с использованием методологии Logical Effort
Ильин С. А., Кобышев А. Е., Ласточкин О. В. 1530

Разработка отечественного импортозамещающего программного средства LVS-верификации топологии интегральных схем
Живчикова Ю. А., Любимцев Д. О., Смирнов С. А., Старостин Н. В. 1532

Алгоритм размещения СБИС на ПЛИС на основе метода группировки путей с учетом архитектурных особенностей
Шокарев Д. Б., Чочаев Р. Ж., Железников Д. А. 1534

Методика проверки аутентичности микросхем на основе анализа динамического энергопотребления
Рогачев В. А., Горбокононенко П. А., Гераськин А. А., Певцов Е. Ф. 1536

Способ повышения точности моделирования специализированных вычислений с плавающей запятой в маршруте цифрового проектирования
Кузнецова Е. Ю., Гаращенко А. В., Крюков П. И. 1537

Методика контроля воспроизводимости via/contact-структур в аналого-цифровом маршруте при разработке комплектов средств проектирования (КСП)
Девятков В. Ю., Надин А. С., Загидуллина О. Р. 1540

Разработка микроэлектромеханических логических вентилей
Соловьев А. А., Певцов Е. Ф., Колчужин В. А. 1542

Разработка каскадного кода коррекции ошибок в матрицах энергонезависимой памяти ReRAM
Петрова С. И., Теплов Г. С. 1544

Способы реализации тактильной обратной связи между оператором и робототехническим комплексом
Гладченко А. А., Тельминов О. А. 1546

Исследование топологической структуры локальных тактовых сеток при проектировании системы синхронизации тактового сигнала в интегральных микросхемах
Кузьмин П. А., Коршунов А. В. 1548

Высокоуровневое моделирование перспективных топологий для сетей на кристалле
Мирошниченко Л. И., Американов А. А., Ромашихин М. Ю. 1550

Разработка реконфигурируемого программно-аппаратного комплекса для работы с отладочными платами
Американов А. А., Фролов К. Д. 1552

СЕКЦИЯ № 12 «РАДИОТЕХНИКА И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» 1554

Методика оценки распознаваемости расстояния Хэмминга при анализе утечки информации по боковым каналам цепей электропитания интегральных микросхем
Михайлов В. Ю., Тишин А. С., Алексеев В. Д. 1554

Мягкий хэндовер в спутниковых терминалах на базе приемо-передающей АФАР с магнитоэлектрическим излучателем
Бурцев В. Д., Антошкин Г. В., Филонов Д. С. 1556

Самоорганизация как способ коррекции навигационного комплекса летательного аппарата в автономном режиме
Суркова А. Д. 1558

Автоматизированная система управления тестированием бортовой аппаратуры на основе распределенной вычислительной сети
Голев А. Д., Былинкин И. К. 1560

Современные методы проектирования компактной и легкой бортовой радиоэлектронной аппаратуры
Коротков М. Д., Тимошенков С. П. 1562

Обзор требований архитектуры полетного контроллера для анализа возможности применения микроконтроллера MIK32 «АМУР»
Дубленский Д. С., Канунников Е. И., Махмудов Т. Н., Попов Д. А., Семион А. А. 1564

Возможность создания комплекса для проведения испытаний интегральных микросхем с использованием программно-определяемого радио
Голан А. В., Коротков К. С., Строганова Е. В., Сердюков В. В., Пузановский К. В., Никитин Д. Д. 1567

Структура информационно-аналитической системы обеспечения надежности электроники
Буцкий Д. О., Зубрильцев Е. Е., Цветков В. Э. 1569

Микропроцессорный блок виброжилета для людей со сниженной остротой зрения
Зотов Ф. А., Москаленко О. В. 1571

СЕКЦИЯ № 13 «МОЛОДЕЖНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ В ОБЛАСТИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ» 1573

Результаты и планы лаборатории мемристорной наноэлектроники ННГУ
Михайлов А. Н. 1573

Работы лаборатории мемристорных материалов ТюмГУ
Бобылев А. Н. 1574

Машинное обучение в технологии тонких сегнетоэлектрических пленок
Сапего Е. Н., Закасовский И. Н., Зайцев О. Е. 1576

Наводораживание графена в переменном электрическом поле для создания латеральных гетероструктур графен/графан
Катин К. П., Подливаев А. В. 1578

Разработка конструкции транзисторных гетероструктур на основе нитрида галлия на кремниевых подложках для создания высоковольтных транзисторов
Царик К. А. 1580

Создание стенда для испытаний ионных источников в ИЯФ СО РАН
Бруль А. В., Вахрушев Р. В., Девятайкина Т. А., Константинов С. Г., Кузьмин Е. И., Куркучеков В. В., Орешонок В. В., Павлюченко В. А., Рыбицкая Т. В., Рябченко К. К., Скляров В. Ф., Сорокин А. В., Старостенко А. А., Чуркин И. Н. 1582

Опыт реализации проекта молодежной лаборатории фотонных интегральных схем ТУСУР
Перин А. С. 1584

Нитевидные нанокристаллы на основе висмутсодержащих твердых растворов InAsBi на кремнии: процессы формирования и функциональные свойства
Федоров В. В., Кавеев А. К., Минив Д. В., Федина С. В., Голтаев А. С., Можаров А. М., Павлов А. В., Мухин И. С. 1587

Разработка технологий получения полимерных сегнетоэлектрических материалов на основе поливинилиденфторида
Макеев М. О., Осипков А. С., Бурьянская Е. Л., Моисеев К. М., Михалев П. А., Кондрашов С. В. 1589

Применение методик MPW и MPC в реализации аналоговых микросхем на основе базовых матричных кристаллов
Попов А. Э., Прокопенко Н. Н., Кузнецов Д. В., Дворников О. В. 1591

Базовый кристалл для изготовления комплекта аналоговых микросхем с входными полевыми транзисторами
Дворников О. В., Чеховский В. А., Попов А. Э., Кузнецов Д. В. 1593

ПРЕДКОНФЕРЕНЦИЯ № 2 «ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА И РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ» 1595

Исследование и разработка радиосистемы с методом разделения каналов на базе вихревых волн
Айрапетян А. А., Азаров М. В., Мелёшин Ю. М. 1595

Облик САПР Engee РТС для моделирования радиотехнических систем
Балакин Д. А., Стельмах А. П., Тильки И. Г. 1597

Особенности применения переходных отверстий в молд-компаунде при проектировании электронной компонентной базы микроэлектроники
Семенов С. П., Батин С. А., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П. 1599

Влияние конструкции и материала пресс-формы на процесс корпусирования микросхем методом трансферного прессования посредством эпоксидного монолитизирующего компаунда
Рабцевич В. А., Беляков И. А., Вертянов Д. В., Разживалов П. Н., Тимошенков С. П. 1600

Методы лазерной микрообработки эпоксидного монолитизирующего компаунда для создания отверстий в компаунде при изготовлении трехмерных микросборок с высокой плотностью коммутации
Беляков И. А., Кочергин М. Д., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П. 1602

Практическое внедрение ИИ для автоматизации проектирования СВЧ-трактов от документации до расчета
Будяков А. С. 1604

Исследование деформированного состояния корпуса РЭА, изготовленного методом селективного лазерного плавления SLM с использованием порошка РС-553 на основе алюминиевого сплава Al-Mg-Sc
Волков С. В., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П. 1606

Разработка инклинометра повышенной точности на основе инерциальных МЭМС
Галкин А. А., Соломкина Н. А., Михеев А. В., Тимошенков А. С., Еркин П. В., Захаров В. П., Рубис Л. Д. 1608

Реконструкция поляризационных квантовых состояний с учетом конечной ширины спектра и немарковости квантовыхопераций
Голышев И. К., Богданова Н. А., Богданов Ю. И., Лукичев В. Ф. 1611

Прототипирование программно-конфигурируемых радиосистем до 6 ГГц на основе отечественной ЭКБ СВЧ
Будяков А. С., Григорьев О. В., Савченко Е. М., Тимошенко А. Г. 1613

Системный подход к разработке ЭКБ и приборов космических аппаратов
Ахметов Р. Н., Баранов Д. А., Гришин В. Ю. 1617

Конфигурируемая архитектура систолического массива для ускорителя нейронных сетей
Гуржов Н. А. 1619

Антенны с цифровым формированием луча — результат концентрации алгоритмов обработки сигналов и микроэлектронных технологий
Джиган В. И. 1621

Томография оптических квантовых состояний с учетом неидеальностей детекторов, различающих число фотонов
Дмитриев И. А., Голышев И. К., Богданова Н. А., Богданов Ю. И., Лукичев В. Ф. 1623

Анализ топологии *n-p-n*-транзисторов выходных каскадов
Грушин А. И., Дюканов П. А., Ксенофонтов Д. Л. 1625

Разработка комплекса модулей САПР для отладки, анализа и оптимизации цифровых СБИС на вентильном уровне
Заплетина М. А., Чочаев Р. Ж. 1627

Разработка интегрированной системы навигации для беспилотного транспортного средства
Захаров В. П., Моторин А. В., Рубис Л. Д. 1629

Алгоритм компенсации колебаний и ошибок позиционирования объектного стола
Климушкин Д. А., Астафьев Д. В., Митрофанов С. П., Петров О. В. 1632

Анализ материалов фотоники для разработки оптических устройств измерения микроперемещений
Кобзев В. М. 1633

Томография кудитов с учетом неидеальности измерений
Кокшаров К. Б., Богданова Н. А., Богданов Ю. И., Лукичёв В. Ф. 1634

Анализ вариантов реализации автоматизации отечественного маршрута проектирования цифровых СБИС на основе workflow-подхода
Переверзев А. Л., Коршунов А. В., Седов А. Ю., Фаворов М. Ю. 1636

Разработка и исследование МЭМС-акселерометров с ЧЭ дифференциального типа
Анчутин С. А., Кочурина Е. С., Зарянкин Н. М., Виноградов А. И., Дернов И. С., Тимошенков А. С., Усов М. И., Баюнов А. Г. 1638

Разработка программы приборно-технологического моделирования кремниевых интегральных схем
Красюков А. Ю. 1639

Разработка эталонного атомно-силового микроскопа
Быков В. А., Матюшин Т. Г. 1641

Анализ и моделирование причин возникновения LER-эффекта и методы его снижения при создании интегральных схем
Кульпинов М. С., Путря М. Г., Лосева В. В., Балашов А. Г. 1643

Определение наиболее подходящей технологии группового монтажа шариков припоя в целях отработки на стендовом оборудовании
Кухарь М. В., Разживалов П. Н. 1644

Подход «мастер — клиент» к использованию распределенных вычислений при характеризации библиотек стандартных ячеек
Макаров Г. Н., Сорокин Т. М. 1646

Мощный высоковольтный транзистор со статической индукцией на Si, превосходящий по основным параметрам все известные ключевые полупроводниковые приборы
Максименко Ю. Н. 1649

Технологическое оборудование: лямбда-резонатор — уникальный источник объемной плазмы
Малинов А. Ю., Виноградов Г. К. 1651

Анализ факторов, влияющих на достоверность радиолокационных измерений в ближней зоне
Марков А. С. 1653

Автоматизированная генерация топологии полупроводниковых приборов на основе результатов приборно-технологического моделирования
Михайлова Е. А., Слезкин В. В., Сотников М. А., Калашников В. С., Семенов М. Ю. 1655

Функционально ориентированные фотонные интегральные схемы бортового применения
Тимошенков С. П., Новиков В. М., Гончаров А. А. 1657

Способы аппаратной реализации функции активации в нейронных сетях
Протасова Е. А. 1659

Интеграция и калибровка инерциальных сенсоров для применения в системах навигации и ориентации
Савчиц А. С., Якунин А. Н. 1661

Прогнозирование показателей безотказности интегральных микросхем на основе параметров надежности используемой элементной базы
Соловьев А. В., Селецкий А. В., Воеводин А. В. 1662

Изготовление волноводов на акриловых жидких фотополимеризующихся композициях
Соловьев В. С., Налимов А. Г., Тимошенков С. П., Тимошенков А. С. 1664

Моделирование формообразования припойных шариковых выводов на контактных площадках методом лазерного спекания и оценка их надежности
Соловьев И. А., Вертянов Д. В., Титов А. Ю., Коробова Н. Е. 1666

Разработка методики герметизации гироскопических блоков на базе аналоговых МЭМС-датчиков в BGA-корпусах
Галкин А. А., Соломкина Н. А., Каменский А. М., Тимошенков А. С., Еркин П. В., Захаров В. П., Рубис Л. Д. 1668

Предложения по построению унифицированной АСУ СТО электронного машиностроения
Переверзев А. Л., Петров В. Ф., Симонов С. Б., Терентьев А. И. 1672

Результаты разработки широкополосного усилителя СВЧ-диапазона с внешним смещением и повышенной энергоэффективностью
Терехин В. В. 1674

Разработка фотонной интегральной микросхемы по гибридной технологии для обработки оптических сигналов
Тимошенков А. С., Соловьев В. С., Штерн М. Ю. 1676

Методика параметрического контроля синхронизирующих тайм-кодов SpaceWire
Трещеткин А. Ю. 1677

Опыт применения открытой библиотеки градиентного бустинга CatBoost на этапе трассировки в рамках физического синтеза на основе ПЛИС
Чистяков А. Ю. 1679

Разработка программного комплекса для автоматизации проектирования цифровых схем в базисе программируемых логических и гетерогенных реконфигурируемых интегральных схем
Чочаев Р. Ж., Железников Д. А., Заплетина М. А. 1681

Алгоритм уточнения калибровочных параметров микроэлектромеханической системы инерциальной навигации
Шипатов Е. А., Шипатов А. В. 1683

Разработка 8-битного цифроаналогового преобразователя для нейростимулятора на отечественной КМОП-технологии 180 нм
Калёнов А. Д., Янова П. А. 1684

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы — российская технология на глобальном рынке

Гольцман Г. Н.
[1] *Российский квантовый центр*
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
[2] *Московский педагогический государственный университет*
119435, г. Москва, ул. Малая Пироговская, 1, стр. 1
[3] *ООО «Сконтел»*
115114, г. Москва, Дербеневская наб, 11, пом. 94/1

Фундаментальные исследования в МПГУ в области сверхпроводимости (80-е годы) привели к разработке быстрых болометров (Hot-Electron Bolometers, HEB) и терагерцевых смесителей (HEB mixers). Применение последних на высокогорных радиоастрономических обсерваториях сопровождалось затем космической приемкой в Европейском Космическом Агентстве и 4-летней успешной работой HEB mixer в составе инструмента HIFI (канал 1,4–1,9 ТГц) космической обсерватории Herschel. Сейчас компания ООО «Сконтел» единственный в мире производитель таких приборов.

Те же исследования привели в 2001 году к публикации сверхпроводниковых однофотонных детекторов (SSPD) и с 2005 года ООО «Сконтел» производит и продает на глобальном рынке многоканальные однофотонные системы. SSPD по всем характеристикам превосходит все другие технологии счета фотонов и 10 лет ООО «Сконтел» был монополистом на глобальном рынке этой продукции. С 2015 года постепенно в мире появилось пять конкурирующих компаний, рынок SSPD быстро растет и к настоящему времени достиг 1 млрд долларов в год. Это приборы для научных исследований, медицинская диагностика, все дальне-пролетные и космические линии квантовой связи, квантовые компьютеры на фотонах, различные квантовые сенсоры и т. д. С 2023 года ООО «Сконтел» находится под санкциями, что оказалось мощным толчком к росту числа покупателей, это работает как знак качества. В 2019 году Минпромторг выделил 0,5 млрд рублей на ОКР «Однофотонная видеокамера видимого и ИК-диапазонов», ОКР успешно завершен к 2024 году и этот уникальный продукт находится на пути к производству. Самые чувствительные в мире видеокамеры не имеют однофотонной чувствительности, а в ИК-диапазоне ситуация существенно хуже. Тем самым такой продукт на рынке пока отсутствует, хотя многие покупатели однопиксельных многоканальных однофотонных систем ждут его появления, особенно в медицинской диагностике. Кроме того, производство однофотонных видеокамер позволит реализовать лидарные системы, способные обнаруживать малые неметаллические движущиеся предметы на расстоянии в десятки километров и сквозь рассеивающие среды, отличать от космического мусора малые спутники на расстоянии в 1000 км и т. д.

УДК 621.3.049

Помехоустойчивость локальной системы навигации в проекте «КОНСУЛ»

Корнеев И., к. т. н., Кондрашов З., Корнеев А.
АО «НИИМА «Прогресс»
125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54
i.korneev@i-progress.tech, z.kondrashov@i-progress.tech, a.korneev@i-progress.tech

Рассмотрено обеспечение навигации абонента системы «КОНСУЛ», удаленного от радионавигационных опорных станций в пределах прямой радиовидимости, при воздействии источника искусственных помех. Выведена формула мощности источника помех, способных подавить сигнал, в зависимости от мощности передатчика опорной станции, расстояний и коэффициентов усиления антенн. Приведены результаты расчетов, выполненных разработанной программой-калькулятором. Рассмотрено обеспечение навигации судов в Морском канале Обской губы.

Локальные системы навигации (ЛСН) дополняют системы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в случаях невозможности использования последних из-за поставленных помех или отсутствия сигнала ГНСС в точке приема.

ЛСН, разрабатываемая в НИИМА «Прогресс», — составная часть проекта «КОНСУЛ».

ЛСН представляет собой помехоустойчивую высокоточную систему, решающую задачи как навигации, так и мониторинга с использованием оригинального алгоритма корреляционной обработки кода сигнала в согласованном фильтре. С ее использованием обеспечивается навигация речных и морских судов в узких местах, беспилотных наземных транспортных средств, а также беспилотных летательных аппаратов, используемых для доставки грузов, мониторинга экологической обстановки, геодезических работ в условиях воздействия помех [1].

В состав системы входит сеть радионавигационных опорных станций РОС, абонентские терминалы АТ и аппартано-программный комплекс (АПК).

В системе используется шумоподобный сигнал (псевдослучайные последовательности — ПСП) с базой 1024 (набор из 1000 ПСП), с частотой следования символов 1 МГц, с модуляцией BPSK, с временным и частотным разделением каналов. Система работает в запросном и беззапросном режимах [2]. Опытные образцы системы настроены на диапазон частот 450–470 МГц, но диапазон может меняться от 100 МГц до 2,5 ГГц.

Получаем оценку инструментальной ошибки позиционирования в ЛСН (без учета внешних влияний и геометрии):

$$\textbf{Бп} = \frac{c}{f_{\text{симв.}}\text{K1}\cdot\text{K2}\cdot\text{K3}\cdot\text{K4}} = \frac{2{,}997\cdot10^{8}\cdot1\cdot10^{-6}}{20\cdot10\cdot3\cdot5} = \textbf{0,1 м.} \qquad \textbf{(1)}$$

Оценка помехоустойчивости ЛСН проекта «КОНСУЛ»

Например, радионавигационная опорная станция (РОС), абонент (АТ) и источник помех (ИП) белый шум расположены в зоне прямой радиовидимости. Абонент находится на расстоянии 100 км от РОС и в 10 км от источника помех на летательном

аппарате на высоте $h_1 = 2000$ м. Антенны РОС и источника помех подняты на высоту $h_2 = 30$ м. Прямая радиовидимость РОС-АТ:

$$D = 4{,}12 \cdot (\sqrt{h1} + \sqrt{h2}) = 4{,}12 \cdot (\sqrt{2000} + \sqrt{30}) = 206 \text{ км}. \quad (2)$$

По рекомендациям Международного союза электросвязи ITU-R P.525-2 [4, 5] ослабление сигнала в свободном пространстве вычисляется по формуле

$$L_{bf} = 32{,}4 + 20\lg(f) + 20\lg(d) - G - K, \quad (3)$$

где f — частота (МГц), d — расстояние (км), G — коэффициент усиления в направленных антеннах приемников и передатчиков (дБ), имеющий следующие составляющие: $G_{рос}$ — коэффициент усиления антенны передатчика опорной станции РОС (дБ); $G_{ат}$ — коэффициент усиления антенны приемника абонентского терминала АТ (дБ); $G_{п}$ — коэффициент усиления антенны источника помехи ИП (дБ); K — коэффициент усиления в тракте приемника от антенны до согласованного фильтра СФ (дБ). Этот коэффициент обобщает усиление элементов приемного тракта АТ, таких как МШУ, смеситель СМ, аналоговый ФНЧ, АЦП, умножитель УМ, цифровой фильтр ЦФ.

Расширение спектра сигналов с использованием ПСП позволяет получить дополнительный выигрыш при обработке [6]. Суть метода синхронного накопления заключается в суммировании отсчетов смеси сигнала и помехи. Причем метод многократных отсчетов позволяет увеличить отношение мощности сигнал/шум в N раз по сравнению с принятием решения по одному отсчету, а мощность помехи — только в N раз ($P_{п\Sigma} = N\sigma^2$), т. к. отсчеты помехи являются некоррелированными.

При мощности сигнала на входе согласованного фильтра приемника $P_{sпрм}$ для превышения порога T мощность помехи в виде белого шума на входе согласованного фильтра $P_{nпрм}$ вычисляется по формуле (4)

$$P_{nпрм} = P_{sпрм} \cdot N \cdot T. \quad (4)$$

В общем случае инженерная формула (5), связывающая мощности передатчиков сигнала и источника помех, учитывающая расстояния и характеристики антенн РОС, АТ, ИП при обеспечении навигации в свободном пространстве в беззапросном режиме, выглядит так:

$$\mathbf{P_{ип} = P_{sпер} \cdot N \cdot T \cdot 10^{-A/10}}, \quad (5)$$

где $\mathbf{A = 20\lg(d_s) - 20\lg(d_п) - G_{рос} - G_{ат} + G_п}$.

Здесь $P_{ип}$ — мощность источника помехи в виде белого шума (Вт), $P_{sпер}$ — мощность на выходе передатчика сигнала опорной станции (Вт), N — база сигнала, T — порог функции корреляции на выходе согласованного фильтра, A — разность ослабления сигнала и помехи в свободном пространстве (дБ), d_s — расстояние от опорной станции до абонента (км), $d_п$ — расстояние от источника помех до абонента (км), $G_{рос}$, $G_{ат}$, $G_п$ — коэффициенты усиления антенн опорной станции, абонента, источника помех (дБ) соответственно.

В НИИМА «Прогресс» разработано приложение на ПЭВМ (программа-калькулятор v2.3.0 в компиляторе Qt Creator на языке Си), выполняющее вычисления по представленной формуле (5).

Работа программы-калькулятора заключается в расчете минимальной мощности передатчика сигнала при представленной мощности источника помехи.

Также возможно решить обратную задачу, переключив кнопку-активатор на необходимую мощность $P_{ип}$ — нахождение мощности источника помехи при известной мощности передатчика сигнала.

Обеспечение навигации газоналивных танкеров в Морском канале Обской губы в районе порта Сабетта

Задача обеспечения навигации в Морском канале Обской губы длиной 50 км очень актуальна: канал неглубокий (14 м), узкий (295 м). Если танкер сядет на мель в условиях постановки искусственных помех сигналам ГНСС, это будет катастрофа. Предлагается развертывание ЛСН путем установки двух вышек РОС на берегу Обской губы.

Зона действия опорной станции ЛСН определяется радиовидимостью АТ-РОС.

Высота вышек ЛСН — 80 м.

Высота антенны на танкере (лоцманский комплект) — 20 м.

Прямая радиовидимость РОС-АТ:

$$D = 4{,}12 \cdot (\sqrt{h1} + \sqrt{h2}) = 4{,}12 \cdot (\sqrt{80} + \sqrt{20}) = 55 \text{ км}.$$

Это расстояние (радиус окружности 55 км) характерно для обеспечения навигации морских и наземных объектов.

Морской канал находится в зоне действия двух вышек РОС1 и РОС2, поэтому для навигации используется запросный метод и дальномерный режим. Для беззапросного режима требуются три РОС, при в этом районе придется строить еще одну вышку высотой 80 м. Кроме этого, преимущество запросного метода заключается в том, что источники питания на берегу работают длительное время в необслуживаемом режиме и сигнал РОС выдается только в отдельные интервалы времени по запросу. Количество абонентов небольшое (несколько танкеров). До начала строительства дополнительной вышки можно развернуть ЛСН и провести испытания системы с использованием вышек РОС1 и РОС2. Для обеспечения запросного режима в лоцманский комплект, используемый на танкере, входит модуль РОС с передатчиком. Мощность сигнала передатчика РОС — 10 Вт. Точность местоопределения **(СКО) б = 5 м.**

Решение задачи — использование ЛСН в запросном режиме, как показано на рис. 1.

Рис. 1. Развертывание ЛСН для навигации в Морском канале Обской губы

Для обеспечения запросного режима на берегу устанавливаются две вышки РОС1 и РОС2, а в лоцманский комплект, используемый на танкере, поставляется модуль РОС с передатчиком. Мощность сигнала передатчика РОС — 10 Вт.

Танкер находится на пересечении двух полуокружностей с центрами в точках РОС1 и РОС2.

Точность позиционирования СКО = 5 м.

Выводы

1. Предложенная формула (5), связывающая мощности передатчиков сигнала и помехи, и программа-калькулятор на ее основе очень удобны для оценки влияния основных факторов на помехоустойчивость при развертывании ЛСН.
2. Очень важно влияние направленности антенн опорной станции и приемника абонента (соизмеримо с влиянием расстояний).
3. В зоне действия ЛСН 10×10 км вполне достаточна мощность передатчика РОС до 5 Вт.
4. Разница в устойчивости к заградительным помехам ЛСН и ГНСС — 33 дБ.
5. Полученные результаты могут быть учтены пря анализе помехоустойчивости других систем связи и навигации, использующих псевдослучайные шумоподобные сигналы.

Литература

1. Корнеев И. Л., Кузнецов А. С., Королев В. С. Режимы работы локальной системы навигации в проекте КОНСУЛ. Потребители системы КОНСУЛ // Наноиндустрия, 2021. Спецвыпуск (7s). — Т. 14 (107). — С. 57–59.
2. Корнеев И. Л. Принципы организации локальной системы навигации проекта «КОНСУЛ». Расчет инструментальной ошибки позиционирования и синхронизации ЛСН. Обеспечение помехоустойчивости системы // Наноиндустрия, 2023. Спецвыпуск (9s). — Т. 16 (119).— С. 19–24.
3. URL: https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/radar-horizon.
4. Рекомендация МСЭ-R P.525-4. — 6 с.
5. URL: https://newpribor.ru/kalkulyator_poter_puti_v_svobodnom_prostranstve.html.
6. Диксон Р. К. Широкополосные системы. Под ред. В. И. Журавлёва. — М.: Связь, 1979.

УДК 621.396.621

Семейство навигационных модулей NaviMatrix

Чижиков Д. В., Бабенко С. М., Харченко Д. С., Агапов А. Ю.
АО НТЦ «Модуль»
125190, г. Москва, 4-я ул. 8 марта, 3
d.chizhikov@module.ru, s.babenko@module.ru, d.kharchenko@module.ru, a.agapov@module.ru

Разработано семейство навигационных модулей NaviMatrix на основе отечественных навигационных процессоров К1879ВЯ1Я (NM ADC-A) и К1888ВС018 (NM Navi-A) производства АО НТЦ «Модуль». Приведены характеристики навигационных модулей семейства NaviMatrix и краткое описание протокола информационного взаимодействия. Показаны варианты применения навигационных модулей семейства NaviMatrix в составе различных объектов гражданской инфраструктуры.
Ключевые слова: GNSS; глобальные навигационные спутниковые системы; спутниковая навигация; навигационные модули; семейство NaviMatrix.

В настоящее время особенно острым является вопрос обеспечения суверенности российского рынка навигационного оборудования гражданского назначения в условиях внешнеполитической нестабильности и постоянного воздействия западных санкций. Наиболее перспективным и стабильным путем развития сферы гражданской спутниковой навигации в РФ является поддержка и субсидирование отечественных производителей навигационной аппаратуры.

Одной из перспективных компаний — производителей отечественной навигационной аппаратуры является АО НТЦ «Модуль». АО НТЦ «Модуль» были разработаны навигационные процессоры К1879ВЯ1Я (NM ADC-A) [1] и К1888ВС018 (NM Navi-A) [2], включающие в себя 32-разрядный RISC-процессор ARM с плавающей точкой, а также два 64-разрядных DSP-процессора NeuroMatrix® NMC3 собственной разработки.

На базе навигационных процессоров К1879ВЯ1Я (NM ADC-A) и К1888ВС018 (NM Navi-A) АО НТЦ «Модуль» было разработано семейство отечественных навигационных модулей NaviMatrix, которое на текущий момент включает в себя:

- модуль МС149.04 ЮФКВ.469355.010 — одночастотный навигационный модуль с поддержкой сигналов ГЛОНАСС (L1OF CT) и GPS (L1OC C/A), предназначенный для поверхностного монтажа на плату;
- модуль МС149.05 ЮФКВ.469355.011 — одночастотный навигационный модуль с поддержкой сигналов ГЛОНАСС (L1OF CT) и GPS (L1OC C/A), выполненный в форм-факторе M.2 Type 3060 key B;
- модуль МС149.06 ЮФКВ.469355.012 — двухчастотный навигационный модуль с поддержкой сигналов ГЛОНАСС (L1OF CT, L2OF CT) и GPS (L1OC C/A, L2C), предназначенный для поверхностного монтажа на плату;
- модуль МС149.07 ЮФКВ.469355.013 — трехчастотный навигационный модуль с поддержкой сигналов ГЛОНАСС (L1OF CT, L2OF CT, L3OC) и GPS (L1OC C/A, L2C, L5), предназначенный для поверхностного монтажа на плату;

- NaviMatrix Evaluation Kit ЮФКВ.469335.009 — отладочный комплект навигационных модулей семейства NaviMatrix, предназначенный для оценки их возможностей и технических характеристик.

Актуальность разработок обусловлена государственной политикой импортозамещения и необходимостью увеличения доли отечественной продукции на российском рынке навигационного оборудования гражданского назначения.

В рамках работ по созданию семейства навигационных модулей NaviMatrix:

- изготовлены опытные образцы модулей МС149.04 и МС149.05 в количестве 20 штук для каждого типа;
- проведена разработка и отладка алгоритмов и встроенного программного обеспечения, обеспечивающих прием, обработку и слежение за навигационными сигналами для применения в коммерческой аппаратуре различного назначения, в частности в целях синхронизации времени;
- проведены исследования в части оценки достижимости модулями заявленных технических характеристик;
- изготовлена технологическая оснастка для работы с навигационными модулями семейства NaviMatrix.

Литература

1. АО НТЦ «Модуль». Микросхема интегральная 1879ВЯ1Я. Руководство по эксплуатации.
2. АО НТЦ «Модуль». Микросхема интегральная К1888ВС018. Руководство по эксплуатации.

УДК 621.391.26

Повышение помехоустойчивости радионавигационных систем методами пространственной обработки сигналов

Глушанков Е. И., Кирик Д. И., Горобцов И. А.
АО «НИИМА «Прогресс»
125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54

Рассматриваются методы повышения помехоустойчивости радионавигационных систем, в которых применяются многоэлементные адаптивные антенные решетки. В таких системах методы повышения помехоустойчивости включают в себя использование алгоритмов коррекции ошибок, разработку эффективных методов модуляции сигналов, а также применение средств фильтрации и усиления сигналов. Повышение помехоустойчивости систем может быть достигнуто несколькими способами. Суть первого метода состоит в применении пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС) при условии, что расстояние между излучающими элементами антенной решетки приравнивается к половине длины волны принимаемого сигнала. Суть второго метода заключается в применении алгоритмов пространственно-разнесенного приема (ПРП), когда расстояние между приемниками больше длины волны принимаемого сигнала. Проведен анализ помехоустойчивости систем с применением ПВОС, ПРП и их совместного применения в составе одной адаптивной антенной решетки.

Ключевые слова: помехоустойчивость; адаптивные антенные решетки; пространственно-временная обработка сигналов; пространственно-разнесенный прием; энергетическая эффективность.

Будем исследовать 16-элементную приемную антенную решетку с расстоянием между излучающими элементами, равным половине длины волны принимаемого сигнала. Конструкция антенной решетки в данном случае не важна, поскольку важным параметром является именно расстояние между излучающими элементами. Таким образом, представленные методы применимы как к коллинеарным решеткам, так и к круговым и прочим. Оценку помехоустойчивости целесообразно проводить по энергетическим показателям, а именно по значениям отношения мощности полезных сигналов к мощности помех и шумов (ОСПШ). Вследствие ухудшения электромагнитной обстановки необходима разработка новых методов обработки сигналов, повышающих помехоустойчивость радионавигационных систем. Цель работы — повышение энергетической эффективности радионавигационных систем методами пространственной обработки сигналов.

Рассмотрены три метода повышения энергетической эффективности. Суть первого метода состоит в корреляционном анализе принятых сигналов, с помощью которого определяется матрица весовых коэффициентов [1]. На ее основе вычисляется ОСПШ и проводится оценка вероятности битовой ошибки в приеме навигационного сообщения, которая сравнивается с требуемым значением.

Второй метод состоит в применении пространственно-разнесенного приема, когда на все антенные элементы поступают одинаковые информационные сигналы, но ввиду различных путей распространения их энергетические параметры различны [2], а помеховые сигналы некоррелированы между собой. Также оценивается

ОСПШ принятых сигналов и на основе наилучшего значения определяется вероятность битовой ошибки.

Третий метод совмещает в себе оба описанных выше способа. Для применения ПРП выбирается несколько излучающих элементов антенной решетки, расстояние между которыми больше длины волны. После обработки проводится их совместная оценка, на основе которой определяется вероятность битовой ошибки [3].

Показана эффективность применения каждого из предложенных методов. Предложена методика проведения совместной оценки сигналов после их обработки с помощью ПВОС и ПРП.

Литература

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1986. — 448 с.
2. Флаксман А.Г. Адаптивная пространственная обработка сигналов в многоканальных информационных системах: дис. ... доктор техн. наук: 01.04.03 / Флаксман Александр Григорьевич. — Нижний Новгород, 2004. — 306 с.
3. Кловский Д.Д., Конторович В.Я., Широков С.М. Модели непрерывных каналов связи на основе стохастических дифференциальных уравнений / Под ред. Д.Д. Кловского. — М.: Радио и связь, 1984. — 248 с.

УДК 627.712.63

Обзор решений беспроводной связи и навигации для применения в робототехнике и беспилотных транспортных средствах (ТС)

Чикваркин И. Б.
АО «НИИМА «Прогресс»
125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54
info@i-progress.tech

Приведены описание и состав навигационных, связных и навигационно-связных модулей, возможных для применения в робототехнике и для беспилотных ТС. Отражены вопросы развития модулей навигации и связи, в том числе и сотовой связи. Отражен вопрос о детектировании внешних помех на модулях ГНСС и GSM. Рассмотрены вопросы сравнения модулей LoRa и УКВ. Затронуты вопросы комбинации модулей и систем для применения в робототехнике и сельскохозяйственной технике.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС); модули связи GSM; модули связи LTE; модули навигации; LoRa; УКВ; аппаратура спутниковой навигации; RTK; PPP; RFID; IMU.

В статье рассматриваются базовые компоненты, применяемые для ориентирования и управления робототехническими и беспилотными транспортными средствами. В докладе обозначена проблема, с которой сталкиваются разработчики автономных систем в части навигации и связи, затрагиваются вопросы спуффинга и джамминга сигналов. Озвучена проблематика выбора и использования различных стандартов связи, в том числе и LTE. Приведены примеры сравнения некоторых модулей связи.

Робототехнические комплексы и автономная техника в своем составе имеют базовые компоненты, взаимодействие между которыми позволит получить качественный, надежный и безопасный автономный комплекс управления. Чаще всего используют следующие базовые компоненты:

- ГНСС — точное позиционирование,
- IMU — стабилизация и ориентация,
- Wi-Fi/4G — управление и передача данных,
- LoRa/УКВ — связь и передача данных на больших площадях,
- GSM — удаленная связь и мониторинг,
- лидары — построение карты, избежание столкновений.

Больше внимания уделяется вопросам навигации от различных спутниковых группировок: GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), Galileo (Европа), BeiDou (Китай), а также двум технологиям: RTK (Real-Time Kinematic), PPP (Precise Point Positioning).

В докладе говорится про современные модули радиосвязи, которые можно разделить на несколько различных групп, видов или типов. Будем рассматривать виды и типы связи, которые применимы для робототехники и автономных транспортных средств. Есть связь ближнего действия, среднего и дальнего. К дальнему действию можно отнести спутниковую связь и сотовую связь (2G, 3G, 4G/LTE и 5G). К среднему действию чаще всего относят УКВ-радиостанции и модули LoRaWAN

(SigFox). Для ближнего действия будем рассматривать модули Wi-Fi, Bluetooth, RFID (NFC).

Чаще всего в робототехнике и в автономных транспортных средствах применяются модули сотовой связи. В стандарте GSM было несколько поколений.

Дальнейшее развитие модулей в части NB-IoT, Wi-Fi и BT последних поколений, а также взаимодействие аппаратуры между собой (V2X/C-V2X) становится одной из передовых задач нашего времени. Передача большого количества данных влечет за собой построение инфраструктуры частных сетей 5G, а впоследствии — абонентских терминалов и модулей на их основе.

В автономных транспортных средствах и робототехнике, несомненно, происходит применение и комбинация различных модулей связи и навигации. Важно получить такие технические решения, которые обеспечат точное позиционирование и надежную связь, устойчивую к внешним воздействиям.

Литература

1. Чжан Ю., Ван Л. и Лю Х. Глубокая визуальная навигация для сельскохозяйственных роботов // IEEE Robotics and Automation Letters, 2021. — DOI: 10.1109/LRA.2021.3067890.
2. Беспроводная лаборатория MIT (2023) «Документация по инструменту мониторинга сигнала LTE». — URL: https://mitwirelesslab.edu/lte-monitoring-docs.
3. Томпсон Р.А., Картер Э.Дж. — 2023.

УДК 629.056.8

Комплекс «НАП Синхро-1Т» для формирования шкалы времени по сигналам ГНСС в условиях помех

Якубович П. Р., Семенов С. А., Долгих И. О., Климов В. Н.
ФГУП «ВНИИФТРИ»
141570, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)

Разработано оборудование для формирования шкалы времени по сигналам ГНСС. Применен комплекс решений для повышения помехоустойчивости на основе собственных разработок антенного облучателя и приемника ГНСС с применением рубидиевого опорного генератора.
Ключевые слова: формирование шкалы времени; приемник ГНСС; помехоустойчивость.

Комплекс «НАП Синхро-1Т» может использоваться для решения задач временной синхронизации в системах связи, телерадиовещания, энергетике и в других областях, использующих телекоммуникации. Для формирования шкалы времени по сигналам ГНСС в условиях помех был разработан набор решений для повышения помехоустойчивости аппаратуры.

«НАП Синхро-1Т» содержит приемник ГНСС собственной разработки, а также рубидиевый опорный генератор, в качестве которого можно использовать генератор НАП-КПН также разработки ВНИИФТРИ. На данный момент приемник ГНСС выполнен с использованием ПЛИС, но в настоящее время ведется разработка двух навигационных модулей Glonio-M1 и Glonio-M2 на базе СБИС, которые могут применяться в данном комплексе и в другой аппаратуре. Использование в приемниках раздельных радиоканалов для приема ГЛОНАСС и зарубежных систем ГНСС повышает защиту от заградительных помех.

В условиях слабых или периодических помех «НАП Синхро-1Т» обеспечивает формирование шкалы времени при работе от обычных антенн ГНСС, для чего достаточно время от времени принимать сигнал хотя бы одного спутника.

В программное обеспечение приемника ГНСС внедряется возможность следить за несколькими копиями сигналов для повышения устойчивости к имитационным помехам путем программного поиска настоящих сигналов среди принятых.

В условиях сильных и постоянных помех «НАП Синхро-1Т» может работать от параболической антенны, для которой разработан специальный облучатель. Направленный прием сигналов ГНСС в телесном угле до 15 градусов обеспечивает усиление полезных сигналов и подавление помех, поступающих с других направлений. Разработанный алгоритм предсказания появления спутников в луче приема усиливает защиту от имитационных помех.

Литература

1. Пудловский В. Б. Навигация по сигналам ГЛОНАСС с использованием сверхминиатюрного рубидиевого стандарта частоты // Альманах современной метрологии, 2020. — № 4 (24). — С. 161–172.

УДК 621.38

Тенденции развития элементной базы аппаратуры навигационных и связных космических аппаратов

Стешенко В. Б., к. т. н., доцент
Заместитель генерального конструктора
АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем»
111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53
contact@spacecorp.ru

Электронная компонентная база, применяемая в бортовой аппаратуре КА, должна в полной мере обеспечивать целевые технические характеристики радиоэлектронной аппаратуры в части функциональных и электрических параметров, а также стойкость к внешним воздействующим факторам. В докладе проведен анализ истории развития и текущей ситуации электронных компонентов для применения в бортовых системах обработки сигналов. Рассмотрена дорожная карта развития элементной базы на среднесрочную перспективу. Сформулированы требования к характеристикам элементов. Рассмотрены вопросы обеспечения качества и надежности.

УДК 629.052.3:527.8:629.782:629.7.077.4:629.7.051.83

Локальные навигационные системы для обеспечения посадки и поиска возвращаемых изделий ракетно-космической техники

Старовойтов Е. И.
АО «НИИМА «Прогресс»
125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54
info@i-progress.tech

Развитие отечественной космонавтики требует решить задачу навигационного обеспечения посадочных полигонов и площадок для возвращаемых аппаратов с экипажем и многоразовых ступеней ракет-носителей. Для обеспечения их управляемого спуска в пределах посадочных полигонов на территории России предлагается использовать локальную навигационную систему.
Ключевые слова: локальная навигационная система; возвращаемый аппарат; многоразовый; посадка; поиск и спасение.

Введение

В настоящий момент времени к создаваемым отечественной ракетно-космической промышленностью космическим аппаратам (КА) с экипажем предъявляется требование обеспечить штатную посадку на территории России, для чего необходимо повысить точность управления спуском [1]. Аналогичные требования также выдвигаются к КА нового поколения других стран.

Еще одним направлением развития космической техники является применение многоразовых частей космических комплексов, в т. ч. возвращаемых первых ступеней ракет-носителей.

Таким образом, актуальным является поиск технических решений для надежного навигационного обеспечения, позволяющего с высокой вероятностью завершить управляемый спуск успешной посадкой на заранее выбранной площадке, а для пилотируемых КА — еще и оперативное обнаружение поисково-спасательными группами возвращаемых аппаратов (ВА) с экипажем.

Управляемая посадка изделий ракетно-космической техники

В настоящее время ВА КА «Союз» приземляются на заранее выбранный полигон с точностью 22 км относительно расчетной точки посадки. В случае баллистического спуска разброс увеличивается до 150 км [2]. На этапе парашютирования и после посадки координаты, полученные по данным глобальных навигационных систем (ГНСС), передаются с помощью спутниковой системы «Коспас-Сарсат» поисково-спасательным отрядам [3]. На перспективном КА нового поколения, разрабатываемом ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королева», точность приземления ВА должна составить уже 5–7 км [4].

В настоящее время активно развивается технология возвращения для повторного использования первых ступеней ракет-носителей. Успешным примером реализации этой идеи является ракета-носитель Falcon 9 (США, SpaceX), у которой возвращаемая первая ступень использует данные ГНСС и радиовысотомера с частотно-модулированным сигналом диапазона 4235–4350 МГц для посадки на плавающую платформу [5]. Эта платформа имеет размеры 91×30 м, а точность определения местоположения возвращаемой ступени должна быть не хуже 10 м [6].

Для новых изделий ракетно-космической техники необходимо создать бортовую навигационно-связную аппаратуру, работоспособность которой не зависит от наличия сигналов ГНСС и доступности иностранных спутниковых группировок, имеющей устойчивость к преднамеренным искажениям сигнала («спуфингу»). Дополнительными требованиями являются компактность, мобильность и быстрота развертывания в выбранной зоне. Эта аппаратура должна быть произведена в России на основе отечественных разработок и элементной базы.

Технология локальной навигации

Наилучшей альтернативой ГНСС являются локальные системы навигации (ЛСН), позволяющие определять координаты потребителя в зоне покрытия радионавигационных опорных станций (РОС), в том числе в условиях помех и «спуфинга».

АО «НИИМА «Прогресс» разрабатывает ЛСН, формирующие навигационное поле, разбитое на «соты» с кодовым или частотным разделением сигналов, которые образованы группой из 3–6 РОС, установленных на одной территории площадью около 10×10 км [7–9].

Предложены беззапросные и запросные ЛСН УКВ-диапазона, ЛСН на базе технологии LTE, предназначенные для навигации высокоавтоматизированных транспортных средств при движении по беспилотным логистическим коридорам, обслуживания речного водного транспорта, развертывания в морских портах и на промышленных объектах.

Реализованные в настоящее время образцы позволяют определять координаты абонента на плоскости и могут быть использованы в ходе поисково-спасательных операций при поиске ВА. Решение задачи управления спуском на заданную посадочную площадку потребует определенной доработки программно-алгоритмического обеспечения ЛСН и антенно-фидерных устройств.

Заключение

Исходя из требований к площади покрытия и к точности навигации для обеспечения управляемого спуска ВА пилотируемых КА нового поколения и возвращаемых ступеней ракет-носителей в пределах посадочного полигона достаточно развертывания одной «соты» ЛСН, в которой также может быть предусмотрен канал для связи с экипажем КА.

Литература

1. Кудрявцев С. И. Анализ баллистических проблем организации спуска перспективного пилотируемого транспортного корабля с орбиты искусственного спутника Земли для безопасной посадки на территории России // Инженерный журнал: наука и инновации, 2018. — № 2. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-2-1731.
2. Легостаев В. П., Микрин Е. А., Орловский И. В., Борисенко Ю. Н., Платонов В. Н., Евдокимов С. Н. Создание и развитие систем управления движением транспортных космических кораблей «Союз» и «Прогресс»: опыт эксплуатации, планируемая модернизация // Труды МФТИ, 2009. — Т. 1. — № 3. — С. 4–13.
3. Новый радиобуй с поддержкой ГЛОНАСС испытан при посадке космического корабля «Союз». — URL: https://glonass-iac.ru/news/news_gnss/2732.

4. РКК «ЭНЕРГИЯ» — Космическая деятельность. — URL: https://www.energia.ru/ru/spaceactivities/ptk-np/ptk-np.html.
5. SpaceX. Falcon User's Guide. September 2021. URL: https://www.spacex.com/media/falcon-users-guide-2021-09.pdf.
6. SpaceX to Aim for Bulls-Eye Rocket Landing on Ocean Platform _ Space. URL: https://www.space.com/28042-spacex-rocket-landing-ocean-platform.html.
7. Корнеев И.Л., Кузнецов А.С., Королев В.С. Режимы работы локальной системы навигации в проекте «КОНСУЛ». Потребители системы «КОНСУЛ» // Наноиндустрия, 2021. Спецвыпуск. — № S7 (107). — С. 57–59. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.57.59.
8. Корнеев И.Л., Прасолов В.Ф. Развертывание локальной системы навигации в условиях подавления сигналов ГНСС. Моделирование работы системы в различных конфигурациях // Наноиндустрия, 2024. Спецвыпуск. — Т. 1. — № S10-1 (128). — С. 10–15. DOI: 10.22184/1993-8578.2024.17.10s.10.15.
9. Старовойтов Е.И., Скиба Е.С., Синильщиков И.В., Алпатов А.А. Синхронизация базовых станций в комплексированной навигационносвязной системе «КОНСУЛ-Р» // Электроника. Наука. Технология. Бизнес, 2024. — № 7. — С. 100–104. DOI: 10.22184/1992-4178.2024.238.7.100.104.

УДК 629.056

Исследование газонаполненных МЭМС-ячеек в составе макетов квантовых генераторов частоты нового поколения

к. т. н. Гусев С. В., Горский Л. Г., Думчиков К. А.
ФГУП «ВНИИФТРИ»
141570, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)

Приведены результаты работ ФГУП «ВНИИФТРИ» по созданию и исследованию газонаполненных МЭМС-ячеек для квантовых генераторов частоты нового поколения. Использование новых технологий позволяет сократить массогабаритные размеры и обеспечить массовое производство при сохранении характеристик стабильности выходной частоты.
Ключевые слова: генераторы частоты; МЭМС; стабильность выходной часоты.

В настоящее время наиболее распространенными являются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), основанные на измерении расстояния от объекта до спутников, расположенных на геостационарной орбите таким образом, что их координаты относительно Земли всегда постоянны. В то же время существующие сегодня ГНСС имеют существенные ограничения и уязвимости, связанные с необходимостью глобального радиообмена сигналами. В частности, использование спутниковых систем существенно ограничено в местах, где затруднена передача радиоволн: в туннелях, в гористой местности или в условиях высокоэтажной застройки, практически полностью невозможно под водой или внутри зданий. В арктической и околоарктической зонах навигация по сигналам ГНСС вызывает существенные затруднения. С освоением арктической зоны для доставки грузов и геологодобычи обеспечение надежной навигации в Арктике является важнейшей задачей. Кроме того, мощность сигналов, поступающих от спутников ГНСС, расположенные на высоте 20 тыс. км от поверхности Земли, сравнительно невысока и подвержена атакам с подменой сигнала и наведением преднамеренных помех, а также снижением производительности в некоторых операционных средах. Указанные проблемы, затрудняющие повсеместное использование спутниковых систем, уже сейчас являются существенным препятствием на пути внедрения технологий беспилотного наземного и воздушного транспорта, развитие которых должно основываться на надежных системах геопозиционирования и навигации.

В настоящее время активно ведутся разработки систем альтернативной навигации (пока в качестве дополнительных) для повышения надежности традиционных ГНСС, обеспечения работоспособности системы в труднодоступных для сигналов спутников местах, борьбы с радиопомехами и другими типами атак. При этом с развитием возможности систем альтернативной навигации возможен полный отказ от глобальных спутниковых систем.

К основным направлениям развития систем навигации без использования сигналов ГНСС можно отнести:

- радионавигационные системы, являющиеся основным средством навигации в середине двадцатого века, которые сейчас по-прежнему используются и развиваются для обслуживания морского и воздушного транспорта. В то же время такие системы требуют наличия навигационных радиостанций, что существенно ограничивает возможности и сферу их применения;

- инерциальные системы навигации, основанные на непрерывном измерении параметров движения объекта (скорости, ускорения, угловых скоростей, угла наклона) относительно выбранной системы отсчета;
- навигацию по карте геомагнитных полей — наиболее перспективный метод навигации, основанный на построении карты геомагнитных полей и использовании сверхточных гравиметров, по показаниям которых и на основе данных карты осуществляется позиционирование объекта. Одним из наиболее перспективных направлений измерения магнитного поля земли является метод, основанный на «холодных» атомах;
- астрономические методы навигации, основанные на определении положения объекта относительно положения известных небесных светил в выбранной системе координат. Древнейший вид навигации сейчас получает свое второе рождение, при этом наблюдения и определение месторасположения осуществляются автоматически, при помощи астрономических оптических и оптико-электронных навигационных приборов. Очевидные недостатки и ограничения этого метода позволяют использовать его только для космической навигации либо ограниченно для морской и наземной навигации;
- перспективные и малоизученные методы, такие как навигация по поляризации солнечного света.

Развитие альтернативных неглобальных средств навигации требует развития соответствующей элементной базы и технологий ее производства:

- датчики ускорения, наклона (акселерометры, инклинометры, гироскопы, магнитометры). Развитие технологии микроэлектромеханики (МЭМС) позволило уменьшить массогабаритные размеры и стоимость элементной базы, что открывает новые возможности для массового внедрения инерциальных систем;
- оптические системы и системы обработки данных положения объектов, также являющиеся перспективными средствами навигации для автономного транспорта. В то же время из-за наличия фундаментальных ограничений самого метода наиболее перспективным направлением является их использование в качестве дополнительной системы навигации для предотвращения происшествий и в качестве резервной системы на случай выхода из строя других бортовых систем;
- квантовые сенсоры, позволяющие существенно повысить точность измерений положения объекта в пространстве и времени, являющиеся основой наиболее перспективных направлений развития навигационных систем. В то же время, являясь сравнительно новым направлением в приборостроении, требуют развития современной технологической базы для организации серийного выпуска и массового внедрения;
- приборы системы точного измерения времени и синхронизации, являющиеся неотъемлемой частью как традиционных спутниковых систем, так и альтернативных средств позиционирования.

ФГУП «ВНИИФТРИ» в настоящее время ведется разработка навигационной аппаратуры потребителя как для приема сигналов традиционной спутниковой навигации, так и по ряду направлений создания сверхточных сенсоров и систем для альтернативной навигации.

В частности, разработан стандарт времени и частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей, не имеющий аналогов в России и превосходящий по своим точностным характеристикам известные западные аналоги (табл. 1).

Табл. 1. Сравнительные характеристики квантового стандарта частоты ФГУП «ВНИИФТРИ» с известными зарубежными аналогами.

	Стандарт частоты, рубидиевый сверхминиатюрный квантовый НАП-КПН ФГУП «ВНИИФТРИ» (Россия)	Chip Scale Atomic Clock (CSAC) MicroSemi Microchip (США)	Miniature Atomic Clock (MAC) MicroSemi Microchip (США)	mRO-50 Orolia **(США)**
Формируемый стандарт частоты	5, 10 МГц	10 МГц	10 МГц	10 МГц
Нестабильность частоты за 1 сек, не более	$3 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$
Нестабильность частоты за 1 сутки, не более	$5 \cdot 10^{-12}$	—	$2{,}5 \cdot 10^{-11}$	—
Потребляемая мощность в рабочем режиме, мВт, не более	300	120	6000	450
Рабочая температура °С	+5/+40	−10/+70	−40/+75	−10/+60
Габаритные размеры	60 $см^3$	17 $см^3$	50,8×50,8×18,3	50,8×50,8×19,5 мм
Вес	95 г	35 г	100 г	75 г

В настоящее время ведутся работы по совершенствованию конструкции прибора, исследование возможностей технологии МЭМС и низкотемпературной многослойной керамики (LTCC) для повышения технологичности и надежности блока квантового дискриминатора, определяющего основные рабочие характеристики прибора.

УДК 621.3.049.77

Разработка электронного модуля 3-осевого магнитометра для систем навигации БПЛА малого и среднего классов на основе отечественной ЭКБ

Полевиков В. В., Юров А. С.
АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Разработана конструкция и проведены измерения макетного образца электронного модуля 3-осевого магнитометра для систем навигации БПЛА малого и среднего класса. Электронный модуль разработан на основе одно- и двухосевых тонкопленочных анизотропных магниторезистивных (AMP), серийно выпускаемых в АО «ЗНТЦ». Проведены оптимизация конструкции электронного модуля в целях его интеграции в систему управления БПЛА малого и среднего класса, выбор отечественной электронно-компонентной базы (ЭКБ) для комплектования модулей, разработаны методики и осуществлены измерения макетного образца модуля.

Ключевые слова: AMR-сенсоры; магниторезистивный эффект; датчики магнитного поля; навигация; GPS; ГЛОНАСС.

Сложившаяся в настоящее время ситуация в части определения положения в пространстве беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) демонстрирует тот факт, что системы GPS и ГЛОНАСС оказались чрезвычайно уязвимыми к внешним дестабилизирующим факторам, приводящим к потере точности наведения и зачастую к выходу из строя БПЛА. В этой ситуации возникает необходимость применения методов навигации на основе других физических принципов, одним из них является ориентирование по магнитному полю Земли. Необходимо отметить, что навигация по магнитному полю Земли, в отличие от систем GPS и ГЛОНАСС не может быть подавлена внешними воздействиями, что является ее неоспоримым достоинством. Это в свою очередь вызывает необходимость разработки и серийного производства электронных модулей магнитометров для систем навигации БПЛА на основе отечественной ЭКБ.

Конструкция модуля магнитометра базируется на микросхемах одно- и двухосевых преобразователей магнитного поля Земли К1382ПП02 и К1382ЧЭ01Т, серийно выпускаемых АО «ЗНТЦ». В ходе разработки модуля решена задача непрерывного измерения малых магнитных полей, полей магнитного поля Земли в трех ортогональных плоскостях с точностью — необходимой для обеспечения навигации БПЛА.

В ходе разработки электронного модуля проведено математическое моделирование модуля, проработаны варианты конструкции с цифровыми интерфейсами, обеспечивающими его интеграцию в систему управления БПЛА малого и среднего класса, а именно RS-485, CAN, SPI, I2C и UART.

В рамках разработки макетного образца трехосевого магнитометра разработана программа — методика измерений и измерительная оснастка, обеспечивающая измерение параметров модуля в непрерывном диапазоне магнитного поля от 0 до ±9 Гс (0,9 мТл).

Таким образом, в рамках разработки макетного образца электронного модуля трехосевого магнитометра подтверждена правильность выбранной конструкции и начата разработка конструкции опытного образца.

УДК 629.056.8

Особенности применения высокоточной спутниковой навигационной аппаратуры для частотно-временной синхронизации

Вейцель А. В., к. т. н.
ФГУП «ВНИИФТРИ»
141570, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)
veytsel@vniiftri.ru

Рассматриваются особенности разработки и проектирования высокоточной спутниковой навигационной аппаратуры для частотно-временных задач и позиционирования. Рассматриваются вопросы определения сдвига внутренней и внешней шкалами времени для синхронизации моментов выполнения первичных измерений в приемнике сигналов глобальных спутниковых систем с внешней шкалой времени. Приводится анализ основных ошибок и методов борьбы с ними для такого класса оборудования. Рассматриваются ошибки измерителей сдвига шкал времени и спутниковой навигационной аппаратуры, которые влияют на точность синхронизации спутникового навигационного оборудования к внешней шкале времени. Анализируются перспективы разработки новой современной высокоточной аппаратуры.
Ключевые слова: сигналы ГЛОНАСС и ГНСС; СБИС; высокоточная синхронизация; высокоточная навигационная аппаратура.

Спутниковая навигационная аппаратура применяется для широкого ряда задач, включая такие критические задачи, как частотно-временное обеспечение и системы синхронизации. Для этих задач в навигационной аппаратуре необходимо прием сигналов от всех ГНСС в разных навигационных диапазонах и обеспечить минимизацию различных шибок. Для решения этих задач в навигационной аппаратуре реализуется несколько аналоговых радиотрактов для приема сигналов от разных навигационных систем в разных частотных диапазонах. В работе рассматриваются особенности построения аналоговых радиотрактов для возможности минимизации потенциальных ошибок навигационной аппаратуры и методики расчета этих ошибок. Также рассматриваются различные технические решения по уменьшению ошибок частотно-временной синхронизации и местоопределения при изготовлении и производстве навигационной аппаратуры с учетом возможностей специализированной калибровки оборудования.

В работе рассмотрены варианты частотно-временной аппаратуры, когда отсутствует требование по решению задачи местоопределения, а решается единственная задача определения точного времени. В этом случае возможно использование в навигационной аппаратуре минимум одного навигационного спутника, что расширяет возможности аппаратуры при наличии пространственных помех за счет отсутствия необходимости приема большого количества сигналов навигационных аппаратов. В работе приводятся результаты экспериментов по приему одного навигационного спутника в условиях помех и показана возможность формирования при этом сигналов точного времени.

В работе рассматриваются программно-аппаратные методы привязки высокоточной навигационной аппаратуры к внешней шкале времени. Рассмотрены различные методы привязки к внешней шкале с анализом их ошибок и технических решений. В работе рассматриваются ошибки в навигационной аппаратуре, возникающие за счет температурных вариаций. Показано влияние температуры на критические компоненты навигационного приемника и предложены методы борьбы с этими ошибками. Также рассматриваются другие типы ошибок, которые являются критическими для частотно-временных задач. Приводятся данные эксперимента, подтверждающего возможность привязки шкалы времени приемника к внешней шкале с точностью лучше 1 нс.

В работе рассматриваются особенности проектирования цифровой обработки сигналов для высокоточной навигационной аппаратуры и реализация технических решений для частотно-временных задач. Анализируются возможности использования ПЛИС и СБИС для высокоточной навигационной аппаратуры и сравниваются возможные характеристики. Рассматриваются варианты построения СБИС от реализации только аппаратной логики с цифровыми каналами до СБИС, являющейся системой на кристалле (SoC) со специализированными процессорами для цифровой обработки сигналов. Необходимость приема и обработки множества сигналов и навигационных систем накладывает особые ограничения на цифровые процессоры, которые реализуют программную часть алгоритмов по обработке сигналов. С учетом ограничений разработки СБИС и особенностей технологий рассматриваются подходы использования мультипроцессорных систем для спутниковых навигационных приемников.

Литература

1. Клеопин А. В., Макаров В. В., Зенченко М. А., Селин Л. Н. Алгоритм фильтрации пикосекундных импульсных сигналов // Альманах современной метрологии, 2020. — № 3. — С. 187–190.
2. Vasilyuk N. N., Denisenko O. V., Veitsel A. V. Digital Processing of Time Scales Shift Measurements for Synchronization of Navigation Equipment with an External Time Scale // 25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), Moscow, Russian Federation, 2023.

УДК 621.3.049.771

Практический опыт перевода микросхем на отечественное микроэлектронное производство

Игошин А. В., Лебедев А. В., Степанова А. С.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org

Рассмотрены особенности перевода и сложности, возникающие при переводе микросхем, ранее разработанных под зарубежные микроэлектронные производства, на отечественные микроэлектронные производства.
Ключевые слова: СФ-блоки; архитектура RISC-V; перепроектирование; ПП РФ 1252.

Популярная во всем мире концепция fabless-компаний помогла сохранить и даже развить в России школу разработки микросхем. Не имея возможности производить в России полупроводниковые пластины с необходимыми для приборостроения технологиями, fabless-компании находили необходимую технологию в других странах, производили разработку кристалла микросхемы, используя предоставленный со стороны фабрик PDK, DDK и необходимые для разработки кристалла микросхемы СФ-блоки.

Все изменилось с началом специальной военной операции в феврале 2022 г. Российские компании, имея отличный разработческий потенциал, потеряли возможность стабильно заказывать полупроводниковые пластины за рубежом. В связи с этим российские дизайн-центры начали рассматривать для производства своих продуктов мощности отечественных микроэлектронных производств путем трансфера технологий. Первым шагом на пути подобного трансфера является наличие необходимых технологических приборов и СФ-блоков, из которых, как из конструктора, разработчики «делают» сборку готового продукта.

При разработке своих перспективных продуктов в рамках ПП РФ 1252 компания ООО «НМ-Тех» закладывает тот же приборный базис, что есть или будет в наличии на микроэлектронном производстве ООО «НМ-Тех». Взяв за основу микропроцессорное ядро на базе архитектуры RISC-V, инженеры ООО «НМ-Тех» осуществили разработку основных сложнофункциональных блоков, как правило, входящих в состав каждого микроконтроллера, а также разработали топологию будущего микроконтроллера.

В целях исключения ошибок производственного цикла, так как освоение технологии производства с топологическими нормами 130 нм еще окончательно не было завершено, инженерами ООО «НМ-Тех» была отработана топология микропроцессорного ядра и основных СФ-блоков на фабрике-доноре с хорошо поставленной технологией, что является общемировой практикой. Запуск микроконтроллера на фабрике-доноре показал полную работоспособность схемотехнических, архитектурных и топологических решений, принятых на этапе разработки микроконтроллера.

Следует отметить, что перенос топологии и СФ-блоков является трудоемким и наукоемким процессом, требующим поэтапной отработки как отдельных технологических процессов, необходимых для производства микроконтроллера,

так и доработки и/или создания новых правил проектирования (PDK), расширения библиотек стандартных ячеек, приборов и т.д. В связи с этими инженеры ООО «НМ-Тех» поэтапно отрабатывали производство отдельных элементов и СФ-блоков, входящих в состав микроконтроллера, в виде тестовых кристаллов.

Как итог, был запущен тестовый кристалл для отработки микропроцессорного ядра, тестирование которого показало принципиальную возможность выпуска на мощностях ООО «НМ-Тех» микропроцессорных ядер с архитектурой на базе RISC-V.

За последние два года, идя по этому пути, ООО «НМ-Тех» по технологиям 250 нм и 130 нм перенесло порядка восьми типономиналов микросхем. Работа по насыщению технологий 250 и 130 нм различными сложнофункциональными блоками для якорных продуктов в рамках ПП 1252 является сложной, долгой, перспективной и продолжается в компании. Полученные СФ-блоки сократят время будущих заказчиков по перепроектированию микросхем с приборного базиса зарубежных микроэлектронных производств в приборный базис ООО «НМ-Тех». Полученные образцы микросхем и экспериментальные изделия, как производства ООО «НМ-Тех», так и изделия, созданные в кооперации, можно увидеть на стенде ООО «НМ-Тех».

УДК 629.052.3:527.8:629.782:629.7.077.4:629.7.051.83

Временное мультиплексирование корреляционных каналов в интегральных схемах приемников глобальных навигационных спутниковых систем: методы реализации и оптимизации

Александров А. В.
АО «НИИМА «Прогресс»
125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54
info@i-progress.tech

Развитие отечественных систем навигации во многом зависит от решения задачи приема и обработки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как ГЛОНАСС, GPS, Gallileo, BeiDou. Для обеспечения их качественных приема и обработки предлагается использовать временное мультиплексирование корреляционных каналов в ГНСС интегральных схемах приемников. В статье рассматриваются принципы временного мультиплексирования корреляционных каналов в ГНСС интегральных схемах. Анализируются архитектурные решения, алгоритмы планирования и методы оптимизации энергоэффективности. Представлены экспериментальные результаты сравнения с традиционными параллельными архитектурами.
Ключевые слова: временное мультиплексирование; ГНСС; интегральные схемы; корреляционные каналы; цифровая обработка сигналов; энергоэффективность.

Введение

Современные приемники ГНСС, конструктивно выполняемые в виде интегральных схем, требуют одновременной обработки сигналов от множества спутников различных навигационных систем. Традиционный подход предполагает использование отдельного коррелятора для каждого отслеживаемого спутника, что приводит к значительным аппаратным затратам и повышенному энергопотреблению. Временное мультиплексирование корреляционных каналов представляет собой эффективное решение для оптимизации использования аппаратных ресурсов при сохранении функциональности многоканального приемника.

Принцип временного мультиплексирования основан на последовательном использовании единого высокопроизводительного коррелятора для обработки сигналов различных спутников в выделенные временные интервалы. Данный подход позволяет существенно снизить площадь кристалла и энергопотребление при незначительном увеличении сложности управляющей логики.

Теоретические основы временного мультиплексирования

Предлагается математическая модель, базирующаяся на следующих утверждениях и выводах.

1) Для системы с N корреляционными каналами общее время цикла обработки T cycle распределяется между каналами следующим образом:

$$T_{channel}(i) = \frac{T_{cycle}}{N} \cdot w_i ,$$

где w_i — весовой коэффициент i-го канала, определяемый качеством сигнала и требованиями к точности.

2) Условие нормировки весовых коэффициентов:

$$\sum_{i=1}^{N} w_i = 1 .$$

3) Требования к производительности коррелятора определяются соотношением

$$f_{\text{correlator}} \geq N \cdot f_{\text{sampling}} \cdot K_{\text{overhead}} ,$$

где f_sampling — частота дискретизации входного сигнала, K_overhead — коэффициент накладных расходов на переключение между каналами.

При этом используются временные ограничения, определяемые критическим параметром — временем переключения между каналами t_switch, которое должно удовлетворять условию

$$t_{\text{switch}} < \frac{T_{\text{cycle}}}{N \cdot K_{\text{efficiency}}},$$

где $K_{\text{efficiency}}$ — коэффициент эффективности использования временных ресурсов.

Архитектурные решения

Архитектурные решения заключаются в определении и использовании структуры системы временного мультиплексирования, иерархической архитектуры мультиплексирования и системы буферизации данных.

Система временного мультиплексирования включает следующие основные компоненты:

- центральный коррелятор, являющийся высокопроизводительным блоком корреляционной обработки, и работающий на повышенной тактовой частоте. Архитектура поддерживает конвейерную обработку с глубиной конвейера 4–6 ступеней;
- мультиплексор данных, реализованный на базе матричного коммутатора с временем переключения менее 2 нс, и предназначенный для коммутации входных данных различных каналов к центральному коррелятору;
- контроллер планирования, предназначенный для управления распределением временных ресурсов между каналами на основе заданных алгоритмов приоритизации;
- буферная память, обеспечивающая временное хранение входных данных и результатов корреляции для каждого канала.

Иерархическая архитектура мультиплексирования обеспечивает выполнение функции переключений на трех уровнях:

- первый уровень — переключение между различными спутниками одной ГНСС-системы;
- второй уровень — переключение между I- и Q-компонентами сигнала;
- третий уровень — переключение между ранней, поздней и точной репликами кода.

Данная архитектура обеспечивает гибкое управление временными ресурсами и адаптацию к различным режимам работы.

Система буферизации данных является многоуровневой и включает в свой состав:

- входные FIFO-буферы: 512 слов × 16 бит × N каналов. Буферы результатов: 256 слов × 32 бита × N каналов;
- промежуточные буферы: 128 слов × 24 бита × 4 уровня конвейера. Размеры буферов оптимизированы для минимизации вероятности переполнения при максимальном коэффициенте использования аппаратных ресурсов.

Алгоритмы планирования временных ресурсов

Планирование временных ресурсов включает статическое, адаптивное и предсказательное планирование.

Алгоритмом статического планирования является простейший алгоритм Round-Robin, который обеспечивает равномерное распределение временных ресурсов:

$$\text{for } (i = 0;\ i < N_{\text{channels}};\ \text{i++}) \left\{\text{process}_{\text{channel}}(i, T_{\text{cycle}} / N_{\text{channels}})\right\}.$$

Данный подход подходит для стабильных условий приема при равном качестве сигналов всех спутников.

Алгоритм адаптивного планирования учитывает текущее отношение сигнал/шум для каждого канала:

```
for (i = 0; i < N_channels; i++) {
    weight[i] = calculate_weight(SNR[i], tracking_state[i]);
    time_slot[i] =  = base_time * weight[i];}
```

Функция расчета весового коэффициента:

$$w_i = \alpha \cdot \frac{1}{SNR_i + \beta} + \gamma \cdot state_actor_i,$$

где α, β, γ — настраиваемые параметры алгоритма.

Алгоритм предсказательного планирования использует историю измерений для прогнозирования будущих потребностей каналов:

```
predicted_SNR[i] = predict_SNR(SNR_history[i], doppler[i], elevation[i]);
future_weight[i] = calculate_future_weight(predicted_SNR[i])
```

Прогнозирование выполняется на основе модели авторегрессии:

$$SNR_{\text{predicted}}(t+1) = \sum_{k=0}^{p} a_k \cdot SNR(t-k) + \in(t).$$

Энергоэффективность и оптимизация

В статье представлены результаты сравнительного анализа применения параллельной и мультиплексированной архитектур и предложены методы оптимизации энергопотребления ГНСС интегральных схем.

Сравнительный анализ энергопотребления показывает следующие результаты:

а) при применении параллельной архитектуры общее энергопотребление определяется как

$$P = N \cdot P_{\text{correlator}},$$

где N — количество корреляторов, $P_{\text{correlator}}$ — энергопотребление одного коррелятора;

б) при применении мультиплексированной архитектуры общее энергопотребление определяется как

$$P = N \cdot P_{\text{correlator}} \cdot \eta + P_{\text{control}} + P_{\text{buffers}},$$

где N — количество корреляторов, $P_{\text{correlator}}$ — энергопотребление одного коррелятора, η — коэффициент увеличения частоты (обычно 0,6–0,8), P_{control} — энергопотребление управляющей логики, P_{buffers} — энергопотребление буферной памяти.

На основании сравнительного анализа предлагается применить следующие методы оптимизации энергопотребления:

1) динамическое управление частотой. Тактовая частота коррелятора адаптируется к текущей нагрузке:

$$f_{\text{clock}} = f_{\text{base}} \cdot \frac{N_{\text{active}}}{N_{\text{total}}} \cdot K_{\text{overhead}};$$

2) селективное отключение каналов. Каналы с критически низким качеством сигнала временно исключаются из обработки для экономии энергии;

3) оптимизация переключений. Достигается минимизация энергозатрат на переключение через оптимальную последовательность обработки каналов.

Экспериментальные результаты

Во время экспериментальной проверки использовалась тестовая платформа, выполненная на базе платы FPGA Xilinx Zynq-7000 с реализацией 32-канального ГНСС-приемника. Параметры тестовой платы:

- тактовая частота: 200 МГц;
- разрядность данных: 16 бит (I/Q);
- глубина буферов: 1024 слова;
- время переключения: 5 нс.

Получены следующие результаты измерений.

Энергопотребление:

- параллельная архитектура: 850 мВт;
- мультиплексированная архитектура: 520 мВт;
- снижение потребления: 38,8 %.

Производительность:

- поддерживаемые каналы: 32;
- время обработки канала: 125 мкс;
- общее время цикла: 4 мс;
- точность позиционирования: деградация менее 5 %.

Площадь кристалла:

- экономия логических ресурсов: 45 %;
- экономия блоков памяти: 35 %;
- увеличение управляющей логики: 15 %.

Проведен сравнительный анализ алгоритмов планирования с помощью их тестирования в условиях переменного качества сигнала. Получены результаты, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Результаты сравнительного анализа алгоритмов планирования

Алгоритм	Среднее SNR, дБ-Гц	Время первого позиционирования, с	Энергопотребление, мВт
Алгоритм статического планирования	42,3	28,5	520
Алгоритм адаптивного планирования	44,7	24,2	485
Алгоритм предсказательного планирования	45,1	23,8	495

Практические аспекты реализации

Критически важным аспектом является точная синхронизация результатов корреляции с едиными временными метками. При этом компенсации задержек обеспечивается применением:

- аппаратных счетчиков времени с разрешением 1 нс;
- калибровочных таблиц для компенсации задержек переключения;
- алгоритмов интерполяции для восстановления непрерывности измерений.

Управление качеством сигнала обеспечивается реализацией адаптивного контроля качества корреляции:

```
if (correlation_quality < threshold_low) {increase_integration_time(channel);
increase_time_allocation(channel); } else if (correlation_quality > threshold_high) {
decrease_integration_time(channel); decrease_time_allocation(channel); }
```

Отказоустойчивость достигается применением соответствующих механизмов:

- детектированием и изоляцией неисправных каналов;
- автоматическим перераспределением временных ресурсов;
- резервированием критически важных каналов.

Заключение

Временное мультиплексирование корреляционных каналов представляет собой эффективный метод оптимизации аппаратных ресурсов в ГНСС интегральных схемах. Экспериментальные результаты демонстрируют снижение энергопотребления на 38,8 % и уменьшение площади кристалла на 45 % при сохранении функциональности и незначительной деградации точности позиционирования.

Адаптивные алгоритмы планирования обеспечивают оптимальное распределение временных ресурсов в зависимости от условий приема сигналов. Предсказательные методы позволяют дополнительно повысить эффективность системы за счет упреждающего планирования.

Литература

1. Kaplan E. D., Hegarty C. J. Understanding GPS: Principles and Applications, 2nd Edition. Artech House, 2006.
2. Стешенко В. Б. FPGA-реализация цифровых сигнальных процессоров. — М.: Додэка-XXI, 2007.
3. Шахтарин Б. И., Сидоркина Ю. А. Синхронизация в системах связи. — М.: Горячая линия — Телеком, 2011.

УДК 629.051

Разработка алгоритма повышения точности геопозиции транспортного средства в условиях многолучевого распространения GPS с использованием инерциальных систем

Цуканова Е. Е., Токарев Е. П., Клоков В. А., Каргин Н. И.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
cee001@mephi.ru

Предложен метод компенсации потери GPS-сигнала на основе интеграции IMU и RTK-GNSS данных с использованием расширенного фильтра Калмана. Решение включает температурную компенсацию и фильтрацию шума, обеспечивая непрерывное позиционирование ТС при временной недоступности спутниковых сигналов.
Ключевые слова: GPS; IMU; RTK; GNSS; расширенный фильтр Калмана.

Введение

Современные системы автономного управления транспортными средствами предъявляют повышенные требования к точности и надежности определения координат в режиме реальном времени, что является критически важным фактором обеспечения безопасности. Глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS), являясь основой современных навигационных решений, демонстрируют существенное снижение эффективности в условиях плотной городской застройки, тоннелей и других сложных ландшафтов, где сигнал может быть частично или полностью заблокирован. В таких ситуациях инерциальные навигационные системы (IMU) представляют собой перспективное решение данной проблемы, обеспечивая непрерывное отслеживание положения ТС с высокой частотой обновления данных.

Однако IMU имеют фундаментальное ограничение — накопление ошибок позиционирования с течением времени. Комбинирование GPS-данных с показаниями IMU открывает новые возможности для создания надежных автономных транспортных систем, устойчивых к перебоям спутниковой навигации.

Описание модели

В данной работе предлагается инновационный подход к обеспечению непрерывного и точного определения местоположения ТС, включая зоны с полным отсутствием GPS покрытия. Решение основано на объединении данных IMU с высокоточными спутниковыми измерениями, поддерживающими RTK коррекцию.

Разработанная навигационная система принимает два потока данных:

- поток инерциальных измерений с трехосевого акселерометра, измеряющего линейное ускорение, и гироскопа, измеряющего угловую скорость, работающих с частотой 100 Гц;
- поток координатных данных, полученных с частотой 1 Гц от GNSS приемника, работающего в RTK режиме, который обеспечивает сантиметровую точность.

Для обеспечения достоверности данных о GNSS-координатах реализован многоэтапный процесс предварительной обработки данных, включающий в себя

анализ целостности данных, контроль временных меток, проверку пространственной согласованности траектории. Особое внимание уделяется выявлению аномальных значений, возникающих при временных сбоях спутникового сигнала.

Для компенсации ошибок IMU применяется расширенный фильтр Калмана (EKF), обеспечивающий плавный переход между режимами GPS/IMU и минимизирующий дрейф позиционирования.

Ориентация транспортного средства в трехмерном пространстве описывается с помощью кватернионов на основе алгоритма SLERP. Обновление ориентации выполняется по дифференциальному уравнению, связывающему текущее состояние системы с показаниями гироскопа:

$$q_k = q_{k-1} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \omega_{k-1} \otimes q_k q_{k-1},$$

где q — нормализованный кватернион, описывающий вращение; ω — угловая скорость; $\otimes$ — операция кватернионного умножения.

Для корректного вычисления местоположения ТС система предварительно преобразует ускорения из связанной в географическую систему координат (ENU), затем последовательно интегрирует их для получения скорости и пройденного расстояния. Рассчитанные координаты корректируются по последним достоверным GNSS данным, минимизируя накопление ошибок при потере спутникового сигнала.

Особенностью подхода является:

- комплексная модель движения автомобиля на основе кинематических уравнений, учитывающих показания инерциальных датчиков (акселерометра и гироскопа);
- двухэтапный процесс обработки данных: прогнозирование положения через IMU и последующая коррекция при получении достоверных GPS-данных;
- температурная компенсация и адаптивная фильтрация шумов инерциальных измерений.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию с картографическими данными (HD Maps) и машинным обучением для дополнительного снижения ошибки.

Литература

1. Nalla Perumal L. P., Arockia Doss A. S. Sensor Fusion for Automotive Dead Reckoning Using GPS and IMU for Accurate Position and Velocity Estimation / Akinlabi E., Ramkumar P., Selvaraj M. (eds) Trends in Mechanical and Biomedical Design. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, 2021.
2. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2013.
3. Farrell J. Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors, 2008.

УДК 621.372.63

Текущий статус и планы освоения технологий CSP- и WLP-корпусирования фильтров на ПАВ

Машинин О. В., Синицына Т. В., Сиротин М. С., Халфин Т. М.
ООО «БУТИС»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
o.mashinin@butis.ru

Представлены результаты применения технологии монтажа пьезоэлементов фильтров на ПАВ методом флип-чип. Описаны методы кратного снижения себестоимости фильтров на ПАВ для рынка гражданской электроники с использованием корпусирования CSP и WLP, приведены практические результаты и планы развития.

Ключевые слова: фильтры на поверхностных акустических волнах; пьезоэлемент; ПАВ; SMD; CSP; WLP.

В соответствии с Указом Президента РФ от 30.03.2022 № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости...» поставлена задача обеспечения преимущественного применения отечественной радиоэлектронной продукции и телекоммуникационного оборудования. И если применение отечественной РЭА и ТКО в ВВСТ регламентировано соответствующим законодательством, то в отношении гражданской радиоэлектроники выбор составных частей и компонентов лежит в коммерческой плоскости.

Разработка и производство отечественной РЭА и ТКО невозможны без отечественной ЭКБ. При этом разработчики и производители отечественной сложнофункциональной ЭКБ (микросхемы, сенсоры, изделия акустоэлектроники и т. д.) сталкиваются с серьезным давлением на рынок со стороны производителей Юго-Восточной Азии (Китай, Тайвань), доступ на российский рынок для которых открыт, а крупносерийный выпуск ими ЭКБ для гражданского рынка на 2–3 порядка превышает выпуск аналогичной ЭКБ отечественными предприятиями, за счет чего российскому производителю ЭКБ очень сложно конкурировать по цене.

Выходом из сложившейся ситуации может быть разработка и освоение производства отечественной ЭКБ в конструктивном исполнении, пригодном для автоматизированного массового производства, и крупносерийные поставки такой ЭКБ на существующих регулируемых рынках в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 17.07.2015 № 719. Такими рынками в настоящее время являются автомобильная электроника и ТКО.

ООО «БУТИС» более 30 лет является разработчиком и бесперебойным поставщиком фильтров на ПАВ гражданского и оборонного назначения в диапазоне частот 30–3400 МГц, достигнув на этом направлении технических показателей на уровне и выше уровня мировых достижений. Последние годы ООО «БУТИС» последовательно проводит разработки технологий, пригодных для автоматизированного массового производства, и конструктивных исполнений, позволяющих достичь при массовом выпуске отпускной цены, сопоставимой с ценой аналогичной продукции предприятий Юго-Восточной Азии.

Так, освоена технология монтажа пьезоэлектрических элементов методом флип-чип с соединением контактных площадок пьезоэлемента и корпуса фильтра

с помощью золотых бампов [1]. Данная технология применяется при серийном производстве фильтров GLONASS/GPS в корпусах типа SMD с габаритными размерами 2,0×1,65×0,77 мм.

На базе технологии флип-чип монтажа ООО «БУТИС» ведется разработка технологии корпусирования Chip-scale package (CSP) [2], позволяющая проводить сборку групповым методом на панели, насчитывающей до 3000 шт. чипов корпусов, с групповым ламинированием всей панели пластиковым компаундом. Такая технология позволяет выпускать фильтры на ПАВ в пластиковых корпусах размером 1,4×1,1×0,5 и 1,1×0,9×0,5 мм для самого массового сегмента РЭА и ТКО с ценой, сопоставимой с зарубежными аналогами. Российский рынок потребления такой ЭКБ составляет 2–5 млн шт. в год, что позволит достичь рентабельного уровня производства.

Следующим этапом развития технологии производства фильтров на ПАВ, осваиваемой ООО «БУТИС», является технология корпусирования Wafer-Level Package (WLP) [3]. Это относительно новая перспективная технология, которая позволит максимально уменьшить размер корпуса, достигнув значений 0,8×0,6×0,25 мм, а также существенно снизить себестоимость фильтра. Областью применения такой ЭКБ являются персональные телекоммуникационные устройства, в том числе мобильные телефоны.

Литература

1. Гусев А. П., Павлов А. В., Павлова С. Г., Мякиньков В. Ю., Сытилин С. Н., Синицына Т. В. Высокоизбирательный малогабаритный СВЧ-модуль в керамике LTCC с применением Flip-chip монтажа // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2016. — Вып. 4 (531). — С. 45–55.
2. Lee Y., Im Jongin, Lee Seunghee. Developmtnt of the RF SAW filters based on PCB substrate // 1-4244-0074-0/06/$20.00©2006 IEEE.
3. Chen Z., Zhang M., Zhu K. Development of 3D Wafer Level Package for SAW Filters Using Thin Film Lamination // 2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT).

УДК 621.372.63

Фильтры на ПАВ для обработки РЧ-сигнала повышенной мощности

Груздев А. С., Гарифулина А. Т., Дорофеева С. С., Егоров Р. В., Синицына Т. В.
ООО «БУТИС»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
s.dorofeeva@butis.ru

Представлены методы проектирования фильтров на ПАВ, обеспечивающих обработку РЧ-сигнала повышенной мощности. Приведены результаты исследований влияния толщины диэлектрической пленки SiO_2 и геометрии многослойных пленок, формирующих топологию фильтра, на допустимый уровень мощности входной сигнала.
Ключевые слова: фильтры на поверхностных акустических волнах; мощность РЧ-сигнала.

Основным недостатком фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в стандартном конструктивном исполнении является низкий уровень допустимой входной мощности (25–100 мВт в зависимости от частотного диапазона), что обусловлено электромиграцией атомов алюминия при больших уровнях мощности, приводящей к электрическому пробою встречно-штыревого преобразователя (ВШП). Именно поэтому разработчики радиоэлектронной аппаратуры для обработки РЧ-сигналов повышенной мощности использовали и во многих случаях продолжают использовать керамические фильтры, уступающие фильтрам на ПАВ по совокупности эксплуатационных характеристик.

Имеющийся мировой опыт, а также исследования, проведенные в ООО «БУТИС», в том числе в рамках ОКР «Пьезо-12, показывают, что данная проблема может быть устранена путем использования специальных конструктивно-технологических решений.

Известно, что оптимальной конструкцией для данной области применения является многозвенная конструкция импедансного типа, содержащая цепочки из Г- и Т-образных резонаторных звеньев, характерной особенностью которой является большая протяженность электродных структур ВШП. С конструктивной точки зрения повышение уровня допустимой входной мощности достигается путем использования параллельного (обычно на входе фильтра) и последовательного (для резонаторов с наиболее короткими преобразователями) включений ПАВ-резонаторов. Так, применение данного конструктивного приема позволило увеличить уровень допустимой входной мощности в восемь раз: на частоте 2350 МГц с 25 до 200 мВт, на частоте 1587 МГц с 75 до 600 мВт.

Технологические методы повышения уровня допустимой входной мощности в первую очередь связаны с применением многослойных металлических пленок для формирования электродных структур ВШП. В частности, использование многослойной пленки Ti + Al + Ti + Al позволило реализовать ПАВ-фильтр на частоте 1587 МГц, обеспечивающий обработку РЧ-сигнала мощностью порядка 700 мВт (исходное значение при стандартной технологии — 75 мВт). Хорошие результаты в части повышения уровня допустимой входной мощности дает применение диэлектрических покрытий на рабочую поверхность ПАВ-фильтра. Например,

применение пленки SiO_2 толщиной 20 нм позволило увеличить данный параметр до 400 мВт для фильтра той же конструкции.

Следует отметить, что технологические методы, в отличие от конструктивных, не требуют увеличения габаритов пьезоэлектрической подложки и в ряде случаев могут быть предпочтительными.

Использование всей совокупности конструктивно-технологических решений позволило реализовать устройства с уникальными для ПАВ-технологии параметрами, а именно с уровнем допустимой входной мощности до 5 Вт на частотах 600–700 МГц и до 2,0 Вт на частотах до 2,5 ГГц [1–3].

Областями применения ПАВ-фильтров данного типа могут быть приемо-передающие модули систем навигации GPS и GLONASS, в том числе систем экстренного реагирования «ЭРА-ГЛОНАСС», системы дистанционного радиоуправления и обнаружения беспилотных летательных аппаратов, а также системы мобильной сотовой связи стандартов GSM 2G/3G/LTE /5G, NB-IoT.

Литература

1. Синицына Т. В., Багдасарян А. С., Гарифулина А. Т., Груздев А. С., Дорофеева С. С. Конструктивно-технологические особенности устройств на ПАВ для обработки радиочастотных сигналов высокой мощности: исследования способов минимизации потерь в резонаторах для условий многослойного напыления // Наукоемкие технологии, 2018. — Т. 19. — № 2. — С. 46–57.
2. Никитов С. А., Кондратьев С. Н., Синицына Т. В., Машинин О. В., Груздев А. С. Фильтры на поверхностный акустических волнах с высокой входной мощностью для систем связи, радиолокационной и телекоммуникационной аппаратуры на номинальную частоту 2170 МГц // Радиотехника и электроника, 2016. — № 4. — С. 389–394.
3. Гарифулина А. Т. Исследование влияния защитных пленок SiO_2 на стойкость ПАВ-фильтров к воздействию радиочастотных сигналов большой мощности // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S6. — С. 221–227.

УДК 621.396.61

Универсальная платформа программно-определяемого радио РИТМ-SDR-USRP

Кащенко И. Е., к. т. н., Ольховский А. А., Ламкова Н. С., Яковлев Г. А.
АО «Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента»
117418, г. Москва, Нахимовский просп., 51
info@exponenta.ru

Представлена универсальная программно-аппаратная платформа «РИТМ-SDR-USRP», реализующая принцип технологии программно-определяемого радио (SDR). Данная платформа поддерживает универсальный протокол обмена данными UHD (USRP Hardware Driver) со специально разработанным расширением для управления встроенными конфигурируемыми высокопроизводительными IP-ядрами от компании ЦИТМ «Экспонента». Высокая производительность достигается за счет интеграции технологии DFEex-HW (digital front-end — цифровой фронтенд от компании ЦИТМ «Экспонента») в составе ПЛИС со встроенным программным обеспечением цифровой обработки сигналов.

Ключевые слова: РИТМ-SDR-USRP; SDR; программно-аппаратная платформа; DFE; USRP; UHD.

Использование программно-определяемого радио (SDR) позволяет существенно сократить затраты на исследование и разработку перспективных систем связи. Как правило, современные SDR-платформы предполагают программную цифровую обработку сигналов с помощью внешних высокопроизводительных вычислительных устройств. Однако такой вариант не всегда обеспечивает требуемую производительность для высоконагруженных систем связи и систем сбора/обработки данных. Для решения этой задачи целесообразно использование встроенных в SDR-платформу и реализованных с помощью ПЛИС производительных IP-ядер. При этом такое решение должно быть конфигурируемым и параметризируемым с помощью внешнего программного управления для полноценной реализации технологии SDR.

Такой развитой системой конфигурации и параметризации IP-ядер обладает универсальная программно-аппаратная платформа «РИТМ-SDR-USRP» разработки компании ЦИТМ «Экспонента». Она позволяет пользователю применять для обработки сигналов встроенные в ПЛИС высокопроизводительные IP-ядра различного назначения:

- помехоустойчивое кодирование/декодирование;
- быстрое прямое и обратное преобразование Фурье;
- OFDM-модуляция/демодуляция;
- многопозиционная модуляция/демодуляция;
- цифровые предыскажения;
- снижение пик-фактора сигнала;
- цифровая фильтрация;
- цифровое понижающее и повышающее преобразования и т. д.

Для управления и коммутации сигналов этих IP-ядер реализована технология DFEex-HW (digital front-end — цифровой фронтенд от компании ЦИТМ

«Экспонента»). Она позволяет управлять потоком цифровых сигналов внутри ПЛИС, коммутировать сигналы между IP-ядрами, передавать данные результирующей и промежуточной обработки пользователю. Таким образом, реализуется распределенная обработка сигналов с применением ПЛИС.

Ключевой особенностью универсальной программно-аппаратной платформы «РИТМ-SDR-USRP» является совместимость с программным интерфейсом UHD от компании National Instrument (NI), что позволяет в полной мере реализовать импортозамещение SDR-платформ NI USRP.

На рис. 1 представлена структурная схема универсальной программно-аппаратной платформы РИТМ-SDR-USRP.

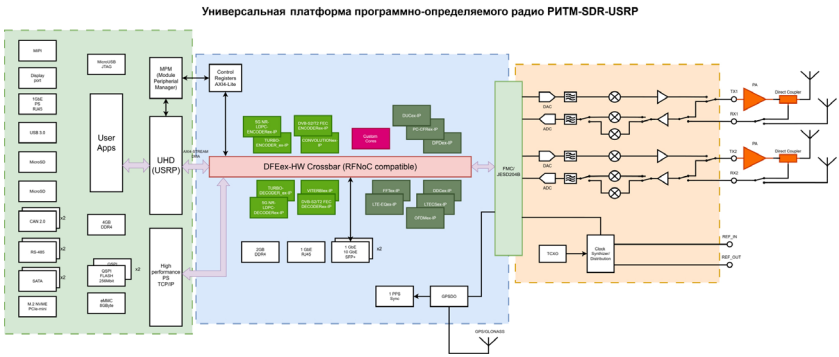


Рис. 1. Структурная схема универсальной программно-аппаратной платформы «РИТМ-SDR-USRP»

Представленная универсальная программно-аппаратная платформа «РИТМ-SDR-USRP» также имеет и высокие технические характеристики:

- ширина полосы частот формируемого сигнала (TX) — 450 МГц;
- ширина полосы частот принимаемого сигнала (RX) — 450/200 МГц;
- диапазон частот приема-передачи — от 100 МГц до 6 ГГц;
- количество передающих каналов — 2;
- количество приемных каналов — 2;
- система синхронизации: GPS/ГЛОНАСС, 1588v2 PTP, внешний/внутренний ОГ.

Литература

1. ЦИТМ Экспонента: офиц. сайт. — URL: https://new.exponenta.ru/comms (дата обращения: 08.07.2025).
2. Кащенко И. Е., Павлов А. П. Регуляризация RLS-алгоритма для адаптивных систем ввода цифровых предыскажений // Радиотехника, 2024. — Т. 88. — № 1. — С. 141–148. DOI: 10.18127/j00338486-202401-13. EDN ODCLUD.
3. Кащенко И. Е., Павлов А. П. Система ввода цифровых предыскажений на основе обобщенной полиномиальной модели с памятью для GaN усилителей мощности // Журнал радиоэлектроники, 2024. — № 10. DOI: 10.30898/1684-1719.2024.10.6. EDN GTWOVS.

УДК 621.3.049

Процессорный сложнофункциональный блок с внеочередным исполнением команд 2-го поколения, совместимый с системой команд RISC-V

Козлов А. В.
ООО «Клаудбеар»
196006, г. Санкт-Петербург, ул. Цветочная, 18, лит. З
alexander.kozlov@cloudbear.ru

Разработано 2-е поколение процессорных ядер с внеочередным исполнением на базе системы команд RISC-V. Описаны микроархитектурные подходы, примененные для увеличения производительности. Описаны поддерживаемые архитектурные функциональные возможности. Приведены результаты производительности на стандартных тестах производительности, а также результаты физической имплементации в технологии СБИС.
Ключевые слова: RISC-V; IP-блоки; процессоры; микроархитектура.

На сегодняшний день процессоры, использующие подход внеочередного исполнения команд, демонстрируют лучшую производительность в классе процессоров общего назначения.

Компанией CloudBEAR были разработано процессорное ядро 2-го поколения BI-672 с внеочередным исполнением команд, совместимое со спецификациями стандарта RISC-V (профиль RVA22), поддерживающее запуск операционных систем с виртуальной памятью (например, ОС Linux). По сравнению с 1-м поколением были переработаны и улучшены подсистема предсказания ветвлений, подсистема выполнения команд чтения/записи, подсистема исполнения команд, подсистема трансляции виртуальных адресов и подсистема памяти.

В докладе будут представлены микроархитектурные особенности данных процессорных ядер, результаты тестов производительности Coremark, Dhrystone, Linpack, Whetstone, SPEC2006, SPEC2017, а также результаты физической имплементации ядер на технологиях СБИС.

УДК 621.382

Трехъядерный микроконтроллер для систем промышленной автоматизации

Мякочин Ю. О., Хренов Г. Ю. д. ф.-м. н.
АО «Байкал Электроникс»
143421, Московская область, городской округ Красногорск, территория Автодорога «Балтия», 26-й километр, 5, стр. 1

Разработан трехъядерный микроконтроллер на основе ядер Risc-V для широкого круга задач систем промышленной автоматизации с инновационными подходами отладки программного обеспечения.
Ключевые слова: микроконтроллер; Risc-V; USB; Python.

Рынок микроконтроллеров всегда разительно отличался от рынка процессоров приложений своим многообразием. Это было связано в первую очередь с тем, что микроконтроллеры разрабатывались под определенный круг задач, а значит, состав, корпус и цена были строго оптимизированы под этот круг задач. И, как результат, вычислительные ядра в этих микроконтроллерах были разнообразными: 8088, AVR, PIC, Mips, ARM и так далее. По мере уменьшения технологических норм изготовления интегральных схем тенденция перехода от 8-битных ядер к 32-битным стала трендом, так как размер кристалла, занимаемого цифровой частью, уменьшался и фактический размер уже определялся не столько цифровой логикой, сколько азмером кольца площадок, так как его габариты уменьшать с такой же скоростью не позволяла технология сборки готовой микросхемы (есть, конечно,вариант использования подхода флип-чип, но это ведет к увеличению стоимости микросхемы и усложнению сборки конечной продукции). После этого стали доминировать микроконтроллеры на архитектуре ARM. Следующей небольшой революцией стало появление открытой системы команд Risc-V. И по мере адаптации всей инфраструктуры под эту систему команд (компиляторы, отладчики, эмуляторы, специализированные библиотеки, адаптация систем реального времени) стали появляться микросхемы с этой системой команд. Ввиду открытой архитектуры разработкой ядер занимаются многие компании по всему миру, в том числе в России. Две компании (Cloudbear и Syntacore) разработали целую линейку ядер, которые можно применять в микроконтроллерах, и это обеспечило независимость от британского поставщика этих компонент.

Разработать такую же линейку микроконтроллеров, которую сделала компания STM, в российских реалиях очень затруднительно, а часто и не требуется. Если посмотреть на опыт компании Espressif, то видно, что упор у них сделан не на широкую номенклатуру микросхем, а на создание большой программной инфраструктуры вокруг продукции этой компании, причем программная инфраструктура по большей части — это Opensource, что дополнительно подчеркивается в миссии компании.

Разрабатывая архитектуру микроконтроллера в компании «Байкал Электроникс», мы также старались разработать такую микросхему, которая позволит использовать ее в достаточно широкой области. Конечно, закрыть все ниши с одной микросхемой невозможно, поэтому наша цель — это системы промышленной автоматики с упором на управление электрическими двигателями. Исходя из этой

задачи, микросхема содержит три ядра Risc-V от компании Cloudbear, каждое из которых максимально адаптировано под решение следующих задач: управляющая логика работы, сигнальная обработка и вспомогательное ядро для поддержки нестандартных протоколов.

Для упрощения работы с нашей микросхемой мы изначально интегрировали в нее интерпретатор Python и полноценный USB-контроллер 2.0 (host/device) с интегрированным физическим уровнем и USB-стеком. Интегрирование высокоскоростного канала связи (USB) позволило нам значительно упростить разработку и отладку программного кода для конечного изделия. В современных микроконтроллерах в подавляющим случае для отладки программ необходимо подключить JTAG-отладчик (5 сигналов), преобразователь UART-USB (2 сигнала) и в отдельных случаях аппаратный tracer (5 сигналов). Таким образом, задействуется 12 выводов микросхемы только для отладки, а значит, их нельзя будет применять для других функций. В нашей микросхеме все эти протоколы могут быть упакованы в один физический канал связи USB (причем эта поддержка реализована на внутреннем ПЗУ, то есть из коробки). Эта функция позволит избавиться от внешних покупных модулей, в том числе tracer (достаточно дорогого на сегодняшний день), и максимально использовать все доступные GPIO для создания конечной аппаратуры.

УДК 004.272

Микроархитектура высокопроизводительного GPGPU для задач искусственного интеллекта

Маслов М. В.
АО «Байкал Электроникс»
143421, Московская область, городской округ Красногорск, территория Автодорога «Балтия», 26-й километр, 5, стр. 1
maksim.maslov@baikalelectronics.ru

В работе рассматривается перспективная архитектура, основанная на принципах массовой мультипоточности (GPGPU) и адаптированная для задач искусственного интеллекта. Приведен анализ существующих решений. Описаны ключевые микроархитектурные подходы, позволяющие достигнуть высокой производительности на массивно-параллельных задачах. Приведены оценки времени исполнения наиболее популярных алгоритмов для задач искусственного интеллекта по результатам моделирования. Предложены направления для дальнейшего развития микроархитектуры.

Ключевые слова: GPGPU; искусственный интеллект; микроархитектура.

Бурное развитие решений на базе искусственного интеллекта (ИИ) предъявляет высокие требования к аппаратному обеспечению, способному эффективно исполнять задачи данного класса. Высокая вычислительная мощность и заложенная параллельность алгоритмов, применяемых в задачах искусственного интеллекта, обуславливает микроархитектурные подходы, применяемые при проектировании такого рода вычислителей. На текущий момент в мире существует большое количество специализированных ускорителей для ИИ, реализующих различные принципы дизайна микроархитектуры — многоядерные процессоры общего назначения, тензорные процессоры (TPU), процессоры Data Flow, нейроморфные процессоры, а также GPU общего назначения (GPGPU). Лидером в данной области является компания Nvidia, разрабатывающая GPGPU со специализированными тензорными ядрами.

В данной работе представлена микроархитектура перспективного GPGPU, предназначенного для задач искусственного интеллекта. В первой части проведен анализ существующих на данный момент архитектурных подходов на примере реализованных решений от компаний Google, Esperanto, Groq, SambaNova, Nvidia, AMD. Сделан вывод о преимуществе GPGPU по сравнению с прочими альтернативами. В дальнейшем рассмотрены основные аспекты, определяющие функциональность и высокую производительность разрабатываемого вычислителя. Дается описание ключевых блоков — вычислительного модуля (PU), кешей инструкций и данных первого уровня (L1I, L1D cache), потокового мультипроцессора (SM), общего кеша второго уровня (L2 unified cache).

Рассмотрено устройство вычислительного модуля (PU): приведены основные блоки, входящие в его состав, кратко описан конвейер исполнения инструкций.

Также в работе описаны ключевые концепции и сложности реализации кешей массивной мультипоточной системы, изложены базовые подходы в их имплементации.

В заключение приводятся количественные оценки производительности на запусках популярных сетей Resnet50, YoloV4, а также алгоритмов свертки и перемножения матриц. Для получения результатов использовался разработанный потактовый симулятор. Определены направления по дальнейшему развитию микроархитектуры.

УДК 004.2

Алгоритмический синтез предметно-ориентированных аппаратных ускорителей

Советов П. Н.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Универсальные процессоры отличаются гибкостью в программировании с использованием привычных прикладным разработчикам программных средств. Вместе с тем достижение высоких характеристик энергоэффективности и быстродействия на различных вычислительных задачах становится для таких процессоров все более проблематичным. В этой связи перспективным является использование аппаратных ускорителей, специализированных для решения узких классов задач или даже для решения единственной задачи. Современные системы на кристалле, помимо универсальных ядер, насчитывают десятки таких предметно-ориентированных ускорителей (Domain-Specific Accelerator, DSA).

Ключевые слова: вычислительная система; ускоритель; компилятор; проблемно-ориентированная архитектура.

Введение

Архитектуры DSA, в отличие от архитектур процессоров общего назначения, отличаются высоким разнообразием, возникающим в первую очередь из необходимости специализации параллельных вычислений и подсистемы памяти для конкретных задач и, возможно, для конкретного проекта. По этой причине проектирование DSA, обладающего заданными характеристиками, необходимо производить в сжатые сроки.

Проектирование архитектуры DSA сегодня осуществляется с помощью низкоуровневых языков Verilog или VHDL и требует высокой квалификации от проектировщика на уровне RTL. При этом затруднен поиск в пространстве архитектурных вариантов (Design Space Exploration, DSE), поскольку создание каждого такого варианта требует значительных усилий со стороны проектировщика. В случае программируемого DSA его оценка осложняется из-за отсутствия прототипа компилятора на этапах проектирования архитектуры.

Методика разработки компилятора

В докладе предлагается методика автоматизации проектирования DSA на основе алгоритмического синтеза архитектуры. На вход синтезатора архитектуры DSA подается набор алгоритмических описаний целевых алгоритмов из заданной предметной области, а также архитектурный шаблон с параметрами. Результатом работы синтезатора является архитектурный граф, который возможно использовать как для генерации RTL-представления, так и для порождения генератора кода прототипа компилятора. Кроме того, автоматически формируется набор команд DSA с оптимизацией размещения двоичных полей.

В отличие от подхода HLS (High-Level Synthesis) поддерживаются реконфигурируемые и программируемые архитектуры RISC/VLIW. Алгоритмы представлены в виде различных DSL (Domain-Specific Language), а не на C/C++, используется

общее промежуточное представление на основе ациклического графа зависимостей. Архитектурная информация имеет более детальный вид, чем набор директив pragma, при этом автоматизируется подход DSE с использованием создаваемого генератора кода прототипа компилятора.

Заключение

В докладе приводятся экспериментальные оценки применения описанной методики на примерах ускорителя из области криптографии и ускорителя поиска по регулярным выражениям.

УДК 621.3.049

Аппаратные средства реализации нейронных сетей, кратно снижающие их время задержки и площадь на кристалле

Буренева О. И., Миронов С. Э., Шичкина Ю. А.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
semironovspb@yandex.ru

Предложено оригинальное аппаратное решение проблемы производительности нейронных сетей на основе умножения на группу разрядов, позволяющее достичь повышения быстродействия при сокращении площади кристалла и возможности автоматической настройки на требуемые проектные нормы.
Ключевые слова: аппаратная реализация нейронных сетей; умножители; группировка разрядов множителя; сжатие топологии.

Одним из основных требований к нейронным сетям и системам искусственного интеллекта является высокое быстродействие. Это обеспечивается аппаратными средствами реализации базовой операции — умножения. Максимальное быстродействие обеспечивается матричными вычислительными устройствами, характеризующимися большой площадью на кристалле. Основой для построения таких вычислителей служат программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) [1, 2], а при более жестких требованиях по быстродействию — графические процессоры.

Доклад посвящен изложению результатов исследований авторов в области разработки заказных (ASIC) специализированных матричных вычислителей, обеспечивающих кратное снижение времени задержки и аппаратных затрат. Это достигается благодаря комплексу дополняющих друг друга оригинальных алгоритмических, схемотехнических и топологических решений [3, 4].

Вычислительный алгоритм базируется на методах умножения с группировкой разрядов множителя, позволяющих ускорять вычисления, выполняя умножение на два разряда множителя [5]. Учет особенностей работы базовых компонентов нейросетей (персептронов) позволил, построив вычислительный алгоритм на основе принципов умножения с группировкой разрядов множителя, снять ограничения на разрядность групп. Это обеспечило кратное снижение времени вычислений и площади на кристалле по сравнению с традиционным вариантом умножения на два разряда множителя.

Схемотехнические решения позволили еще в два раза ускорить работу вычислителя и снизить аппаратные затраты благодаря возможности построения вдвое более компактных топологий базовых ячеек матрицы.

На основе анализа вариантов топологической реализации ячеек был предложен вариант их схемной реализации, обеспечивающий существенное снижение площади на кристалле для устройств с большим коэффициентом ускорения (3, 4, 5).

Топология ячеек проектировалась в КМОП-технологии с использованием оригинальной системы сжатия топологии TopDesign [6], осуществляющей автоматическую настройку топологии ячеек на требуемые проектные нормы с высокой плотностью упаковки.

По результатам проведенных исследований разрабатываются средства кремниевой компиляции персептронов — программы генерации топологии [7], параметризированные по проектным нормам, по разрядности данных, по мощности каскадов, по числу группируемых разрядов множителя (от 2 до 5).

Литература

1. Bureneva O., Mironov S. Fast FPGA-Based Multipliers by Constant for Digital Signal Processing Systems // Electronics, 2023. Vol. 12 (3). P. 605. URL: https://doi.org/10.3390/electronics12030605.
2. Tawfeek R. M., Elmenyawi M. A. VHDL implementation of 16×16 multiplier using pipelined 16×8 modified Radix-4 booth multiplier // Int. J. Electron., 2022. Vol. 110 (6). P. 971–985. URL: https://doi.org/10.1080/00207217.2022.2068198.
3. Миронов С. Э., Буренева О. И., Зибарев К. М. Быстродействующие умножители для аппаратной реализации искусственных нейронных сетей // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2022. — Вып. 4. — С. 109–116. DOI: 10.31114/2078-7707-2022-4-109-116.
4. Миронов С. Э., Буренева О. И., Милакин А. Д. Анализ архитектур умножителей для аппаратной реализации нейронных сетей // III Международная конференция по нейронным сетям и нейротехнологиям (NeuroNT), 2022. — Санкт-Петербург, 2022. — С. 32–35. DOI: 10.1109/NeuroNT55429.2022.9805564.
5. Venkata Dharani B., Joseph S. M., Kumar S., Nandan D. Booth Multiplier: The Systematic Study // Lecture Notes in Electrical Engineering; Kumar, A., Mozar, S., Eds.; Springer: Singapore, 2021. Vol. 698. P. 943–956.
6. Зуев И. С., Миронов С. Э., Сафьянников Н. М., Максимов А. Б. Виртуальное символьное проектирование параметризованных фрагментов КМОП БИС. — СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. — 236 с. [20] с. вкл.
7. Зуев И. С., Миронов С. Э., Сафьянников Н. М. Проектирование специализированных кремниевых компиляторов в САПР параметризованных фрагментов КМОП БИС TopDesign. — СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. — 226 с., [20] с. цв. ил.

Высокопроизводительные отечественные ускорители для инференса нейронных сетей в реальном времени

Фролов М. А.
заместитель генерального директора по научной работе, к. т. н.
ООО «ХайТэк»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42
Технополис «Москва»
info@lin-q.ru

Основными трендами развития промышленности в мире в период с 2025 по 2030 гг. являются роботы, космос и искусственный интеллект. Одной из важнейших задач является развитие технологий ИИ и обеспечение суверенитета в этом направлении.

Потребность в ускорителях нейронных сетей на мировом рынке стабильно растет. Объем мирового рынка в 2025 году составит более 93 млрд долл. США и, по прогнозам, вырастет в 2027 году до 129 млрд долл. Рынок РФ заинтересован в аппаратных решениях для применения в автономных системах и беспилотии, анализе данных в системах «Безопасный город», управлении транспортными средствами, здравоохранении, кибербезопасностм и защите от мошенников, логистике и обслуживании. Объем рынка решений ИИ в РФ, по оценке STATISTA, оценивается в 2025 году в 413 млрд руб., а к 2030 году составит 1,4 трлн руб.

Компания «ХайТэк» — российский разработчик решений на базе отечественного процессора собственной архитектуры и полного набора необходимого программного обеспечения под брендом LinQ. Созданные компанией аппаратные ускорители для искусственного интеллекта опираются на запатентованную архитектуру и проприетарные алгоритмы инференса нейросетей. Результатом семилетней разработки первого отечественного тензорного процессора в 2022 году стал опытный образец интегральной микросхемы Н и линейка специальных вычислителей на ее основе.

В 2022 году при поддержке Министерства промышленности и торговли проведена модернизация тензорного процессора, и в конце 2023 года изготовлена инженерная партия процессоров LinQ H1M, которые в марте 2024 года успешно прошли функциональные испытания.

Разработанный доверенный тензорный процессор имеет уникальное IP-ядро, позволяющее производить расчет сверточных и иных нейронных сетей с производительностью в int8 на систолическом массиве 128×128 порядка 24 ТОПС за счет 16 тысяч элементов, максимальной рабочей частоты 1 ГГц, встроенной памяти 16 Мб.

Разработанные компанией процессоры и модули на их базе снижают зависимость от иностранных решений и гарантируют импортонезависимость и технологический суверенитет в аппаратной части искусственного интеллекта. Микрочип LinQ Н — яркий пример высококлассного российского технологического решения, не уступающего зарубежным аналогам.

Линейка ускорителей с процессорами LinQ H1M поставляется заказчикам в различных форм-факторах: PCIe, SBC3,5 и 3U. Ускорители в форм-факторе PCIe (LinQ HP, HPD, HPQ) имеют исполнения с одним, двумя и четырьмя процессорами.

Производительность решений с четырьмя процессорами составляет до 96 ТОПС. Ускорители LinQ HX работают в паре с сопроцессором общего назначения, модули поставляются в паре с Rockchip 3588 и фактически могут заменять бортовой компьютер автономной системы. Универсальный ускоритель HPS построен на базе LinQ HPQ (до 10 шт.) и предназначен для выполнения инференса «тяжелых» нейронных сетей в реальном времени с низкой задержкой, обеспечивая потоковую передачу входных данных и результатов инференса. Он обеспечивает низкую задержку при обработке малых батчей, обладает пиковой производительностью до 960 TOPS (int8) и интегрируется в стандартные 19-дюймовые стойки. Ускоритель основан на оригинальной архитектуре LinQ H1M, не использует сторонние IP-ядра и поддерживает прямую интеграцию с экосистемой TensorFlow 2.x и PyTorch (через ONNX). Использование внутреннего компилятора LinQ Compiler с элементами ИИ обеспечивает глубокую оптимизацию вычислительных графов, что позволяет свести задержку инференса к минимуму.

Ключевыми характеристиками LinQ HPS являются:

- **производительность и масштабируемость:** до 960 TOPS (int8) на одном юните (node); объем памяти 640 ГБ DDR4 ECC (многоканальная конфигурация); возможность одновременного запуска до 40 моделей нейронных сетей; линейная масштабируемость при установке нескольких ускорителей;
- **гибкая интеграция**: форм-фактор: 3U Rackmount, поддержка стандартной 19» стойки; интерфейс 2x PCIe x16 Gen4; дополнительные опции ASIC-плат для аппаратного видеокодирования (H.264, H.265 и др.);
- **низкая задержка**: ~2,3 мс для ResNet-50 (batch = 1), при оптимизациях — до 1,5 мс; специализированные оптимизаторы в компиляторе (DNN Quant, Graph Optimizer);
- **программный стек собственной разработки:** нативная интеграция с TensorFlow 2.x; поддержка PyTorch через ONNX; собственные инструменты анализа производительности (Performance Profiler, DNN Stat);
- **надежность и защита:** Watchdog Timer, Power Monitor, мониторинг температуры; гибкое управление тактовой частотой для оптимизации TDP;
- **энергопотребление (TDP):** 300/600/900/1500 Вт (зависит от частоты и режима охлаждения; есть троттлинг и возможность управлять питанием через ПО).

Ускорители компании «ХайТэк» LinQ HPS предназначены для запуска и ускорения нейронных сетей в приложениях с ИИ:

- корпоративные и облачные сервисы (MLaaS, таргетинг, рекомендации и пр.);
- интеллектуальная видеоаналитика и городская безопасность;
- биометрия и контроль доступа;
- научные исследования и разработка лекарств;
- распределенные вычисления;
- оптимизация энергопотребления.

Если сравнивать технические характеристики ускорителей LinQ с импортными аналогами, то решение компании «ХайТэк» имеет высокие конкурентные показатели по удельной производительности ТОПС на ватт, что при прочих характеристиках позволяет пользователю решать прикладные задачи на отечественном железе.

Ускорители LinQ имеют поддержку фреймворка TPU, позволяющего разработчику нейронной сети интуитивно понятно портировать ее модель на вычислительные мощности ускорителя. Для этого разработан специальный конвертер из формата ONNX в TensorFlow. Сконвертированная модель автоматически квантуется, формируется вычислительный граф, после чего осуществляется расчет графа тензорным процессором. Наибольшую производительность ускорители показывают при работе со сверточными нейронными сетями и трансформерами. Более сотни нейронных сетей протестированы на облачном сервисе компании «ХайТэк» («Атлантик») и в изделиях заказчика. По результатам успешного тестирования нейронных сетей гарантирована работоспособность ускорителя из коробки.

В планах компании в 2028 году выйти на рынок РФ с ускорителями на базе процессоров нового поколения LinQ H2 с характеристиками, сопоставимыми с иностранными аналогами, для решения задач в области машинного обучения и работы с большими языковыми моделями. Создание LinQ H2 позволит в десятки раз повысить производительность LinQ HPS.

Одну из задач на пути к импортонезависимости можно решить уже сейчас, а именно повысить доверие к отечественным решениям в области ИИ и помочь разработчикам перспективных комплексов и систем с технологиями ИИ получить доступ к отечественным аппаратным решениям и пройти обучение по работе с отечественными ускорителями. Это возможно путем создания доверенной отраслевой платформы на площадке Министерства промышленности и торговли, организации удаленного доступа специалистов промышленности, отвечающих за разработку систем и комплексов, а также организации обучения специалистов промышленности работе с программно-аппаратными решениями доверенной платформы.

УДК 004.2

Архитектуры специализированных ускорителей вычислений на основе массового параллелизма для создания программно-аппаратных комплексов на базе процессоров «Эльбрус»

Тарасов И. Е.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Рассмотрены подходы к проектированию программно-аппаратных комплексов на основе ускорителей с массово-параллельной архитектурой, предназначенные для создания специализированных вычислительных устройств на базе процессоров «Эльбрус». В рамках подхода рассмотрено сочетание конвейерных и программируемых узлов, реализующих потоковую обработку данных в составе комплекса, что существенно увеличивает производительность систем на базе процессоров общего назначения для целевого подкласса задач.
Ключевые слова: вычислительная система; ускоритель; ПЛИС; СБИС; проблемно-ориентированная архитектура.

Введение

Повышение эффективности вычислительных комплексов ограниченного подкласса задач возможно при условии использования специализированных ускорителей вычислений, адаптированных для этого подкласса. При этом процессор общего назначения в составе программно-аппаратного комплекса выполняет задачи интеграции подсистем и управления работой, а основной объем вычислений выполняется ускорителями, которые в силу высокой специализации могут иметь массово-параллельную архитектуру, что обеспечивает высокую суммарную производительность не вследствие высокой тактовой частоты одного узла, а как результат параллельной работы большого количества узлов.

Архитектуры и подходы к проектированию ускорителей вычислений с массовым параллелизмом

Практические подходы к проектированию ускорителей вычислений с массовым параллелизмом заключаются в выборе архитектурных шаблонов на основе анализа графа вычислительной задачи, представленного в абстрагированном виде. Далее проектирование специализированного узла выполняется с учетом его архитектуры: для конвейерного представления — как набор функциональных устройств на каждой из стадий, а для программируемого процессорного узла — как описание регистровой модели и арифметико-логического устройства, обеспечивающих выполнение операций для всех узлов графа. Сочетание ускорителей разных типов расширяет область применения подхода, повышая эффективность систем на базе процессоров общего назначения.

Перспективными областями применения массово-параллельных ускорителей являются криптографические преобразования, системы цифровой обработки сигналов и системы потокового анализа сетевого трафика.

Заключение

Инициативные исследования в области разработки ускорителей с массово-параллельной архитектурой показали возможность построения анализатора сетевого трафика на основе глубокой инспекции пакетов, на основе правил, описываемых регулярными выражениями. Разработанный макет на базе ПЛИС AMD Artix-7 реализует до 300 независимо программируемых специализированных процессоров для потоковой обработки сетевого трафика 1G Ethernet. Количество процессоров определяется логическим объемом ПЛИС и может быть при необходимости увеличено.

УДК 004.318

Разработка контроллера оперативной памяти DDR5 для многоядерных процессоров

Петров И. А.
АО «МЦСТ»
117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

Описана разработка контроллера памяти DDR5 процессоров «Эльбрус» седьмого поколения на основе контроллера DDR4 и его оптимизация для повышения многопоточной производительности, включая структурные и логические изменения. Приводятся оценки повышения эффективности работы.

Ключевые слова: многоядерность; подсистема памяти; контроллер памяти; DDR5.

С развитием полупроводниковых технологий становится возможным размещать все большее число ядер в одном процесссоре. Растущая потребность процессора в пропускной способности памяти отчасти компенсируется развитием стандартов DDR SDRAM, однако достижение номинальной пропускной способности памяти в реальных многопоточных задачах требует все большего внимания.

Начиная с DDR2 АО «МЦСТ» использует в своих процессорах контроллеры памяти собственной разработки. Контроллер DDR4 [1] претерпел ряд оптимизаций для эффективной работы в составе 16-ядерного процессора [2], где демонстрирует пропускную способнность от 60 до 80 % от номинальной.

При разработке процессоров «Эльбрус» седьмого поколения контроллер памяти был модернизирован до стандарта DDR5 [3]. Он подерживает память RDIMM и LRDIMM, ECC x4, x8 и x16, 3DS глубиной до 8H объемом до 4 ГБ на один физический канал. Частота работы может достигать 6400 МТ/с в зависимости от физуровня.

Переход на новую версию стандарта потребовал ряда структурных изменений. DDR5 подразумевает два логических канала в одном физическом, что реализовано отдельным контроллером памяти на каждом логическом канале. Для поддержки возросшей частоты памяти максимальную тактовую частоту контроллера потребовалось увеличить вдвое до 1600 МГц и соответственно оптимизировать конвейер обработки запросов.

Ряд доработок, как в самом контроллере, так и за его пределами, произведен для повышения пропускной способности памяти при многопоточном доступе. Реестр заявок планировщика разделен на два для чтения и записи, суммарно принимая два запроса за такт. Соответственно доработана логика фильтров и переупорядочивания запросов. Для уменьшения частоты открытия страниц [4] в накристальной сети, ядрах и других устройствах разрабатываемого процессора реализована автоматическая группировка запросов в память.

В экспериментах на RTL-модели процессора в тестах, соответствующих STREAM и SPEC CPU2017, новый контроллер показывает более высокую эффективность по сравнению с контроллером предыдущего поколения, демонстрируя около 80 % от номинальной пропускной способности без использования группировки запросов и 90 % с группировкой даже при 48-поточном доступе.

Литература

1. Петров И. А. Разработка контроллера оперативной памяти для применения в современных микропроцессорах семейства «Эльбрус» // Радиопромышленность, 2019. — Т. 29. —№ 3. — С. 41–47.
2. Петров И. А., Недбайло Ю. А. Оптимизации контроллера оперативной памяти DDR4 процессоров серии Эльбрус (тезисы на «Микроэлектронике-23»).
3. Jedec Standard. DDR5 SDRAM Specification. (JESD79-5A).
4. Nedbailo Yu. A., Petrov I. A. Increasing DDR4 SDRAM throughput in parallel workloads // 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Mar. 2020.

УДК 004.318

Современные методы моделирования многоядерных процессоров

Недбайло Ю. А.
ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»
119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24

Описаны методы моделирования многоядерных процессоров для их верификации и оптимизации на разных этапах проектирования. Для ускорения моделирования рассматривается упрощение модели, использование трасс событий и кластерная выборка.

Ключевые слова: многоядерность; программное моделиирование; потактовый симулятор.

Многоядерные процессоры содержат колоссальное количество логических элементов, которое растет как с увеличением количества ядер, так и с развитием архитектуры. Усложняются и выполняемые ими задачи. На разных этапах проектирования, соответственно, требуются различные адекватные этому этапу методы моделирования выполнения процессором реальных задач.

Для верификации, то есть проверки корректности, требуется точное моделирование его RTL-описания. Соответственно, на ранних этапах проектирования для этого используются RTL-симуляторы, а на поздних — прототипы на ПЛИС.

Для оптмизации производительности, как правило, используются потактовые симуляторы, достаточно точно описывающие поведение каждого компонента процессора на языке программирования вместо RTL. Ускорение по сравнению с RTL-симуляцией получается кардинальное, но недостаточное для моделирования реальных задач.

Один из подходов к дальнейшему ускорению — упрощение модели. Для оптимизации ядра обычно достаточно детально моделировать только его, а дальше L1 или L2 кеша упростить все до функциональной модели [1]. Модели кешей и накристальной сети можно в некоторой степени упрощать и для их оптимизации [2].

Другой подход — использование трасс событий вместо исполнения кода или trace-based вместо execution-based симуляции. Это подходит для оптимизации устройств подсистемы памяти [2]. На execution-based-симуляторе с некоторого уровня кешей сохраняется в файлы последовательность запросов в память, и эти файлы затем воспроизводят на модели процессора вместо выполнения кода. Недостаток этого подхода — сложность моделирования обменов между ядрами, но решения этой проблемы существуют [3].

Третий подход — кластерная выборка. Для оценки средних значений показателей производительности за время выполнения программы с любой точностью можно измерить их на достаточном количестве случайно выбранных участков достаточно большой длины. При использовании трасс нужно просто вырезать эти участки из них [2]. При execution-based-симуляции можно переключаться между потактовым и функциональным симулятором или даже эмуляцией (это умеет популярный симулятор Gem5). На прототипе — выполнять бинарные файлы, сформированные на основе моделируемых задач [4]. Проблема этого подхода — прогрев кешей в начале каждого участка. При небольшом их размере или высокой скорости

моделирования можно просто выбрать размер участков достаточно большим. Иначе нужно воспроизводить состояние кешей.

В целом при проектировании процессора целесообразно использовать как минимум RTL-симуляторы и прототип на ПЛИС для верификации, execution-based-симулятор для оптимизации ядра и trace-based-симуляторы для оптимизации подсистемы памяти. Как максимум — различные гибридные методы для более точной оптимизации.

Литература

1. Порошин П. А., Мешков А. Н., Черных С. В. Разработка симулятора, поддерживающего потактовый режим работы, на основе текущей версии функционального симулятора архитектуры «Эльбрус» // Вопросы радиоэлектроники, 2018. — № 2. — С. 69–75.
2. Nedbailo Y. Fast and Scalable Simulation Framework for Large In-Order Chip Multiprocessors // 2020 26th Conference of Open Innovations Association (FRUCT).
3. Sangaiah et al. Synchrotrace: Synchronization-aware architecture-agnostic traces for lightweight multicore simulation of CMP and HPC workloads // ACM Trans. Archit. Code Optim., 15 (1), March 2018.
4. Patil H. et al. PinPlay: A framework for deterministic replay and reproducible analysis of parallel programs // Int. Symposium on Code Generation and Optimization, 2010.

УДК 004.716

Применение одноплатных компьютеров в основе сети связи робототехнических комплексов

Бычков И. Н.[1], Коренев П. В.[2]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1а, корп. 1
bychkov.in@mipt.ru
[2] *ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»*
119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24

Одноплатный компьютер применяется в качестве бортового вычислителя робота с передачей видеопотока. Целевыми задачами такого вычислителя являются приложения в основе сети связи для эффективной маршрутизации данных в группе роботов. В рамках экспериментов определены требования к производительности таких вычислителей с учетом динамического перестроения сети связи.

Ключевые слова: одноплатный компьютер; производительность сети связи; обработка данных; маршрутизация.

Предложено использовать популярные mesh-сети, основанные на стандарте IEEE 802.11s, для подсистемы связи группы робототехнических комплексов. Этот стандарт добавляет поддержку mesh-сетей, в которых устройства могут соединяться друг с другом напрямую, без центральной точки доступа. Такие сети удобны для развертывания в сложных условиях, где нет возможности установить полноценную инфраструктуру: например, в удаленных районах или на временных мероприятиях. Реализация данного стандарта, как правило, выполняется на уровне драйверов адаптеров с подключением к высокоскоростным интерфейсам одноплатного компьютера, например PCIe 2.0 или USB 3.x. Этот стандарт успешно апробирован для построения сети из нескольких сотен узлов [1].

В качестве узлов связи использованы одноплатные компьютеры различных производителей, включая российские решения. Такие компьютеры становятся все более популярными для новых применений [2]. Проведен анализ производительности и эффективности решений с применением популярных моделей из этого класса устройств. Выявлены особенности применения одноплатных компьютеров со встроенными адаптерами, поддерживающими на уровне драйвера стандарт IEEE 802.11s. Особое внимание уделено энергоэффективности и качеству сервиса сети связи с учетом использования робототехнических комплексов.

Особенностью исследования является применение робототехнических комплексов в изменяющихся условиях эксплуатации и радиолокационной обстановки. Проведена оценка качества общего программного обеспечения одноплатных компьютеров в качестве бортовых вычислителей. Несмотря на небольшие пропускные способности каналов связи, требуемые условия эксплуатации характеризуются постоянным перестроением маршрутов передачи данных, а также поддержанием работоспособности робота в автономном режиме при возможном отсутствии связи.

Литература

1. Вишневский В., Лаконцев Д., Сафонов А., Шпилев С. Mesh-сети. В ожидании стандарта IEEE 802.11s // Электроника: Наука. Технологии. Бизнес, 2008. — № 3. — С. 98–105.
2. Полянин М. Лучшие одноплатные мини-компьютеры для работы и кодинга // Журнал «Яндекс Практикума». — URL: https://thecode.media/mini1/?ysclid=md170m95fs886684539.

УДК 004.65

Анализ производительности специализированной СУБД для многослойных технических объектов

Федоткин А. С.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1а, корп. 1
falexey@vlsi.ru

Разработана специализированная СУБД SDB для хранения и обработки многослойных технических объектов (МТО). Проведены анализ и экспериментальная проверка производительности СУБД на мультиплатформенном стенде тестирования.
Ключевые слова: СУБД; многослойные технические объекты; визуализация данных; обработка данных.

Предложен вариант реализации специализированной СУБД Structure Data Base (SDB) для эффективной обработки и визуализации МТО со встроенным интерфейсом API для ускоренных вычислений на высокопроизводительных вычислительных комплексах с применением графических ускорителей как для аппаратной растеризации при визуализации данных, так и для ускоренных вычислений при их обработке.

Основным критерием производительности предложенной СУБД предлагается считать суммарную производительность, которая должна обеспечить пользователю комфортную работу с проектами, связанными с обработкой МТО. Комфортной работу предлагается считать при выполнении следующих условий:

1) алгоритмическая сложность операций, влияющих на интерактивную работу, не должна превышать $m \cdot \log(n)$, где m — число модифицируемых объектов при выполнении одной интерактивной операции, n — общее количество объектов в базе данных. При этом не требуется учитывать сложность операций, не влияющих на интерактивную работу пользователя;
2) отрисовка n объектов базы данных должна выполняться без видимой пользователю задержки на доступном оборудовании вычислительного комплекса, при n, принятом равным 1 миллиону. Считаем, что задержка пользователю не видна при отрисовке изображения со стандартным популярным разрешением FullHD 1920×1080 пикселей не менее 25 кадров в секунду [1]. То есть отрисовка одного кадра должна выполняться не дольше, чем за 40 мс.

Рассмотрены операции, влияющие на интерактивную работу пользователя, такие как поиск геометрически связанных объектов или объектов с заданным свойством, поиск объектов в заданной области пространства, добавление, изменение, удаление объектов или их свойств. В предложенной реализации СУБД эти операции сводятся к выборке объектов из ассоциативного контейнера по ключу либо поиску объектов в дереве квадрантов. Сложность таких операций не превышает логарифмическую от общего количества объектов в базе данных.

Для оценки производительности СУБД создан стенд тестирования, состоящий из двух программно-аппаратных комплексов на платформе «Эльбрус» и AMD. Параметры стенда представлены в табл. 1.

Таблица 1. Состав и характеристики стенда тестирования

Количество процессоров	2 шт. «Эльбрус 8С»	1 шт. AMD EPYC 7543
Архитектура	«Эльбрус», версия 4	x86-64
Количество ядер Межпроцессорное взаимодействие	8 ядер в процессоре 2 процессора в модуле (8 Гбайт/с межпроцессорные связи)	32 ядра
Тактовая частота	1300 МГц	2800 МГц
Оперативная память	4 канала DDR3-1600 registered ECC, до 51,2 ГБ/с 64 Гбайт на процессор Всего 128 ГБ	8 каналов DDR4-3200 registered ECC, до 204,8 ГБ/с Всего 128 ГБ
Видеокарта	1 шт. на базе графического процессора AMD Radeon RX 6900 XT с 16 ГБ ОЗУ, 5120 графических ядер, работающих на частоте 1890 МГц	1 шт. AMD Radeon RX 6950 XT 1 шт. на базе графического процессора NVidia RTX 3090 с 24 ГБ ОЗУ, 10496 графических ядер, работающих на частоте 1395 МГц
Мониторы	1шт. 4K Ultra HD (3840×2160)	1шт. 4K Ultra HD (3840×2160)

Экспериментально на стенде тестирования было определено время отрисовки базы данных, содержащей 1 миллион объектов, равное 12,5 мс на платформах «Эльбрус» и AMD с графическим ускорителем AMD Radeon RX 6950 XT и 8,3 мс на платформе AMD с графическим ускорителем NVidia RTX 3090, что коррелирует с публикуемыми производителями параметрами графических процессоров.

СУБД SDB успешно применена в САПР «СРК», разрабатываемой в ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» для проектирования корпусов сложнофункциональных микросхем [2]. Данная СУБД может быть использована для более сложных МТО в задачах разработки электронных устройств и других областях, однако эффективность применения потребует апробации. В лаборатории средств проектирования микроэлектроники ФГАОУ ВПО МФТИ при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание) № 075-03-2025-662 от 17.01.2025 г. проводится исследование возможности применения методов искусственного интеллекта для автоматизации выполнения трассировки с применением высокопроизводительных графических ускорителей.

Литература

1. Саломатин С. А., Артишевская И. Б., Гребенников О. Ф., Профессиональная киносъемочная аппаратура и тенденции ее развития в СССР // Профессиональная киносъемочная аппаратура / Т. Г. Филатова. — 1-е изд. — Л.: Машиностроение, 1990. — С. 4–36. — 288 с. — ISBN 5-217-00900-4.
2. Бычков И. Н., Валягин А. С., Васюткин А. О., Ведешкин Д. А., Лобанова А. Г., Лобанов И. Н., Смирнов Ю. В., Федоткин А. С., Шинкарук В. Д. Комплект программных средств как технология корпусирования микросхем // Приборы, 2024. — № 12 (294). — С. 6–13.

УДК 621.382.2

Аппаратные решения для реализации высокопроизводительной системы межпроцессорных обменов

Аряшев С. И., Токарев И. В.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
aserg@cs.niisi.ras.ru, tokigvl@cs.niisi.ras.ru

Разработана микросхема поддержки системы межпроцессорных обменов (СМПО), предназначенная для коммутации супер-ЭВМ. Это ключевой компонент в построении высокоскоростных сетей передачи данных.
Ключевые слова: PCI Express; супер-ЭВМ; приемо-передатчик; канал связи; СМПО.

Разработана микросхема поддержки системы межпроцессорных обменов (СМПО) [1]. СМПО предназначена для коммуникационных сетей мультипроцессорных систем супер-ЭВМ [2], микросхема является ее ключевым компонентом. Микросхема содержит следующие основные компоненты:

- 20 высокоскоростных четырехканальных приемо-передатчиков данных;
- 10 каналов связи;
- 2 контроллера PCI Express;
- коммутационное ядро;
- контроллер управления микросхемой;
- контроллеры управления передачей данных;
- контроллеры управления приемом данных;
- контроллер Ethernet;
- контроллеры UART;
- контроллеры SPI;
- контроллер JTAG.

Высокоскоростные четырехканальные приемо-передатчики обеспечивают прием и передачу данных с пропускной способностью одного канала до 25 Гбит/с. Поддерживаемая ширина входной и выходной параллельных шин данных приемо-передатчика — 16/20/32/40/64 бит. Микросхема содержит встроенные средства самотестирования приемо-передатчиков.

Каналы связи микросхемы обеспечивают пакетную передачу данных. Каждый канал образован путем агрегации двух высокоскоростных четырехканальных приемо-передатчиков. Пропускная способность каждого канала — до 200 Гбит/с. Каналы связи имеют встроенные средства самотестирования.

Контроллеры PCI Express (PCIe) представляют собой EndPoint-устройства, соответствующие спецификации PCI Express 3.0. Ширина каждого контроллера PCIe — x16. Приемо-передатчики контроллера PCIe четырехканальные, имеют пропускную способность до 8 Гбит/с на канал, суммарная пропускная способность каждого контроллера — до 128 Гбит/с. Каждый контроллер имеет встроенные средства самотестирования.

Топология микросхемы СМПО изготовлена по технологии TSMC 28 нм hpc+. Размер кристалла — 15,9×13,8 мм. В общей сложности микросхема содержит 28 четырехканальных приемо-передатчиков (20 приемо-передатчиков для каналов

связи и 8 приемо-передатчиков для контроллеров PCIe). Объем блочной памяти в микросхеме — порядка 12 Мбайт. Имеются внутренние средства самотестирования памяти.

Количество высокоскоростных приемо-передатчиков, размер кристалла привели к дополнительному количеству согласований с фабрикой-изготовителем.

Примененные в микросхеме высокоскоростные приемо-передатчики и контроллеры PCIe отечественной разработки являются передовыми решениями в области создания отечественных микросхем. Также в ходе разработки микросхемы было освоено корпусирование кристаллов такого размера на отечественном производстве.

Литература

1. Шагалиев Р. М. Направления работ и актуальные задачи развития суперкомпьютерных технологий, включая высокопроизводительную вычислительную базу // Материалы Всероссийской научно-технической конференции (МВУС-2022). — Ростов-на-Дону, 2022. — С. 61–63.
2. Басалов В. Г., Холостов А. А. Перспективная гибридная топология KNS для систем межпроцессорных обменов на базе СМПО-10G // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов, 2016. — № 3. — С. 62–69.

УДК 621.391.31

Высокочастотная система тактирования сигнала для четырехканального мультистандартного последовательного 28 Гб/с приемо-передатчика по технологии КМОП 28 нм

Ларионов А. В., Буякова О. Н., Сысоева О. В., Тарасов И. В., Токарев И. В., Прозорова А. Г.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
alar@cs.niisi.ras.ru

Высокочастотная система тактирования (ВСТ) приемо-передатчика спроектирована по технологии КМОП 28 нм. Выходной сигнал передатчика, тактируемого данной системой, демонстрирует суммарный джиттер $TJ_{TX} = 11{,}9$ пс@25 Гб/с для полинома PRBS7 и вероятность битовых ошибок $BER = 10^{-12}$.

Ключевые слова: фазовая автоподстройка частоты; приемо-передатчик; LC-осциллятор; активная индуктивность.

При разработке высокоскоростного многоканального последовательного приемо-передатчика особое внимание уделяется ВСТ. Характеристики приемо-передатчика, а именно скорость обработки данных, энергоэффективность, мультистандартность, напрямую зависят от ВСТ.

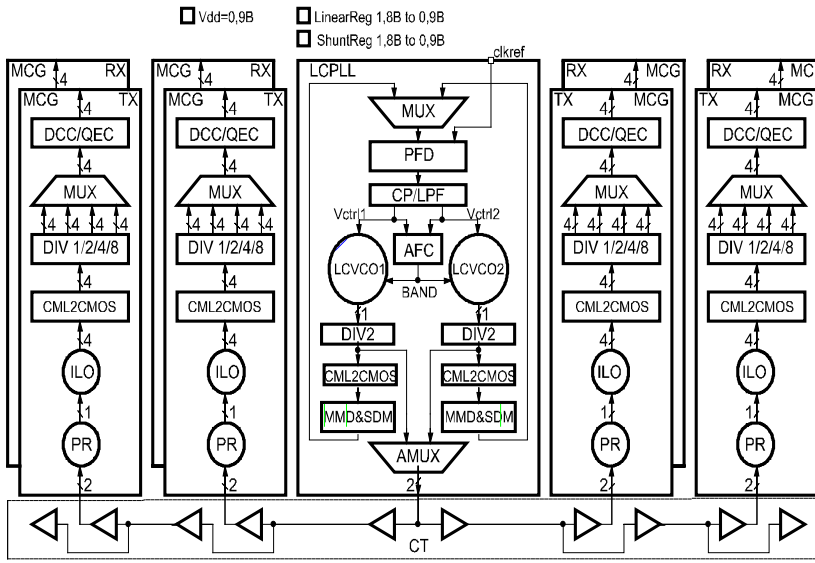


Рис. 1. Структурная схема высокочастотной системы тактирования

На рис. 1 показана структурная схема ВСТ, которая состоит из фазовой автоподстройки частоты LCPLL (LC Phase Lock Loop), дерева синхронизации CT (Clock Tree) и восьми мультифазных генераторов MCG (Multiphase Clock Generator). LCPLL реализована аналоговым образом [1] и обеспечивает работоспособность приемо-передатчика в диапазоне 18,2–29,0 Гб/с и деленных на степень 2 субдиапазонах. CT реализовано с использованием активной индуктивности [2], что позволяет увеличить полосу пропускания по сравнению с резистивной нагрузкой без дополнительных затрат по мощности. MCG формирует требуемое количество фаз для передатчика TX или приемника RX, используя только один фазовращатель PR (Phase Rotator), что обеспечивается применением инжекционного осциллятора [3] ILO (Injection Lock Oscillator).

Рис. 2. Глазковая диаграмма PRBS7 на 25 Гб/с

Рис. 3. Глазковая диаграмма «гребенка» на 12,5 ГГц

Глазковая диаграмма на рис. 2 снята с выхода передатчика [4] с помощью Keysight DSAZ254A, демонстрирует суммарный джиттер $TJ_{TX} = 11{,}9$ пс@25 Гб/с и $RJ_{RMS} = 320$ фс для полинома PRBS7 и вероятности битовых ошибок $BER = 10^{-12}$. На рис. 3 «гребенка» с $RJ_{RMS} = 300$ фс. Потребляемая мощность ВСТ 233 мВт@25 Гб/с.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме FNEF-2024-0003.

Литература

1. Almadi M., Pi D., Catli B. et al. A 288fs RMS jitter versatile 8-12,4 GHz wide-band fractional-N synthesizer for SONET and SERDES communication standards in 40 nm CMOS // IEEE International Conference on VLSI Design, 2013. P. 160–161.
2. Kimura H., Aziz P., Jing T. A 28 Gb/s 560 mW multi-standard serdes with single-stage analog frond-end and 14-tap decision feedback equalizer in 28 nm CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014. Vol. 49. № 12. P. 3091–3103.
3. Ozkaya I., Cevrero A., Francese P. et al. A 60-Gb/s 1.9-pJ/bit NRZ optical receiver with low-latency digital CDR in 14-nm CMOS FinFET // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018. Vol. 53. № 4. P. 1227–1237.
4. Ларионов А., Буякова О., Сысоева О., Токарев И. Последовательный 28 Гб/с передатчик с энергоэффективностью 3,2 мВт/Гб/с квадратурным тактированием по технологии КМОП 28 нм // Наноиндустрия, 2024. — № S10-1. — С. 51–57.

УДК 004.052.42

Интеллектуальные системы адаптивной настройки параметров DDR на базе машинного обучения

Земков С. И., к. т. н. Корниленко А. В., к. т. н. Гревцев Н. А., к. т. н. Чибисов П. А.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
zemkov@cs.niisi.ras.ru

Разработан метод оптимизации настроечных коэффициентов DDR3 SDRAM на основе машинного обучения. Предложен подход с использованием алгоритмов градиентного бустинга (XGBoost) и Random Forest для прогнозирования стабильных конфигураций памяти. Предложенный метод апробирован на синтетической задаче и применен для подбора настроечных коэффициентов DDR3 SDRAM. Показана эффективность метода по сравнению со стандартным маршрутом подбора настроек.

Ключевые слова: DDR3 SDRAM; оптимизация настроек; машинное обучение; XGBoost; кластеризация.

На сегодняшний день одной из проблем при работе с DDR SDRAM является сложность настройки многочисленных параметров (CAS-задержки, напряжения, калибровки и др.), особенно при увеличении частот. Традиционный перебор конфигураций становится неэффективным из-за высокой вычислительной сложности. Машинное обучение зарекомендовало себя в качестве эффективного инструмента анализа сложных технических систем с неочевидными взаимосвязями [1, 2].

В данной работе предложен метод оптимизации настроечных коэффициентов DDR3 SDRAM на основе методов машинного обучения. Основными преимуществами подхода являются:

- использование градиентного бустинга (XGBoost) и Random forest для предсказания стабильных конфигураций по неполному набору данных;
- применение кластеризации (DBSCAN) для автоматического выявления оптимальных параметров;
- сокращение времени настройки по сравнению с полным перебором.

Работоспособность разработанной методики была продемонстрирована на синтетических данных с известными зонами стабильности, были получены оптимальные гиперпараметры, а затем модель была адаптирована для применения на DDR3/DDR4-контроллере разработки НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ. Было создано экспериментальное окружение для получения и проверки настроечных коэффициентов. Модель Random Forest продемонстрировала высокую точность прогнозирования рабочих областей, в то время как модель XGBoost показала высокий охват областей интереса даже при ограниченной обучающей выборке, что позволило сократить время подбора параметров более чем в пять раз.

В результате исследований был создан алгоритмический комплекс, включающий:

- модель машинного обучения для предсказания устойчивых конфигураций;

- методы кластерного анализа для определения центров оптимальных настроек;
- автоматизированную систему тестирования и валидации параметров.

Разработанный подход позволяет значительно ускорить процесс создания ПО для настройки памяти и может быть адаптирован для других типов SDRAM. Перспективным направлением является интеграция предложенного метода с традиционными алгоритмами оптимизации и исследование альтернативных нейросетевых моделей и других ансамблевых методов [3].

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме FNEF-2024-0003.

Литература

1. Гревцев Н.А., Манеркин А.Д., Чибисов П.А. Применимость методов машинного обучения для тестирования моделей микропроцессора // Труды НИИСИ РАН, 2023. — С. 97–104.
2. Farhadi S., Tatullo S., Ferrian F. Comparative analysis of ensemble learning techniques for enhanced fatigue life prediction // Scientific Reports, 2025. Vol. 15. Art. 1136. DOI: 10.1038/s41598-024-79476-y.
3. Yiwen Liao, Bin Yang, Jochen Rivoir, Raphaël Latty. (2022). A Deep-Learning-Aided Pipeline for Efficient Post-Silicon Tuning.

УДК 004.052.42

Применение гибридных методов машинного обучения для ускорения верификации на блочном уровне

Манеркин А. Д., к. т. н. Гревцев Н. А., к. т. н. Чибисов П. А.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
manerkin@cs.niisi.ras.ru

В статье рассматривается метод ускорения функциональной верификации на блочном уровне, основанный на методе градиентного бустинга. Сравнивается эффективность основных реализаций градиентного бустинга и гибридных подходов для ускорения достижения покрытия состояний конечных автоматов при UVM-верификации контроллера DDR3.
Ключевые слова: функциональная верификация; UVM; кодовое покрытие; машинное обучение; градиентный бустинг.

Растущая сложность современных систем на кристалле неизбежно увеличивает сроки проектирования. При этом этап функциональной верификации является одним из наиболее ресурсоемких, занимая значительную часть времени разработки проекта [1]. Одним из способов уменьшения временных затрат на функциональную верификацию является применение методов машинного обучения для отсеивания транзакций, не способных привести к увеличению кодового покрытия.

Данное исследование сосредоточено на практическом применении алгоритмов градиентного бустинга и их гибридных комбинаций для решения этой задачи в рамках UVM-верификации. В качестве тестового объекта был выбран типовой блок — контроллер памяти DDR3. Эксперименты проводились на специализированной верификационной платформе, использующей стандартный интерфейс обмена данными. Целевая метрика обучения сконструирована для оценки вклада транзакций в покрытие редких состояний конечных автоматов. Суть применяемого подхода заключается в селективном отборе транзакций: модель, обученная предсказывать потенциальную полезность транзакции для повышения уровня покрытия, позволяет отсеивать малоперспективные входные воздействия. Это, в свою очередь, дает возможность достигать максимального уровня кодового покрытия за существенно меньшее количество транзакций по сравнению с традиционными методами на основе псевдослучайной генерации. Проведен сравнительный анализ реализаций метода на основе различных алгоритмов градиентного бустинга (XGBoost, CatBoost и LightGBM). Было обнаружено, что на разных фазах роста покрытия эффективны разные алгоритмы: на начальном этапе, когда происходит активное накопление базового покрытия, наиболее эффективным оказывается алгоритм XGBoost. Однако при переходе к фазе плато, где требуется достичь все труднодостижимые точки покрытия, явное преимущество получает алгоритм LightGBM.

По итогам анализа предложено применение гибридных моделей на основе алгоритмов, показавших свою эффективность, так как использование гибридных моделей позволяет учитывать основные преимущества рассмотренных реализаций. Проведен сравнительный анализ гибридных моделей, таких как блендинг (blending) [2], стекинг (stacking) [3] и трансфер градиентов (gradient transfer) [4].

Выявлена наиболее эффективная реализация метода ускорения функциональной верификации на блочном уровне, основанной на стандарте UVM. Полученные подходы имеют широкую применимость. Поскольку контроллер DDR3 структурно схож со многими блоками современных процессоров, разработанные методы можно адаптировать для верификации других компонентов систем на кристалле. Это позволяет сократить время верификации сложных микропроцессорных систем.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме FNEF-2024-0003.

Литература

1. Foster H. D. The 2022 Wilson research group functional verification study, 2022. URL: https://blogs.sw.siemens.com/verificationhorizons/2022/10/10/prologue-the-2022-wilson-research-group-functional-verification-study (дата обращения: 11.07.2025).
2. Khyani D., Jakkula S., Gowda S., Anusha K. J. Swetha K. R. An Interpretation of Stacking and Blending Approach in Machine Learning // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2021. Vol. 8.
3. Wolpert D. H. Stacked generalization // Neural Networks, 5(2). P. 241–259. DOI: 10.1016/s0893-6080(05)80023-1.
4. Breiman L. Bagging Predictors, Technical Report №421, Department of Statistics, University of California Berkeley, 1994.

УДК 004.027

Потоковые процессоры для обработки массивов данных в реальном масштабе времени

Бобков С. Г., д. т. н., Левченко Н. Н., к. т. н., Климов А. В.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Центр перспективной микроэлектроники, отделение проблем проектирования в микроэлектронике
s_g_bob@mail.ru

Предложена концепция применения для обработки массивов данных в реальном масштабе времени процессоров, реализующих потоковую модель вычислений. Приведены структурная схема потокового процессора, особенности его архитектуры.
Ключевые слова: потоковая модель вычислений; потоковый процессор; реальный масштаб времени; аппаратный параллелизм.

Эффективное распараллеливание вычислений на сотни и тысячи вычислительных ядер возможно только на уровне аппаратуры. Одной из моделей вычислений, которой имманентно присущ параллелизм, является потоковая модель вычислений с динамически формируемым контекстом [1]. Модель вычислений обеспечивает начало процесса вычислений по готовности данных (dataflow) и функционирует в парадигме «раздачи». Потоковая модель вычислений с динамически формируемым контекстом реализуется в архитектуре потокового процессора, который обеспечивает аппаратную поддержку распределению вычислений по имеющимся аппаратным ресурсам. Особенно эффективен потоковый процессор на задачах со сложноорганизованными данными, нерегулярной структурой, разреженными матрицами, многомасштабными вычислениями.

На рис. 1 представлена структурная схема потоковой системы для задачи обработки сетевых пакетов. К коммутатору Ethernet подключается множество потоковых процессоров, каждый из которых состоит из:

- процессора ввода-вывода (на базе 32-разрядного RISC-процессора), предназначенного для преобразования входных данных в токены, управления потоками данных, а также обработки исключительных ситуаций и тестирования;
- коммутатора токенов, предназначенного для передачи токенов между процессором ввода-вывода и набором процессоров сопоставлений;
- процессоров сопоставлений, предназначенных для сопоставления токенов между собой, а также обработки сформированных пакетов на массиве функциональных блоков. Функциональные блоки способны функционировать в конвейерном режиме. Результат обработки пакетов в виде токенов (токены представляют собой структуру данных, которая помимо самого операнда содержит также набор служебных данных и ключ, однозначно определяющий положение операнда в виртуальном адресном пространстве задачи) либо снова поступает в процессор сопоставлений, либо выдается в качестве результата в процессор ввода-вывода.

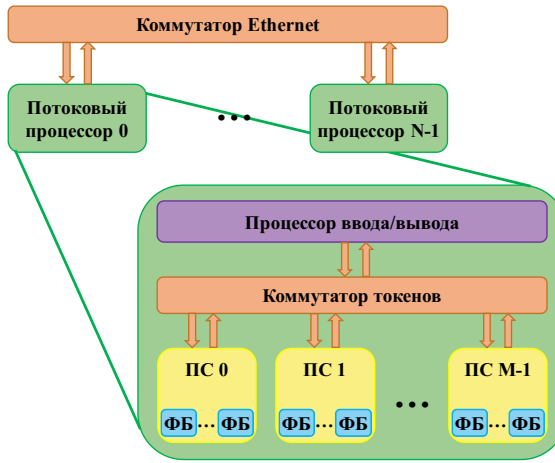


Рис. 1. Структурная схема потоковой системы для задачи обработки сетевых пакетов

Для повышения производительности и в силу специфики задачи обработки сетевых пакетов потоковый процессор лишен отдельных исполнительных устройств, а функциональные блоки перенесены в процессор сопоставлений, тем самым расширяя блок специальных операций, предназначенный для работы со спецтокенами в обход исполнительных устройств.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. Змеев Д. Н., Климов А. В., Левченко Н. Н., Окунев А. С., Стемпковский А. Л. Потоковая модель вычислений как парадигма программирования будущего // Информатика и ее применения, 2015. — Т. 9. — Вып. 4. — С. 29–36.

УДК 004.415

Оптимизированная программная модель комплексных вычислительных систем с динамической настройкой

Ладин О. И.[1,2]
[1] *ПАО «Сбербанк»*
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32, к. А
OILadin@sberbank.ru
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Предложен метод динамической настройки модели симулятора комплексной вычислительной системы для достижения требуемого уровня компромисса между точностью и скоростью симуляции для нужд оптимизации ПО, предназначенного для высокопроизводительных систем. Метод динамической настройки позволяет достичь лучших результатов по сравнению с раннее предложенным статических подходом.

Ключевые слова: программное моделирование; высокопроизводительные системы; динамическая настройка.

Оптимизация программного обеспечения, предназначенного для высокопроизводительных систем, выполняется с использованием средств профилирования. Средства профилирования предоставляют метрики эффективности работы программного обеспечения, подсвечивают неоптимальности и возможности для оптимизации. Отладка, профилирование и оптимизация программного обеспечения на целевом аппаратном обеспечении имеют ряд трудностей из-за ограниченности интерфейса профилировщика, становятся невозможными в случае недоступности аппаратных компонентов системы.

Альтернативный подход к оптимизации программного обеспечения заключается в использовании программной модели целевой системы — симулятора, который позволяет оценить эффективность работы программно-аппаратного комплекса. Симуляторы характеризуются точностью модели, скоростью работы и масштабируемостью, подразделяясь на классы: функциональные, событийные и потактовые [1].

Для задач оптимизации программного обеспечения требуется достичь требуемого уровня точности модели, однако избегая чрезмерного усложнения и замедления моделирования. В предыдущей работе [2] был предложен подход, позволяющий использовать компромиссное решение между точностью моделирования и скоростью работы симулятора системы. Суть подхода заключается в выборочной компоновке симулятора полной системы из компонент с разным уровнем детализации.

Недостаток подхода заключается в статическом выборе уровня детализации — в среднем он дает оптимальный результат, но не учитывает изменение поведения программного обеспечения в процессе выполнения. Целью данной работы является поиск метода динамической настройки уровня детализации компонентов симулятора системы в целях улучшения баланса точности модели и скорости работы на протяжении всего выполнения программного обеспечения. В результате

получены и оценены принципы настройки уровня детализации, выявлены узкие места метода. Оценена применимость полученных моделей для нужд оптимизации ПО.

Литература

1. Lukai Cai and Daniel Gajski. Transaction Level Modeling: An Overview // Hardware/Software Codesign and System Synthesis, 2003.
2. Ладин О. И. Построение оптимизированной программной модели комплексных вычислительных систем // Российский форум «Микроэлектроника-2024». 10-я научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов, 2024. — С. 123–124.

УДК 004.72

Аналитический подход к оценке задержек в mesh-сети в вычислительной системе с распределенной памятью

Хайдуков Д. И.[1,2], Алексеев А. А.[1]
[1] ПАО «Сбербанк»
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32, к. А
dikhaydukov@sberbank.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
khajdukov.di@phystech.edu

Предложена аналитическая модель задержек в mesh-сети в СнК с распределенной памятью, соответствующая потактовой в пределах 5%. Сравнение алгоритмов маршрутизации с помощью модели показало явное преимущество алгоритма ADOR над DOR и выявило оптимальность использования двухпосылочных пакетов.

Ключевые слова: вычислительная система; сеть на кристалле; аналитическая модель; система массового обслуживания M/M/1/N; алгоритм маршрутизации DOR.

В последние годы стремительно набирают популярность вычислительные системы с распределенной памятью, где различные агенты, расположенные вокруг центральной памяти, требуют высокоскоростного доступа к ней посредством mesh-сети на кристалле. В данных условиях для сравнения архитектурных решений на ранних этапах проектирования актуальна разработка аналитического подхода к оценке задержек в сети на основе среднего времени обслуживания в M/M/1/N-очередях маршрутизаторов [1].

В работе предложена аналитическая модель, учитывающая архитектурные особенности маршрутизаторов:

- поддержка wormhole [2];
- пять входных/выходных портов (четыре для соседних маршрутизаторов и один для агента или памяти);
- два физических канала (данные и служебные запросы);
- набор виртуальных каналов (ВК) для избегания взаимоблокировок и повышения емкости сети;
- FIFO-очереди глубиной 2 на входе и выходе каждого ВК.

Для оценки задержек модель учитывает вероятности коллизий при маршрутизации и при коммутации ВК, а также переполнения очередей, что обеспечивает расхождение с потактовым симулятором не более 5%.

Модель была применена к сравнению алгоритмов маршрутизации в mesh 10×10 при равномерном трафике чтения и записи с равной интенсивностью: DOR (Dimension Order Routing), наиболее популярный алгоритм, и ADOR (Adaptive DOR) — гибкая модификация DOR, но требующая вдвое больших ресурсов [3]. Результаты сравнения (рис. 1) показали явное превосходство алгоритма ADOR над DOR даже в условиях равного количества затрачиваемых ресурсов (4 ВК). Кроме

того, показано, что пакет из двух посылок является оптимальным для каждого из алгоритмов.

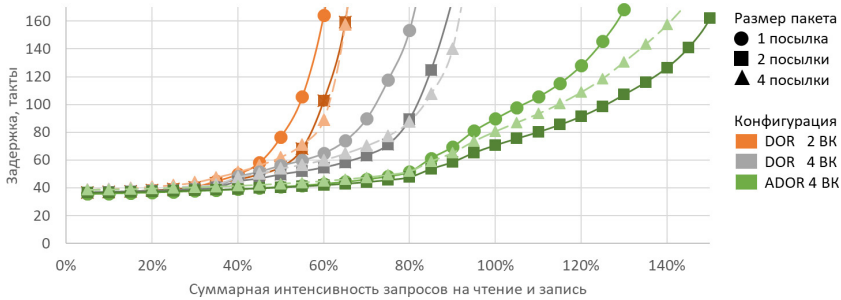


Рис. 1. Средняя задержка запросов в Mesh-сети 10×10 для алгоритмов DOR и ADOR

Литература

1. Lai M. et al. An accurate and efficient performance analysis approach based on queuing model for network on chip // ICCAD, 2009.
2. Uma R., Sarojadevi H., Sanju V. Routing of flits in parallel input interface scenario in a generalized network-on-chip framework using wormhole flow control algorithm // Springer Singapore, 2022.
3. Papaphilippou P., Van Chu T. Efficient deadlock avoidance for 2D mesh NoCs that use OQ or VOQ routers // IEEE Transactions on Computers, 2024.

УДК 004.3

Применение высокоскоростных линков CXL/UCIe для решения проблем с хранением данных в современных гетерогенных системах

Белянин И. В., Кудрявцев А. Н.
ПАО «Сбербанк»
117997, г. Москва, ул. Вавилова, 19
ivbelyanin@sberbank.ru, ankudryavtsev@sberbank.ru

Представлен анализ трендов в архитектуре современных гетерогенных систем. Рассмотрены метрики и показатели эффективности различных вычислительных систем. Перечислены вызовы, которые возникают при использовании современного ПО и обсчете современных нейронных сетей и языковых моделей. Особое внимание уделено проблемам реализации хранения памяти и достижения необходимых показателей по объему хранилища, скорости передачи данных и задержкам доступа. Предложены схемы вычислительных комплексов с использованием линков CXL/UCIe для решения этих проблем. Проведен анализ представленных решений.

Ключевые слова: высокоскоростные интерфейсы; протокол передачи данных; Memory Wall; СнК; CXL; UCIe; CoW; CoWoS.

Введение

Современное программное обеспечение во многом определяет архитектуру современных вычислительных систем [2]. С увеличением сложности алгоритмов и объема обрабатываемых данных растут (особенно это касается задач, связанных с искусственным интеллектом) требования и к вычислительным системам [3], появляются и стремительно развиваются новые способы передачи данных и хранения информации. Требования к подсистемам памяти со стороны ПО и различных LLM-моделей растут кратно быстрее, чем аппаратный возможности интерфейсов (Memory Wall) [4]. Одним из самых перспективных способов хранения данных на данный момент является стандарт HBM [], который отличается высокой пропускной способностью и энергоэффективностью, что играет определяющую роль при выборе архитектуры топовых аппаратных решений. Однако, несмотря на все перечисленные плюсы, HBM, как и все современные высокоскоростные интерфейсы по работе с DRAM-памятью, имеют ряд недостатков:

- недостаточный объем памяти для современных LLM-моделей;
- недостаточная пропускная способность памяти и интерконнекта;
- чрезмерно возрастающее энергопотребление с ростом производительности систем.

А что за HBM? Уже сейчас видно, что технологические лидеры индустрии производства DRAM-решений (Samsung, SK Hynix, Micron) добрались до локальной вершины возможностей интерфейса HBM4* и постепенно фокус с модернизации стандарта смещается в сторону масштабирования текущих решений, обычно с использованием различных сложных корпусов для объединения нескольких микросхем в одном корпусе, а также соединения таких решений с помощью специальных линков [5]. Для таких задач отлично подходит комбинация интерфейсов

UCIe и CXL [1], которые могут обеспечить взаимодействие нескольких микросхем с сохранением когерентности подсистемы памяти.

Схема макета универсального устройства расширителя памяти для использования в современных гетерогенных системах

Для расширения возможностей вычислительного кластера применяются такие устройства, как расширители памяти. В качестве интерфейса данного устройства выбран стандартный когерентный интерфейс CXL, который позволяет достичь высокой пропускной способности с минимальными для такого рода интерфейсов задержками. Массивом памяти с быстрым доступом выступает DDR5-память, а в качестве дополнительного хранилища выступают один или два NVMe-диска.

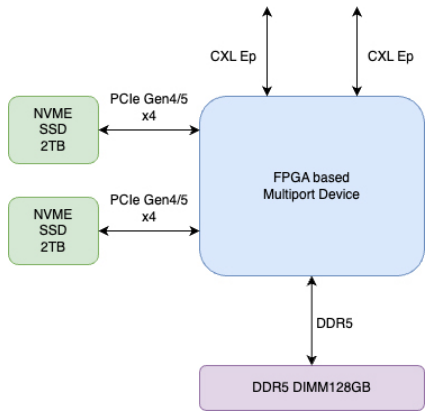


Рис. 1. Схема макета расширителя памяти с интерфейсом CXL

Представленное устройство способно хранить до 128 ГБ «горячей памяти», в то же время при применении специализированных алгоритмов подкачки данных оно позволяет иметь в «горячей» области памяти все необходимые для работы конкретного LLM данные.

Заключение

Результатом проведенных работ стал архитектурный макет расширителя памяти с интерфейсом CXL, а также описаны возможности использования такого устройства для решения актуальных проблем вычислительной области. Описаны протоколы и интерфейсы взаимодействия устройства с возможной реализацией законченного продукта.

Литература

1. Das Sharma Debendra, Blankenship Robert, Berger Daniel. An Introduction to the Compute Express Link (CXL) Interconnect // ACM Computing Surveys, 2024. 10.1145/3669900.
2. Hennessy J. L., Patterson D. A. Computer Architecture, Fifth Edition: A Quantitative Approach (5th. ed.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2011.

3. Advancing AI Workloads with PCIe Gen6 and New System Architectures (Presented by Micron Technology), CJ Newburn (NVIDIA), Ryan Meredith (Micron), Wes Vaske (Micron), NVIDIA GTC25, 03.2025.
4. Accelerating AI: Memory's Impact on GPUs, Eyal Pnini (Samsung Semiconductor, Inc.), NVIDIA GTC25, 03.2025.
5. Three-dimensional photonic integration for ultra-low-energy, high-bandwidth interchip data links // Nature Photonics. Vol. 19. P. 502–509. DOI: 10.1038/s41566-025-01633-0.

УДК 621.382

Перспективы использования открытых архитектур в отечественных микропроцессорах

Хренов Г. Ю.
АО «Байкал Электроникс»
143421, Московская область, городской округ Красногорск, территория Автодорога «Балтия», 26-й километр, 5, стр. 1

В работе рассмотрены перспективы применения различных архитектур для создания отечественных микропроцессоров. На основе анализа доступных отечественных и зарубежных источников делается вывод о применимости даже существующих отечественных микропроцессорных ядер, использующих открытую архитектуру RISC-V, для создания конкурентоспособных образцов вычислительной техники уже в текущем десятилетии.
Ключевые слова: микропроцессоры; архитектура RISC-V; программная экосистема.

На сегодняшний день наиболее распространенными компьютерными архитектурами, использующимися в большинстве микропроцессоров, являются архитектуры x86 и ARM v8/v9, которые по факту являются золотым стандартом для отрасли. Другие архитектурные решения можно найти либо на рынке микроконтроллеров, хотя и там архитектура ARM занимает доминирующее положение, либо в узкоспециализированных нишах. В связи с ограничениями, введенными против отечественной микроэлектронной отрасли, дальнейшее применение этих архитектур не представляется возможным, а поэтому достаточно остро стоит вопрос о том, какая архитектура сможет стать «рабочей лошадкой» отечественной вычислительной техники на ближайшее десятилетие.

На самом деле выбор крайне ограничен, поскольку таких архитектур просматривается только две: E2K и RISC-V. Развитие первой архитектуры имеет глубокие исторические корни и представляется многим весьма перспективным, особенно учитывая тот факт, что это самобытная, абсолютно отечественная архитектура. К сожалению, уже хорошо известно, что статическое планирование исполнения команд, присущее архитектуре E2 K, не позволяет достаточно эффективно использовать наличный аппаратный ресурс, а широко рекламируемая потенциальная возможность параллельного исполнения многих команд плохо реализуется для большинства программных кодов. Другой и, наверное, даже более важной проблемой этой архитектуры является необходимость самостоятельно развивать программную экосистему. К «счастью», в 2010 году появилась «открытая» архитектура RISC-V, которая за 15 лет прошла период взросления, вылечила детские болезни и на сегодняшний день уже превратилась в одну из мейнстримовых процессорных архитектур. Анализ текущего состояния этой архитектуры показывает, что, согласно достигнутому уровню наполнения инструкциями и проработанности системы команд в целом, архитектура может с успехом применяться как в нише микроконтроллеров, так и на рынке больших микропроцессоров. Достигнутые отечественными разработчиками RISC-V-ядер результаты, в частности отечественные ядра с внеочередным исполнением команд, уже указывают на то, что на архитектуре RISC-V можно проектировать вполне конкурентоспособные микропроцессоры.

Несомненным достоинством архитектуры является также тот факт, что архитектура RISC-V поддержана стремительно растущей программной экосистемой, развитием которой занимаются сотни компаний во всем мире (РФ, Китай, Европа, США). Именно это снижает риски возникновения ситуации, в которой проблема создания программной экосистемы ляжет тяжелым бременем на плечи отечественного программного сообщества. На сегодня главной задачей в деле развития архитектуры RISC-V в РФ видится развитие микроархитектурных решений, которые позволят в среднесрочной перспективе 5–7 лет создать отечественные микропроцессоры, закрывающие наиболее значимые ниши на рынке вычислительной техники.

Решение оптимизационных задач на FPGA

Старожилов И. В.
ООО «ОКТ»

- Общая постановка задачи, краткое описание типов задач и алгоритмов.
- Плюсы и минусы использования FPGA для решения задач оптимизации.
- Обзор существующего опыта, включая зарубежный.
- Описание решения от компании QBoard, в частности:
  - техстек, средства разработки,
  - особенности построения процесса разработки,
  - методика автоматизированного тестирования,
  - возникавшие сложности и выработанные решения,
  - достигнутые результаты и выводы.
- Демонстрация решения компании QBoard.
- Вопросы-ответы, заключительное слово.

Технологии аппаратной трассировки для архитектуры RISC-V

Кашканов А. О.
ООО «КНС-ГРУПП»
123376, г. Москва, ул. Рочдельская, 15, стр. 13

Рассматриваются технологии аппаратной трассировки в архитектуре RISC-V на базе спецификаций N-Trace и E-Trace. Анализируются их особенности, преимущества и ограничения, а также основные сферы применения — от отладки сложных систем до оптимизации производительности и кибербезопасности. Особое внимание уделено практическим аспектам реализации и перспективам развития.

Ключевые слова: аппаратная трассировка; RISC-V; N-Trace; E-Trace; отладка процессоров.

Аппаратная трассировка инструкций — это критически важный инструмент для отладки, анализа производительности и верификации процессоров. Например, компания Intel уже более 10 лет поставляет чипы со встроенной технологией Intel Processor Trace, а компания ARM предоставляет IP-блоки подсистемы Embedded Trace Macrocells. Для архитектуры RISC-V предлагается использовать одну из ратифицированных спецификаций — E-Trace [1] или N-Trace [2]. Обе технологии обеспечивают запись потока исполнения инструкций, но различаются по уровню возможностей, гибкости и сложности применения.

Например, спецификация E-Trace предлагает трассировку инструкций и данных, тогда как N-Trace работу с потоком данных не определяет, ссылаясь на родительский стандарт IEEE-ISTO 5001-2003. С другой стороны, спецификация N-Trace более строго определяет ключевые аспекты реализации этого функционала в оборудовании, в то время как E-Trace отдает большое количество глав на откуп вендору. В итоге разработчику приходится изучать обе спецификации, чтобы сделать выбор в пользу того или другого решения.

Главное преимущество аппаратной трассировки — минимальное влияние на работу системы во время сбора данных: данные собираются в реальном времени, при этом процессор может не прерываться на обработку событий. При использовании, например, аппаратных счетчиков событий необходимо периодически считывать их состояние, внося погрешности в измерения. Можно выделить следующие основные сценарии использования технологии аппаратной трассировки:

- отладка сложных систем: трассировка помогает исследовать корректность работы ядра ОС и драйверов, в том числе на системах с жестким реальным временем. В многопоточных приложениях технология позволяет выявлять причину гонки состояний;
- поиск аномалий исполнения кода: каждую итерацию цикла можно изучить до последней инструкции с точностью до каждого такта процессора;
- оптимизация производительности: данные о времени выполнения инструкций позволяют находить узкие места в коде, особенно в задачах машинного обучения и цифровой обработки сигналов;

- верификация процессоров: при разработке новых ядер (например, в проектах альянса RISC-V) трассировка может быть использована для проверки корректности исполнения микрокода;
- кибербезопасность: запись исполняемого кода помогает обнаруживать атаки, такие как ROP-цепочки и др.

Гибкость стандартов трассировки позволяет модифицировать их под конкретные задачи, например добавлять анализ энергопотребления или отказоустойчивости. Однако реализация функционала в процессоре является весьма трудоемкой, так как затрагивает практически все его основные блоки. К каждому процессорному ядру подключается блок энкодера трассы, которая далее передается через отдельную транспортную инфраструктуру в системную память или внешний отладочный разъем.

В докладе будет представлен сравнительный обзор двух спецификаций, ряд сопутствующих стандартов, а также существующие предложения альянса по совершенствованию технологии трассировки; рассмотрены основные вопросы реализации технологии в системе на кристалле.

Литература

1. RISC-V N-Trace (Nexus-based Trace) Specification v1.0 [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/riscv-non-isa/tg-nexus-trace/releases/download/1.0_Ratified/RISC-V-N-Trace.pdf (дата обращения: 08.07.2025).
2. Efficient Trace for RISC-V v2.0 [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/riscv-non-isa/riscv-trace-spec/releases/download/v2.0-20250616/riscv-trace-spec-asciidoc.pdf (дата обращения: 08.07.2025).

УДК 004.712

Возможности стандарта Ultra Ethernet для решения задач ИИ

Кирюшкин С. Б.
ПАО «Сбербанк»
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32, к. А
sbkiryushkin@sberbank.ru

Рассмотрен стандарт Ultra Ethernet(UE) v1.0, который заточен на построение распределенных ИИ-кластеров, вводя специализированные аппаратные решения. Основные инновации затронули транспортный уровень. Новые опции обеспечивают низкие задержки, стабильную пропускную способность, высокую масштабируемость.
Ключевые слова: Ultra Ethernet; ИИ; RDMA; InfiniBand; HPC.

Введение

Стандарт Ultra Ethernet [1] v1.0 был представлен консорциумом 11.06.2025 года в открытом доступе. Он стал необходимым решением после развития высокопроизводительных систем и нейросетей. Для эффективного обмена данными в ИИ-вычислениях необходимы низкая задержка, небольшая нагрузка на CPU, поддержка RDMA — все это отсутствовало в Ethernet. Расширение RDMA RoCEv2 от InfiniBand(IB) спасло ситуацию, но имеет ряд ограничений:

- RoCEv2 требует транспорт без потерь — конвергентный Ethernet;
- требует строгий порядок пакетов;
- в случае потерь и переупорядочивания пакетов производительность снижается до 0;
- вынесение за стандарт верхнеуровневых протоколов настройки и синхронизации ведет к нагрузкам на CPU, проблемам совместимости вендоров;
- проприетарный IB разработан в 2001 г. и с тех пор слабо изменяется. Стандарт закрыт от разработчиков.

UE нацелен на то, чтобы устранить все недостатки традиционного Ethernet и IB.

Учредители консорциума — AMD, Arista, Broadcom, Cisco, Intel, Meta, Microsoft. Всего более 50 участников, в том числе Nvidia.

Ключевые возможности Ultra Ethernet для задач ИИ

Основные нововведения затрагивают UE-транспорт (UET), он определяет три профиля: AI Base (приложения ИИ при минимальных затратах); AI Full (дополнен отложенным Send, точным совпадением, Atomic); HPC (большее дополнение к AI Full). UET поддерживает удаленный доступ к памяти RDMA, управление перегрузками, программные протоколы, шифрование.

- Режим доставки пакетов не в порядке очереди Reliable Unordered Delivery, что востребовано в задачах ИИ. В протоколе IB перепосылка нагружала сеть и уничтожала полезный трафик.
- Механизмы минимизации перегрузок Congestion Management используют гибридные схемы: Packet Spraying и Multipath selection — динамическое распределение трафика по нескольким путям; Sender и Receiver-credit based — механизмы контроля количества отправленных пакетов в сеть, измерения скорости, задержек и джиттеров сети, протоколы предотвращения

перегрузок ECN и приоритезации трафика PFC [2]. Нагрузка рассчитывается не только между двумя конечными точками, но и всей сети, оперативно перенаправляя трафик по свободным путям.

- Поддержка коллективных операций In-Network Collectives, выполняемых непосредственно в коммутаторе (AllReduce, AllGather, ...), снижается нагрузка на GPU, сокращаются повторяющиеся обмены и задержки [3]. Схожая технология SHARP есть у NVIDIA в коммутаторах NVSwitch.
- Масштабируемость сети Scalability. Для настройки новой связи необходимо всего одно легковестное сообщение.

В сетевой уровень UEN добавлен Packet Trimming — механизм обрезания пакета при перегрузках. Приемник получает только заголовок с возможностью быстрого перезапроса конкретного утерянного пакета.

На канальном уровне UEL реализован Link Level Retry, поддерживающий перепосылку пакета между соседними узлами взамен традиционного подхода между конечными точками.

Заключение

Стандарт Ultra Ethernet предлагает системный подход построения высокопроизводительных дата-центров от физического уровня до программных API-интерфейсов. В нем содержатся описания уже известных и новых сетевых протоколов, поддержка коллективных операций обучения и инференса, работа с Rendezvous-протоколом. Новые возможности повышают стабильность и производительность сети, но предъявляют более высокие аппаратные требования.

Литература

1. Ultra Ethernet Consortium // Ultra EthernetTM Specification v1.0. June 11, 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://ultraethernet.org/wp-content/uploads/sites/20/2025/06/UE-Specification-6.11.25.pdf (дата обращения: 08 07 2025).
2. Ultra Ethernet — новейшая модификация традиционного сетевого протокола // 20 июня 2025. [Электронный ресурс]. — URL: https://serverflow.ru/blog/stati/ultra-ethernet-noveyshaya-modifikatsiya-traditsionnogo-setevogo-protokola/?ysclid=mc7khaikp3638167390 (дата обращения: 08 07 2025).
3. Research White Paper: UEC 1.0 // June, 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://ultraethernet.org/uec-1-0-whitepaper (дата обращения: 08 07 2025).

Балансировщик нагрузки DS Proxima для кластеризации средств информационной безопасности и серверов приложений

Руткевич А. В.
Генеральный директор
АО «НПП «Цифровые решения»
105066, г. Москва, а/я 18

Активная цифровизация требует увеличения вычислительных возможностей серверов приложений и средств обеспечения информационной безопасности. Следующим шагом после достижения максимума ядер в процессоре и процессоров в сервере становится кластеризация серверов. Балансировщик нагрузки DS Proxima обеспечивает возможность линейного увеличения производительности кластера с контролем работоспособности его элементов. Поддержка широкого спектра алгоритмов позволяет оптимально использовать вычислительные ресурсы внутри кластера как с точки зрения производительности, так и с точки зрения надежности.

Российский накопитель microSD: снижение технологических рисков

Шкляев Е. А.
менеджер продукта
АО «НПП «Цифровые решения»

В условиях внешнего давления и ограниченного доступа к зарубежным технологиям задача обеспечения технологического суверенитета становится приоритетной для многих государственных и промышленных структур. Хранение данных — одна из наиболее уязвимых областей, где критически важна независимость от иностранных поставщиков компонентов.

В рамках презентации мы представим полностью отечественное решение — microSD-накопитель на базе собственного российского SD-контроллера. Контроллер разработан нашей компанией с нуля, что исключает риски санкционных ограничений и «закладок». Продукт соответствует международным стандартам SD Association, а его архитектура позволяет обеспечить совместимость с широким спектром конечных устройств.

УДК 004.031.6

Обзор и сравнение встраиваемых систем на процессорах с интегрированными ИИ-ускорителями

Медведев А. В.
АО «НПК «Атроник»
117587, г. Москва, Варшавское ш., 118, корп. 1, пом. XLII
mav@atronik.ru

Рассмотрены архитектуры центральных процессоров с интегрированными TPU/NPU-ускорителями для работы с искусственными нейронными сетями. Приведены сравнительные оценки производительности процессоров в составе отечественных встраиваемых компьютерных модулей.

Ключевые слова: машинное зрение; искусственный интеллект; нейронные сети; CPU; GPU; TPU; NPU; компьютерный модуль; система на модуле; встраиваемые системы; Nvidia Jetson; RockChip.

Введение

В настоящее время одной из самых популярных встраиваемых аппаратных платформ для задач искусственного интеллекта (ИИ), машинного зрения и видеоаналитики являются компьютерные модули Nvidia семейства Jetson [1].

Несмотря на свою популярность, использование технологий Nvidia имеет некоторые сложности, связанные с международной политической обстановкой. В условиях ограниченного доступа к технологиям Nvidia разработчики и компании вынуждены искать альтернативные решения, такие как платформы на базе ARM-процессоров с интегрированными ядрами-ускорителями.

GPU, NPU, TPU

Современные процессоры по своей архитектуре являются системами на кристалле (SoC — System on Chip), объединяя на одном кристалле несколько компонентов вычислительной системы. Это позволяет уменьшить количество отдельных микросхем и сделать устройство более компактным и экономичным с точки зрения потребления энергии.

В процессорах, предназначенных для работы с нейронными сетями и обработки видео, помимо ядер центрального процессора (CPU — Central Processing Unit) [2] присутствуют специализированные ядра процессоров для ускорения ряда трудоемких задач, таких как кодирование и декодирование, сжатие данных и т. п. К таким специализированным ядрам относятся GPU, TPU и NPU — три типа процессорных архитектур, наиболее пригодных для выполнения различных задач в области параллельных вычислений, связанных с обработкой графической информации, ускорением нейронных сетей и машинным обучением.

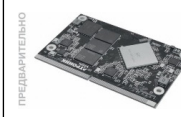
Процессоры ряда китайских производителей могут рассматриваться как альтернатива Nvidia. Одними из самых популярных в России являются процессоры компании RockChip.

Для облегчения оценки производительности, развертывания и выполнения моделей на аппаратных платформах Rockchip производитель предлагает набор инструментов и библиотек RKNN Toolkit2 — Rockchip Neural Network. Программный

стек RKNN помогает пользователям быстро развертывать модели ИИ на чипах Rockchip [3].

В качестве примера рассмотрим компьютерные модули [4] производства НПК «АТРОНИК». В табл. 1 приведен сравнительный анализ модулей стандарта SMARC 2.1 производства НПК «АТРОНИК» [5].

Таблица 1

Модуль	МЦП1502	МЦП1503	МЦП1504
Фото			
Форм-фактор	SMARC 2.1	SMARC 2.1	SMARC 2.1
Центральный процессор	4 ядра ARM Cortex-A55 1,4 ГГц	8 ядер (4×Cortex-A76+ 4×Cortex-A55), 2 ГГц	8 ядер Cortex-A53 1,6 ГГц
Ускоритель	NPU, 0,8 Tops	NPU, 6 Tops	TPU, 16 Tops
Объем ОЗУ	DDR4 4 Гб с ECC	LPDDR4 16 Гб	LPDDR4 16 Гб
Объем ПЗУ (eMMC)	32 Гб	64 Гб	64/128 Гб
HDMI	v.2.0	v.2.1	v.2.1
Потребляемая мощность, Вт	до 7	до 20	до 20
Рабочий температурный диапазон	−40...+85 °C	−40...+85 °C	−40...+85 °C
Поддерживаемые операционные системы	Linux Ubuntu, AstraLinux, ЗОСРВ Нейтрино	Linux Debian, AltLinux, AstraLinux	Linux Ubuntu

На рис. 1 приведено сравнение производительности представленных компьютерных модулей «АТРОНИК» с аналогами от Nvidia при работе с популярными наборами нейронных сетей.

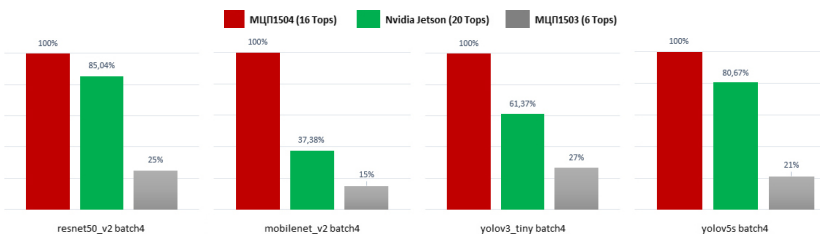


Рис. 1. Сравнение производительности компьютерных модулей «АТРОНИК» с аналогами от Nvidia

Для более ресурсоемких задач представленные выше компьютерные модули могут работать совместно с внешними ускорителями на базе NPU Hailo-8. В качестве эксперимента была проведена оценка производительности модулей МЦП1502 и МЦП1503 и внешнего ИИ-ускорителя Hailo-8R формата Mini PCIe. В результате на МЦП1502 нейросеть показала производительность 60 fps, а на МЦП1503 — производительность 90 fps.

Использование модуля МЦП1502 и внешнего NPU Hailo-8L обеспечивают самую низкую стоимость инференса TOPS/$ из представленных на рынке промышленных вычислителей.

Заключение

Выбор между Nvidia Jetson или аналогом зависит от конкретных требований проекта, включая производительность, поддержку фреймворков, энергопотребление и бюджет. Если нужна высокая производительность для сложных AI-задач, Nvidia Jetson может быть лучшим выбором. Если же необходимы доступные решения для менее требовательных приложений, RK3588 и другие китайские процессоры могут стать хорошими альтернативами.

Литература

1. NVIDIA Celebrates 1 Million Jetson Developers Worldwide at GTC. URL: https://blogs.nvidia.com/blog/million-jetson-developers-gtc.
2. Introduction to the HIP programming model. URL: https://rocm.docs.amd.com/projects/HIP/en/latest/understand/programming_model.html#hardware-differences-cpu-vs-gpu.
3. rockchip-linux/rknn-toolkit2. URL: https://github.com/rockchip-linux/rknn-toolkit2.
4. Медведев А. В. Компьютерные модули — преимущества применения и популярные стандарты на примерах продукции НПК «АТРОНИК» // Электроника НТБ, 2024. — № 3. — С. 158–168.
5. Медведев А. В. Компьютерные модули формата SMARC от НПК «АТРОНИК» // CONTROL ENGINEERING Россия, 2023. — № 4. — С. 32–36.

УДК 004.4'242

Выявление общих характеристик периферийных модулей микроконтроллеров

Рыбкин С. В., Захаров А. М., Черкасов М. С.
АО «ЭРЕМЕКС»
115088, г. Москва, ул. Угрешская, 27, стр. 1

Исследованы возможности создания универсальных конфигураций периферийных модулей микроконтроллеров для создания общих библиотек с их интеграцией в конфигуратор экосистемы. Приведены результаты сравнения периферийных модулей.

Ключевые слова: микроконтроллер; генератор исходного кода; библиотеки поддержки периферийных модулей; MCU; HAL.

Разработка микроконтроллеров и их производство становятся все более доступными. Появляется много новых микроконтроллеров, которым требуется создание новой экосистемы (библиотеки HAL, примеры, отладочные платы и т. п.). В данной работе уделяется внимание библиотекам поддержки периферийных модулей (HAL, LL и т. п.) и их генерации по обобщенному описанию периферийных модулей микроконтроллеров.

В рамках работы по созданию конфигуратора экосистемы для встраиваемых решений необходимо решить задачу по поиску общих параметров периферийных модулей разных производителей микроконтроллеров. Унификация описания характеристик периферийных модулей помогает синтезировать исходный код для работы с ними, что ускоряет создание экосистемы для нового микроконтроллера.

Выполняется сравнение периферийных модулей микроконтроллеров российских и импортных производителей. Выявляются функциональные группы в аналогичных периферийных модулях, которые используются для описания универсальных модулей, например порты ввода-вывода (GPIO), таймеры (Timer), асинхронные приемо-передатчики (UART) и т. п. Перечень настраиваемых параметров таких универсальных периферийных модулей может меняться в зависимости от аппаратной реализации в каждом конкретном микроконтроллере.

Рассматриваются варианты генерации исходного кода для библиотек разного уровня абстракции.

Результаты исследования используются в разработке конфигуратора экосистемы.

УДК 004.1

Роль лаборатории R&D «РТК-ЦОД» в электронной промышленности РФ

Власов А. В.
АО «Центр Хранения Данных» им. академика М. Ф. Решетнёва»
109316, г. Москва, Остаповский пр., 22, стр. 16

Описывается прямое влияние исследований лаборатории R&D «РТК-ЦОД» на российских производителей серверов, СХД, коммутационного и пр. дата-центрового оборудования, а также на скорость импортозамещения в ИТ-индустрии.

Ключевые слова: R&D; импортозамещение; тестирование; ИТ-оборудование.

Лаборатория R&D «РТК-ЦОД» — это научно-технический хаб, который:

- ускоряет темп импортозамещения в электронной промышленности РФ;
- повышает конкурентоспособность российских ИТ-решений;
- формирует экосистему доверия между производителями, заказчиками и регуляторами.

Программы и методики испытаний, разработанные лабораторией R&D «РТК-ЦОД», стали отраслевым стандартом для российских производителей при создании новых технических решений.

Результаты проведенных испытаний непосредственно влияют на продуктовые дорожные карты производителей, способствуя совершенствованию технических характеристик оборудования. Тем самым лаборатория напрямую влияет на снижение зависимости от зарубежных производителей.

Результаты исследований вносятся в реестр проверенных решений, который позволяет госструктурам и частным компаниям получить доступ к надежному оборудованию и отказоустойчивой инфраструктуре.

В составе лаборатории работает аналитический центр, который исследует новые технические решения, оборудование, электронные компоненты и оценивает российских производителей вычислительной техники.

Литература

1. Реестр исследований лаборатории R&D «РТК-ЦОД». — Москва, 2021–2025 гг.
2. Реестр аналитических материалов лаборатории R&D «РТК-ЦОД». — Москва, 2021–2025 гг.
3. Реестр рекомендаций по доработке дата-центрового оборудования лаборатории R&D «РТК-ЦОД». — Москва, 2021–2025 гг.
4. Журнал учета обратной связи от российских производителей дата-центрового оборудования лаборатории R&D «РТК-ЦОД». — Москва, 2021–2025 гг.
5. Реестр опросных листов российских производителей дата-центрового оборудования лаборатории R&D «РТК-ЦОД». — Москва, 2021–2025 гг.

УДК 004.4’242

Экосистема для встраиваемых решений

Сушков А. В., Рыбкин С. В.
АО «ЭРЕМЕКС»
115088, г. Москва, ул. Угрешская, 27, стр. 1
avs@eremex.ru

Экосистема для встраиваемых решений нацелена на поддержку реализации полного маршрута разработки и настройки проекта под микроконтроллер или процессор. Экосистема включает в себя различные инструменты диагностики, тестирования и анализа прикладного ПО.

Ключевые слова: встраиваемые системы; экосистема; конфигуратор; микроконтрорллер; процессор.

На сегодняшний день разработка микроконтроллеров и их производство становятся все более доступными, возникает много новых решений для систем управления, применяющихся в той или иной отрасли промышленности. В целях обеспечения снижения порога вхождения, портирования проектов между платформами, сокращения сроков разработки и, как следствие, уменьшения ее стоимости необходимо создание единой экосистемы (библиотеки HAL, примеры, отладочные платы и т. п.).

Особое внимание уделяется набору библиотек HAL и их генерации по обобщенному описанию периферийных модулей микроконтроллеров.

Развитие экосистемы для встраиваемых решений решает проблему по формированию общих параметров периферийных модулей разных платформ микроконтроллеров (таких производителей, как «ПКК «Милландр», «НИИЭТ», «МИКРОН» и др.). Унификация описания характеристик периферийных модулей помогает синтезировать исходный код для работы с ними, что ускоряет процесс потирования проектов.

Исследование маршрута разработки и настройки проекта выявило потребность работы экосистемы «из коробки» с техническими решениями.

В частности, в ходе разработки радиомодема для автоматизированных систем управления выявлен ряд факторов, связанных с оперативным портированием с микроконтроллера одного производителя на другой (в том числе переход с импортного решения на отечественное). Также в целях обеспечения повышения эффективности разработки в экосистеме реализованы дополнительные инструменты — трассировка приложений при разработке прикладного ПО на базе ОСРВ, набор библиотек и драйверов, отладка на аппаратной платформе и система автоматизированного тестирования прикладного ПО.

УДК 621.3

Система управления, обработки и синхронизации РСА космического базирования

Гришин В. Ю., Еремеев П. М., Лось В. О.
АО «НИИ «Субмикрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
grishin@se.zgrad.ru, eremeevpm@mail.ru, lvo_13@mail.ru

В статье рассматривается структура системы управления, обработки и синхронизации для АФАР радара с синтезированной апертурой. Подсистема обработки и синхронизации обеспечивает формирование, прием и обработку сигналов с полосой до 600 МГц. Подсистема управления использует сквозной сетевой протокол.

Ключевые слова: АФАР (активная фазированная антенная решетка); РСА (радар с синтезированной апертурой).

Создание космических средств радиолокационного зондирования Земли является актуальной задачей. Для достижения требуемого субметрового разрешения и полосы захвата ~600 км необходимо обеспечить углы сканирования не менее ±3° по азимуту и ±20° по углу места, для этого используется АФАР с электронным сканированием луча. Также для обеспечения субметрового разрешения предложена схема формирования и приема сигнала с полосой 600 МГц.

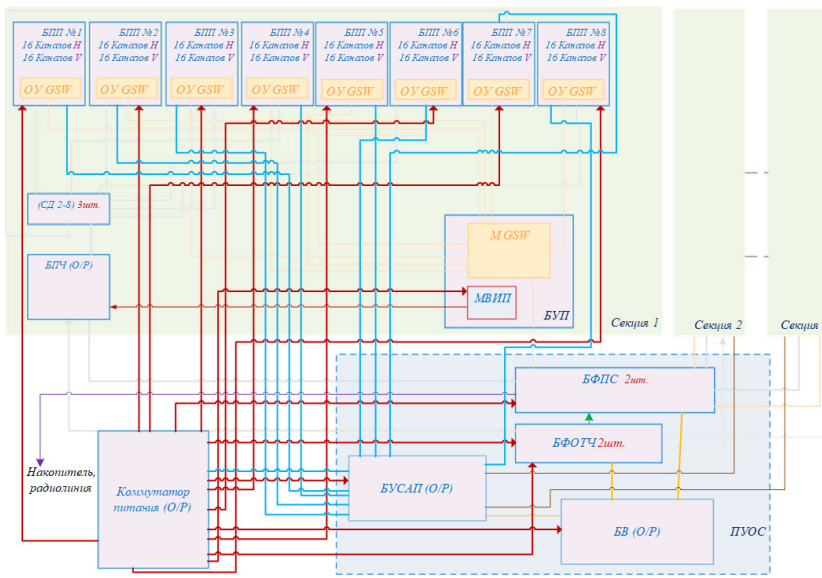


Рис. 1. Структурная схема системы управления АФАР

Наилучшими возможностями по обработке сигналов и гибкости применения обладают цифровые АФАР, однако на современном уровне развития отечественной элементной базы их стоимость и энергопотребление значительно выше, чем для аналоговых АФАР. Разумным компромиссом является создание гибридной АФАР, состоящей из нескольких секций (в данной работе из 12 секций). В пределах каждой секции обработка сигнала и диаграммообразование осуществляются аналоговым способом. В совокупности секции образуют цифровую АФАР с 12 элементами. Для обеспечения функционирования АФАР используется интегрированная система управления на основе сети GigaSpaceWire [1, 2], рис. 1.

В состав системы управления входят резервированный блок вычислителя БВ, резервированный блок устройств сопряжения с антенной подсистемой БУСАП, два блока формирования опорных и тактовых частот БФОТЧ (основной и резервный), два резервных блока формирования и приема сигналов БФПС (основной и резервный). Элементы системы управления также входят в состав секций, образующих антенную подсистему. Особенностью предложенной системы управления является использование сквозного сетевого протокола. Используя данный протокол, блок вычислителя может управлять всеми элементами АФАР вплоть до конкретного приемо-передающего канала, входящего в состав блока приемо-передатчиков БПП.

Литература

1. Еремеев П. М., Лось В. О. Интегрированная система управления АФАР на основе сети GigaSpaceWire // «Микроэлектроника-2022»: сборник тезисов 8-й научной конференции. Роза Хутор, 2–8 октября 2022 г. — С. 84–84.
2. ГОСТ Р 70020-2022. Космическая техника. Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов. Spacewire-RUS. Дата введения 2022-06-01. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва: Российский институт стандартизации, 2022.

УДК 621.37.037

Антенная система многофункционального РСА космического базирования на базе АФАР

Цветков В. К., к. т. н., Лялин К. С., Переверзев А. Л., д. т. н., Кузьмин И. А., Орешкин В. И., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
ksl@miee.ru

В статье рассматриваются технические решения по созданию многофункционального радиолокатора с синтезированной апертурой космического базирования в части конструкции антенной системы. Предложена антенная система на базе АФАР. Представлены результаты расчета энергетического бюджета, диаграммы направленности антенны в различных режимах работы и при сканировании. Предложен антенный элемент и способ его возбуждения в антенной решетке. Представлены требования к приемо-передающему каналу и предложения по его составу. Результаты работ позволяют вести радиолокационную съемку местности с субметровым разрешением и полосой захвата порядка 600 км.

Ключевые слова: ДЗЗ; радиолокатор с синтезированной апертурой; АФАР; активная фазированная антенная решетка.

Радиолокационный мониторинг с синтезом апертуры широко применяется при решении задач картографирования, актуализации сведений о фактической объектовой обстановке, наблюдения за природными явлениями. Практический интерес представляют радиолокаторы, позволяющие получать снимки субметрового разрешения с широкой полосой захвата. Решить такую задачу при сохранении характеристик энергетического бюджета возможно с помощью активной фазированной антенной решетки (АФАР) [1, 2]. Большой физический размер антенной решетки, широкая полоса рабочих частот (600 МГц в X-радиолокационном диапазоне частот), необходимость сканирования в относительно большом секторе углов обязывают компенсировать разницу фазовых набегов на границах рабочей полосы частот. Решением данной задачи выступают два ключевых подхода: разбиение антенной решетки на самостоятельные каналы с собственной цифровой обработкой принимаемого сигнала (цифровая антенная решетка) и применение коммутируемых интегральных линий задержки. В предложенной архитектуре применяются оба этих подхода. Разбиение антенной решетки на 12 самостоятельных подрешеток (цифровых каналов) позволяет также реализовать алгоритмы селекции движущихся целей, интерферометрии. Примененные подходы позволили обеспечить сектор сканирования не менее ±3° по азимуту и ±20° по углу места. Антенный элемент реализован в виде прямоугольного плоскопечатного элемента с двумя точками возбуждения, что позволяет вести полнополяриметрическую съемку.

Радиометрическая чувствительность −20 дБ в высокодетальном режиме достигается помимо прочего достижением высоких энергетических характеристик радара при ограничениях допустимой средней мощности электропитания 9 кВт. Импульсная выходная мощность передающего канала АФАР составляет 2 Вт. Количество каналов АФАР — 1536. Рабочая скважность — не менее 5.

Особенностью предложенной системы является ее функциональность при решении задач радиолокационной съемки, возможность получения снимков в широкой полосе обзора.

Литература

1. Коберниченко В. Г., Сосновский А. В. Космические радиолокационные системы с синтезированной апертурой антенны // Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: Конспекты лекций / Всероссийские открытые Армандовские чтения: молод. школа, 2022. — № 1.
2. Костров В. В., Ракитин А. В. Радиолокационный космический сегмент дистанционного зондирования Земли в 2023 году: состояние и перспективы развития // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2023. — № 4 (52). — С. 11–31. DOI: 10.24412/2221-2574-2023-4-11-31. EDN EDJZTE.

УДК 621.396.67

Кластеризованное антенное полотно для малогабаритных АФАР

Демшевский В. В.[1], Аникин Г. С.[1,2]
[1] АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
info@istokmw.ru
[2] Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4
mai@mai.ru

В работе представлены результаты исследования возможности реализации кластеризованного антенного полотна с возможностью электронного сканирования в широком секторе углов для работы в составе малогабаритной АФАР.
Ключевые слова: кластеризованное антенное полотно; электронное сканирование; электродинамическое моделирование.

Число дискретных элементов определяет не только возможности АФАР, но и ее стоимость. Теоретически к каждому излучателю на антенном полотне должен быть подключен свой приемо-передающий модуль (ППМ), имеющий фазовращатель и аттенюатор. Но с экономической точки зрения стоимость такой системы будет однозначно высокой. Один из способов, который потенциально может снизить стоимость АФАР и уменьшить ее сложность, — это так называемая кластеризация антенного полотна. Кластеризация — это объединение дискретных элементов на антенном полотне в группы с помощью делителя/сумматора, имеющего один выход, к которому будет подключен ППМ. Другими словами, установка фазы и амплитуды будет проводиться не для каждого дискретного излучателя на полотне, а для группы. Суть идеи состоит в том, что количество ППМ, аттенюаторов, фазовращателей, шин управления и жгутов питания, а также СВЧ-соединителей уменьшится пропорционально количеству дискретных элементов в кластере. В результате стоимость системы может быть снижена более чем в два раза.

В представленной работе показаны результаты аналитических и электродинамических расчетов кластеризованного антенного полотна, предназначенного для работы в составе малогабаритной АФАР. Показана принципиальная возможность реализации такого полотна на практике, а также возможность электронного сканирования в широком секторе углов (±60°) без существенного искажения диаграммы направленности.

Литература

1. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д. И. Воскресенского. 4-е изд. — М.: Радиотехника, 2012.
2. Савельев П. А. Анализ характеристик антенных решеток с дискретным фазированием // Антенны, 1974. — № 19. — С. 82–93.
3. Меркулов В. В. К оценке КНД системы излучателей при наличии фазовых и амплитудных искажений // Радиотехника и электроника, 1966. — Т. 11. — № 11. — С. 2066–2069.

УДК 621.396.6

Исследование возможности создания АФАР X-диапазона на основе многоканальных приемо-передающих модулей

Коротаев Н. А., Демшевский В. В., Карасев М. С.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
info@istokmw.ru

В работе представлены результаты исследования возможности реализации АФАР X-диапазона на основе многоканальных приемо-передающих модулей с использованием только отечественной ЭКБ. Приведено описание конструкции и электрические параметры, полученные в результате электродинамического моделирования.

Ключевые слова: приемо-передающий модуль; tile-архитектура; антенная решетка.

Активная фазированная антенная решетка (АФАР) — это фазированная антенная решетка (ФАР), имеющая на выходе каждого элемента или группы элементов отдельный приемо-передающий модуль (ППМ), с возможностью управления амплитудой и фазой на своем выходе [1]. ППМ имеет свой собственный передатчик, приемник и схему управления. В итоге каждый отдельный ППМ можно запрограммировать на работу в качестве передатчика, приемника или независимого радара. Все ППМ, находящиеся в составе АФАР, могут работать как вместе, создавая мощный радиолокатор, так и выполнять параллельно разные задачи. Часть из них работают вместе как приемник предупреждения об источниках излучения в диапазоне работы АФАР, другая часть осуществляют функцию борьбы с помеховыми явлениями, а остальные выполняют функцию активного радиолокатора. Любой ППМ или группу ППМ можно переназначить на любую роль в системе, организовав отдельную «подсистему». Выходная мощность излучаемого сигнала или чувствительность приемника любой из таких «подсистем» пропорциональны количеству ППМ, входящих их состав.

В зависимости от конструкции ППМ, а также его типа (одноканальный или многоканальный) архитектура АФАР может быть поканальной, slat (планочной) или tile (плиточной). В работе рассмотрен возможный вариант реализации АФАР на основе tile-архитектуры, представляющей собой многослойную структуру, которая состоит из многоканальных ППМ с интегрированными излучающими элементами, схемами формирования луча, питания и распределительной логики. Надежное взаимное соединение ППМ и излучающих элементов осуществляется с помощью пайки и специальных СВЧ-переходов. Такая конструкция значительно уменьшает объем, исключает дополнительные кабели и соединители между антенным полотном и ППМ, а также позволяет разместить систему теплоотвода на обратной стороне ППМ. По предварительным оценкам, такая архитектура построения АФАР в совокупности позволяет снизить стоимость изделия в несколько раз.

Литература

1. Белоус А. И., Мерданов М. К., Шведов С. В. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. — 688 с.
2. Викулов И. Радиоэлектронные системы с АФАР: направления развития и применения // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2017. — № 5 (00165). — С. 126–134.
3. Карасев М. С. Многофункциональный приемо-передающий модуль X-диапазона частот // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2019. — Вып. 3 (542). — С. 51–54.
4. Карасев М. С. Приемо-передающий субмодуль X-диапазона частот // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2020. — Вып. 3 (546). — С. 40–44.

УДК 621.396.96

Метод адаптивного формирования радиолокационных портретов в крупноапертурных РЛС для оперативной классификации космических аппаратов

к. т. н. Перлов А. Ю.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
laperlov@yandex.ru

Приведено описание метода адаптивного формирования радиолокационных портретов в РЛС мониторинга космического пространства в интересах решения задачи классификации космических аппаратов. Показано, что эффективное построение одномерных и двумерных портретов космических аппаратов может быть достигнуто за счет учета параметров зондирующих сигналов и нелинейных искажений в АФАР.

Ключевые слова: РЛС; космический аппарат; радиолокационное портретирование; нелинейные искажения; АФАР.

Рост количества космических аппаратов (КА) и активное развертывание группировок типа Starlink определяют актуальность решения задачи мониторинга космического пространства. Ключевым инструментом для непрерывного обнаружения и сопровождения целей являются радиолокационные станции мониторинга космического пространства (РЛС МКП), чьи возможности по классификации КА должны развиваться с учетом значительного усложнения реального космического фона [1].

Потенциальной возможностью современных крупноапертурных РЛС МКП является формирование некоординатной информации, включая радиолокационные портреты (РЛП), характеризующие распределение интенсивности отраженного сигнала от целей. Формируемые РЛП служат источником информации для выделения сигнальных признаков — отражательных, геометрических и динамических параметров КА.

Для эффективного построения РЛП с помощью алгоритмов инверсного синтеза апертуры необходимо обеспечить равномерную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) в аппаратуре приемо-передающей системы РЛС. Особенно данный вопрос актуален при переходе в режим построения РЛП с использованием широкополосных ЛЧМ-сигналов, влияющих на неравномерность АЧХ и, соответственно, на эффективность построения РЛП при проводке КА [2].

При этом ключевой особенностью крупноапертурных РЛС с приемо-передающими активными фазированными антенными решетками (АФАР) является ее нелинейных характер неравномерности АЧХ за счет большого числа и сложных конструктивных особенностей приемо-передающих трактов. Данное обстоятельство обусловлено разбросом амплитудно-фазового распределения между трактами РЛС, который влияет на искажение АЧХ при работе с широкополосными сигналами.

В интересах решения задачи оперативной классификации КА предложен метод адаптивного формирования РЛП, который учитывает различные параметры

зондирующих сигналов (полоса, несущая частота, длительность, скважность) и основан на следующих операциях:

- оценка неравномерности и АЧХ приемо-передающей системы РЛС;
- калибровка АФР приемо-передающих трактов АФАР;
- компенсация неравномерности АЧХ на основе управления параметрами зондирующих сигналов;
- формирование выборки РЛП (одномерных и двумерных) при работе с различными типами зондирующих сигналов;
- классификация КА на основе применения сверточных нейронных сетей к полученным РЛП.

В рамках имитационного моделирования показано, что предложенный метод создает основы для адаптивного формирования выборки одномерных (дальностных) и двумерных (дальностно-доплеровских) портретов в РЛС за счет определения оптимальных параметров для построения РЛП с учетом различных параметров зондирующих сигналов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00140, https://rscf.ru/project/24-79-00140.

Литература

1. Разиньков С. Н., Перлов А. Ю., Захаров А. С., Темник Я. А. Оперативная калибровка активных фазированных антенных решеток наземных радиолокационных станций // Воздушно-космические силы. Теория и практика, 2024. — № 29. — С. 94–102.
2. Перлов А. Ю., Захаров А. С., Тимошенко А. В., Булатов М. Ф. Модель тепловых искажений амплитудно- частотной характеристики приемной системы радиолокационной станции в режиме сверхразрешения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли, 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 26–34. DOI: 10.36724/2409-5419-2024-16-5-26-34.

Программно-аппаратный комплекс для имитации канала распространения сигнала

к. т. н. Балакин Д. А.
АО Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента»
117418, г. Москва, Нахимовский просп., 51

Главным критерием успеха работоспособности радиотехнической системы (РТС) на практике являются полевые испытания. Зачастую они заканчиваются неуспешно, так как при разработке РТС очень сложно предусмотреть все сценарии, с которыми сталкиваются РТС при тестировании. Решение этой проблемы — это моделирование, позволяющее учесть разнообразный диапазон параметров РТС и различные условия эксплуатации. Однако полученные модели должны не только показывать высокую точность, но и быть переносимыми на специальное оборудование или программно-аппаратный комплекс (ПАК), позволяющий «на столе» протестировать приемо-передающую часть РТС. К такому оборудованию предъявляют требование функционированияю в реальном времени.

Одним из важнейших факторов, влияющих на итоговый результат работы РТС, является канал распространения сигнала, где передаваемый сигнал претерпевает различные искажения. Таким образом, реализация канала распространения в ПАК является актуальной задачей. Модель канала распространения должна учитывать влияние поверхности Земли или подстилающей поверхности (многолучевое распространение, дифракцию), атмосферу Земли (рефракцию, сверхрефракцию, субрефракцию, затухание при различных погодных условиях), а также особенности распространения через ионосферу.

В докладе представлены результаты разработки моделей канала распространения сигнала, выполненных в рамках проекта Engee-РТС. Часть этих моделей интегрирована в ПАК, который представляет собой комплекс полунатурного моделирования «РИТМ». Показаны результаты работы ПАК, а также дальнейшие пути его развития.

УДК 621.396.61

Конфигурируемые IP-ядра для систем связи и телекоммуникаций

Кащенко И. Е., к. т. н., Ткач А. А., Дубровко А. Ю., Цымбал М. Р., Пантелеева П. В.
АО «Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента»
117418, г. Москва, Нахимовский просп., 51
info@exponenta.ru

Разработана библиотека IP-ядер для проектирования современных систем связи и телекоммуникаций, включая стандартизованные системы связи: 3GPP LTE, 5G NR, IEEE 802.11, DVB-S2/S2X, DVB-T2 и др. Представлены основные характеристики предлагаемых IP-ядер и краткое описание архитектуры и их принципа работы. Показаны результаты работы прототипов систем связи, реализованных на основе предлагаемой библиотеки IP-ядер.
Ключевые слова: IP-ядра; системы связи; телекоммуникации; 3GPP LTE; 5G NR; IEEE 802.11; DVB-S2/S2X; DVB-T2.

Современные и перспективные системы связи, как правило, предназначены для передачи больших объемов информации и обеспечения непрерывного потока пользовательской информации, что требует от таких систем высокой производительности. Построение и проектирование таких высокопроизводительных систем является чрезвычайно сложной задачей, так как от разработчиков и исследователей требуется не только знание физических принципов и алгоритмов приема, передачи и распространения радиосигналов, но и понимание, как эти принципы и алгоритмы реализовать в составе целевой программно-аппаратной платформе. Одним из вариантов решения задач реализации алгоритмов систем связи, в частности алгоритмов, связанных с цифровой обработкой сигналов, может стать использование специализированных конфигурируемых IP-ядер.

Основная задача алгоритмов цифровой обработки сигналов в системах связи и телекоммуникациях связана с функциями и преобразованиями так называемого цифрового фронтенда (Digital Front-End — DFE):

- цифровой повышающий/понижающий преобразователь;
- цифровые предыскажения сигнала;
- канальные фильтры;
- снижение пик-фактора сигнала;
- БПФ/ОБПФ;
- OFDM модулятор/демодулятор;
- помехозащищенные кодеки.

Данные функции и преобразования целесообразно реализовывать в виде конфигурируемых IP-ядер. Это позволяет использовать единую архитектуру проектирования для обширной номенклатуры систем связи.

На рис. 1 представлена структурная схема типового тракта приема-передачи системы связи, основанной на конфигурируемых IP-ядрах, разработанных специалистами компании ЦИТМ «Экспонента».

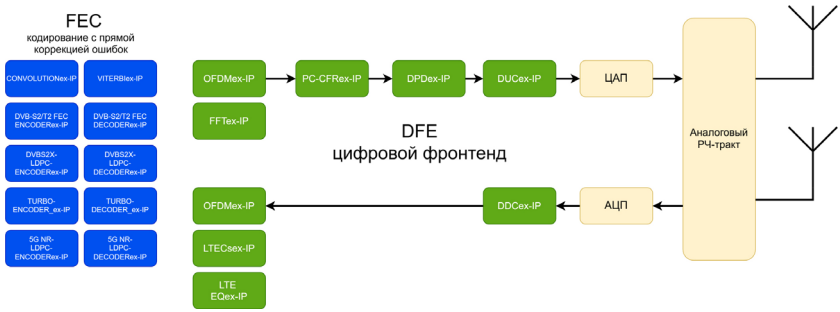


Рис. 1. Система связи на основе решений от ЦИТМ «Экспонента»

Разработанные IP-ядра представляют собой полноценную библиотеку, позволяющую выполнять проектирование современных систем связи и телекоммуникаций, существенно снижая трудозатраты на научные исследования и разработку алгоритмов цифровой обработки сигналов. Особенностями представленных IP-ядер являются:

- высокое быстродействие;
- оптимизированные с точки зрения вычислительных ресурсов алгоритмы;
- универсальная программная реализация, позволяющая использовать данные IP-ядра в составе ПЛИС и СБИС зарубежной и отечественной разработки;
- программная реконфигурация и адаптация под нужды заказчика;
- наличие программных моделей в отечественной среде моделирования Engee.

Литература

1. Кащенко И. Е., Павлов А. П. Регуляризация RLS-алгоритма для адаптивных систем ввода цифровых предыскажений // Радиотехника, 2024. — Т. 88. — № 1. — С. 141–148. DOI: 10.18127/j00338486-202401-13. EDN ODCLUD.
2. Кащенко И. Е., Павлов А. П. Система ввода цифровых предыскажений на основе обобщенной полиномиальной модели с памятью для GaN усилителей мощности // Журнал радиоэлектроники, 2024. — № 10. DOI: 10.30898/1684-1719.2024.10.6. EDN GTWOVS.

УДК 681.3.5

Построение унифицированного комплекта разработчика АСУ СТО электронного машиностроения

Переверзев А. Л., д. т. н., Петров В. Ф., к. т. н., Симонов С. Б., к. т. н., Терентьев А. И., к. т. н.
Институт микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
aaattt@mail.ru

В работе рассмотрены проблемы проектирования отечественного специального технологического оборудования (СТО) с учетом импортозамещения. В настоящее время технические и архитектурные решения в области разработки автоматизированных систем управления СТО на отечественной элементной базе не унифицированы. Поиск и применение общих архитектурно-технических решений позволят сократить время разработки СТО, повысить их надежность и снизить стоимость обслуживания.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления; программируемый логический контроллер; «Багет-ПЛК2»; «ПЛК-Эльбрус»; распределенные системы управления.

В настоящее время развитие отечественных технологий электронного машиностроения имеет большое значение. Разрабатывается более 100 единиц специального технологического оборудования (СТО), свыше 500 видов материалов для производства электроники.

Проектируемое СТО представляет собой комплексные установки с автоматизированной системой управления. Система управления СТО должна обеспечивать автоматический сбор, обработку, хранение информации и выработку управляющих сигналов в соответствии с заданным рецептом для обеспечения технологического процесса. При этом необходимо обеспечить безопасность функционирования и эффективность производства, которая складывается из скорости (производительности) изготовления и качества выпускаемой продукции.

Для этого в проектируемых СТО необходимо поддержать высокий уровень автоматизации работы как отдельной стоящей установки, так и всей производственной линии. Также необходимо обеспечить ясный и непротиворечивый операторский интерфейс для выполнения производственных операций и сервисного обслуживания установки и интеграцию в автоматизированный производственный цикл на предприятии.

На фоне санкций и ухода зарубежных производителей становится актуальной задача создания отечественного унифицированного комплекта разработчика АСУ СТО с открытой архитектурой для применения в электронном машиностроении. Идеология такого подхода предполагает создание множества совместимых и взаимозаменяемых модулей, которые допускают применение компонентов различных разработчиков без привязки к определенным производителям.

Ассоциация предприятий «Электронное машиностроение» [1] также считает целесообразным создание унифицированной системы управления СТО.

В России разработкой и производством ПЛК на базе отечественных процессоров занимаются НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ [2], ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» [3] и др.

В НИИСИ разработаны две линейки ПЛК и модулей для них — ПЛК1 и ПЛК2 [2]. Отличительной особенностью является использование отечественного микропроцессора 1890ВМ108 с тактовой частотой 400 МГц.

ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» производит программируемый логический контроллер «ПЛК-Эльбрус» [3], построенный на базе отечественного микропроцессора «Эльбрус-2С3» (К1891ВМ068) с тактовой частотой до 2 ГГц.

На базе представленных отечественных решений предлагается разработать унифицированный программно-аппаратный комплекс, выполняющий функции сбора и обработки информации, регистрации, управления, регулирования, сигнализации и технологических блокировок, предназначенный для обеспечения необходимых параметров управления и бесперебойной работы СТО. Использование предлагаемых решений позволит повысить эффективность разработки, производства и эксплуатации оборудования электронного машиностроения, а также разработать единые стандарты подготовки кадров.

Литература

1. Ассоциация ЭМ. — URL: https://elmashrussia.ru (дата обращения: 17.03.2025).
2. НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ. — URL: https://www.niisi.ru (дата обращения: 17.03.2025).
3. ИНЭУМ, 2013–2024. — URL: http://www.ineum.ru (дата обращения: 17.03.2025).

УДК 681.326.3

ПЛК в автоматизированных системах управления специализированным технологическим оборудованием

Аряшев С. И.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
aserg@cs.niisi.ras.ru

Представлены принципы разработки, используемые в НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ при разработке микроэлектронных изделий, в том числе ПЛК семейства «Багет». Обозначены проблемы, на решение которых направлены данные ПЛК.

Ключевые слова: программируемый логический контроллер; автоматизированная система управления; технологическое оборудование.

Существующие в НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ принципы, закладываемые в разработки, в полной мере использованы при разработке ПЛК семейства «Багет», его встраиваемого и инструментального программного обеспечения.

Проведен анализ потребности государства и бизнеса. Оценена их актуальность и значимость. Представлены текущие тенденции и вызовы рынка программируемых логических контроллеров (ПЛК), а также вызовы автоматизированных систем управления специализированным технологическим оборудованием (АСУ СТО). Разработана программно-аппаратная платформа «Багет» для АСУ СТО. В состав платформы входит в том числе программное обеспечение ПЛК семейства «Багет»: встраиваемое, инструментальное и прикладное. Представлен опыт НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ в решении проблем с использованием разработанных ПЛК на базе микроконтроллеров. Представлен процесс внедрения, от запроса до работающей системы. Обозначены направления развития ПЛК.

Программный комплекс ELPLC-LOGIC — платформа для программирования ПЛК

Глухов А. В.
ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»
119334, г. Москва, ул. Вавилова, 24

Российская инструментальная система программирования на языках стандарта МЭК 61131-3 для ПЛК ELPLC-LOGIC разрабатывается ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» с 2011 года.

САПР состоит из среды разработки и системы исполнения. Система исполнения работает под операционными системами Linux, ЗОСРВ «Нейтрино», на аппаратных платформах «Эльбрус», ARM, x86. Возможно портирование на другие аппаратные архитектуры. Поддерживается работа систем исполнения на виртуальных машинах.

Среда разработки работает под операционными системами Linux (в частности, на российских дистрибутивах Astra Linux, Alt Linux, «Эльбрус-Линукс»), а также под Windows, MacOS. Поддерживаются пять языков программирования (ST, FBD, SFC, LD, IL).

Система исполнения адаптирована под ОС реального времени. Основной поток выполняется с повышенным приоритетом. Реализована функция безударной корректировки исполняемых программ. Реализован ряд механизмов взаимодействия с драйверами аппаратуры ПЛК, коммуникационными протоколами. Организован канал отладки программ, поддерживаются программно-аппаратные механизмы защиты и управления исполнением. Поддерживаются механизмы резервирования.

Среда разработки содержит инструменты для конфигурирования всех компонентов, обеспечивает выбор аппаратной платформы с набором совместимых служб, кросс-средств сборки и библиотек. Сборка программ реализована в два этапа: код на технологических языках транслируется в код на языке С, а затем компилируется под выбранную аппаратную архитектуру. В среде разработки реализовано несколько механизмов отладки программ: табличное представление переменных, подсветка значений в графических языках, отладочная визуализация в виде построения набора мнемосхем с привязкой к IEC-переменным.

Реализованы функции для контроля изменений программ пользователя: контрольные точки разработки программы, контроль изменений при установке программ на целевые устройства, хранение последней версии проекта на устройстве.

В среду разработки встроена система плагинов, позволяющая разрабатывать дополнительные модули конфигурирования и кодогенерации системы исполнения сторонними разработчиками, что позволяет применять САПР ELPLC-LOGIC совместно с ПЛК различных производителей.

УДК 681.518.5

Средства промышленной автоматизации АО «ЭЗАН». SCADA-система «Соната»

Лущевский С. С.
АО «Экспериментальный завод научного приборостроения со Специальным конструкторским бюро Российской академии наук»
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 9
efse@ezan.ac.ru

SCADA-система «Соната» разработана Специальным конструкторским бюро АО «ЭЗАН» и предназначена для создания автоматизированных систем управления технологическими процессами. Внесена в Реестр российского ПО. Дается обзор функциональных возможностей и основных характеристик.
Ключевые слова: АСУ ТП; SCADA-система; промышленная автоматизация.

SCADA-система «Соната» является полнофункциональной SCADA/HMI-системой для построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) в различных отраслях промышленности, энергетики и транспорта.

При разработке архитектуры использованы принципиально новые решения в построении систем автоматизации — распределенная база сигналов и многоядерность. Благодаря такой архитектуре повышается общая живучесть системы и ее надежность, обеспечивается построение распределенных систем и упрощается их масштабируемость.

SCADA «Соната» является мультиплатформенной, работает на различных аппаратных платформах под управлением операционных систем ЗОСРВ «Нейтрино» (QNX 6), ОС семейства Linux, MS Windows.

Создание проекта системы автоматизации для всех уровней выполняется в единой интегрированной среде разработки, включающей в себя редакторы пользовательского интерфейса, графических и текстовых языков технологического программирования, средства конфигурирования архивов, драйверов и протоколов обмена данными, отладки и развертывания проекта.

Разработка технологических программ выполняется на технологических языках программирования стандартов IEC (МЭК) 61131 (циклическая модель выполнения) и IEC (МЭК) 61499 (событийная модель выполнения). Также возможно разрабатывать программные модули на языке C++ или интерпретируемом языке программирования Lua.

Поддерживаются стандартные протоколы обмена данными: OPC UA (client, server), MODBUS RTU/TCP (master, slave), HTTP (веб-интерфейс), МЭК 61850, МЭК 60870-101, 104, SNMP (Ver. 1,2C,3), интерфейсы PostgreSQL, MySQL, SQLite.

Основными отличительными особенностями SCADA-системы «Соната» являются:

- единая среда разработки и исполнения для всех уровней системы автоматизации;
- распределенность вычислительных ресурсов;
- гарантированное время реакции на события;
- высокая надежность — резервирование, дублирование, диагностика;

- единое информационное пространство в распределенной АСУ ТП;
- моделирование объектов автоматизации;
- групповая разработка проектов.

Модульная архитектура и простота масштабирования SCADA-системы «Соната» позволяют строить системы промышленной автоматизации различной степени сложности и распределенности.

УДК 621.3.049

Особенности реализации медицинской аппаратуры электроимпульсной терапии

Нестеренко И. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
nesterenko@bms.zone

Проведен обзор и анализ аппаратуры электроимпульсной терапии. Предложены способы и подходы к реализации структурных элементов аппаратуры и встроенной информационно-управляющей системы. Рассмотрены вопросы функциональной безопасности.
Ключевые слова: электроимпульсная терапия; электростимуляция; нейростимуляция; дефибрилляция.

Значительная часть процессов информационного обмена в организме человека основана на электрическом взаимодействии, которое на клеточном уровне обеспечивается нейронами и кардиомиоцитами, способными генерировать и распространять потенциалы действия. Это делает возможным терапевтическое применение электроимпульсной терапии (ЭИТ) — контролируемого воздействия электрическими импульсами в целях коррекции, модуляции или восстановления физиологических функций.

ЭИТ представлена следующими основными видами, определяемыми обеспечиваемым терапевтическим эффектом: электрокардиостимуляция (ЭКС), имплантируемая кардиоверсия-дефибрилляция (ICD), наружная дефибрилляция (НД), глубокая стимуляция мозга (DBS), стимуляция блуждающего нерва (VNS), стимуляция спинного мозга (SCS), миостимуляция (МС), электростимуляция для регенерации тканей (ЭСРТ) [1]. Параметры различных видов ЭИТ представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры различных видов ЭИТ

Вид ЭИТ	Интенсивность	Длительность	Частота
ЭКС	2–5 В	0,2–1,0 мс	40–80 имп/мин
ICD	30–40 Дж (до 800 В)	10 мс	—
НД	150–360 Дж	10 мс	—
DBS	1–10 мА	60–120 мкс	100–200 Гц
VNS	0,25–3,5 мА	250–500 мкс	20–30 Гц
SCS	1–25 мА	30–1000 мкс	40 Гц — 10 КГц
МС	20–120 мА	200–400 мкс	20–50 Гц
ЭСРТ	100–1000 мкА	100–1000 мкс	0,1–10 Гц

Несмотря на широкий диапазон параметров формируемых воздействий, в аппаратуре ЭИТ можно выделить общие структурные элементы: преобразователь

напряжения, накопитель энергии, формирователь импульсов, система электродов, информационно-управляющая система (ИУС).

Основным способом обеспечения заданных характеристик терапевтического воздействия в аппаратуре ЭИТ является применение при реализации ИУС принципа обратной связи, причем как исключительно в рамках технических средств [2], так и включая живые системы в контур управления [3].

Одной из ключевых задач при реализации аппаратуры ЭИТ является обеспечение энергоэффективности принимаемых технических решений, что продиктовано их непосредственным влиянием на эксплуатационные характеристики аппаратуры, разрабатываемой преимущественно в носимом или имплантируемом исполнении.

Рассматриваемая аппаратура относится к классу медицинских изделий, к которым предъявляются требования по обеспечению безопасности применения, в том числе в условиях единичного нарушения. Для удовлетворения таких требований при проектировании ИУС аппаратуры ЭИТ должны приниматься меры по обеспечению функциональной безопасности, включающие как введение определенной аппаратной избыточности, так и программные процедуры самотестирования и контроля.

Перспективными направлениями работ в области аппаратуры ЭИТ являются исследования биоразлагаемых устройств, поиск способов извлечения энергии для обеспечения функционирования из окружающей среды и повышение пространственного разрешения электродных структур. ЭИТ развивается в сторону персонализированных энергоэффективных и малотравматичных решений, открывая новые возможности в терапии и восстановительной медицине.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024).

Литература

1. Enji K., Sumin K., Yong Won K., Hunkyu S., Moohyun K., Won Gi C., Wonjung P., Hayoung S., Dong Ha L., Jakyoung L., Sanghoon L., Inhea J., Kyeonghee L., Jang-Ung P. Interdiscip. Med. 2023. 1, e20230003.
2. Патент РФ № 2827917, МПК A61N 1/39. Способ формирования дефибрилляционного импульса со ступенчатой формой фронта и среза и устройство для его осуществления / Горбунов Б. Б., Нестеренко И. В., Селищев С. В., Телышев Д. В. — Заявл. 13.12.2023, опубл. 03.10.2024, бюл. № 28. — 23 с.
3. Wang J., Chen Z. S. Closed-loop neural interfaces for pain: Where do we stand? // Cell Reports Medicine, 2024. 5:101662.

УДК 681.54

Нелинейное управление концентрацией глюкозы в интерфейсах живых технических систем

Пожар К. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
pozhar@bms.zone

В работе предложен комплексный подход к адаптивному нелинейному управлению концентрацией глюкозы в крови в технических системах для терапии сахарного диабета 1-го типа, основанный на комбинации предиктивного управления и управления по обратной связи с оценкой эффективности в пространстве Ковачева.
Ключевые слова: нелинейное управление; автоматизированная инсулинотерапия; адаптивное управление; предиктивное управление.

Системы управления находят широкое применение в медицине для терапии социально значимых заболеваний. Создание медицинских изделий нового поколения (Указ Президента РФ от 18.06.2024 г. № 529) главным образом сопряжено с вопросами автоматизации и персонализации управления. Особой актуальностью обладают системы управления концентрацией глюкозы в крови, применяемые при тяжелых нарушениях функционирования естественных механизмов управления концентрацией глюкозы в крови (сахарный диабет 1-го типа), а также системы управления концентрацией глюкозы в рабочей среде систем диализа.

В таких задачах объект управления представляет собой сложную нелинейную систему с большим количеством естественных обратных связей и адаптивных механизмов и находится в условиях постоянных внешних возмущений и внутренних изменений. Имеется выраженная асимметрия риска отклонений, а управление является односторонним. Другой важной особенностью таких систем является тот факт, что зачастую человек является одновременно объектом управления, оператором системы управления, лицом, принимающим решения, и системой обратной связи. Вкупе с технической сложностью эффективного получения обратной связи в таких системах это приводит к неэффективности применения существующего мощного математического аппарата к линейным системам, а также распределения задач управления, принятия решений, экспертной оценки по субъектам и подсистемам и требует разработки новых комплексных подходов к управлению.

В качестве метода управления предложено адаптивное управление непрерывным звеном управления по обратной связи и предиктивным звеном управления по внешним возмущениям. Ключевым предлагаемым подходом к решению задачи управления концентрацией глюкозы в крови при диабете является применение симметризующей функции Ковачева [1], позволяющей унифицировать оценку риска от положительных и отрицательных отклонений. Динамическая функция эффективности определяется мультипликативно через нормированные критерии, заданные в пространстве Ковачева. Критерии оценивают предельное отклонение в том числе с учетом вероятности задержки произвольного внешнего возмущения, экспозиционной нагрузки от высоких значений глюкозы, а также впервые динамически оценивается риск от резкого падения концентрации глюкозы в крови.

В основе предиктивного управления лежит нелинейная физически обоснованная математическая модель объекта управления, основанная на уравнениях ферментативной кинетики в естественной системе управления концентрацией глюкозы в крови. Разработаны методы параметрической идентификации модели, а также расчета оптимальных управляющих воздействий в виде искаженной функции Гаусса с оптимизируемыми параметрами.

Общий алгоритм функционирования системы управления включает пять параллельно работающих модулей, обеспечивающих автоматическое непрерывное управление, анализ мгновенных значений управляемой величины и расхождений измеренных и прогнозируемых значений, обработку информации о внешних возмущениях, управляющих воздействиях, состоянии пользователя и поступающей информации от медицинских специалистов, а также диагностику технических элементов системы. Результатом работы алгоритма в случае отсутствия нарушений является автоматическое управление по обратной связи с осуществлением оптимальных управляющих воздействий при наличии внешних возмущений. В случае возникновения неисправностей или расхождений система формирует ряд рекомендаций и сигнализаций, после чего возможен переход в режим слабого управления, допускающего лишь снижение управляющего воздействия относительно номинального значения (аналог наиболее современных систем управления), выход из которого осуществляется через заданное время или по запросу пользователя, ручное управление (аналог систем управления прошлого поколения), а также вызов экстренных служб.

Литература

1. Kovatchev B. P. et al. Symmetrization of the blood glucose measurement scale and its applications // Diabetes care, 1997. Vol. 20. № 11. P. 1655–1658.

УДК 629.052.3

Разработка антенной системы секторного MIMO-радиолокатора

Мелёшин Ю. М.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе показан процесс разработки и испытаний антенной системы секторного MIMO-радиолокатора K-диапазона частот. Продемонстрированы этапы расчета и электромагнитного моделирования энергетических характеристик MIMO-радиолокатора в заданном секторе работы, получены экспериментальные результаты испытаний антенной системы и сделаны выводы о целесообразности предлагаемых подходов разработки.
Ключевые слова: MIMO; радиолокатор; виртуальная антенная решетка; энергетическая эффективность РЛС.

Одним из базовых принципов построения радиолокаторов на базе технологии множественного входа и множественного выхода (англ. multiple-input-multiple-output, далее — MIMO РЛС) является формирование виртуальной антенной решетки [1–3]. Виртуальная антенная решетка (ВАР) — это совокупность сигналов откликов размерностью $N_{\text{вар}} = N_{\text{прд}} \cdot N_{\text{прм}}$, содержащая все комбинации передатчик — приемник. Пусть координаты приемных и передающих антенных элементов записываются векторами:

$r_{\text{прд}}^{(i)} = [x_{\text{прд}}^{(i)}, y_{\text{прд}}^{(i)}, z_{\text{прд}}^{(i)}]$ — координаты i-й передающей антенны ($i = 1, ..., N_{\text{прд}}$),
$r_{\text{прм}}^{(j)} = [x_{\text{прм}}^{(j)}, y_{\text{прм}}^{(j)}, z_{\text{прм}}^{(j)}]$ — координаты j-й приемной антенны ($j = 1, ..., N_{\text{прм}}$).

Тогда координаты виртуальной антенной решетки определяются выражением

$$r_{\text{вар}}^{(k)} = \frac{r_{\text{прд}}^{(i)} + r_{\text{прм}}^{(j)}}{2}, \quad k = 1, ..., N_{\text{вар}}.$$

Как видно из данных выражений, одна и та же ВАР может быть получена при различных структурах и координатах приемных и передающих элементов, следовательно, использование MIMO РЛС открывает еще одну степень свободы при проектировании структуры и конструкции физической антенной решетки [4].

Были промоделированы различные варианты расположения физических антенных элементов MIMO РЛС с диапазоном рабочих частот 24,05–24,25 ГГц и сектором работы ±60 градусов в азимутальной плоскости и от −10 до +90 в угломестной плоскости [5].

Полученные результаты электродинамического моделирования были верифицированы путем экспериментального исследования, в ходе которого был полностью подтвержден сектор работы в угломестной плоскости, однако сектор работы в азимутальной плоскости составил ±50 градусов. По результатам исследования сделаны выводы о влиянииконструктивных элементов MIMO РЛС на итоговую энергетическую эффективность в секторе работы.

Литература

1. Черняк В. С. О новых и старых идеях в радиолокации: MIMO РЛС // Успехи современной радиоэлектроники, 2011. — № 2. — С. 5–20.

2. Чапурский В. В. Получение радиоголографических изображений объектов на основе разреженных антенных решеток типа MIMO с одночастотным и многочастотным излучением // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение», 2011. — № 4 (85). — С. 72–91.
3. Астахов Н. В., Бадаев А. С., Макаров О. Ю., Демихова А. С., Питолин В. М. Применение MIMO-радаров для точного обнаружения целей и оценки их параметров // Радиотехника, 2021. — Т. 85. — № 6. — С. 23–26. DOI: https://doi.org/10.18127/j00338486-202106-04.
4. Meleshin Y. M., Romanova E. O., Zatonskaya A. A., Kuzmin I. A. and Airapetian A. A. Optimization of the Arrangement of Antenna Elements of the Ku-band MIMO Radar // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021. P. 2541–2543. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396418.
5. Мелёшин Ю. М., Хасанов М. С., Карпов В. Н., Лялин К. С. MIMO радиолокатор на базе линейно-частотно модулированных сигналов с медленной фазокодовой манипуляцией // Труды МАИ, 2024. — № 138. — URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=182670.

УДК 629.052.3

Разработка MIMO-радиолокатора K-диапазона частот

Мелёшин Ю. М., Карпов В. Н., Лялин К. С.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе показан процесс разработки MIMO-радиолокатора K-диапазона частот. Продемонстрированы этапы составления структурной схемы, выбор оптимальных конструктивных решений в части проектирования как всего радиолокатора, так и его составных частей. Описан получившийся облик MIMO-радиолокатора малой дальности.

Ключевые слова: MIMO; радиолокатор; конструирование РЛС; тепловыделение.

В настоящее время актуальной является задача исследования и разработки современных радиолокационных станций (РЛС) малой дальности действия. Одним из подходов, который позволяет получить РЛС с высокими угловыми разрешающими способностями при небольшом количестве активных каналов, является технология MIMO РЛС (от англ. multiple-input-multiple-output, что означает множественный вход и множественный выход) [1–3]. В данной работе показан процесс разработки MIMO РЛС K-диапазона частот, который включает в себя такие этапы, как теоретический расчет, электромагнитное моделирование отдельных частей, конструирование облика РЛС, проектирование составных частей и теплофизические расчеты составных частей.

В работе показано, что использование технологии MIMO РЛС позволило реализовать сложное устройство каждой грани РЛС на базе единой СВЧ печатной платы, а предложенные подходы по расположению передающих антенных элементов и организации теплоотвода от выходных передающих СВЧ-усилителей позволили обеспечить непрерывный режим работы РЛС.

Теоретические выкладки подтверждены результатами экспериментальной отработки РЛС, в ходе которой показано, что при устоявшемся непрерывном режиме работы РЛС температура на СВЧ-усилителях мощности не превышает 70 градусов, что подтверждает целесообразность и работоспособность выбранных подходов.

Литература

1. Черняк В. С. О новых и старых идеях в радиолокации: MIMO РЛС // Успехи современной радиоэлектроники, 2011. — № 2. — С. 5–20.
2. Чапурский В. В. Получение радиоголографических изображений объектов на основе разреженных антенных решеток типа MIMO с одночастотным и многочастотным излучением // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение», 2011. — № 4 (85). — С. 72–91.
3. Мелёшин Ю. М., Хасанов М. С., Карпов В. Н., Лялин К. С. MIMO радиолокатор на базе линейно-частотно модулированных сигналов с медленной фазокодовой манипуляцией // Труды МАИ, 2024. — № 138. — URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=182670.

УДК 621.383:681.586.73

Обнаружение воздушных целей с помощью болометрического приемника

Ракитин А. В., Костров В. В.
АО «НИИ «Субмикрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
arv@se.zgrad.ru

Рассматриваются вопросы, связанные с применением болометрических датчиков в задачах обнаружения воздушных целей. Приведены обоснование достижения заданных характеристик, результаты статистического моделирования и полунатурных экспериментов.

Ключевые слова: болометрический приемник; обнаружение; воздушная цель.

Задача обнаружения воздушных целей является крайне актуальной и востребованной в различных условиях применения. В связи с малым размером целей и использованием мер, позволяющих существенно снизить их заметность в радиочастотном диапазоне, основное внимание при разработке современных систем обнаружения уделяется оптическим решениям, в частности инфракрасным приемникам. Подавляющее число существующих решений в предметной области основаны на применении охлаждаемых приемников различного типа, обладающих хорошей чувствительностью и обеспечивающих высокие характеристики обнаружения. Вместе с тем существенными недостатками охлаждаемых приемников являются большое время выхода на рабочий режим, измеряемое единицами и даже десятками минут, большая масса и габариты. Болометрические приемники лишены указанных недостатков, но обладают худшей чувствительностью и низким быстродействием.

Достижение значений эквивалентной шумовой разницы температур (ЭШРТ) в пределах 50 мК и размера более 640×480 пикселей для болометрических матриц позволяет применять их в задачах обнаружения [1]. Предлагаемые на сегодняшний день болометрические матрицы и модули, выполненные на их основе, имеют ЭШРТ порядка 30 мК и ниже при размере до 1024×768 пикселей, что превосходит указанные значения. Низкое быстродействие, как показано в работе, не является сдерживающим фактором в задачах обнаружения.

Одним из главных параметров системы обнаружения является дальность или ее пороговая чувствительность. Для их определения необходимо выполнить энергетический расчет, учитывающий влияющие факторы. Одним из таких факторов является фоноцелевая обстановка, когда фон может быть не излучающим, равномерно излучающим и с градиентной засветкой. В работе рассмотрена задача поиска и обнаружения воздушной цели болометрическим приемником с учетом влияния фона и атмосферы в заданном диапазоне рабочих высот. Построены вероятностно-дальностные характеристики, анализ которых показывает обеспечение более высоких значений вероятности обнаружения по сравнению с радиолокационными датчиками на тех же расстояниях до цели. Например, при сходных номинальных дальностях 40 км радиолокационная система обнаружения обеспечивает вероятность правильного обнаружения $P_d = 0{,}22$, а оптико-электронная — $P_d = 0{,}7$.

Проведен анализ особенностей отклика целей при межкадровой обработке. Разработан алгоритм, позволяющий повысить качество обнаружения за счет учета

«шлейфа» движущейся цели, возникающего из-за инертности болометрических элементов. В основе алгоритма лежит преобразование Радона, преобразующего двумерную задачу в одномерную. Проведенное статистическое моделирование показывает выигрыш в пороговом отношении сигнал/шум до 8–12 дБ по сравнению с классическим алгоритмом. Предложены направления развития алгоритмов обнаружения применительно к задаче обнаружения воздушных целей с помощью болометрических приемников.

Литература

1. Horn S., Lohrmann D., Campbell J., Perconti P., Balcerack R. Uncooled IR technology and applications // Proc. SPIE. Vol. 4369. P. 210–221.

УДК 621.396.96

Возможности модульной радиолокационной платформы ДЗЗ при решении задач интерферометрии

Кузьмин И. А., к. т. н. Цветков В. К., Кислый С. А.
АО «Завод ПРОТОН»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 10

Проведено исследование возможности использования модульной радиолокационной платформы дистанционного зондирования Земли для решения задач интерферометрии. Были получены цифровые модели рельефа одного и того же участка земной поверхности в различных частотных диапазонах. На основе анализа полученных результатов оценены точность и разрешение полученных цифровых моделей рельефа

Ключевые слова: ЦМР; РСА; интерферометр; модульная радиолокационная платформа ДЗЗ.

На сегодняшний день все более широкое распространение получают радиолокационные средства дистанционного зондирования Земли. Основными преимуществами радиолокационных средств ДЗЗ являются всепогодность, возможность работы в любое время суток и возможность обнаружения укрытых объектов, обусловленная проникающими свойствами радиоволн в низкочастотных диапазонах. Также широкое распространение получает использование радиолокационных средств ДЗЗ в интерферометрическом режиме для построения цифровой модели рельефа местности [1].

Современный технический уровень позволяет миниатюризировать радиолокационные средства ДЗЗ, что позволяет размещать их на малых и средних БПЛА [2, 3]. Модульная радиолокационная платформа [2] имеет два приемных канала, что позволяет подключить две приемные антенны, разнесенные между собой поперек направления движения носителя платформы, что позволяет осуществлять радиолокационную съемку в интерферометрическом режиме. За счет сменных модулей платформа может осуществлять радиолокационную съемку в одном из пяти диапазонов частот — P, L, S, C или X.

Помимо этого, при использовании БПЛА в качестве носителя необходимо использовать специальные алгоритмы обработки радиолокационных данных, позволяющие учесть сильные траекторные нестабильности, присущие малым и средним БПЛА [4]. Был проведен ряд экспериментов, в результате которых были получены цифровые модели рельефа участка земной поверхности, снятые в разных частотных диапазонах. Была проведена оценка точности и разрешения полученных цифровых моделей рельефа. Алгоритмы формирования радиолокационных изображений были модифицированы с учетом применения для решения задач интерферометрии. Были сделаны выводы о возможности использования модульной радиолокационной платформы для построения цифровой модели рельефа в разных частотных диапазонах.

Литература

1. Ma Y. et al. Collaborative Estimation of Aboveground Forest Biomass Using P-Band and X-Band Interferometric Synthetic Aperture Radar Based on Feature Optimization // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024. Vol. 17. P. 17876–17889.
2. Переверзев А.Л., Лялин К.С., Мелешин Ю.М. и др. Компактный мультидиапазонный радар с синтезированной апертурой // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S4 (99). — С. 154–156.
3. Лялин К.С., Переверзев А.Л., Кузьмин И.А. и др. Малогабаритная модульная платформа многодиапазонного радиолокационного комплекса дистанционного зондирования Земли для БПЛА // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8-1 (113). — С. 80–84. DOI: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s.80.84. EDN EKXCDQ.
4. Кузьмин И.А. Новый пофрагментный алгоритм формирования радиоизображений в системах дистанционного зондирования Земли // Проектирование и технология электронных средств, 2024. — № 4. — С. 21–27.

УДК 621.376.4

Радиомодем стандарта DVB-S2 для широкополосной системы связи российской орбитальной станции

Шевченко Р. А.[1], Конев С. В.[2]
[1] АО «Микроволновые Системы»
105122, г. Москва, Щелковское ш., 5, стр. 1
[2] ПАО «РКК «Энергия»
141070, г. Королев, ул. Ленина, 4а

В докладе предложены подходы к проектированию технического облика радиомодема, предназначенного для формирования и обработки радиосигнала стандарта спутниковой связи DVB-S2, являющегося составной частью приемо-передающего устройства Ku-диапазона (ППУ-Ku) широкополосной системы связи (ШСС) российской орбитальной станции (РОС).
Ключевые слова: бортовой модем стандарта DVB-S2; широкополосная система связи РОС.

Одним из основных комплексов технических средств, обеспечивающих возможность пилотируемых и беспилотных полетов космических аппаратов, являются радиосистемы управления и передачи информации.

В целях обеспечения функционирования российской орбитальной станции (РОС) ведется разработка бортового радиомодема приемо-передающего устройства Ku-диапазона широкополосной системы связи с учетом:

- анализа существующих вариантов построения спутниковых модемов стандарта DVB-S2 [1–2];
- требований обеспечения функциональной pin-to-pin-совместимости создаваемого изделия с эксплуатируемыми средствами (изделие T-720-2 L3Communication, используемое в модуле «Звезда» МКС, модем фирмы Ayecka — в наземной инфраструктуре Роскосмоса), работающими в стандарте DVB-S2 с дополнительным пользовательским режимом (модуляция OQPSK) и скоростью передачи данных не менее 60 Мсимв/сек;
- анализа доступной ЭКБ исходя из условий эксплуатации, требований к надежности и долговечности и технико-экономической рациональности;
- анализа возможных вариантов конструктивного облика радиомодема, обеспечивающего, с одной стороны, эксплуатацию с учетом заданной модели внешних воздействующих факторов, с другой стороны, стандартизацию, «гибкость» и модернизационный потенциал.

При построении современных бортовых спутниковых модемов можно выделить три основных варианта построения (архитектуры).

Вариант № 1: «классическая архитектура» — построение модема на дискретных элементах ЦАП/АЦП, квадратурных модуляторах в сочетании с достаточно простыми ПЛИС и DSP-процессорами.

Вариант № 2: «SDR-архитектура» — построение модема в виде высокопроизводительного вычислителя (embedded system) с реализацией алгоритмов цифровой обработки сигнала программным способом. В качестве аппаратных средств используется связка SDR-трансиверов и ПЛИС. Отдельным перспективным

и активно развивающимся подвидом данного класса можно назвать модемы на новом поколении RFSoC (ПЛИС с интегрированным ЦАП/АЦП).

Вариант № 3: «модем на кристалле» (ToM — terminal on modul) — построение модема на специально спроектированном под определенный стандарт спутникового вещания чипе — заказная СБИС.

С учетом доступности элементной базы, высокой степени модернизационного потенциала, возможности обеспечения минимально возможных сроков разработки для решения поставленной задачи — разработки бортового радиомодема стандарта спутниковой связи DVB-S2 с дополнительным пользовательским режимом (модуляция OQPSK), наиболее предпочтительным вариантом построения спутникового модема является второй вариант — SDR-архитектура.

В части выбора ЭКБ при разработке бортовых блоков, предназначенных для размещения в РОС, возможны два подхода:

- использование радиационно стойкой ЭКБ, обеспечивающей функционирование изделия в условиях воздействия радиационного излучения в течение всего срока летной эксплуатации (15 лет);
- использование ЭКБ в «индустриальном» исполнении на основе конструктивных методов защиты от воздействия радиационного излучения с заменой блоков в ходе летной эксплуатации (N раз в течение 15 лет, что допустимо для РОС).

Исходя из проведенных исследований [3], по данным эксплуатации, реальный срок службы систем с применением ЭКБ в «индустриальном» исполнении в 3–4 раза ниже срока службы систем с применением радиационно стойкой ЭКБ. При сопоставимых конструктивно-схемных решениях в течение срока службы 15 лет потребуется не более 3–4 замен блоков на РОС. Приняв стоимость изделия на «индустриальной» ЭКБ за одну условную единицу, стоимость изделия на радиационно стойкой ЭКБ составит не менее 10 условных единиц. Таким образом, с учетом дополнительных расходов на испытания/сертификацию и вывод на орбиту экономически целесообразно произвести замены изделий, выполненных на «индустриальной» ЭКБ на РОС, в течение эксплуатации.

В качестве конструктива для бортового радиомодема рационально использовать стандарт VPX форм-фактора 3U [4], обеспечивающего устойчивость к заданной модели внешних воздействующих факторов, стандартизацию, «гибкость» и модернизационный потенциал.

В докладе представлены полученные результаты макетирования радиомодема.

Литература

1. ETSI. EN 302 307-1 V1.4.1 «Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services News Gathering and other broadband satellite applications» REN/JTC-DVB-341-1.
2. ETSI. EN 302 307 V1.2.1 «Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)» REN/JTC-DVB-238.

3. Belous A., Saladukha V., Shvedau S. Space Microelectronics. Volume 1: Modern Spacecraft Classifi cation, Failure, and Electrical Component Requirements // London, Artech House, 2017. P. 440. ISBN: 9781630812577.
4. Слюсар В. Встраиваемые компьютерные системы для жестких условий: стандарты VITA 65 и VITA 46 // Электроника. Наука, технология и бизнес, 2012. — Вып. 6.

Цифровые компоненты китайского производства для применения в цифровой обработке сигналов

Неяскин К. В.
АО «Эпсилон»
197198, г. Санкт-Петербург, просп. Добролюбова, 19, лит. А, пом. 4Н
k.neyaskin@aoepsilon.ru

Рассмотрены наиболее часто используемые семейства ПЛИС западного производства, а также ряд китайских производителей, которые предлагают цифровые микросхемы для применения в космической отрасли и ОПК, а также в промышленности. Проведено сравнение основных технических характеристик и степень аналогии с западными микросхемами.
Ключевые слова: ПЛИС; Xilinx; память; цифровые микросхемы; ЦОС; китайская ЭКБ; Китай.

На протяжении последних десятилетий происходило активное внедрение западной ЭКБ в отечественное производство, главной причиной чего служило отсутствие аналогов в мире в части технологичности (эксплуатации и производства) и передовых технических показателей. С другой стороны, до недавнего времени не было достаточных стимулов к активному импортозамещению в связи с доступностью данных микросхем на российском рынке.

ПЛИС обычно отличаются большей ценой, чем широко распространенные сигнальные процессоры и микроконтроллеры, но главными преимуществами FPGA являются возможность их конфигурирования, а также, что представляет особый интерес, наличие на кристалле большого числа специализированных блоков, предназначенных для аппаратного решения часто встречающихся задач, что позволяет значительно улучшить технико-эксплуатационные характеристики выпускаемой продукции. К таким блокам традиционно относятся блочная память, блоки для выполнения операций «умножение с накоплением» и аппаратные высокоскоростные последовательные приемо-передатчики.

Особую популярность обрела линейка ПЛИС (FPGA) 7-го поколения производства Xilinx (США) — Kintex-7, Virtex-7, Artix-7, выполненные по 28-нм технологии, так как они являются часто используемыми в разработках. Эта серия устройств обычно используется в высокоскоростных сетях (10–100G), портативных радарах, для проверки прототипов ASIC и других областях, которые характеризуются высокими требованиями к количеству ресурсов и производительности, но не очень чувствительны к энергопотреблению и стоимости.

В качестве ключевого преимущества 7-го поколения FPGA отмечается унификация программируемых ресурсов новых семейств. Утверждается, что для седьмого поколения FPGA возможна быстрая миграция между семействами Virtex/Kintex/Artix без необходимости корректировки проекта.

В целом для FPGA серии 7 можно отметить следующие факторы, способствующие их применению в цифровых системах нового поколения:

- унификация архитектуры логических ячеек, блоков ЦОС и блочной памяти;

- увеличение степени интеграции за счет развития ядер высокоскоростных последовательных приемо-передатчиков, контроллеров PCI-Express и блоков xADC;
- снижение потребляемой мощности, упрощающее проектирование системы питания и улучшающее целостность сигналов;
- выделение семейства Kintex, ориентированного на ЦОС.

Таким образом, новые семейства FPGA Xilinx представляют собой эффективную аппаратную платформу для реализации систем ЦОС, проводных и беспроводных интерфейсов.

Сейчас, когда возникла острая необходимость обеспечить ЭКБ отечественных разработок в условиях отсутствия легальных каналов поставки западных компонентов, рассматривается их замена на китайские аналоги. Это стало возможным благодарю тому, что КНР начиная с 2000-х годов активно уделяла внимание исследованиям в сфере разработки электронных компонентов для разного рода применений. В результате появилось большое количество китайских производителей, которые предлагают полные аналоги ПЛИС и других высокопроизводительных микросхем. Вместе с тем уровень качества и степень заменимости западных оригиналов также отличаются, поэтому следует избирательно подходить к подбору и поставке китайских компонентов при помощи проверенных поставщиков китайской ЭКБ, к каким относится компания «Эпсилон».

Несколько изготовителей в Китае занимаются выпуском изделий, предназначенных для применения в космической сфере. В ходе доклада будут рассмотрены некоторые из них, добившиеся наиболее значимых результатов в этом направлении. Как правило, такие производители предлагают не только радиационно стойкие изделия, но и продукцию для применения в промышленности, бортовой аппаратуре летательных аппаратов и оборудовании оборонного комплекса. Также будет проведен анализ степени сходства предлагаемых цифровых микросхем с западными аналогами, которые они призваны заменить. Помимо ПЛИС будут рассмотрены и другие цифровые микросхемы, применяемые в системах ЦОС: память, различные интерфейсы, АЦП/ЦАП и пр.

Литература

1. Тарасов И. Перспективы использования FPGA Xilinx 7-й серии в системах связи и ЦОС // Электронные компоненты, 2011. — № 1.

УДК 621.3.049

Выработка требований к ЭКБ для систем питания и управления аппаратуры радиолокатора с синтезированной апертурой на базе АФАР для малого космического аппарата

Вислоус П. А.[1,2], Съедин М. В.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
pv-zel@ya.ru
[2] ООО «ЭЛИАРС»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Гуськова, 8, стр. 1
smv@eliars.ru

В докладе обзорно представлены результаты проработки облика радиолокатора с синтезированной апертурой на базе АФАР X-диапазона для малого космического аппарата. Рассмотрены выработанные ТЗ к производству отечественной электронной компонентной базы для замены ключевых элементов систем управления и питания приемо-передающей аппаратуры.
Ключевые слова: ЭКБ; БМК; РСА; АФАР; МКА.

По состоянию на сегодняшний день около 30 стран разрабатывают и эксплуатируют радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования. Данные РСА используются в хозяйственных, научно-исследовательских и военных целях. Типичная задача — картографирование. Однако в отличие от оптических методов зондирования земной поверхности радиолокационный метод имеет ряд преимуществ, в первую очередь независимость от освещенности поверхности солнцем и облачности над ней. В ряде случаев, используя различные методы обработки радиолокационной информации (РЛИ), удается оценить тип поверхности, зарегистрировать объекты, скрытые под растительностью и снегом, а также определить движущиеся объекты, в том числе крайне медленные, к примеру движение грунтов.

В нашей работе рассматривается РСА на базе АФАР X-диапазона. Именно в этом частотном диапазоне с приемлемой эффективностью решается значительная часть радиолокационных задач. Помимо рабочего диапазона к РСА был предъявлен ряд требований, касающихся пространственного разрешения, ширины захватываемой земной поверхности, рабочих режимов РСА, максимального непрерывного времени работы, максимальной потребляемой мощности, напряжения питания, параметров охлаждения аппаратуры, а также требования к надежности, массе и габаритам.

На основании предъявленных к РСА требований были сформулированы специфические технические требования к приемо-передающей аппаратуре. В ходе проектной проработки был спроектирован и построен макетный образец 1/4 устройства. Анализ его функциональных характеристик показал, что возможна частичная замена управляющих микросхем, импульсных преобразователей, а также элементов СВЧ-тракта и разъемных соединений на отечественные аналоги. Это позволит создать локатор, почти полностью построенный на компонентах российского производства. Однако отечественная промышленность на текущий

момент не выпускает электронные компоненты, полностью удовлетворяющие требованиям к рассматриваемому РСА.

Антенное приемо-передающее устройство может быть условно разделено на три функциональные подсистемы: СВЧ-тракт, система питания и система управления. Последняя включает в себя цепи стробирования преобразователей питания, усилителей и коммутирующих элементов, а также управление аттенюаторами и фазовращателями. В настоящей работе рассмотрены только система питания и система управления.

Для реализации системы питания необходимы следующие ключевые элементы:

1) высоковольтный двухканальный линейный регулятор положительного напряжения со встроенной телеметрической схемой;
2) многоканальный линейный регулятор положительного напряжения;
3) многоканальный линейный регулятор отрицательного напряжения;
4) синхронный контроллер понижающего импульсного преобразователя;
5) синхронный контроллер инвертирующего импульсного преобразователя.

Система управления для установки луча АФАР в части формирования необходимого амплитудно-фазового распределения требует устройства для реализации установки положения фазовращателей и аттенюаторов в приемо-передающем модуле (ППМ) по информации от внешнего управляющего устройства. Таким образом, нужен контроллер для управления многоканальным ППМ, принимающим управляющую последовательность по последовательному высокоскоростному интерфейсу.

Для формирования необходимого амплитудно-фазового распределения в части управления массивом ППМ необходимо устройство, реализующее преобразование углов отклонения сканирующего луча АФАР от нормали в ряд значений аттенюаторов и фазовращателей каждого ППМ и выдающее на последовательную шину управляющий сигнал.

Помимо управления для корректного функционирования АФАР необходимо получать телеметрическую информацию о состоянии элементов решетки и сигнала на каждом этапе вторичного питания и каскадах СВЧ-тракта. Для этих целей необходимо устройство сбора телеметрии многоканального ППМ.

По каждому из упомянутых устройств сформулировано техническое задание (ТЗ) для создания требуемых микросхем на основе уже разработанных базовых матричных кристаллов (разработка АО «ДИЗАЙН ЦЕНТР «СОЮЗ», изготовление ОАО «НИИМЭ и Микрон»).

После выполнения работ по указанным ТЗ возможна почти полная замена всей ЭКБ рассматриваемого в данной работе РСА на отечественную.

Литература

1. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под редакцией В. С. Вербы // М.: Радиотехника — 2010. — 680 с.
2. Ониашвили М. И., Крючков И. В., Лесников Г. А., Нефедов С. И., Семенов А. Н. Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования и анализ тенденций их развития // Инженерный журнал: наука и инновации, 2012 — № 8 (8). — С. 94–114.

3. Шпенст В. Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли космического базирования // Компоненты и технологии, 2013. — № 3.
4. Кучейко А. А. Итоги запусков спутников ДЗЗ в 2012 году // Геопрофи, 2013. — № 3 (6). — С. 10–15.
5. Пермяков Р. В. Итоги запусков космических аппаратов ДЗЗ в 2023 г. и перспективы 2024 г. // Геопрофи, 2024. — № 1 (6). — С. 4–8.

УДК 615.47

Система нейростимулятора с замкнутым контуром управления болевыми реакциями

Коняева А. П., Пожар К. В., Нестеренко И. В., Жило Н. М.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработан опытный образец нейростимулятора и регистратора для записи вызванных потенциалов спинного мозга. Данный этап служит основой для разработки замкнутой системы, которая корректирует амплитуду стимулирующего тока при отклонении регистрируемого сигнала от целевого уровня.
Ключевые слова: нейростимуляция; система с обратной связью; подавление боли.

Системы нейростимуляции применяются для управления хронической и нейропатической болью в случаях, когда лекарственная терапия демонстрирует ограниченную эффективность. Перспективным направлением является разработка замкнутой системы управления параметрами нейростимуляции, способной адаптироваться к физиологическим изменениям пациента.

Одной из ключевых задач является обеспечение стабильности терапевтического эффекта при изменении положения тела. Перемещение пациента в пространстве вызывает изменение распределения тока в тканях, что может приводить к недостаточной или чрезмерной стимуляции и, как следствие, снижению обезболивающего эффекта. Решением является реализация системы обратной связи, основанной на непрерывной оценке эффекта стимуляции и последующей корректировке параметров воздействия.

В рамках работы создан опытный образец нейростимулятора и внешний регистратор для записи вызванных составных потенциалов действия (ECAP). Для оценки работоспособности системы проведены медико-биологические исследования эффективности на животной модели с искусственно созданной нейропатической болью. Электрод нейростимулятора был имплантирован в область спинного мозга, стимуляция вызывала электромиографические ответы в мышцах ноги животного, подтверждая функциональность системы и эффективность воздействия. Внешний регистратор, подключенный к электроду, фиксировал ECAP-ответы с характерными амплитудами сигнала. Анализ данных показал, что амплитуда ECAP может служить количественным показателем объема активированной нервной ткани.

Представленные результаты создают основу для построения адаптивной системы управления с обратной связью, в которой амплитуда ECAP сравнивается с индивидуальным референсным уровнем и при отклонении параметры стимулирующего импульса автоматически корректируются.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024).

УДК 621.316

Оценка влияния схемотехнических решений в электрической схеме устройства нейростимуляции на срок его службы

Маслова В. Ю.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Исследовано влияние схемотехнических решений в электрической схеме нейростимулятора на его срок службы. Показано, что применение пассивной балансировки заряда и преобразователя напряжение — ток с адаптивным напряжением питания может позволить сократить потребляемую нейростимулятором энергию.
Ключевые слова: электрическая схема токового нейростимулятора; неперезаряжаемые источники питания; энегоэффективность нейростимулятора; преобразователь напряжение — ток; балансировка заряда.

Важной задачей в процессе развития технологии создания устройств нейростимуляции является улучшение пользовательского опыта. При этом на впечатление пациентов от использования нейростимуляторов влияет срок его службы. Важна как его продолжительность, так и возможность контроля и точной оценки этой характеристики. Срок службы нейростимулятора в первую очередь определяется сроком службы источника питания устройства, в большей мере зависящим от уровня его энергопотребления. В свою очередь, на уровень энергопотребления нейростимулятора влияют его функциональные (амплитуда, частота и длительность терапевтического сигнала, продолжительность активной стимуляции и т. д.) и конструктивные (схемотехническое решение электрической схемы устройства, конструкция имплантируемых электродов и т. д.) характеристики, а также свойства стимулируемых биологических тканей.

Одним из подходов, позволяющих производить оценку и прогнозирование срока службы источников питания нейростимуляторов, является использование математических моделей, учитывающих различные характеристики системы нейростимулятор — биологическая ткань. В случае применения математических моделей, учитывающих только функциональные характеристики системы и импеданс интерфейса электрод — нервная ткань, минимальное отклонение значения срока службы источника питания существенно относительно данных из документации на серийные модели нейростимуляторов и составляет 270 %, что соответствует 47 месяцам абсолютного отклонения. В связи с этим актуальной задачей является разработка новых более точных математических моделей, предназначенных для описания процесса расходования ресурса источника питания имплантируемого нейростимулятора.

Целью настоящей работы было увеличение точности прогнозирования срока службы источника питания путем включения в модель возможности учета влияния конструктивных характеристик системы. Применение подобных моделей позволит сократить ошибку между реальным и прогнозируемым значениями срока службы источника питания нейростимулятора, что позволит уменьшить число преждевременных эксплантаций устройств нейростимуляции, снизить вероятность внезапного прекращения подавления болевого синдрома из-за исчерпания ресурса

источника питания и повысить психологический комфорт пациентов. Кроме того, данные модели могут быть применены при проектировании нейростимуляторов в целях выбора оптимальных технических решений по критерию энергоэффективности.

Для достижения поставленной цели функционал предложенной ранее автором работы математической модели был расширен. В модель была добавлена возможность учета влияния конструкции преобразователя напряжение — ток: с фиксированным и адаптивным напряжением питания, а также учета влияния схемы балансировки заряда: пассивной (с использованием массивов блокирующих конденсаторов) и активной (с использованием специализированных схем) балансировки заряда. Установлено, что применение преобразователя напряжение — ток с адаптивным напряжением питания и пассивной балансировки заряда позволит уменьшить количество потребляемой нейростимулятором энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024).

УДК 004.05

Разработка интеллектуального ЭБУ ТС в соответствии с требованиями ASIL D

Храмов С. О., Клоков В. А.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
sokhramov@mephi.ru

В работе рассматриваются проблемы обеспечения функциональной безопасности при разработке электронных блоков управления транспортных средств, в том числе содержащих элементы искусственного интеллекта. Анализируются требования стандартов функциональной безопасности электронных блоков транспортных средств и методы их реализации в современных автомобильных системах.

Ключевые слова: функциональная безопасность; ASIL; электронный блок управления; транспортное средство; автомобильная электроника; встраиваемые системы.

Введение

Современные транспортные средства все чаще оснащаются электронными блоками управления (ЭБУ) с элементами искусственного интеллекта. Разработка таких систем требует строгого соблюдения стандартов функциональной безопасности, особенно при работе в критических условиях.

Обеспечение функциональной безопасности в соответствии с требованиями ASIL D

Обеспечение безопасности является одним из важнейших элементов при разработке транспортных средств. Все компоненты и системы автомобиля обязаны соответствовать принятым государственным и международным стандартам. ЭБУ транспортных средств обязаны соответствовать требованиям стандартов [1–2].

В соответствии с требованиями стандарта [2], все компоненты и системы транспортных средств должны быть классифицированы по уровням риска ASIL: от самого низкого ASIL A до самого высокого ASIL D.

Уровень риска ASIL D определяет наивысший уровень полноты безопасности для автомобильных систем. Его присваивают наиболее важным компонентам транспортных средств, сбой которых приводит к неработоспособности системы в целом, а также к угрозе здоровью и жизни людей, находящихся внутри транспортного средства [2].

Основные требования включают:

- анализ потенциальных рисков,
- документирование всех этапов разработки,
- внедрение механизмов отказоустойчивости,
- тестирование на всех уровнях разработки,
- валидацию алгоритмов и программного обеспечения.

Обеспечение безопасности интеллектуальных блоков ТС

Развитие электронной промышленности закономерно приводит к производству более комплексных систем для транспортных средств. Таким образом, разработка интеллектуальных ЭБУ сопряжена с рядом сложностей:

- ограничения в выборе электронной компонентной базы и программного обеспечения (ПО), сертифицированного для использования в системах с заданным уровнем ASIL,
- ограничения при разработке ПО [3],
- необходимость комплексной защиты от несанкционированных внешних воздействий и кибератак [4],
- длительность верификации алгоритмов работы электронных блоков,
- трудозатратность подготовки тестовых и валидационных данных.

Заключение

Разработка интеллектуальных ЭБУ ТС в соответствии с требованиями ASIL представляет собой сложную инженерную задачу, требующую комплексного подхода к обеспечению безопасности. Успешная реализация таких систем возможна только при строгом соблюдении всех требований стандарта и применении современных методов верификации.

Литература

1. ISO/TS 22998:2016. Road vehicles — Safety aspects of electronic/electrical systems and software = Дорожные транспортные средства. Аспекты безопасности электронных/электрических систем и программного обеспечения: технический спецификация / Международная организация по стандартизации. — Женева: ISO, 2016.
2. ISO 26262:2018. Road vehicles — Functional safety = Дорожные транспортные средства. Функциональная безопасность: международный стандарт / Международная организация по стандартизации. — Женева: ISO, 2018. — 1200 с.
3. MISRA C:2025. Guidelines for the use of the C language in critical systems = Рекомендации по использованию языка C в критических системах / The MISRA Consortium Limited. — Норвич, 2025. — ISBN 978-1-911700-19-7. — ISBN 978-1-911700-20-3 (PDF). — 250 с.
4. Жариков А. М., Клоков В. А. Принципы организации информационной безопасности встраиваемых систем // Российский форум «Микроэлектроника-2023»: Сборник тезисов 9-й научной конференции, Москва, 09–14 октября 2023 года. — М.: Техносфера, 2023. — С. 187–188.

УДК 004.415.2

Российская программно-аппаратная платформа для систем автоматического управления БАС мультироторного типа

Анохин Д. В., Брюков С. Б., д. т. н. Янакова Е. С.
АО НПЦ «ЭЛВИС»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14

Современные бортовые аэронавигационные системы (БАС) мультироторного типа представляют собой профессиональные дистанционно пилотируемые летательные аппараты, оснащенные передовыми технологиями, такими как искусственный интеллект, машинное обучение и автоматизация. Для построения таких систем в работе предлагается российская программно-аппаратная платформа РУБАС на ЭКБ АО НПЦ «ЭЛВИС» с поддержкой функции искусственного интеллекта.

Ключевые слова: БАС; БПЛА; СнК; искусственный интеллект; российская ЭКБ.

Российская программно-аппаратная платформа РУБАС для систем автоматического управления БАС включает компоненты, обеспечивающие функционирование как самого БПЛА, так и интеллектуальных систем управления. Состав платформы РУБАС:

- полетный контроллер в форм-факторе SpeedyBee на основе СнК Eliot разработки АО НПЦ «ЭЛВИС»;
- вычислитель в форм-факторе Raspberry Pi 5 на основе СнК СКИФ для потоковой обработки информации и интеллектуального управления БАС;
- вычислитель Sparka на основе двух СнК СКИФ для потоковой обработки информации, управления и радиосканирования.

Разработанный трехуровневый стек программного обеспечения полетного контроллера (ПК) включает операционную систему реального времени, обеспечивающую базовые функции работы контроллера, специальное программное обеспечение, отвечающее за управление полетом, обработку данных с датчиков, взаимодействие с другими компонентами, и дополнительные прикладные модули. Программное обеспечение ПК на основе СнК Eliot построено на основе RTOS NuttX с использованием фреймворка PX4 [1], включает драйверы для датчиков, необходимых для штатного функционирования ПК, таких как акселерометр, барометр, компас, вольтметр для мониторинга заряда батареи и др.

Интеллектуальное управление БАС построено на базе фреймворка ROS (Robot Operating System) [2] с использованием датчиков. ROS-узлы (ROS Nodes) выполняют обработку данных (фильтрацию, калибровку), обнаружение и слежение (алгоритмы компьютерного зрения и ИИ), планирование маршрутов и навигацию (маршрутизацию, обход препятствий), а также управление движением. В рамках ROS для коммуникаций узлов используются топики, сервисы применяются для выполнения команд и запросов. Связь с полетным контроллером осуществляется по протоколу MAVLink.

Программно-аппаратная платформа РУБАС со стеком ПО обеспечивает обработку ошибок и аварийных ситуаций, модульность, расширяемость и интеграцию

различных компонентов системы управления БАС, позволяя разрабатывать как автономные, так и управляемые дистанционно летательные аппараты.

Литература

1. PX4 автопилот, руководство пользователя. — URL: https://docs.px4.io/main/en/index.html (дата обращения: 11.07.2025).
2. Официальная документация ROS. — URL: https://wiki.ros.org (дата обращения: 11.07.2025).

УДК 004.415.2

Многоканальная обработка сигналов как способ повышения точности и надежности сопровождения БПЛА

Брюков С. Б., Дмитриев А. В., д. т. н. Янакова Е. С.
АО НПЦ «ЭЛВИС»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14

Для обнаружения и сопровождения БПЛА в основе современных систем лежат технологии радиолокации и машинного зрения в различных частотных диапазонах. В работе предлагается программно-аппаратный комплекс «СОКОЛ-Н», совмещающий основные программно-аппаратные решения по обнаружению и сопровождению БПЛА в одной системе со специальным программным обеспечением на базе российского процессора «СКИФ».
Ключевые слова: ПАК; БПЛА; СнК; искусственный интеллект; машинное зрение; радиолокация; российская ЭКБ.

Отечественная разработка масштабируемого программно-аппаратного комплекса для обнаружения и сопровождения БПЛА, основанного на собственных программных и аппаратных средствах, включает многоканальную обработку сигналов, центральный мониторинг и управление всей системой. Состав программно-аппаратного комплекса «СОКОЛ-Н»:

- радиолокационная станция;
- массив поворотных платформ, направляющие ОЭС и другие локационные датчики;
- многочастотная, многоканальная система видимого спектра с возможностью фокусировки на различных участках или объектах одновременно с разрешающей способностью сенсора до 4 К;
- система наблюдения инфракрасного длинноволнового диапазона с объективом с переменным фокусным расстоянием и автофокусировкой;
- вычислитель в форм-факторе Raspberry Pi 5 на основе СнК «СКИФ» [1] для многоканальной потоковой обработки сигналов и интеллектуального управления системой обнаружения и сопровождения БПЛА.

Разработанное программное обеспечение комплекса «СОКОЛ-Н» обеспечивает одновременную обработку множества сигналов с различного оборудования и позволяет принимать интеллектуальные решения по управлению системой. Внутри реализована универсальная архитектура, которая обеспечивает масштабируемость обработки потоковых данных за счет внутреннего распределения задач и балансировки нагрузки между процессорными блоками на базе распределенных сетевых технологий ZeroMQ и MQTT [2].

Обработка видеосигналов осуществляется с помощью встроенных кодеров/декодеров и GPU-ядер СнК «СКИФ» [1], а математическое обеспечение и сигнальная обработка выполняются на ELcore-ядрах. Технологии машинного зрения и интеллектуальное управление реализованы на базе платформы ELcoreNN.

В состав «СОКОЛ-Н» интегрирован симулятор оптико-электронной системы с поворотным механизмом, работающим по протоколу Pelco-D. Симулятор осуществляет сегментное воспроизведение панорамного видео с нанесенными текстурными объектами в 3D-пространстве. Он позволяет полноценно заменить

аппаратную PTZ-платформу для дообучения нейросетей, тестирования и отладки технологий искусственного интеллекта и машинного зрения. Программный комплекс «СОКОЛ-Н» обеспечивает быструю модернизацию системы обнаружения и сопровождения БПЛА, а также возможность создания новых систем на базе современных аппаратных решений.

Литература

1. СКИФ, микросхемы ЭЛВИС, документация и средства разработки. — URL: https://support.elvees.com/docs/Microchips/SKIF (дата обращения: 8 июня 2025 г.).
2. Репозитории программных решений для Linux на базе СКИФ. — URL: https://github.com/orgs/elvees/repositories?type=all (дата обращения: 10.07.2025 г.).

УДК 681.5.017

Ускоритель импульсного ИИ для встраиваемой и мобильной электроники

д. т. н. Переверзев А. Л., Силантьев А. М., Примаков Е. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
silantiev@org.miet.ru

Разработан апаратный ускоритель для импульсных нейронных сетей в целях применения в мобильной и встраиваемой электронике. Приведены характеристики предлагаемого ускорителя и краткое описание интеграции с программными инструментами.
Показаны варианты интеграции решения в радиоэлектронную аппаратуру.
Ключевые слова: Edge AI; SNN; NPU; System on Module.

На сегодняшний день одним из перспективных способов улучшения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) для мобильных и встраиваемых применений является интеграция искусственного интеллекта (ИИ). В первую очередь с помощью ИИ решаются задачи обработки информации от датчиков видео-, аудио-, вибросигналов. Интеграция возможностей ИИ в РЭА обусловлена необходимостью быстрой обработки информации, снижением требований к скорости обмена информацией, оптимизацией энергопотребления и защитой чувствительной информации. Такие требования ложатся в концепцию Edge AI.

При разработке РЭА в концепции Edge AI используются аппаратные компоненты, разработанные для ускорения сверточных (CNN) и рекуррентных (LSTM) сетей. Развитие моделей сетей идет непрерывно и требует все новых возможностей по производительности и энергопотреблению.

Перспективным подходом для решений Edge AI являются импульсные нейронные сети (ИмНС или SNN). Они характеризуются подходом с имитацией импульсного характера передачи информации наподобие нейронов головного мозга. Это позволяет при решении идентичных задач на порядки снизить энергопотребление за счет меньшего количества операций, обеспечить быструю реакцию на внешние события, уменьшить сложность моделей по сравнению с CNN. Кроме проектирования импульсных моделей существуют подходы по автоматической конвертации ANN2CNN, которые позволяют оптимизировать энергопотребление, но не обеспечивают другие преимущества по сравнению с проектированием оригинальных импульсных моделей.

Для реализации преимуществ ИмНС создано аппаратно-программное решение, состоящее из System on Module (SoM) — платы на основе ПЛИС фирмы GoWin и отечественного программного инструментария ArNI-X для проектирования, и обучения ИмНС. В ПЛИС реализован прототип ускорителя ИмНС, интегрированного с конвейером предобработки видео. Концепция SoM позволяет быстро интегрировать ускоритель к различным конечным изделиям, сокращая время разработки и оптимизируя стоимость.

Спроектированное решение обладает сравнимой с NVIDIA Jetson Nano производительностью для целевых задач видеообработки, обеспечивая в пять раз

меньшее энергопотребление и в два раза меньшую стоимость. Однако оно не обладает таким большим набором периферийных интерфейсов и блоков.

В будущем перенос ускорителя в специализированный ASIC позволит либо создать чип для производства на отечественных фабриках, обладающий возможностью работать с видео низкого разрешения и аудиосигналами, либо перейти на более передовые техпроцессы и обеспечить улучшение производительности, стоимости и энергопотребления.

Литература

1. Ларионов Д. А., Иванов Д. А. Киселев М. В. Нейроморфные системы искусственного интеллекта // Интеллектуальные системы. Теория и приложения, 2022. — Т. 26. — Вып. 1. — С. 326–330.
2. Ivanov D., Chezhegov A., Kiselev M., Grunin A. and Larionov D. Neuromorphic artificial intelligence systems // Front. Neurosci., 2022. 16:959626. DOI: 10.3389/fnins.2022.959626.
3. Ivanov D. A., Larionov D. A., Maslennikov O. V. and Voevodin V. V. Neural network compression for reinforcement learning tasks // Nature, Scientific Reports, 2025. 15, 9718. URL: https://doi.org/10.1038/s41598-025-93955-w.

Опыт прототипирования контроллера PCI Express от стороннего производителя на ПЛИС AMD/Xilinx

Павлов К.
Старший инженер по разработке СнК
YADRO

Обычно в ПЛИС AMD/Xilinx проекты с контроллерами PCI Express создают с помощью стандартных IP-ядер, встроенных в САПР Vivado, а также с помощью Hard IP.

В противовес этому задача, которая встала перед Константином и его командой, оказалась нестандартной: нужно было сделать прототип подсистемы PCIe с использованием стороннего MAC-контроллера и при этом оставить PHY-контроллер стандартным.

В докладе Константин раскроет технические вызовы, с которыми пришлось столкнуться в ходе работы, методы их решения, покажет, как поднять линк PCIe на скоростях вплоть до Gen3, подтвержденных тестами.

Построение мультикластерных сред на базе российских СнК для потоковой обработки информации

Брюков С. Б., Янакова Е. С., Дмитриев Д. В.
АО НПЦ «ЭЛВИС»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14

Разработан программно-аппаратный комплекс в виде мультикластера на базе российской геторогенной СнК К1892ВМ21Я. Приведены характеристики предлагаемой архитектуры и краткое описание применения в задачах потоковой обработки данных. Показаны виды реализованного системного и инфраструктурного ПО, включая ПО обработки видео нейросетевыми алгоритмами.
Ключевые слова: СнК, мультикластер, потоковая обработка данных.

В критически важной инфраструктуре, такой как автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), защита информации и обеспечение надежности работы имеют первостепенное значение и могут иметь серьезные последствия для экономики, социальной сферы и безопасности. Жесткая изоляция процессов, которая не позволяет приложениям случайно или намеренно обмениваться информацией, повышает безопасность системы в целом.

Комплексирование гетерогенных СнК в мультикластерные решения в настоящее время становится одним из способов обеспечения надежной отказоустойчивости и экономии вычислительных ресурсов. Одним из факторов, сдерживающих развитие, является сложность проектирования подобных решений из-за уникальности гетерогенных российских СнК и необходимости создавать специализированное системное и инфраструктурное ПО. В рамках работ по созданию мультикластера на базе СнК К1892ВМ21Я были разработаны:

- модуль процессорный форм-фактора SMARC на базе СнК К1892ВМ21Я;
- плата-носитель для размещения 9 шт. SMARC К1892ВМ21Я;
- корпус шасси 1U для размещения платы-носителя с соответствующим питанием, охлаждением и выводом аппаратных интерфейсов, таких как USB 3.0, HDMI, 1GbE;
- системное ПО на базе OS AltLinux;
- ПО управления мультикластером типа BMC;
- демонстрационное ПО классификации объектов в видеопотоке FullHD;
- демонстрационное ПО load balancer для .NET REST-сервиса.

Литература

1. Пример мультикластерных решений. — URL: https://www.firefly.store/collections/servers/products/csr1-n10r3588s-cluster-server-r1.
2. Modern server ARM processors for supercomputers: A64FX and others Initial data of benchmarks, ISSN 2079-3316.

УДК 621.3.077.7

От калибровки к позиционированию: использование инерциальных и магнитных датчиков для определения ориентации

Якунин А. Н., Савчиц А. С.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
needcar@mail.ru

Предложена методика калибровки и привязки осей инерциальных и магнитных датчиков. Приведено решение задачи определения пространственной ориентации объекта, основанной на анализе трехосевых акселерометров и датчиков магнитного поля. Рассмотрены вопросы применимости данного решения.

Ключевые слова: инерциальные датчики; акселерометр; датчик ускорения; магнитометр; магнитный датчик; калибровка; привязка осей; пространственная ориентация; матрица координатных преобразований; кватернион.

Определение пространственной угловой ориентации объектов — часто встречающаяся задача для широкого класса технических систем — от автономных платформ до авиационной навигации. Задача определения изменения углового положения может быть решена, если есть возможность определения положения относительно объекта двух неколлинеарных опорных векторов. В работе в качестве таких векторов предлагается использовать векторы гравитации и магнитного поля Земли. Их способны измерять такие сенсоры, как акселерометры и магнитометры [1, 2].

В работе рассматривается подход к упрощению процедуры привязки и калибровки рассматриваемых датчиков. Затем приводится решение задачи определения относительной угловой ориентации с помощью аппарата координатных преобразований. Рассматриваются вопросы применимости предложенного подхода.

Литертура

1. Якунин А. Н., Саблин А. В., Соловьев А. Н., Проскуряков Д. В., Савченко Ю. В. Методика калибровки инерциальных сенсоров // Известия Тульского государственного университета. Серия «Радиотехника и радиооптика», 2002. — Т. III. — Вып. 1.
2. Якунин А. Н., Саблин А. В., Соловьев А. Н., Савченко Ю. В. Методика калибровки магнитных сенсоров // Известия Тульского государственного университета. Серия «Радиотехника и радиооптика», 2003. — Т. I. — Вып. 2.

Разработка высокопольного сверхпроводящего магнитно-резонансного томографа

Демихов Е. И.[1,2], Киселев Н. К.[3], Шумм А. Б.[3], Глушаев А. В.[4], Ковальчук О. Н.[4]
[1] АО «Росатом Технологии здоровья»
115230, г. Москва, Варшавское ш., 46
[2] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53
[3] АО «НИИ технической физики и автоматизации»
115230, г. Москва, Варшавское ш., 46
[4] АО «НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова»
196641, г. Санкт-Петербург, п. Металлострой, дор. на Металлострой, 3

Магнитно-резонансная томография — наиболее точный и информативный способ диагностики в современной медицине. Возникающие физические задачи многообразны и интересны. По количеству МРТ-аппаратов на 1 млн человек Россия на порядок отстает от лидирующих стран. Высокопольный магнитно-резонансный томограф с полем 1,5–7 Тл позволяет проводить точную диагностику сложных заболеваний на ранних стадиях. Большой интерес представляет разработка МРТ 14 Тесла из-за возможности диагностики на ранней стадии шизофрении, болезни Альцгеймера, эпилепсии и др. Каждый орган или система человеческого организма, строго говоря, требует использования собственного набора импульсных ЯМР-последовательностей для оптимального решения задач диагностики и получения максимального пространственного разрешения. Целью работы является разработка серии современных МРТ и создание производства. Новизна нашей работы состоит в использовании сухих (без жидкого гелия) сверхпроводящих магнитов, высокотемпературных сверхпроводников второго поколения, новой конструкции криомагнита для создания магнитно-резонансных томографов.

УДК 621.3.051.025

Разработка подсистемы энергообеспечения нейростимулятора с выходной характеристикой источника напряжения

Гуров К. О., Миндубаев Э. А., Данилов А. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
constantinegurov@yandex.ru

Представлен метод достижения выходной характеристики источника напряжения на нагрузке подсистемы энергообеспечения перезаряжаемого нейростимулятора при изменении сопротивления нагрузки и относительного положения передающей и принимающей катушек индуктивности.
Ключевые слова: индуктивная передача энергии; источник напряжения; измерение характеристик; стабилизация выходной мощности; нейростимулятор.

В настоящее время одним из перспективных способов энергообеспечения имплантируемых медицинских приборов, таких как перезаряжаемый нейростимулятор, является индуктивная передача энергии (ИПЭ). Однако изменение сопротивления нагрузки в процессе зарядки аккумулятора и относительные смещения катушек индуктивности в системе ИПЭ могут приводить к значительному отклонению выходных характеристик, что увеличивает время зарядки нейростимулятора [1]. Для устранения последствий данной проблемы, то есть поддержания требуемого уровня выходного напряжения, необходимо оптимизировать параметры в передающей (внешней) части системы ИПЭ на основе измеренных в динамическом режиме значений выходного напряжения и тока в приемной (имплантируемой) части, что являлось целью данной работы.

В работе были предложены две стратегии управления параметрами в передающей части системы ИПЭ: изменение выходного напряжения DC-DC-преобразователя для питания полумостового преобразователя, а также изменение частоты генератора сигналов, поступающих на затворы ключевых транзисторов, управляющих процессом переключения полумостового преобразователя.

Определены основные технические требования к системе беспроводного энергообеспечения, реализующей выбранную стратегию управления выходным напряжением, с учетом конструктивных требований к нейростимулятору. Для реализации описанной подсистемы были определены требуемые комплектующие: переменное сопротивление (цифровые потенциометры AD8400 с программно изменяемым сопротивлением 0–100 и 0–1 кОм); датчик мониторинга напряжения и тока (INA226); микроконтроллеры с архитектурой RISC в передающей и принимающей частях системы ИПЭ (ATMega328P); модули передачи и приема данных (SYN115 и SYN480R).

Выполнена экспериментальная валидация метода определения во внешней части выходных характеристик системы ИПЭ, измеренных с помощью датчика мониторинга напряжения и тока в имплантируемой части, а также две стратегии управления частотой и напряжением в полумостовом преобразователе для достижения выходной характеристики источника напряжения на нагрузке системы ИПЭ. Результаты верификации подтверждают возможность применения разработанного метода с требуемой точностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации крупного научного проекта (соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024).

Литература

1. Barbruni G. L., Ros P. M., Demarchi D., Carrara S., Ghezzi D. Miniaturised Wireless Power Transfer Systems for Neurostimulation: A Review // IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2020. Vol. 14. № 6. P. 1160–1178.

УДК 004.94

Разработка отечественной интегрированной среды автоматизированного проектирования и измерения широкополосных устройств для радиотехнических систем

Полторыхин К. М., Семенов Э. В.
Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, Академический просп., 2/3

В докладе рассматривается архитектура для разработки отечественной системы автоматизированного проектирования системного уровня с интеграцией характериографа устройств основной полосы частот. Такая комбинация позволяет автоматизированно производить измерения устройств основной полосы частот и бесшовно использовать характеристические функции в проектировании радиотехнических систем.
Ключевые слова: система автоматизированного проектирования; системный уровень; модели типа «черный ящик»; широкополосные радиотехнические системы; характериограф.

В настоящее время национальная система автоматизированного проектирования является приоритетной разработкой в области радиотехники и электроники. Утвержденная дорожная карта развития САПР до 2030 года при этом подразумевает только два направления: схемотехническое и топологическое. Системный уровень, который обусловлен высокой абстракцией описания узлов, не рассматривается при этом в принципе. Хотя появляются российские аналоги популярных решений (например, Engee), которые позволяют на системном уровне производить моделирование различных систем, но в таком случае для использования такого ПО необходимы знания в области математического моделирования и программирования для синтеза собственных моделей устройств.

Параллельно этому известны интегрированные САПР, которые совмещают в себе как программную часть для проектирования, так и программно-аппаратную часть для измерения и характеризации устройств. Известным решением в данной области является разработанная компанией Keysight Technologies программная платформа PathWaves или САПР AWR Design Environment от компании Cadence Design Systems с интеграцией программной среды контроля и управления измерениями LabView. В частности, с помощью оборудования Keysight Technologies PNA-X измеряются X-параметры устройств, а затем бесшовно интегрируются в систему моделирования Advanced Design System для проектирования радиотехнических систем. Отечественных аналогов таких систем не существует, а само использование X-параметров накладывает ограничение моделирования с другими видами входных воздействий, например широкополосных.

Нашим коллективом была инициирована разработка собственной САПР, которая имеет рабочее название Behavioral SimLab (рис. 1). Сама система моделирования реализована с помощью предопределенной схемы, которая состоит из 12 узлов: генератора сигналов (синусоидального и импульсного), преобразователя частоты, усилителя мощности, передающей антенны, канала распространения, включая объект зондирования, приемную антенну, малошумящего усилителя,

преобразователя частоты приемника, фильтра сосредоточенной селекции и аналого-цифрового преобразователя. Для каждого блока предустановлена своя система параметров, с помощью которых можно адекватно моделировать поведение устройства.

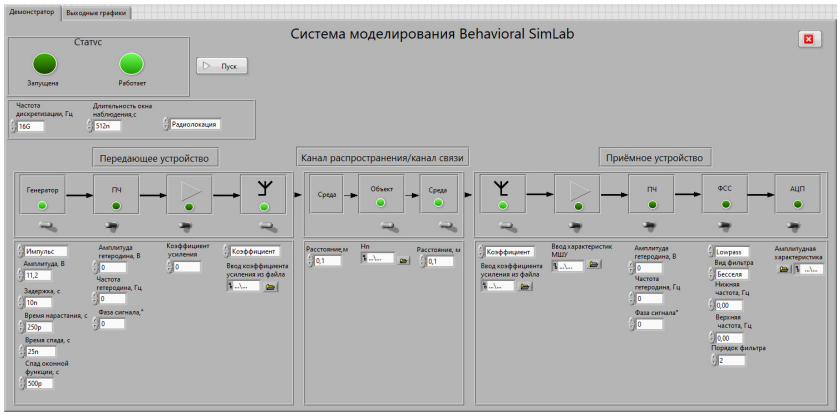


Рис. 1. Лицевая панель системы автоматизированного проектирования Behavioral SimLab

Первая версия САПР была представлена в [1], но ее функционал был ограничен. В настоящее время с помощью данного ПО возможно проводить моделирование широкополосных радиотехнических систем с прямой оцифровкой — систем связи и радиолокационных систем [2]. При этом отличительной особенностью мы считаем использование нелинейно-инерционных моделей устройств основной полосы частот в виде нелинейных рекурсивных фильтров разных порядков, которые позволяют адекватно моделировать поведение устройства при импульсном воздействии.

Для характеризации устройств основной полосы частот по нелинейно-инерционным моделям используется программно-аппаратная установка. По переходным характеристикам устройств измеряются характеристические функции (вольт-амперная, вольт-кулонная и вебер-амперная характеристики) путем их стробирования в разные моменты времени. В настоящее время установка реализована для измерения устройств основной полосы частот без и с выбросом на плоской вершине переходной характеристики.

Главной проблемой использования двух решений является то, что они реализованы в одной программной среде, но при этом никак не связаны друг с другом. В данной работе предлагается рассмотреть архитектуру системы моделирования совместно с характериографом устройств основной полосы частот. Данная разработка позволит импортозаместить достаточно дорогостоящее оборудование от зарубежных компаний для характеризации узлов на отечественных технологиях, что даст развитие направлению измерительных приборов нового класса совместно с системами моделирования.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования № FWRM-2024-0001.

Литература

1. Полторыхин К. М., Семенов Э. В., Березин А. А., Байкалова А. Е. Универсальное средство моделирования широкополосных радиотехнических систем на уровне структурной схемы // Школа молодых ученых, форум «Микроэлектроника-2023»: сборник тезисов. Сочи, 9–14 октября 2023. — С. 802–803.
2. Полторыхин К. М., Семенов Э. В., Безрукова И. В. Моделирование распространения и нелинейного рассеяния сверхширокополосного сигнала малогабаритным объектом на уровне структурной схемы // Всероссийская научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2025». Дивноморское, 23-27 июня 2025. — 6 с.

УДК 621.316

Аттенюаторы и оконечные нагрузки для задач проектирования и измерения радиоэлектронных устройств

Малышев И. Н., Еремеев Ю. В., Белков И. Г.
АО «Научно-производственное объединение «ЭРКОН»
603104, г. Нижний Новгород, ул. Нартова, 6
min@erkon-nn.ru

Представлены основные результаты разработок фиксированных полосковых и коаксиальных аттенюаторов и оконечных нагрузок. Показаны особенности применения серийно выпускаемых изделий для проектирования и измерения радиоэлектронных устройств

Ключевые слова: аттенюатор; ослабление; оконечная нагрузка; согласование; СВЧ-цепи.

Широкие номенклатура и области применения радиоэлектронных устройств требуют от аттенюаторов и оконечных нагрузок, используемых при их проектировании и измерениях, такого же разнообразия в конструктивном и функциональном качествах.

Основными исполнениями фиксированных аттенюаторов в диапазоне рабочих частот до 40 ГГц являются полосковые и коаксиальные, применяемые как при инженерном проектировании радиоэлектронных устройств, так и при лабораторной отладке оборудования и защите средств измерений. В докладе представлены отечественный научно-технический задел и перспективные направления разработок в данной области.

Чип-аттенюаторы типов ПР1-1 и С6-8 малой мощности 0,5 и 1 Вт применяют в микрополосковых и симметричных полосковых линиях передачи или в составе коаксиальных ослабляющих устройств. Частотный диапазон аттенюаторов составляет 0–18 ГГц.

Аттенюаторы типа ПР1-22 малой и средней мощности 10 и 100 Вт в диапазоне частот до 3 ГГц для полосковых линий передачи имеют полосковые выводы и фланцевые теплоотводы для крепления к радиатору (или без фланца для пайки к теплоотводу).

Коаксиальные аттенюаторы типа ПР1-25 и оконечные нагрузки типа ПР1-24 малой, средней и высокой мощности имеют радиатор с естественным или принудительным воздушным охлаждением, соединители типов SMA, N, III. Достигнутые на текущее время частотно-мощностные характеристики в диапазоне малой мощности составляют 50 Вт / 18 ГГц, в диапазоне средней мощности — 300 Вт / 8,5 ГГц или 1000 Вт / 2,5 ГГц, в диапазоне высокой мощности — 2000 Вт / 2,5 ГГц [1].

Использование аттенюаторов и оконечных нагрузок весьма широко [2]. Полосковые аттенюаторы находят применение в модульных СВЧ-усилителях, приемниках, векторных модуляторах, циркуляторах и т. п. на полосковых линиях передачи. В зависимости от типоразмеров и мощности рассеяния аттенюаторов возможно применение технологии гибридных интегральных схем СВЧ (поверхностный монтаж на микрополосковую плату) либо, при больших мощностях рассеяния, навесным монтажом полосковыми выводами.

Коаксиальные аттенюаторы и оконечные нагрузки — наиболее распространенные устройства для измерительного и лабораторного применения. Используются для калиброванного измерения уровня мощности сигнала, снижения чувствительности характеристик узлов аппаратуры к изменениям импеданса нагрузки, защиты входных узлов средств измерений от ошибок операторов и электростатических наводок. Также используются в антенно-фидерных, усилительных, модуляторных трактах высокой мощности.

Входное и выходное сопротивление аттенюаторов, как правило, стандартное — 50 Ом. Для согласования импедансов СВЧ-узлов или использования в нестандартных трактах значения могут отличаться.

Тенденции развития различных областей техники СВЧ требуют как повышения частотно-мощностных характеристик, так и миниатюризации отдельных технических решений компонентов. Показаны возможности изготовления аттенюаторов до 18 ГГц по толстопленочной технологии. В настоящее время исследуется возможность расширения применения толстопленочной технологии в диапазоне до 40 ГГц (50 ГГц).

В части коаксиальных аттенюаторов в перспективной проработке находятся изделия с повышенными частотно-мощностными характеристиками — до 250 Вт / 18 ГГц и до 5 Вт / 40 ГГц, реализованными в том числе за счет технологической оптимизации [3].

В полосковых аттенюаторах и оконечных нагрузках за счет применения высокотеплопроводных материалов (например, нитрида алюминия) возможно повышение удельной мощности и миниатюризации компонента до стандартных типоразмеров 1206, 0805 и т. п. при мощности в единицы ватт. Имеются наработки в сторону увеличения мощности до 250 Вт.

Применение современных материалов, таких как CVD-алмаз, может на порядки увеличить частотно-мощностные характеристики. Для обеспечения высоких требований к метрологическим параметрам (долговременная и температурная стабильность ослабления, начальное сопротивление) необходимы фундаментальные исследования и создание новых высокостабильных резистивных материалов.

Литература

1. Серийные ВЧ и СВЧ аттенюаторы и поглотители АО «НПО ЭРКОН» // ВЧ и СВЧ аттенюаторы и поглотители. — URL: https://www.erkon-nn.ru/catalog/attenyuatory-poglotiteli (дата обращения: 03.07.2025).
2. Белов Л. А. Аттенюаторы СВЧ-сигналов // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005. — № 6. — С. 32–38.
3. Малышев И. Н., Белков И. Г., Еремеев Ю. В. Разработка коаксиального СВЧ аттенюатора до 40 ГГц на основе численного электродинамического моделирования // XIV Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник докладов. Санкт-Петербург. 2–6 июня 2025 г. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — С. 363–366.

УДК 681.5.015

Аппаратно-программный мишенный комплекс для автоматизации регистрации результатов стрелковых упражнений

к. т. н. Литманович Д. М.[1], Куделин А. И.[2], к. т. н., Литманович А. М.[3]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
Litmanovich.dmitry@yandex.ru
[2] ООО «Электронные мишени»
124536, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Юности, 8, пом. 1/4
[3] АО «Микрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Изложены результаты разработки и экспериментальных исследований аппаратно-программного комплекса для регистрации и количественной оценки результатов стрельбы из пневматического и малокалиберного оружия. Представлен оригинальный оптоэлектронный принцип регистрации попаданий, структурные и программно-алгоритмические решения, а также количественные показатели достоверности работы комплекса, подтвержденные лабораторными испытаниями.
Ключевые слова: электронная мишень; оптическая сенсорика; метрологическая достоверность; автоматизация; стрелковый спорт; анализ данных.

Современные задачи обеспечения объективности и воспроизводимости результатов в стрелковом спорте, а также повышения эффективности учебного процесса, актуализируют необходимость перехода к аппаратно-программным системам автоматизированной регистрации результатов стрельбы. Проведенная работа направлена на решение задачи прецизионного определения координат пролета объекта контроля и комплексной автоматизации последующей обработки информации о результатах стрелковых упражнений.

В работе реализован многоканальный оптико-электронный метод позиционирования попаданий, основанный на регистрации теневых проекций посредством пространственно разнесенных фотоприемников, интегрированных на модульные печатные платы. Структурная архитектура построена по принципу распределенного сбора данных, что позволяет масштабировать как регистрируемую зону, так и аналитические возможности системы.

Особенностью комплекса является использование дифференцирующих преобразователей и компараторов для формирования цифровых сигналов о факте затенения, обеспечивающих высокую помехоустойчивость и чувствительность.

Лабораторные испытания включали моделирование эксплуатационных сценариев стрельбы с использованием баллистических стендов, что позволило верифицировать метрологическую точность комплекса при определении координат с погрешностью не более 0,5 мм (центральная область диаметром 50 мм), а также воспроизводимость регистрации скоростей объектов от 50 до 1000 м/с. Также отмечено отсутствие ложных срабатываний при контроле объектов, не относящихся к пулям (диаметр <4 и >10 мм).

Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность внедрения и дальнейшего развития отечественных аппаратно-программных комплексов в инфраструктуру стрелкового спорта и учебных учреждений, обеспечивая цифровизацию процессов оценки результатов, их объективность и аналитическую обоснованность.

Литература

1. LS25/50 LASERSCORE. The fully optical target for 25m and 50m pistol and small bore rifle. SIUS AG, Switzerland. [Электронный ресурс]. URL: https://sius.com/en/product/ls25-50-laserscore-11 (дата обращения: 25.04.2025).
2. Polyscope Bericht. SwissDis AG, 2017. [Электронный ресурс]. URL: https://www.swissdis.ch/fileadmin/media/pdf-dokumente-2017/Polyscope_Bericht.pdf (дата обращения: 25.04.2025).

УДК 681.5.08

Построение автоматизированной системы тестирования бортовой аппаратуры с интеллектуальными модулями распределенной вычислительной сети

Былинкин И. К.
АО «НИИ «Субмикрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
bylinkin@inbox.ru

В данной работе представлены результаты разработки системы тестирования бортовой аппаратуры, построенной на основании децентрализованных вычислительных модулей. Описаны состав типовых модулей и их функционал, формализованы их технические характеристики и предложены возможности дальнейшего расширения их номенклатуры. Показаны основные узлы вычислительных модулей и варианты их управляющих ячеек.
Ключевые слова: тестирование систем; интерфейсные модули; бортовая аппаратура.

Современная бортовая аппаратура ракетно-космической техники достигла высокого уровня сложности. При этом рост ее сложности не прекращается — увеличивается количество функциональных узлов, растет плотность компоновки электронных компонентов, усложняются алгоритмы управления [1]. Все это приводит к тому, что даже незначительные ошибки проектирования, оставшиеся незамеченными на ранних этапах, могут вызвать каскадный отказ всей системы при проведении дорогостоящих натурных испытаний. Традиционные методы тестирования, основанные на послемонтажной проверке уже собранных образцов, становятся экономически неэффективными. Обнаружение ошибок на этапе комплексных испытаний влечет за собой многомиллионные затраты на доработку и повторные проверки. Ключевым решением этой проблемы становится перенос основной нагрузки по верификации на начальные этапы проектирования и тщательные проверки первых образцов изделий [2].

Автоматизированная система тестирования бортовой аппаратуры представляет собой решение (вычислительную сеть), построенное на основе распределенной сети интеллектуальных модулей. Каждый модуль функционирует как автономный вычислительный комплекс, оснащенный специализированными процессорами. Встроенная память FRAM обеспечивает надежное хранение данных, а аппаратные ускорители на базе FPGA позволяют обрабатывать сигналы в режиме реального времени.

Архитектура системы предполагает четкое функциональное разделение между модулями. Модуль контроля питания непрерывно отслеживает параметры энергоснабжения и прогнозирует возможные отказы, модули интерфейсов поддерживают работу с различными протоколами связи, а обработку сигналов и их анализ в реальном времени осуществляет линейка специализированных модулей.

Интеллектуальные возможности системы проявляются в ее способности адаптировать параметры тестирования. Модули самостоятельно могут регулировать частоту опроса датчиков, уточнять оптимальные пороги срабатывания

и контролировать интенсивность нагрузки. Принятие решений происходит по распределенному принципу, когда модули обмениваются не исходными данными, а готовыми выводами, используя консенсус-алгоритмы и механизмы голосования.

Аппаратная реализация системы включает использование небольшой группы унифицированных вычислителей для создания разнофункциональных модулей. Ключевые модули могут дублироваться, что позволяет парировать их сбои и отказы во время проверок.

Основные преимущества системы заключаются в ее исключительной надежности, где отказ отдельного модуля не влияет на работоспособность всей системы благодаря аппаратной изоляции ошибок. Высокая производительность достигается за счет параллельной обработки данных на множестве узлов и минимизации задержек благодаря локальному выполнению операций. Гибкость архитектуры позволяет легко добавлять новые типы модулей и адаптировать систему под конкретные задачи [3].

Перспективы развития системы связаны с внедрением оптических интерфейсов между модулями (что позволит реализовать модули, работающие со скоростными, например SpaceWire, интерфейсами) и разработкой самообучающихся аппаратных конфигураций. Особенностью системы является то, что каждый модуль представляет собой не просто исполнительное устройство, а полноценный интеллектуальный агент, чьи аппаратные возможности строго соответствуют решаемым задачам.

Литература

1. Горбунов С. Ф., Гришин В. Ю., Еремеев П. М. Сетевые интерфейсы космических аппаратов: перспективы развития и проблемы внедрения. // Наноиндустрия, 2019. — № 89. — С. 128–130. DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.128.130.
2. Иванов А. В., Петров С. К. Современные методы проектирования и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 2021. — 345 с.
3. Семенов В. П. и др. Интеллектуальные системы диагностики технического состояния. — М.: Радиотехника, 2023. — 278 с.

УДК 666.3-187

Перспективные технологические решения в области высокотемпературного обжига плат при изготовлении металлокерамических корпусов

Ахметгалиев Р. Ш.[1,2], Ермолаев Е. В.[1], Жуков И. А.[2], Егошин В. А.[1,2], Шугаепов Ш. Н.[1,2]

[1] АО «Завод полупроводниковых приборов»
424003, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 2б
[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

В статье предложены перспективные технологические решения для высокотемпературного обжига плат при производстве металлокерамических корпусов для интегральных схем. Предложена методика применения укрывного материала, выполняющего функции термоэкранирования и стабилизации газовых потоков.

Ключевые слова: микроэлектроника; металлокерамический корпус; плата; алюмооксидная керамика; высокотемпературный обжиг; термоэкранирование; укрывной материал; газодинамика спекания.

Высокотемпературный обжиг представляет собой критически важный технологический этап в производстве металлокерамических корпусов на основе алюмооксидной керамики. В процессе спекания формируется микроструктура, определяющая ключевые эксплуатационные характеристики конечного изделия, в том числе геометрическую стабильность плат.

Технологический процесс осуществляется в контролируемой газовой среде с регламентированной точкой росы, выполняющей двойную функцию. С одной стороны, газовая среда обеспечивает защиту от окисления и нежелательных химических реакций, с другой — регулирует комплекс физико-химических процессов в объеме керамики и металлизации. В ходе спекания последовательно протекают следующие процессы: удаление органических компонентов, термическое разложение химических соединений, структурно-фазовые превращения, спекание керамических частиц с образованием монолитной структуры.

Следует отметить, что указанные процессы сопровождаются значительным уменьшением линейных размеров платы. В сочетании с неоднородностью многослойной структуры это может приводить к недопустимым деформациям. В промышленной практике для минимизации деформаций традиционно применяют метод спекания плат в механически стабилизированном состоянии, предполагающий использование ровной подложки с контролируемой шероховатостью поверхности и керамических грузов, обеспечивающих равномерное давление на заготовку.

Современные исследования демонстрируют, что геометрическая стабильность плат определяется не только точностью поддержания технологических параметров (температурного режима, газового состава, скоростей нагрева и охлаждения), но и рядом дополнительных факторов. Практический опыт свидетельствует, что даже при использовании высокотехнологичных печей с автоматизированным

контролем параметров в каждой точке рабочей зоны традиционные методы не всегда обеспечивают требуемую точность геометрических параметров крупногабаритных изделий. Экспериментально установлено, что основными причинами деформаций являются неравномерность теплового воздействия, приводящая к анизотропии усадки, разница давлений летучих компонентов между верхней и нижней поверхностями платы, турбулентный характер газовых потоков, влияющий на равномерность удаления продуктов разложения.

В рамках настоящего исследования разработана и апробирована методика применения специального укрывного материала, выполняющего двойную функцию: термоэкранирование (защита от неравномерного теплового излучения) и стабилизация газовых потоков (обеспечение равномерного удаления летучих компонентов). Особое внимание уделено анализу динамики газообразных продуктов разложения в пространстве над и под обжигаемой платой. На основе проведенных исследований получены следующие результаты:

1) определен оптимальный состав укрывного материала, обеспечивающего термическую стабильность и минимальное аэродинамическое сопротивление;
2) выявлена функциональная зависимость между микрорельефом (шероховатостью) подложки и уровнем избыточного давления в приповерхностной зоне;
3) определены оптимальные параметры технологического процесса, обеспечивающие равномерное удаление летучих соединений с верхней и нижней поверхностей платы.

Полученные данные свидетельствуют, что применение укрывного материала в сочетании с оптимизацией газодинамических параметров позволяет существенно снизить деформацию плат в процессе обжига.

Литература

1. Егошин В. А., Шугаепов Ш. Н., Ахметгалиев Р. Ш., Ермолаев Е. В., Мазуренко А. А., Чернышева Ю. А. Применение отечественного глинозема глубокой прокалки для производства металлокерамических корпусов // Электроника НТБ, 2024. — № 10 (00241). — С. 86–89.
2. Шугаепов Ш. Н., Ермолаев Е. В., Егошин В. А., Ахметгалиев Р. Ш., Мазуренко А. А. Технологическое оборудование и материалы, применяемые для изготовления металлокерамических корпусов // Электроника НТБ, 2022. — № 5 (00216). — С. 1–4.

УДК 621.357.77

Оптимизация процесса гальванического осаждения золота для снижения стоимости конечного продукта на основе составных полупроводников

Суханов Д. А.
ООО «ОСТЕК-ЭК»
121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2
micro@ostec-group.ru, *info@ostec-group.ru*

Проведена оптимизация процесса гальванического осаждения золота на полупроводниковую пластину и оптимизация конструкции процессного модуля в целях уменьшения стоимости затрат на проведение процесса, сокращения расхода золота, улучшения неравномерности толщины пленки золота, осажденного на поверхности пластины и в переходных отверстиях.
Ключевые слова: полупроводники; составные полупроводники; арсенид галлия (GaAs); нитрид галлия (GaN); карбид кремния (SiC); кремний (Si); гальваническое осаждение золота.

Составные полупроводники (CS — compound semiconductor) — технология следующего поколения в современной электронике. 80% полупроводниковых компонентов в мире используют кремний (Si) в качестве своей основы. Оставшиеся 20% используют CS. Самые востребованные на полупроводниковом производстве — карбид кремния (SiC), арсенид галлия (GaAs), нитрид галлия (GaN). CS сложнее в производстве, чем Si, но они обладают большей подвижностью носителей заряда и другими важными свойствами:

1) мощность (электромобили, преобразователи питания и т. д.);

2) скорость (сотовая связь и беспроводной интернет (5G), радиолокация);

3) фотоэлектрическое преобразование (фотоника, оптоволоконная связь).

В основе создания всех чипов на CS лежит технология гальванического осаждения золота (Au).

Иммерсионное химическое покрытие — это чистая химическая реакция. Может осаждать максимум до 1 мкм толщины металла. Требует большого объема реагента при низкой скорости осаждения и высокой стоимости обработки в пересчете на один кристалл.

Испарение характеризуется низкой скоростью и неселективным осаждением. Плохой контроль осаждения металлической пленки и высокая стоимость обработки одного кристалла.

Гальваническое осаждение в вертикальной плоскости характеризуется высоким расходом реагента и ионов Au в пересчете на один кристалл, низкой однородностью получаемого покрытия на поверхности, что приводит к высокой стоимости обработки одного кристалла и низкому выходу годных продукции.

Благодаря оптимизации процесса и повышению класса технологического оборудования стоимость процесса можно сократить, а качество — повысить.

Оптимизация процесса осаждения Au в горизонтальной плоскости происходила за счет использования компактных реакторов фонтанного типа. В дополнение использовались различные вспомогательные процессные модули: вакуумного

предварительного смачивания до процесса осаждения, отмывки и сушки поверхности после процесса осаждения.

Оптимизация процесса для достижения однородности покрытия поверхности проводилась на различных процессах: формирование межуровневой металлизации, столбиковых выводов, мостовых межсоединений и просто равномерного покрытия обратной стороны пластины с учетом отверстий.

Благодаря оптимизации процесса удалось получить неравномерность покрытия 2–3 % по пластине ∅150 мм и сокращение расхода Au на 10–12 %.

После проведенных оптимизаций объединились уникальные технологии распределения электрического поля в потоке электролита и самого потока электролита для соответствия сложнейшим требованиям к гальваническому покрытию обратной стороны пластины и заполнению отверстий.

На рис. 1 и 2 показана исследуемая пластина после оптимизации процесса формирования слоя золота на обратной стороне, а на рис. 3 и 4 — изображения переходного отверстия с обратной стороны пластины в разрезе. В табл. 1 показаны значения толщины покрытия в различных точках на пластине.

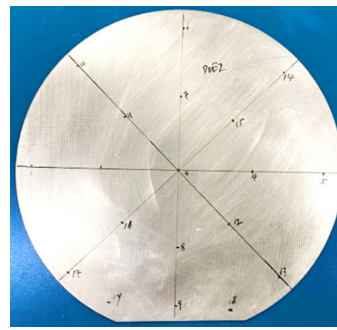


Рис. 1. Обратная сторона пластины с золотым покрытием с точками измерения толщины слоя Au

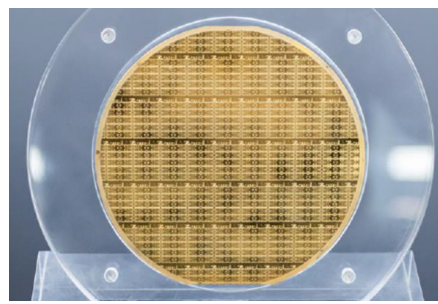


Рис. 2. Пластины с лицевой стороны (со сформированной топологией)

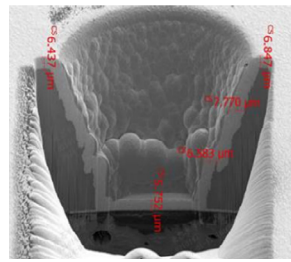


Рис. 3. Изображение переходного отверстия на обратной стороне пластины (FIB)

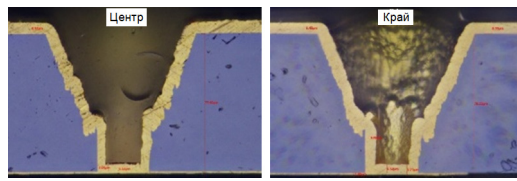


Рис. 4. Изображение переходных отверстий на обратной стороне пластины

Параметры переходного отверстия:

- морфология: 30×60 мкм — верх отверстия, 20×40 мкм — низ отверстия, глубина: 75 мкм;
- площадь покрытия поверхности: ∅150 мм, 1,8367 дм^2 (3 мм краевая зона), включая металл на поверхности, боковой стенке и дне отверстий;
- однородность покрытия поверхности: 5 % с учетом дна и стенок отверстий;
- состояние покрытия: >50 %, обеспечение толщины металлической пленки 2 мкм на дне отверстия;
- расход Au составил 0,9–0,95 г на пластину ∅150 мм.

Табл. 1. Значения толщины слоя Au на обратной стороне пластины ∅150 мм

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
мкм	1,42	1,39	1,46	1,41	1,44	1,37	1,39	1,4	1,46

№	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
мкм	1,4	1,39	1,45	1,44	1,39	1,4	1,39	1,42	1,45	1,46

Используя уникальную технологию для снижения потерь осаждения Au на поверхности и увеличения толщины слоя металлической пленки, покрывающего дно переходного отверстия, удалось обеспечить значительную экономию затрат на Au до 275 юаней на одну пластину при каждом процессе гальванического осаждения Au.

УДК 621.3.049

Технологические возможности сборки многокристальных модулей на уровне пластины

к. ф.-м. н. Лачинов А. А., Подковыров А. А., Салынский Н. А.
ООО «Совместное предприятие «Квантовые технологии»
121205, г. Москва, инновационный центр Сколково, ул. Нобеля, 1
aalachinov@rosatom.ru

В докладе рассматриваются возможности разработки и производства интерпозеров на кремниевых пластинах диаметром 300 мм для интеграции многокристальных микромодулей на уровне пластины.
Ключевые слова: интерпозер; слои перераспределения; redistribution layer; RDL; сборка; 2.5D/3D-интеграция; корпусирование на уровне пластины; Wafer level packaging; WLP.

Технологии передовой сборки и корпусирования (так называемые advanced packaging) помогают удовлетворить спрос на микросхемы, которые востребованы в перспективных областях применения, например 5G, автономные транспортные средства, устройства Интернета вещей и другие. Для этих задач требуются высокопроизводительные чипы с низким энергопотреблением, способные быстро обрабатывать огромные объемы данных. Современные технологические процессы изготовления полупроводниковых элементов сталкиваются с фундаментальными физическими ограничениями и экономической целесообразностью [1, 2, 3, 4]. В результате технический прогресс на этапе разработки и производства чипов замедляется, а экономически обоснованный максимальный размер кристалла и, следовательно, его производительность становятся все более ограниченными. Передовые технологии сборки и корпусирования, появившиеся за последние два десятилетия, включая так называемые 2.5D- и 3D-интеграцию и гетерогенную архитектуру (в т. ч. чиплеты), позволяют преодолеть эти ограничения, дополнив технологии проволочного монтажа и флип-чипов, разработанные в предыдущие полвека. Такой подход обеспечивает быстрые циклы разработки, высокий уровень гибкости и низкие затраты по сравнению с другими типами сборки и корпусирования, особенно когда речь идет об оптимизации преимуществ системы [5], где гетерогенная система может содержать функциональность совокупности отдельных микросхем. Применяемые технологии на зарубежных фабриках включают в себя множество подвидов, таких как корпусирование на уровне пластины (Fan-Out Wafer-Level Package), чип на пластине на подложке (Chip-on-Wafer-on-Substrate), чиплеты и другие [6, 7].

Доклад посвящен реализации отечественной технологии производства интерпозеров для сборки и корпусирования многокристальных микромодулей различного назначения. Будут рассмотрены особенности применяемых технологических процессов и имеющиеся технологические наработки на производственной линии, включающей процесс back-end-of-line (BEOL) на 300-мм кремниевых пластинах.

В докладе будет представлен подход к разработке топологии интерпозера для повышения эффективности 2.5D-интеграции с учетом массогабаритных параметров и требований по быстродействию и надежности. В частности, будет отражено решение следующих задач: моделирование и анализ межсоединений для подбора

оптимальных размеров и количества слоев перераспределения, исследование характеристик межсоединений в этих слоях в зависимости от правил проектирования, проектирование топологии экспериментального образца.

Литература

1. Borkar S. Obeying Moore's Law beyond 0.18 Micron [Microprocessor Design] // Proceedings of the 13th Annual IEEE International ASIC/SOC Conference (Cat. № 00TH8541), Arlington, VA, USA, 13–16 September 2002. P. 26–31.
2. Mack C. A. Fifty years of Moore's law // IEEE Trans. Semicond. Manuf., 2011. Vol. 24. P. 202–207.
3. Jin L., Brocade Communications. T-5 What Makes Moore's Law Continue?-Recent Advances in Semiconductor // Proceedings of the 2007 7th International Conference on ASIC, Guilin, China, 22–25 October 2007.
4. Mack C. A. The end of the semiconductor industry as we know it // Emerg. Lithogr. Technol. VII 2003, 5037, 1.
5. Appello D., Bernardi P., Grosso M., Reorda M. S. System-in-package testing: Problems and solutions // IEEE Des. Test Comput., 2006. Vol. 23. P. 203–211.
6. Lau J. H. Recent Advances and Trends in Advanced Packaging // IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., 2022. Vol. 12. P. 228–252.
7. Hou S. Y., Chen W. C., Hu C., Chiu C., Ting K. C., Lin T. S., Wei W. H., Chiou W. C., Lin V. J. C., Chang V. C. Y. et al. Wafer-Level Integration of an Advanced Logic-Memory System Through the Second-Generation CoWoS Technology // IEEE Trans. Electron Devices, 2017. Vol. 64. P. 4071–4077.

УДК 621.382.33

Особенности технологии изготовления гетеробиполярных транзисторов на основе структур InGaP/GaAs

Осипов А. М., Егорова Е. И., Захарова Н. Ю., Захаров С. И., Козловский Э. Ю., к. т. н.
ЗАО «НПП «Планета-Аргалл»
173004, г. Великий Новгород, ул. Федоровский ручей, 2/13
argall@argall.nov.ru

Приведено описание основных технологических этапов при изготовлении гетеробиполярных транзисторов (ГБТ) на основе структур InGaP/GaAs. Рассмотрены особенности технологии изготовления и их влияние на качество формируемых транзисторных структур. Получены образцы ГБТ с коэффициентом передачи тока базы не менее 50 ед. и граничной частотой не менее 40 ГГц.
Ключевые слова: гетеробиполярный транзистор; ГБТ; СВЧ; GaAs; InGaP; ГУН.

Гетеробиполярные транзисторы на основе GaAs с эмиттером InGaP, по сравнению с AlGaAs, имеют улучшенные характеристики, в первую очередь низкие фазовые шумы, что делает данный класс приборов крайне привлекательным для изготовления устройств СВЧ-диапазона, таких как генераторы, управляемые напряжением (ГУН).

Традиционным способом формирования вертикальной структуры ГБТ является формирование омического контакта к области эмиттера с последующим последовательным трехступенчатым мезатравлением (жидкостным или сухим) для вскрытия слоев базы и коллектора и формирования омических контактов к этим областям и общей изоляции активной области транзистора. Наиболее распространенной металлизацией для контактов является система Ti/Pt/Au для эмиттера и базы и системы на основе эвтектики AuGe для коллектора.

В данной работе традиционный способ формирования вертикальной структуры ГБТ подвергся изменению в целях минимизации воздействия жидкостного травления и «взрывной» литографии на металлизацию омических контактов. При этом изначально формировали мезу эмиттера, базы и коллектора, далее формировали омический контакт к базе, затем одновременно омический контакт к эмиттеру и коллектору и в завершение — мезатравление для общей изоляции активной области транзистора. В качестве металлизаций для контактов после ряда экспериментов были выбраны системы Au/Ge/Ni/Au для эмиттера и коллектора и Ni/Ti/Pt/Ti/Au для базы.

Разработанная технология изготовления ГБТ позволила получить образцы транзисторов с коэффициентом передачи тока базы не менее 50 ед. и граничной частотой не менее 40 ГГц.

Достигнутые результаты позволяют использовать разработанный транзистор в качестве активного элемента ГУН, а разработанная технология изготовления активного элемента может быть использована как базовая для разработки технологии МИС СВЧ-диапазона на GaAs ГБТ.

УДК 621.375.4

Разработка технологического процесса GaN/SiC с топологической нормой 0,25 мкм в АО «ОКБ-Планета»

Желаннов А. В., Казанцева З. С., Алмазов О. Б.
АО «ОКБ-Планета»
173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1н

Представлены результаты разработки технологического процесса GaN/SiC с топологической нормой 0,25 мкм в АО «ОКБ-Планета», средств проектирования для технологии изготовления СВЧ ЭКБ на основе GaN.
Ключевые слова: нитрид галлия; транзистор; топологическая норма; коэффициент усиления; выходная мощность.

В рамках проекта с Фондом перспективных исследований был разработан полностью замкнутый технологический процесс изготовления тестовых активных и пассивных элементов на основе гетероструктур GaN/AlGaN на подложках карбида кремния, включающий набор топологий мощных и малошумящих транзисторов, конденсаторов, индуктивностей, резисторов. Также разработан параметрический монитор для контроля за отдельными технологическими операциями.

Эпитаксиальные слои нитрида галлия выращивались на 4-дюймовых подложках карбида кремния методом химического осаждения из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений.

Технологический процесс с топологической нормой 0,25 мкм обеспечивает создание приборных структур со следующими характеристиками: начальный ток стока полевых транзисторов — 700±100 мА/мм, максимальный ток стока полевых транзисторов — 800±100 мА/мм, максимальная крутизна полевых транзисторов — 250±50 мСм/мм, напряжение пробоя затвор-сток полевого транзистора — более 120 В, сопротивление тонкопленочных резисторов — 50±5 Ом, емкость конденсаторов — 250±10 пФ/мм^2.

С использованием разработанных и изготовленных тестовых элементов были созданы средства проектирования для технологии изготовления СВЧ ЭКБ на основе GaN, включающие библиотеку моделей пассивных компонентов (конденсаторов, резисторов и катушек индуктивности) и активных компонентов (мощных и малошумящих СВЧ-транзисторов) и проектные нормы для разработки топологий СВЧ интегральных схем (ИС) на основе GaN HEMT.

С использованием средств проектирования были разработаны и изготовлены демонстраторы СВЧ интегральных схем, включающие ИС «GaN малошумящий усилитель», ИС «GaN предварительный усилитель мощности» и ИС «GaN выходной усилитель мощности».

Создание буферного N-стоп-слоя в кремниевых силовых полупроводниковых приборах с использованием легирования ионами водорода

Вренев Я. А.[1], Кравчук Е. А.[1], Быкова А. В.[2], Романов Д. А.[1], Полохов А. М.[1], к. т. н. Машевич П. Р.[3]
[1] ООО «СИТРОНИКС Смарт Технологии»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2
yavrenev@sitronics-smart.com
[2] АО «Микрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработан альтернативный технологический процесс формирования буферного N-стоп-слоя для кремниевых быстровосстанавливающихся диодов (далее — FRD), изготовленных на объемном кремнии с использованием ионного легирования ионами водорода. Приведены результаты эксперимента, результаты измерений электрических параметров и краткое описание технологического процесса. Целью работы являлось получение альтернативного способа формирование буферного N-стоп-слоя для FRD на объемном кремнии для изделий 33, 45 и 65 класса.

Ключевые слова: кремний; быстровосстанавливающиеся диоды; буферный N-стоп-слой; ионное легирование; водород; фосфор.

В современной полупроводниковой технологии существуют два признанных метода формирования буферного N-стоп слоя для силовых полупроводниковых приборов, изготовленных на основе объемного кремния. Первый метод включает процесс ионного легирования с использованием фосфора или мышьяка, за которым следует высокотемпературный отжиг. Второй метод основан на эпитаксиальном выращивании слоя. Эти технологии позволяют создавать изделия с ключевыми характеристиками:

- минимальная толщина кристалла;
- высокое обратное напряжение;
- малые токи утечки;
- низкое прямое напряжение;
- высокий прямой ток.

Инновационный подход к формированию N-стоп-слоя с применением ионов водорода и последующего низкотемпературного отжига позволил значительно улучшить динамические параметры полупроводниковых приборов. Данный метод способствует созданию дополнительных центров рекомбинации, что, в свою очередь, снижает время жизни неравновесных носителей заряда, повышая тем самым эффективность полупроводниковых устройств.

Исследования были проведены специалистами кооперации, включающей компанию-разработчика ООО «СИТРОНИКС Смарт Технологии» и АО «Микрон». В результате были изготовлены приборы FRD класса 33, 45 и 65.

Литература

1. Козлов В. А., Козловский В. В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α-частицами // Физика и техника полупроводников, 2001. — Т. 35. — Вып. 7. — С. 769–795.
2. Niedernostheide F.-J. et al. Tailoring of field-stop layers in power devices by hydrogen-related donor formation // 2016 28th International Symposium on Power Semiconductor. Devices and ICs (ISPSD), 2016. P. 351–354. DOI: 10.1109/ISPSD.2016.7520850.

УДК 544.032.65; 546.77

Формирование газопроницаемого микропрофиля поверхности молибденовых подложек высокоинтенсивным электронно-лучевым воздействием

Шугаепов Ш. Н.[1,2,3], Жуков И. А.[2], Бабаев А. С.[2], Егошин В. А.[1,2,3], Ахметгалиев Р. Ш.[1,2], Ермолаев Е. В.[1,3]

[1] АО «Завод полупроводниковых приборов»
424003, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 26
vaegoshin@zpp12.ru, rshahmetgaliev@zpp12.ru,
ermolaev_ev@zpp12.ru, shnshugaepov@zpp12.ru
[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36
[3] Марийский государственный университет
424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1

В работе представлены результаты исследований в части технологии электронно-лучевой модификации поверхности молибденовых листов марки МЧВП для создания газопроницаемого микропрофиля, разработанного по расчетной математической модели.

Ключевые слова: микроэлектроника; металлокерамический корпус; плата; алюмооксидная керамика; высокотемпературный обжиг; молибден; электронный луч; текстура; бесконтактный контроль; газопроницаемость.

Производство изделий микроэлектроники и СВЧ-техники предусматривает использование специальной высокотемпературной оснастки для окончательного спекания керамических изделий в печах проходного типа.

Конструкционные материалы на основе молибдена имеют широкие перспективы применения ввиду высокой стойкости в бескислородной среде к повышенным температурам, обладают высоким коэффициентом теплопроводности и малым значением коэффициента температурного расширения.

Молибденовые листы применяются в качестве подложек при обжиге металлокерамических плат в среде формиргаза (водород+азот) при температурах до плюс 1600 °C. Однако существует проблема, связанная с одновременным обеспечением равномерного и контролируемого доступа формиргаза к опорным поверхностям спекаемых керамических изделий, а также формированием свободного отвода летучих компонентов, выделяющихся из керамики.

В работе изучена технология электронно-лучевой модификации поверхности молибденовых листов марки МЧВП для создания газопроницаемого микропрофиля, разработанного по расчетной математической модели.

Модификация поверхности проводилась на технологическом электронно-лучевом комплексе АЭЛТК-344-12. В ходе исследования электронно-лучевого воздействия на поверхность молибденовых пластин было получено 6 (шесть) различных рельефов (микропрофилей) за счет вариации режимов и траекторий перемещения.

Для последующего сканирования профилей прямым методом применяли бесконтактные схемы — конфокальную лазерную сканирующую микроскопию и трехмерную лазерную профилометрию, а для части образцов были приготовлены

слепки из слепочно-оттискной массы. Путем математической обработки данных сканирования было установлено, что минимальное избыточное давление в пористом пространстве под заготовкой корпуса микросхемы составляет 0,36 Па.

На основании проведенного исследования сделаны выводы.

Литература

1. Гуденко А. В., Слива А. П., Драгунов В. К., Щербаков А. В. Особенности формирования изделий методом электронно-лучевой наплавки // Сварочное производство, 2018. — № 8. — С. 12–19.
2. Петрухин Д. А., Слива А. П. Электронно-лучевое рельефное модифицирование вольфрама // Сборник трудов V международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии». Москва, 2024. — С. 154–161.
3. Шугаепов Ш. Н., Ермолаев Е. В., Егошин В. А., Ахметгалиев Р. Ш., Мазуренко А. А. Технологическое оборудование и материалы, применяемые для изготовления металлокерамических корпусов // Электроника НТБ, 2022. — № 5 (00216). — С. 1–4.

УДК 621.382.323:001.891.57

Разработка цифрового двойника суб-100-нм многозатворных МОП-транзисторов

Петросянц К. О., д. т. н., Силкин Д. С., к. т. н., Попов Д. А., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
kpetrosyants@hse.ru

На базе TCAD-модели разработан цифровой двойник для многозатворных МДП-структур с длиной канала менее 100 нм и затворным стеком типа TiN-HfO_2-SiO_2. Проведена валидация цифрового двойника по характеристикам четырех видов FinFET разных производителей, а также NWFET- и NSFET-структур.

Ключевые слова: цифровой двойник; FinFET; NSFET; NWFET; TCAD.

Концепция цифрового двойника (ЦД) требует наличия у модели некоторых предсказательных качеств, чтобы обеспечить обратную связь между ЦД и реальным объектом, то есть чтобы инженер мог достаточно свободно менять параметры ЦД и быть уверенным, что аналогичные конструктивные изменения в реальном приборе приведут к сопоставимому результату.

В этой связи были сформулированы следующие требования к модели.

1. Модель должна иметь единое математическое «ядро», описывающее физические свойства прибора. Уравнения и включенные в них коэффициенты запрещается менять при изменении конструкции прибора.
2. Модель должна сохранять погрешность моделирования в пределах 20 % для приборов, имеющих одинаковый физический принцип работы, но различную форму, размеры, уровни легирования и прочие конструкторские параметры.

Для проверки соблюдения последнего условия необходим значительный объем экспериментальных данных, включающих структурные параметры и электрические характеристики. Из-за этого в качестве объекта исследований выбраны передовые трехмерные многозатворные транзисторы (FinFET, NWFET, NSFET). В научной литературе собрана обширная экспериментальная база по исследованию как экспериментальных образцов, так и моделей данных структур.

На базе включенных в коммерческий пакет Synopsys TCAD-моделей физических эффектов было подготовлено математическое ядро, включающее зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примеси и избыточных носителей, электрического поля и длины канала, зависимости времени жизни от концентрации примеси, а также учитывающее эффект сужения запрещенной зоны.

Эта модель дала хорошие результаты по расчету статических Id-Vg-характеристик FinFET трапецеидального сечения с длинами канала 30, 40 и 60 нм, изготовленных Институтом микроэлектроники Китайской академии наук, а также FinFET прямоугольного сечения, изготовленного по 7-нм технологии GLOBALFOUNDRIES, NWFET с длиной канала 100 нм и NSFET с длиной канала 12 нм, изготовленного IBM. Концентрация примеси в канале меняется от 10^{16} до 10^{18} $см^{-3}$, эквивалентная толщина оксида (EOT) — от 1 до 1,5 нм, толщина

кремниевого канала — от 35 до 5 нм. Сравнение экспериментальных характеристик со смоделированными показано на рис. 1. Средняя погрешность не превышает 15 %.

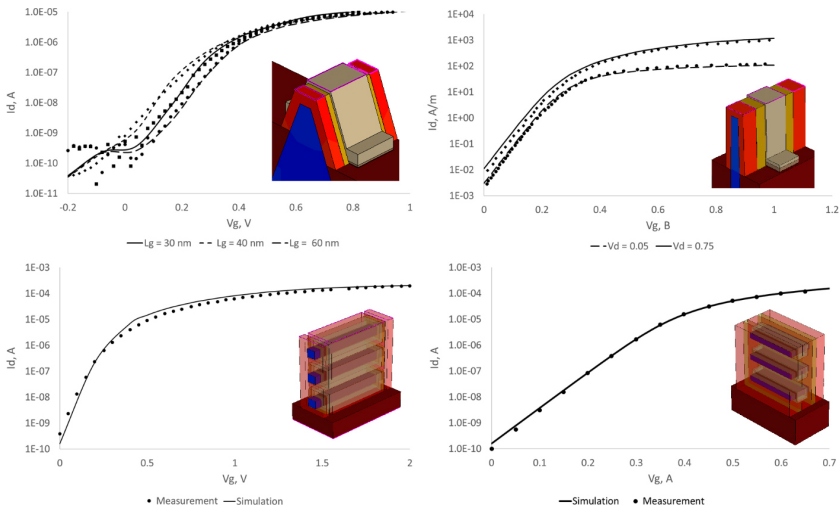


Рис. 1. Результаты валидации цифрового двойника по характеристикам разных типов МДП-структур

Функциональные возможности ЦД могут быть расширены за счет применения тепловых [1] и радиационных [2, 3] моделей, которые могут разрабатываться и валидироваться отдельно, а затем подключаться к ЦД по мере необходимости.

Работа выполнена в рамках проекта ФИ-2025-4 НИУ ВШЭ.

Литература

1. Petrosyants K. O., Silkin D. S., Popov D. A. Comparative Characterization of NWFET and FinFET Transistor Structures Using TCAD Modeling // Micromachines, 2022. Vol. 13 (8). P. 1293. URL: https://doi.org/10.3390/mi13081293.
2. Петросянц К. О., Силкин Д. С., Попов Д. А. и др. Особенности TCAD- и SPICE-моделирования удара заряженной частицы в 6Т-ячейку статической памяти, изготовленную по КМОП-технологии с проектными нормами 28 нм // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2023. — Т. 28. — № 6. — С. 826–837. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-6-826-837. EDN XCTUXL.
3. Петросянц К. О., Силкин Д. С., Попов Д. А. и др. TCAD-моделирование нанометровых структур FinFET на объемном кремнии с учетом воздействия радиации // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2021. — Т. 26. — № 5. — С. 374–386. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-5-374-386. EDN WBYIRG.

Разработка и оптимизация приборов силовой электроники от 0,4-го до 17-го класса в целях получения их предельных целевых параметров с помощью приборно-технологического моделирования

Кравчук Е. А., Вренев Я. А., Полохов А. М., Романов Д. А., Горбунова А. И., к. т. н. Машевич П. Р.
ООО «СИТРОНИКС Смарт Технологии»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2
kryukovskiy@sitronics-smart.com

На базе пакета программ технологического и приборного моделирования Synopsys Sentaurus TCAD была разработана библиотека приборов силовой электроники от 0,4-го до 33-го класса. Разработаны следующие конструкции приборов: FRED-диоды с классом от 12 до 17, FRD-диоды от 0,4-го до 33-го класса, IGBT-транзисторы от 33-го до 65-го класса с конструкцией NPT+ и SPT+, MOSFET Trench-транзисторы от 0,4-го до 1-го класса со встроенной ESD-защитой. Проведена верификация и калибровка разработанных моделей ячеек и тестовых кристаллов в целях получения оптимальных характеристик макетных образцов.

Ключевые слова: приборно-технологическое моделирование силовых приборов; силовая электроника; быстровосстанавливающиеся PiN-диоды; радиационно-термическая обработка диодов; локальный контроль времени жизни; FRD-диоды; FRED-диоды; облучение электронами и протонами; локальный контроль времени жизни; IGBT-транзисторы; конструкция NPT; конструкция SPT; конструкция SPT+; стоп-буферный слой; конструкция Trench; MOSFET; встроенная ESD-защита.

Разработка технологии производства ЭКБ силовой электроники в текущий момент осуществляется в условиях жестко ограниченных ресурсов ввиду санкционных ограничений. Применение систем технологического и приборного моделирования нацелено на сокращение количества экспериментальных запусков, необходимых для успешного выполнения проекта и изготовления устройства, фактически на сокращение времени разработки устройства, соответствующего требованиям ТЗ.

Алгоритм разработки ЭКБ силовой электроники в системе технологического и приборного моделирования следующий:

- выделение элементарной ячейки, которая будет мультиплицирована в приборе, и технологическое моделирование ячейки на базе эскизного технологического маршрута;
- разработка и проверка конструкции периферии, удовлетворяющей рабочему напряжению прибора;
- приборное моделирование статических и динамических характеристик и экстракция целевых параметров прибора;
- масштабирование прибора для получения заявленных характеристик;
- выбор оптимальных технологических и топологических параметров структуры по результатам моделирования;

- верификация модели после получения результатов измерений тестовых структур и результатов РЭМ-анализа;
- уточнение и оптимизация модели для расчета макетных образцов прибора.

В рамках работ по созданию ЭКБ силовой электроники были созданы следующие модели ячеек приборов и периферии:

- FRD-диоды от 33-го класса и выше и FRED-диоды 12-го класса и выше, модели PiN-диодов учитывают влияние радиационно-термической обработки с помощью введения характерных для рассмотренного типа облучения и температурной обработки ловушечными уровнями в запрещенной зоне;
- IGBT-транзисторы от 33-го до 65-го класса с конструкциями NPT+ и SPT+;
- nMOSFET Trench-транзисторы с конструкцией Trench от 0,4-го до 1-го класса.

Модели учитывают трехмерный характер структур с помощью моделирования в цилиндрической системе координат в случае квадратной ячейки, в случае гексагональной и квадратной ячеек, в случае полосковой конфигурации ячейки размер умножался на эквивалентную ширину канала. По результатам моделей определены параметры эпитаксии слоев для FRED, а также толщины и сопротивления подложек для FRD и IGBT. По разработанным моделям были уточнены технологические параметры операций маршрута производства и топологические размеры структур, изготовлены тестовые кристаллы и проведены измерения на АО «Микрон». Модели позволяют наглядно увидеть преимущества новых конструкций SPT+. На основе экспериментальных данных проведена верификация результатов моделирования и корректировка параметров численной модели для расчета макетных кристаллов, точность моделей составила более 80 %. Проведены анализ динамических характеристик на базе библиотеки разработанных приборов и верификация динамической модели для приборов от 0,4-го до 1-го класса. Библиотеку моделей можно использовать для дальнейшей оптимизации конструкций ячеек и периферии ЭКБ силовой электроники, а также для анализа и физических эффектов в приборе.

Литература

1. Rahimo M. T., Shammas N. Y. I. Optimization of the reverse recovery behaviour of fast power diodes using injection efficiency and lifetime control techniques // Proc. EPE 97. P. 2099.
2. Козлов В. А., Козловский В. В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и альфачастицами // Компоненты и технологии, 2004. — № 3. — С. 785. — URL: https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/38565.
3. Bellini M., Vobecky J. TCAD simulations of irradiated power diodes over a wide temperature range // 2011 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). IEEE, New York, 2011. P. 183–186.
4. Москатов Е. А. Электронная техника. Начало. — Таганрог, 2010. — 204 с.

Пластиковые корпуса с открытой полостью: преимущества, проблемы и решения

Воробьёв С.А.
ООО «ОСТЕК-ЭК»
121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2

Основные тезисы

1. Пластиковые корпуса с открытой полостью

- Применение в электронике, включая высокочастотные и миниатюрные устройства.

2. Преимущества EMC-корпусов

- Высокая производительность и низкая стоимость при массовом производстве.
- Хорошая теплопроводность и электроизоляционные свойства.
- Широкая номенклатура корпусов для разных подложек.

3. Недостатки EMC-корпусов

- Риск механических повреждений (разрушение кристалла, коробление из-за разницы ТКР).
- Ограничения для СВЧ-устройств (высокие потери на частотах выше 2 ГГц).
- Гигроскопичность (эффект «попкорна») и низкая теплопроводность по сравнению с металлокерамикой.

4. LCP-корпуса (Liquid Crystal Polymer)

Основные свойства:

- Низкие диэлектрические потери ($\varepsilon \approx 3{,}0$, $\tan\delta < 0{,}002$), стабильность до 110 ГГц.
- Минимальное влагопоглощение (~0,04%) и высокая термостойкость (до 240–300 °C).
- Химическая инертность и анизотропия свойств.

Применение:

- ВЧ-фильтры, фотонные ИС, разъемы (USB-C), медицинские импланты, автомобильные РЛС (24–79 ГГц).
- Модули 5G, спутниковая электроника, антенны (AiP), носимые устройства.

5. Преимущества LCP-корпусов с открытой полостью

- Отличные частотные характеристики и радиопрозрачность.
- Миниатюризация, малый вес, механическая прочность.
- Возможность интеграции пассивных компонентов и антенн.
- Стоимость ниже, чем у металлокерамики.

6. Проблемы LCP-корпусов и решения

- Низкий теплоотвод:
  - решение — металлическое основание, теплоотводящие отверстия, внешние радиаторы.
- Коробление из-за анизотропной усадки:
  - решение — симметричный дизайн, контролируемое охлаждение.
- Герметизация:

- варианты — оптически прозрачный компаунд, стеклянная крышка, частичная или полная заливка.

7. Заключение

- Металлокерамика: воздушная полость, низкие потери в ГГц-диапазоне.
- EMC-корпуса: низкая стоимость, массовое производство.
- LCP-корпуса: идеальны для 5G/6G, фотоники, IoT, аэрокосмической электроники.

Ключевые выводы

Корпуса с открытой полостью сочетают преимущества металлокерамических и металлополимерных корпусов с точки зрения производительности, сборки, применения для СВЧ-устройств.

УДК 53.083.98

Контроль процессов формирования ONO-структур для применения в приборах с энергонезависимой памятью

Волоховский А. Д.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
volohovskiy@nm-tech.org

В работе проводится исследование свойств ONO-структур для применения в приборах с энергонезависимой памятью, разработка методик измерения их параметров при межоперационном контроле, включая толщины слоев, электрофизические свойства структуры, а также содержание ионов металлов внутри данных структур.
Ключевые слова: энергонезависимая память, Non-volatile memory, NVM, CT-NVM, окисел — нитрид — окисел, ONO, SONOS.

Один из видов устройств энергонезависимой памяти основан на захвате зарядов ловушками (CT-NVM — Charge Trapping Non-Volatile Memory). Устройства CT-NVM позволяют хранить данные в течение длительных периодов времени (более 10 лет) и обладают лучшей радиационной стойкостью, чем запоминающие устройства на основе плавающего затвора [1]. Устройства типа SONOS (Silicon-Oxide-Nitride-Oxide-Silicon) являются одной из наиболее распространенных архитектур устройств типа CT-NVM.

В устройствах типа SONOS заряд хранится в ловушках, распределенных в слое нитрида кремния, который расположен между инжекционным слоем оксида кремния и блокирующего окисла. Структуры окисел — нитрид — окисел (ONO) формируются в непрерывном диффузионном цикле, в связи с чем контроль параметров полученных структур проводят на сформированной трехслойной структуре.

Контроль толщин формируемых структур обычно проводят с применением таких методов, как спектрофотометрия или эллипсометрия. Однако контроль трехслойных структур ONO не может быть выполнен с применением метода спектрофотометрии в связи с малыми толщинами слоев, входящих в структуру, либо лазерной эллипсометрии в связи с тем, что три параметра не могут быть получены из двух измеряемых величин Ψ и Δ даже при варьировании угла падения излучения на образец.

Известна методика измерения структур ONO, основанная на комбинации методов лазерной эллипсометрии, угловой рефлектометрии и УФ-спектрофотометрии [2]. В этой методике лазерная эллипсометрия используется для определения общей толщины структуры, угловая рефлектометрия позволяет найти положение границ раздела, а спектрофотометрия — толщину слоя нитрида. При этом данные со всех трех методов измерения собираются последовательно, а их комбинирование происходит на этапе решения обратной задачи.

В современных технологических процессах толщины пленок, входящих в состав структуры ONO, составляют менее 10 нм, поэтому применение рефлектометрии и спектрофотометрии даже в области глубокого УФ не позволяет получить точные результаты.

Нами предложена методика измерения толщин структур ONO, основанная на методе полихроматической эллипсометрии в спектральном диапазоне 240–800 нм, в которой реализована поэтапная обработка данных. В начале используются данные из УФ-области, чтобы найти толщину слоя нитрида, используя его поглощение в диапазоне 240–350 нм. На втором этапе применяется весь набор данных для нахождения общей толщины структуры и положений границ раздела в ней. Полученные экспериментальные данные со структуры ONO с толщинами 2,8–7,0–6,0 нм находятся в хорошем согласии с измерениями, полученными сторонними методами.

Разработана бесконтактная методика измерения концентрации ловушек заряда в структуре ONO. Методика основана на поэтапном осаждении малых доз коронарного заряда на структуру и измерении ее вольт-фарадных характеристик через воздушный зазор с использованием электрода Кельвина.

Разработана методика измерения концентрации ионных загрязнений внутри структуры ONO. Для этого структура подвергается травлению в парах плавиковой кислоты, далее следуетсбор продуктов реакции и их анализ методом масс-спектрометрии (VPD-ICPMS). При этом при обработке нитрида кремния в парах плавиковой кислоты образуются соли аммония, которые не могут быть напрямую собраны для анализа, поэтому введена дополнительная операция нагрева пластины до температуры 350 °C, что позволяет разложить их на более простые компоненты и собрать продукты реакции стандартным для метода VPD-ICPMS способом.

В работе дано детальное описание разработанных методик и полученных результатов. Полученные результаты позволяют предприятию «НМ-Тех» перейти к разработке и постановке технологии устройств с энергонезависимой памятью типа SONOS по техпроцессу 130 нм.

Литература

1. White M. H., Adams D. A., Bu J. K. // IEEE Circuits and Devices, 2000. Vol. 16. P. 22–31.
2. Leng J. M., Opsal J., Aspnes D. E. Combined beam profile reflectometry, beam profile ellipsometry and ultraviolet-visible spectrophotometry for the characterization of ultrathin oxide-nitride-oxide films on silicon // American Vacuum Society, 1999.

УДК 621.382.27

Сегнетоэлектрический полевой транзистор памяти на основе $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ и двумерного MoS_2

к. ф.-м. н. Черникова А. Г., к. ф.-м. н. Козодаев М. Г., Хакимов Р. Р., Забросаев И. В., Колинько К. С., д. т. н. Маркеев А. М.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
chernikova.ag@mipt.ru

В данной работе рассматриваются основы технологии формирования сегнетоэлектрического полевого транзистора на основе тонкопленочного сегнетоэлектрика $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$, полученного методом атомно-слоевого осаждения, и двумерного MoS_2, использующегося в качестве полупроводникового канала. Обсуждаются функциональные характеристики такого устройства, включая окно памяти и возможность реализации различных стабильных состояний проводимости канала. Полученные результаты могут быть полезны для дальнейшей разработки устройств для in-memory computing, полностью совместимых с КМОП-технологией и обладающих высоким потенциалом масштабирования.

Ключевые слова: MoS_2; сегнетоэлектрики; оксид гафния; $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$; атомно-слоевое осаждение; сегнетоэлектрический полевой транзистор.

Современные процессоры выполняют огромное количество сложных операций, требующих постоянного перемещения данных между памятью и вычислительными блоками. Это приводит к снижению производительности и росту энергопотребления. В ряде исследований было показано, что на перемещение значительных объемов данных может приходиться до трети общего энергопотребления, связанного с выполнением вычислительной задачи [1]. В этой связи все более актуальной становится реализация подходов, направленных на повышение эффективности работы с данными.

Одним из таких подходов является in-memory computing, суть которого заключается в хранении и обработке данных одним устройством. Очевидно, что такой подход требует объединения основных функциональных свойств логических транзисторов (таких как быстродействие) и ячеек памяти (энергонезависимость, долговременное хранение данных) в одном элементе. Одной из обсуждаемых концепций для in-memory computing является сегнетоэлектрическая память, наиболее перспективным подходом к реализации которой является сегнетоэлектрический полевой транзистор (FeFET, ferroelectric field-effect transistor).

FeFET, наряду с высоким быстродействием и энергонезависимостью, обладает такими преимуществами, как недеструктивное считывание состояний и хороший потенциал масштабирования, в отличие от более традиционной ячейки 1T-1C (один транзистор — один конденсатор) FeRAM. Тем не менее, несмотря на высокую перспективность FeFET, его практическая реализация долгое время оставалась затруднительной из-за проблем интеграции классических перовскитных сегнетоэлектриков с кремниевыми каналами.

Открытие сегнетоэлектричества в HfO_2 и $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ радикально изменило представления о возможностях создания FeFET. Дело в том, что HfO_2, массово используемый в технологии high-k metal gate (HKMG) для кремниевых транзисторов с 2007 года, технологически совместим с существующими CMOS-процессами и лишен недостатков перовскитных сегнетоэлектриков. Подтверждением этому служит быстрая эволюция технологии FeFET на основе HfO_2/ $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ — от первых демонстраций работоспособности [2] до интеграции в 28-нм техпроцессы HKMG и создания вертикальных ультраплотных массивов FeFET [3, 4].

С другой стороны, для преодоления пределов современной миниатюризации и продления действия закона Мура актуальным становится создание устройств с ультратонким полупроводниковым каналом. Однако основной материал микроэлектронной промышленности — кремний — демонстрирует критическое падение подвижности носителей при уменьшении толщины канала до единиц нанометров. В этих условиях все большее внимание привлекают двумерные (2D) полупроводники, такие как MoS_2, WS_2, WSe_2 и др., поскольку в последние годы достигнуты существенные успехи в росте монослойных пленок MoS_2 электронного качества на подложках коммерчески значимой площади, с подвижностью носителей ~40 $см^2/В{\cdot}с$, что значительно выше подвижности в кремнии сравнимой толщины [5].

В настоящей работе исследовалась возможность создания FeFET на основе $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$, в котором в качестве полупроводникового канала используется двумерный MoS_2. Особое внимание уделялось архитектуре формирования сегнетоэлектрического затворного стека и возможности осаждения качественного подзатворного диэлектрика непосредственно на MoS_2 методом атомно-слоевого осаждения (АСО). Измерения устройств как в режиме подачи активного напряжения на затвор, так и в импульсном режиме подтвердили возможность формирования устойчивого окна памяти и наличия нескольких стабильных состояний проводимости канала.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00227, https://rscf.ru/project/23-19-00227/).

Литература

1. Marega G. M., Wang Z., Paliy M. et al. Low-Power Artificial Neural Network Perceptron Based on Monolayer MoS_2 // ACS Nano, 2022. Vol. 16 (3). P. 3684–3694.
2. Böscke T. S., Müller J., Bräuhaus D. et al. Ferroelectricity in hafnium oxide: CMOS compatible ferroelectric field effect transistors // IEEE Int. Electron Devices Meeting, 2021. 24–5.
3. Müller J., Yurchuk E., Schlösseret T. et al. Ferroelectricity in HfO_2 enables nonvolatile data storage in 28 nm HKMG // IEEE Symp. on VLSI Technology (VLSIT), 2012. 25–6.
4. Florent K., Pesic M., Subiratset A. et al. Vertical ferroelectric HfO_2 FET based on 3D NAND architecture: towards dense low-power memory // IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM), 2018. 2–5.
5. Sebastian A., Pendurthi R., Choudhury T. H. et al. Benchmarking monolayer MoS_2 and WS_2 field-effect transistors // Nature Communications, 2021. Vol. 12. P. 693.

УДК 537.226.4, 621.3.049.774

Алгоритм детектирования критической степени деградации остаточной поляризации и ошибок чтения в дифференциальных ячейках FeRAM на основе $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$

Константинов В. С.[1,2], **к. ф.-м. н. Захаров П. С.**[1,2]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
vkonstantinov@niime.ru
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе изложен алгоритм, который позволяет выявлять дифференциальные ячейки памяти FeRAM на основе $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ с критической степенью температурной деградации остаточной поляризации и ошибки их чтения.
Ключевые слова: диоксид гафния; сегнетоэлектричество; импринт; ошибка чтения; дифференциальная ячейка памяти FeRAM.

Сегнетоэлектрическая память FeRAM является одним из перспективных видов энергонезависимой памяти, которая, не уступая MRAM и PCRAM в быстродействии, имеет крайне низкое энергопотребление, что делает ее полноправным кандидатом на роль универсальной памяти — памяти, которая совмещает в себе оперативную память и память длительного хранения. В настоящее время известны только серийные микросхемы FeRAM, которые изготавливаются с использованием цирконата-титаната свинца, теряющего свои сегнетоэлектрические свойства при масштабировании [1]. Новые перспективы для FeRAM открылись, когда в 2011 году сегнетоэлектричество было обнаружено [2] в тонких пленках на основе орторомбического диоксида гафния и подтверждено многочисленными последующими исследованиями [3–5] диоксида гафния с добавками Si, Zr, Al и La, в т. ч. и отечественными учеными.

Однако в ходе вышеуказанных исследований установлено, что под действием длительного высокотемпературного воздействия записанная остаточная поляризация деградирует, что может приводить к ошибкам чтения. Как показала А. Чуприк в [6], основным механизмом термической деградации остаточной поляризации в $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ является импринт — поле, которое возникает в результате обратного захвата электронов из кислородных вакансий у одного из интерфейсов пленки и препятствует дальнейшей перезаписи информации.

В микросхемах FeRAM это усугубляется преимущественно бинарным принципом считывания, который основан на сравнении отклика с опорным сигналом, что затрудняет заблаговременное выявление сдеградировавших ячеек.

Предлагаемый ниже алгоритм позволяет выявлять ячейки памяти FeRAM на основе $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ с критической степенью температурной деградации и ошибки чтения в них. Этот алгоритм применим для дифференциальной ячейки FeRAM [7], и его суть состоит в том, чтобы детектировать сигнал в три этапа. Первый этап заключается в том, чтобы зарегистрировать зарядовый сигнал на переднем фронте, второй — на заднем фронте управляющего сигнала и третий — чтобы сравнить их

абсолютные величины и полярность. Критический уровень деградации остаточной поляризации и ошибка чтения регистрируются в случае, если абсолютная величина отклика на первом шаге меньше, чем абсолютная величина отклика на втором шаге, и их полярности противоположны. Этот алгоритм позволяет повысить надежность хранения и чтения данных в микросхеме FeRAM с дифференциальной ячейкой.

Подробно обоснование и вариант схемотехнического решения алгоритма раскрываются в патенте на изобретение [8].

Алгоритм разработан в рамках проекта Фонда перспективных исследований «Радиационно стойкая энергонезависимая память», шифр «Магнит».

Литература

1. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128.
2. Böscke T. S. et al. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films // Applied Physics Letters, 2011. Vol. 99. № 10.
3. Hyuk Park M. et al. Evolution of phases and ferroelectric properties of thin $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ films according to the thickness and annealing temperature // Applied Physics Letters, 2013. Vol. 102. № 24.
4. Chernikova A. G. et al. Ferroelectric properties of full plasma-enhanced ALD TiN/La:HfO_2/TiN stacks // Applied Physics Letters, 2016. Vol. 108. № 24.
5. Chouprik A. et al. Nanoscale doping and its impact on the ferroelectric and piezoelectric properties of $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ // Nanomaterials, 2022. Vol. 12. № 9. P. 1483.
6. Chouprik A. et al. Origin of the retention loss in ferroelectric $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$-based memory devices // Acta Materialia, 2021. Vol. 204 P. 116515.
7. Sheikholeslami A., Gulak P. G. A survey of circuit innovations in ferroelectric random-access memories // Proceedings of the IEEE, 2002. Vol. 88. № 5. P. 667–689.
8. Ермаков И. В., Захаров П. С., Итальянцев А. Г., Константинов В. С., Шульга Ю. В., Филатов С. А. Способ регистрации логического состояния ячейки сегнетоэлектрической памяти для предотвращения потери данных при чтении и выявлении ячеек с повышенной степенью деградации и устройство блока для его реализации / Патент РФ № 2 840 059 C1. Заявл. 17.09.2024; опубл. 16.05.2025. — URL: https://www.fips.ru (дата обращения: 01.06.2025).

УДК 004.94:621.382.323

Разработка и оптимизация конструкции 65-В n-канального LDMOS-транзистора для 130-нм BCD-технологии

Лапин А. Е., Ларионова Д. С., Гурковский Б. В., Козлов Е. В.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
alapin@nm-tech.org, larionova@nm-tech.org, gurkovsky@nm-tech.org, ekozlov@nm-tech.org

В статье продемонстрированы результаты процесса разработки и оптимизации конструкции 65-В n-LDMOS-транзистора — ключевого компонента разрабатываемой 130-нм BCD-технологии. В результате оптимизации удалось достичь требуемых характеристик — специфичного сопротивления R_{SP} и пробивного напряжения BV_{DSS}.

Ключевые слова: LDMOS-транзистор; BCD-технология; LDD-область; RESURF-технология; TCAD.

Ключевыми компонентами любой BCD-технологии, отличающей ее от классической КМОП-технологии, являются высоковольтные (HV — high voltage) МОП-транзисторы с латеральной диффузией (LDMOS — laterally diffused metal-oxide-semiconductor), оптимизированные для достижения минимально возможного специфичного сопротивления R_{SP} при сохранении заданного уровня пробивного напряжения BV_{DSS} [1].

Процесс интеграции таких приборов в технологический маршрут классической КМОП-технологии сопряжен с введением большого количества дополнительных технологических блоков. Разрабатываемая 130-нм BCD-технология имеет следующие общие с другими BCD-технологиями [2] особенности:

- использование низкоомной объемной (bulk) p^{++} Si-подложки;
- наличие скрытого n^+-слоя и глубоких канавок (DTI — deep trench isolation), обеспечивающих изоляцию высоковольтных и низковольтных частей будущих ИС;
- наличие в маршруте операций по выращиваю двух эпитаксиальных слоев заданной толщины и концентрации, позволяющих контролировать уровень пробивного напряжения *p*-*n*-диода подложка — скрытый слой.

Разрабатываемая конструкция 65-В *n*-канального LDMOS-транзистора, ключевого компонента указанной технологии, включает в себя не менее двух высоковольтных *n*- и *p*-карманов, а также отдельную область для обеспечения электрического контакта к скрытому n^+-слою. Данные факторы влияют как на уровень пробивного напряжения BV_{DSS}, так и на величину специфичного сопротивления R_{SP}, которые зависят также от толщин и концентраций эпитаксиальных слоев, топологических размеров (областей дрейфа, аккумуляции, канала, расстояния до области контактирования к скрытому n^+-слою), а также конструкции LDD-области со стороны стока [3, 4]. Большое количество влияющих на характеристики прибора параметров приводят к повышенной сложности задачи оптимизации конструкции транзистора и увеличивают сроки разработки.

Выбор оптимальной стратегии по оптимизации топологии, а также LDD-области транзистора, представляющей из себя перевернутую двойную

RESURF-область, позволили достичь, согласно результатам, полученным с помощью приборно-технологического моделирования в среде TCAD, требуемого техническим заданием уровня характеристик для 65-В *n*-канального LDMOS-транзистора — специфичного сопротивления R_{SP} менее 100 мОм·мм^2 и пробивного напряжения $BV_{DSS} \geq 78$ В, что соответствует 20%-му запасу относительно V_{DS_MAX} для данного прибора.

Литература

1. Riccardi D., Causio A., Filippi I., Paleari A. BCD8 from 7V to 70V: a new 0.18um Technology Platform to Address the Evolution of Applications towards Smart Power ICs with High Logic Contents // Proceedings of the 19th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, 2007. Vol. 1. № 1. P. 73–76.
2. Park I., Choi Y., Ko K., Yoon C. BD180 — a new 0.18um BCD (Bipolar-CMOS-DMOS) Technology from 7V to 60V // Proceedings of the 20th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, 2008. Vol. 1. № 1. P. 64–67.
3. Vestling L. Design and Modeling of High-Frequency LDMOS Transistors. Uppsala University, 2002. 55 p.
4. El-Kareh B., Hutter L. Silicon Analog Components Device Design, Process Integration, Characterization, and Reliability. Springer, 2020. 648 p.

УДК 621.31

Сравнение эффективности механизмов горячих носителей и туннелирования при программировании ячеек энергонезависимой памяти SONOS

Червонный Д. В., Арилин Р. А., Захаров П. С., Ермаков И. В., Зубов И.А.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
dchervonnyy@niime.ru

Представлено сравнение эффективности механизмов переноса заряда в слой нитрида кремния в структуре памяти SONOS, продемонстрировано сравнение скорости деградации логических состояний ячейки памяти SONOS при данных механизмах.

Ключевые слова: SONOS; горячие носители; туннелирование; HCI; встроенная память; способ записи и стирания; скорость деградации логических состояний.

Технология SONOS была представлена еще в середине 1970-х годов, однако из-за своих специфических особенностей актуальна до сих пор. Низкая себестоимость, простая интеграция в технологический процесс и радиационная стойкость — ключевые параметры технологии, позволяющие ей быть востребованной в качестве встроенной памяти для различных применений [1].

Ячейка памяти SONOS, разработанная в АО «НИИМЭ», представлена в виде стандартной структуры КМОП-транзистора с многослойным затвором, состоящим из туннельного оксида, запоминающего слоя нитрида кремния и блокирующего оксида кремния, располагающегося непосредственно под слоем поликремния [2]. Туннельный слой оксида кремния используется в качестве преодолеваемого барьера для носителей заряда в случае переноса в область нитрида кремния и в качестве блокирующего барьера при хранении заряда в слое нитрида. Нитрид кремния используется в качестве основного «запоминающего» слоя, захватывающего и удерживающего заряд посредством механизма захвата заряда на ловушках (Charge Trap), тем самым определяя пороговое напряжение структуры и, следовательно, логическое состояние «0» или «1». Блокирующий слой оксида кремния используется в качестве барьера при нежелательном переносе заряда из области нитрида кремния в область поликремния [3]. Существует два основных механизма переноса носителей заряда в область нитрида кремния: туннелирование и инжекция горячих носителей HCI (Hot Carrier Injection) [4]. При исследовании этих механизмов в операциях программирования ячейки памяти SONOS наблюдаются существенные отличия по нескольким ключевым параметрам, таким как величина логического окна при циклировании, скорость деградации логического окна при хранении и величина токов потребления в момент записи [5].

Литература

1. Красников Г. Я., Мещанов В. Д., Шелепин Н. А. Семейство микросхем ПЗУ информационной емкостью 4-64 МБИТ для космических применений // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2015. — № 2. — С. 4–10.

2. White M. H., Wang Y. R., Wrazien S. J., Zhao Y. S. Advancements in nanoelectronic SONOS nonvolatile semiconductor memory (NVSM) devices and technology // International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2006. Vol. 16. P. 471–478.
3. Червонный Д. В., Арилин Р. А., Болычев Д. И. // Наноиндустрия, 2021. — Т.13. — № S7 (107). — С. 180–181.
4. Libsch F. R., White M. H. Charge transport and storage of low programming voltage SONOS/MONOS memory devices // Solid-State Electronics, 1989. Vol. 33. № 1. P. 110–118.
5. Червонный Д. В., Арилин Р. А., Болычев Д. И. // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8 (113). — С. 107–108.

УДК 53.097

Мемристивные стуктуры на основе энергонезависимых фазопеременных материалов и оксидов переходных металлов

Михалевский В. А.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Разработаны образцы мемристивных кроссбар-структур на основе халькогенидных фазоизменяемых материалов (GeTe) и на основе оксидов переходных металлов (NbO_x). Проведено сравнение их свойств и динамики резистивного переключения.

Ключевые слова: мемристоры; кроссбар-структуры; фазопеременные материалы; оксиды переходных металлов.

Мемристор, признанный четвертым фундаментальным пассивным элементом электроники, нашел успешное воплощение в наноразмерных архитектурах на основе тонких пленок и кластеров наночастиц [1]. Ключевая особенность мемристоров — способность к управляемой модуляции электрического сопротивления и долговременному сохранению множества промежуточных резистивных состояний. Эта функциональность, аналогичная синаптической пластичности в биологических нейронных сетях, открывает широкие перспективы для разработки реконфигурируемых интегральных схем нового поколения, нейроморфных вычислений и систем искусственного интеллекта [2].

Возможным кандидатом для построения мемристоров являются халькогенидные фазопеременные материалы, такие как GeTe и $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST225), использовавшиеся ранее в оптических накопителях (DVD-RW, Blu-ray) и энергонезависимой памяти (PCRAM) [3]. Традиционно фазовый переход между аморфным и кристаллическим состояниями индуцируется коротким лазерным нагревом из-за необходимости высоких скоростей охлаждения (порядка 10^{11} K/c). Значительной альтернативой является использование коротких электрических импульсов, обеспечивающих локальный джоулев нагрев и управление фазовым состоянием [4]. Высокая скорость переключения (наносекунды и менее) делает эти материалы очень привлекательными для создания реконфигурируемых электронных устройств. Важнейшим свойством является возможность реализации в одной ячейке на основе тонкой халькогенидной пленки множества устойчивых резистивных состояний [5].

Целью работы является детальное исследование механизмов обратимого электрически индуцированного фазового перехода в тонкопленочных кроссбар-структурах на основе GeTe и сравнительный анализ их характеристик со свойствами аналогичных структур на основе оксидов переходных металлов (NbO_x).

Исследовано влияние параметров внешних электрических импульсов на процессы кристаллизации и аморфизации в GeTe-кроссбар-ячейках. Методика заключалась в измерении и комплексном анализе импульсных вольт-амперных характеристик для отслеживания динамики изменения сопротивления образцов в процессе переключения.

Проведено прямое сравнение ключевых параметров обратимого резистивного переключения в GeTe-структурах и структурах на основе NbO_x.

Определен потенциал халькогенидных материалов (на примере GeTe) в качестве конкурентной платформы для создания высокоэффективных мемристивных устройств по сравнению с широко изучаемыми мемристорами на основе оксидов переходных металлов [6].

Проведенные исследования убедительно демонстрируют, что тонкопленочные кроссбар-структуры на основе GeTe являются высококонкурентной платформой для разработки энергоэффективных мемристивных устройств. Установлено, что электрически индуцированные фазовые переходы в GeTe обеспечивают высокую скорость переключения, стабильные многоуровневые состояния и превосходную управляемость параметрами импульса (длительность, амплитуда), однако являются более требовательными к топологии структур по сравнению со структурами на основе NbO_x. Полученные результаты подтверждают потенциал GeTe как альтернативы традиционным оксидным мемристорам, выделяют его ключевые преимущества и технологические сложности для создания перспективных нейроморфных систем и реконфигурируемой электроники следующего поколения.

Литература

1. Chua L. // IEEE Transactions on circuit theory, 2003. 18, 5. P. 507–519.
2. Jin P., Wang G., Liang Y., Iu H. H. C., Chua L. O. // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2021. 68, 11. P. 4419–4432.
3. Kolobov A. V., Tominaga J. Chalcogenides: Metastability and Phase Change Phenomena. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
4. Raoux S., Wutting M. (ed.). Phase Change Materials. Science and Applications. Springer Science+Business Media, 2009.
5. Sarwat S. G. // Materials Science and Technology, 2017. 33, 16. P. 1890–1906.
6. Chen P., Zhang X., Liu Q., Liu M. // Applied Physics A, 2022. 128, 12. P. 1113.

УДК 621.382

Использование термически разлагаемого полимера, нанесенного газофазным осаждением, для травления low-k-диэлектрика с малым повреждением

Резванов А. А.[1,2], Горохов С. А.[1,2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
arezvanov@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В настоящей работе будет рассмотрен подход заполнения пор low-k-диэлектриком полимера из газовой фазы, который позволяет существенно снизить его повреждение в процессе плазмохимического травления.
Ключевые слова: нанопористые материалы; low-k-диэлектрики; полимер; плазменное травление.

В настоящее время наибольший интерес вызывают низкопористые p-OSG (k > 2,5, пористость <20 %). Однако низкая пористость и небольшие размеры пор не способствуют заполнению с использованием обычного метода из-за сложной полимерной транслокации. Поэтому интересно исследовать альтернативные методы защиты, основанные на использовании органических веществ с малым молекулярным размером, которые могут проникать в пористые структуры в качестве мономеров, а затем полимеризоваться *in situ*, также уделяя внимание модификациям технологического процесса, направленным на минимизацию воздействия жестких плазменных сред [1, 2]. В настоящей работе описывается альтернативный метод защиты от плазмы с использованием мономеров на основе диизоцианата и диамина, молекулярный объем которых достаточно мал, чтобы проникать в субнанометровые поры. В первой части данного исследования описываются экспериментальные детали, включая процесс осаждения полимера. Затем оценивается воздействие плазмы CO_2, используемой в процессе удаления остатков фоторезиста, для различных диэлектриков p-OSG, что указывает на то, что для самых передовых технологических норм даже материалы с низкой пористостью сильно повреждаются в данном технологическом процессе. В последнем абзаце будет приведено описание, как термически разлагаемые полимеры могут использоваться в качестве защитной заглушки во время процесса удаления фоторезиста.

Мономеры выбирались на основе их молекулярного размера (~0,7 нм) и устойчивости к травлению плазмой, т. е. содержат циклический алкан. В процессе осаждения подложки нагреваются до 60–100 °C, давление в реакционной камере поддерживается ниже 1 Торр и каждый мономер вводится последовательно, разделенный этапами продувки N_2. При использовании этого подхода на кремниевых пластинах скорость осаждения составила 0,2 нм/мин (~0,1 нм/цикл с однородностью 1-сигма 4,1 %). Плотность полимерной пленки, осажденной на кремниевую пластину, составляет порядка 1,24 г/см^3.

На рис. 1 показано повреждение различных low-k-диэлектриков (разная пористость, размер пор, диэлектрическая проницаемость и др.) в процессе воздействия плазмой CO_2 при фиксированной мощности, потоке газа, давлении, но с вариацией по времени — 10, 30, 40 и 60 секунд. Наибольший ущерб наблюдается для высокопористых материалов (SOG-2.2, OSG-2.3), для которых характерна наибольшая деструкция метильных групп и большой пик воды уже после 10 секунд воздействия плазмы CO_2. Для промежуточных материалов, таких как OSG-2.55 и OSG-2.4, характерно меньшее повреждение.

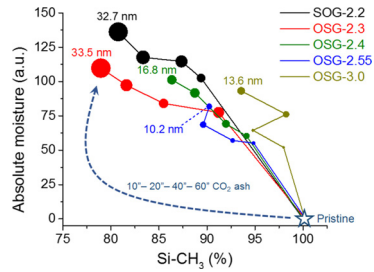


Рис. 1. 2D-карта повреждения для различных low-k-диэлектриков в плазме CO_2 в зависимости от времени

В процессе удаления фоторезистивной маски в плазме CO_2 происходит повреждение low-k, глубина повреждения может составлять несколько десятков нанометров в объемном диэлектрике. Повреждения low-k в данном процессе можно подавить, избегая контакта поверхности диэлектрика с плазмой CO_2. На рис. 2 показаны статистические данные RC-измерений, полученные для меандров вида вилка-вилка для Cu/low-k с переменным шагом, и проиллюстрирован эффект использования полимерной заглушки для защиты диэлектрика от деградации во время плазменного удаления SOC. Для большого шага (>120 нм) эффект незначителен. Однако использование полимерной заглушки позволяет поддерживать значение диэлектрической постоянной ближе к его изначальному значению на половине высоты траншеи, следовательно, с ~55%-м снижением RC-задержки.

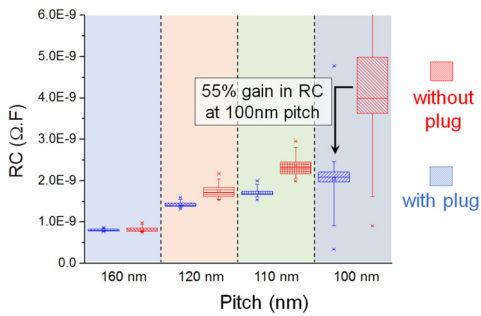


Рис. 2. Значения RC-задержек, полученные для меандров вида вилка-вилка с использованием Cu/low-k

Литература

1. Красников Г. Я. и др. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4 (177). — С. 60–64.
2. Rezvanov A. et al. Use of a Thermally Degradable Chemical Vapor Deposited Polymer Film for Low Damage Plasma Processing of Highly Porous Dielectrics // Appl. El. Mat., 2019. Vol. 1. P. 2602.

УДК 621.382

Атомно-слоевое осаждение TiO_2 нанометровой толщины на двумерные полупроводниковые материалы: MoS_2

Маркеев А. М., д. т. н., Романов Р. И., Забросаев И. В., Лебединский Ю. Ю., Смирнова В. В., Ли В., Смирнова В. В., Завидовский И. А., Большаков А. Д., д. ф.-м. н.

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Ключевые слова: двумерные полупроводники; MoS_2; обратная подпороговая крутизна; омические контакты; атомно-слоевое осаждение; туннельно-тонкий TiO_2.

MoS_2 — полупроводник с ван-дер-Ваальсовой связью, вследствии чего относительно легко может быть получен в монослойном виде (~0,7 нм), сохраняя при этом низкую шероховатость поверхности. Недавние успехи в росте MoS_2 полупроводникового качества на больших площадях в сочетании с его уникальными свойствами ставят этот полупроводник в ряд наиболее перспективных материалов для МДП-транзисторов с ультратонким (≤3–5 нм) каналом. К таким свойствам двумерного MoS_2 обычно относят [1]:

- высокий электростатический контроль канала, что обеспечивает низкую обратную подпороговую крутизну ~70 мВ/дек при длинах канала менее 10 нм;
- подвижность носителей монослойного MoS_2 составляет величину ~50 $В^2$/см·с против ~5 $В^2$/см·с у кремния при сопоставимой толщине;
- высокая (~1,8 эВ) ширина запрещенной зоны MoS_2 подавляет прямое туннелирование между истоком и стоком, т. е. обеспечивает низкий Off-ток для транзисторов с длиной канала ≤10 нм.

Однако на пути интеграции MoS_2 в микроэлектронику остается нерешенным ряд серьезных проблем. Среди них разработка технологии Gate All Around, получение подзатворных диэлектриков на химически инертной поверхности MoS_2, разработка технологии контактов исток-сток с низким сопротивлением. Последняя проблема является одной из самых сложных. Действительно, MoS_2 характерен тем, что в него могут проникать электронные орбитали металлов контактов. В результате в запрещенной зоне MoS_2 возникают так называемые индуцированные металлом состояния (Metal Induced Gap States (MIGS)). MIGS делают неэффективным подбор металлов по работе выхода для получения минимального барьера на границе раздела контакт — MoS_2. В результате сопротивление контактов исток-сток в MoS_2 практически на два порядка уступает сопротивлению омических контактов к кремнию.

В этой связи для решения проблемы высокого барьера Шоттки, т. е. для получения контактов исток-сток с низким сопротивлением, требуются другие подходы. Одним из способов решения было бы встраивание между металлом контакта и MoS_2 слоя туннельно-тонкого диэлектрика, который, с одной стороны, препятствовал бы проникновению электронных орбиталей металла в полупроводник, а с другой стороны, был бы достаточно тонким, чтобы исключить повышение барьера за счет диэлектрика.

В данной работе были рассмотрены параметры, которым должен соответствовать туннельно-тонкий диэлектрик для снижения барьера Шоттки в контактах металл — MoS_2. К таким диэлектрикам следует отнести TiO_2, который, согласно расчетам, должен иметь практически нулевой барьер по отношению к зоне проводимости MoS_2 и иметь толщину ~1–1,5 нм. Атомно-слоевое осаждение (АСО) является общепризнанной технологией получения тонких диэлектриков практически с атомарным уровнем контроля толщины. Однако следует отметить, что АСО требует наличия химически активных центров на исходной поверхности, которые практически отсутствуют на поверхности ван-дер Ваальсовых материалов. В этой связи в данной работе был проведен цикл исследований по разработке процесса АСО сверхтонких (~1 нм) слоев TiO_2 на поверхности MoS_2. Исследования проводили как на модельной поверхности монокристаллов MoS_2, так и на поверхности MOCVD слоев MoS_2. Было показано, что эффективность АСО процесса MoS_2 можно повысить путем снижения температуры роста. Однако этого оказалось недостаточно для обеспечения сплошности TiO_2 при толщинах ~1 нм. В результате была применена функционализация поверхности MoS_2 путем облучения ее ионами He, что позволило вырастить сплошные слои TiO_2 толщиной ~1 нм. Методом РФЭС было показано, что именно сплошные слои TiO_2 обеспечивают практически нулевой барьер Шоттки между TiO_2 и MoS_2.

Разработанный процесс АСО сверхтонкого TiO_2 на поверхности MoS_2 был использован для модификации барьера Шоттки с различными металлами, а также для блокировки нежелательных химических реакций между некоторыми металлами и MoS_2.

Литература

1. O'Brien K. P. et al. Process integration and future outlook of 2D transistors // Nature Communications, 2023. Vol. 14. P. 6400.

УДК 621.3.049

Структура и электрические свойства пленок MoS_2, синтезированных методом металлоорганического химического осаждения из газовой фазы

Романов Р. И., Смирнова В. В., Ли В., Маркеев А. М., д. т. н.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
romanov.ri@mipt.ru

Выделены основные режимы роста пленок MoS_2 в процессе металлоорганического химического осаждения из газовой фазы в зависимости от потока несущего газа и определены их основные особенности. В разных режимах исследовано влияние температуры роста на структуру и электрические свойства пленок.

Ключевые слова: MoS_2; MOCVD; окислительное травление.

Двумерные пленки дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), характерным представителем которых является MoS_2, обладают уникальными структурными и электронными свойствами, что делает их перспективными для использования в полевых транзисторах, сенсорах и других электронных и оптоэлектронных устройствах нового поколения [1]. Металлоорганическое химическое осаждение из газовой фазы является одним из наиболее перспективных методов контролируемого синтеза пленок ДПМ на промышленнозначимых площадях. Синтезируемые этим методом пленки обладают достаточно высоким качеством для применения в электронных приборах. Однако сказываются недостатки, присущие этому методу, такие как относительно малый размер кристаллических доменов, низкая скорость роста и возможное содержание углеродных загрязнений [2]. В данной работе было проведено исследование влияния параметров процесса осаждения на структуру и электрические свойства MoS_2 в целях преодоления упомянутых недостатков и повышения качества синтезируемых пленок.

Синтез проводился в горизонтальном реакторе с горячими стенками. В качестве прекурсоров использовались $Mo(CO)_6$ и H_2S, в качестве несущего газа — аргон. Кроме того, для связывания продуктов реакций использовался H_2, а для окислительного травления углерода — пары H_2O. Было выявлено существенное влияние потока несущего газа. При низком потоке (порядка 100 ст. $см^3$/мин) реализовывался режим трехмерного роста. Для перехода к режиму двумерного роста требовалось увеличение потока примерно до 500 ст. $см^3$/мин. Но при этом на рост влияют продукты разложения прекурсоров, содержащие углерод и кислород. Это приводит к низкой скорости роста и содержанию углерода в пленках. Для удаления углеродных загрязнений использовалось окислительное травление с помощью водяных паров. При увеличении потока несущего газа до примерно 2000 ст. $см^3$/мин скорость роста существенно повышается, а кристаллиты становятся более однородными по форме и размерам. Для режимов среднего (режим II) и высокого (режим III) потоков несущего газа было исследовано влияние температуры на структуру и электрические свойства пленок. Установлено, что в режиме II

при температуре до 850 °C наблюдается послойный рост, а размер зерен составляет 10–50 нм. Для этих пленок характерно относительно невысокое электрическое сопротивление (R_{sh} ~ 10^6 Ом/кв.) Тогда как при температурах от 900 °C размер зерен колеблется в пределах 20–200 нм, а сопротивление пленок на несколько порядков выше. Для пленок, синтезированных в режиме III, было исследовано влияние температуры в диапазоне от 850 до 1000 °C на структуру, преимущественную ориентацию зерен и электрические свойства пленок.

Литература

1. Sebastian A., Pendurthi R., Choudhury T. H., Redwing J. M., Das S. Benchmarking monolayer MoS_2 and WS_2 field-effect transistors // Nature communication, 2021. Vol. 12. P. 693.
2. Lee D. H., Sim Y., Wang J., Kwon S.-Y. Metal–organic chemical vapor deposition of 2D van der Waals materials—The challenges and the extensive future opportunities // APL Mater., 2020. Vol. 8. P. 030901.

УДК 621.3.049.77

Метод проведения процесса проявления фоторезиста для уменьшения количества дефектов на областях с низкой плотностью рисунка в изготовлении ИС по технологическим нормам 130 нм

Рудометов Я. А., Шелкунов Д. Ю.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
Shelkunov@nm-tech.org

В данной работе предложен метод промывания фоторезиста после проявления для уменьшения количества дефектов, вызванных особенностями взаимодействия позитивных фоторезистов с проявителем, при формировании фоторезистивных масок в областях с низкой плотностью рисунка проекционной ГУФ фотолитографией.

Ключевые слова: фотолитография; химически усиленные фоторезисты; глубокий ультрафиолет; проявление; каплевидные дефекты; технологическая норма 130 нм.

С переходом на технологические нормы изготовления ИС размером 130 нм и ниже уменьшается допустимый размер и количество дефектов после проведения технологических операций. Особенно критичны дефекты после выполнения операций фотолитографии, такие как осажденные частицы на вскрытых областях фоторезистивной маски, а также повреждение топологии. Эти дефекты влияют на качество формирования топологии в функциональных слоях такими методами, как имплантация, реактивно-ионное травление и другие, что существенно влияет как на функциональность изготавливаемой ИС, так и на коэффициент выхода годных. Поэтому в современном производстве ИС стало особенно важно контролировать количество дефектов сформированной фоторезистивной маски.

Одним из дефектов при формировании фоторезистивных масок с областями низкой плотности рисунка является возникновение каплевидных дефектов. Эти дефекты образуются из-за взаимодействия фоторезиста и несогласованного под него проявителя, а также резкого изменения pH, происходящего во время промывания пластины в деионизированной воде от проявителя [1]. В результате этого происходит кластеризация фоторезиста в открываемых областях фоторезистивной маски с последующим его переосаждением. Проявлением «воздушного» изображения в фоторезисте формированием нескольких луж от 2–5 можно значительно уменьшить количество подобных дефектов [2], но это влечет за собой изменение размера сформированных структур, а также в определенных условиях не оказывает никакого влияния на количество дефектов.

Предложенный метод уменьшения дефектов заключается в проявлении пластины центрифугированием в одинарной луже и промывании пластины деионизированной водой сканирующим движением от края к центру с замедленной скоростью движения руки подачи деионизированной воды. Данный метод был внедрен в отечественную технологию изготовления ИС по техноогическим нормам 130 нм и показал снижение количества дефектов при формировании фоторезистивной

маски с областями низкой плотности рисунка на 93% по сравнению с классическим методом промывания пластины с подачей воды в центр пластины.

Литература

1. Wei Y. Advanced processes for 193-nm Immersion lithography // SPIE, 2009. 336 p.
2. Lu Zhijian, Thomas Alan, Gutmann Alois, Chen Kuang-Jung, Lawson C. Margaret, inventor; Infineon Technologies AG, International Business Machines Corp., assignee. Method of reducing post-development defects in and around openings formed in photoresist by use of multiple development/rinse cycles. United States patent US6372408B1. — 2002 Apr. 16.

УДК 533.92

Исследование влияния параметров глубокого реактивного ионного травления на профиль боковых поверхностей при изготовлении элементов МЭМС

Петрова С. В.[1], Коломийцев А. С.[1], Ильин О. И.[1], Житяева Ю. Ю.[1], Гусев Е. Ю.[1], Чебанов М. А.[2]
[1] Южный федеральный университет
347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
malohatko@sfedu.ru
[2] АО «НЗПП Восток»
630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60

В работе представлены результаты исследования влияния аспектного соотношения канавок в элементах МЭМС на вертикальность боковых поверхностей. Выявлено, что при глубоком реактивном травлении аспектное соотношение канавок должно быть не более 5,5:1.

Ключевые слова: глубокое реактивное травление; кремниевые структуры; МЭМС.

Глубокое реактивное ионное травление (ГРИТ) — метод, который используется при изготовлении сложных структур с высоким соотношением сторон [1]. Данный метод является ключевым при производстве МЭМС-элементов [2]. При разработке топологии структур необходимо учитывать, что при травлении широких канавок на дне может возникать эффект «травы» [3], а при травлении узких канавок значительно снижается скорость процесса. Данные недостатки могут привести к нежелательным дефектам, а именно к добавлению наклона боковых стенок [4], что может привести к некорректной работе элементов МЭМС. Таким образом, при выборе режима необходимо учитывать аспектное соотношение канавок для создания вертикальных стенок и минимизации дефектов.

В работе проведено исследование влияния аспектного соотношения канавок в элементах МЭМС на вертикальность боковых поверхностей. Представлена зависимость скорости травления от аспектного соотношения канавок. Выявлено, что скорость травления канавок с большим аспектным соотношением ниже, чем канавок с меньшим аспектным соотношением. Помимо этого, при аспектном соотношении выше 5,5:1 появляется наклон боковых стенок. Таким образом, на основании анализа полученных результатов определены требования к топологии элементов МЭМС, где критически важным параметром является вертикальность боковых стенок.

Представленные результаты позволяют сформировать рекомендации к топологиям структур для изготовления методом ГРИТ и оптимизировать существующие режимы травления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-91-23005 в Южном федеральном университете.

Литература

1. Romano L., Jefimovs K. Editorial for the Special Issue on Recent Advances in Reactive Ion Etching and Applications of High-Aspect-Ratio Microfabrication // Micromachines, 2023. Vol. 14. 1630 p.
2. Бернар-Мулен Э., Уваров А., Дезре Э. Глубокое травление твердых материалов // Наноиндустрия, 2016. — № 6 (68). — С. 106–112.
3. Jansen H., de Boer M., Burger J. et al. The black silicon method II:The effect of mask material and loading on the reactive ion etching of deep silicon trenches // Microelectronic Engineering, 1995. Vol. 27. P. 475–480.
4. Xu T., Tao Z., Li H. et al. Effects of deep reactive ion etching parameters on etching rate and surface morphology in extremely deep silicon etch process with high aspect ratio // Advances in Mechanical Engineering, 2017. Vol. 9. № 12. P. 168781401773815.

УДК 621.3.049.77

Определение параметров технологических операций плазменного травления и метода химической очистки для удаления полимерной высадки при изготовлении ИС по технологическим нормам 250 нм и ниже

Сафронова Ю. С., Шелкунов Д. Ю., Артамонова К. В., Рудометов Я. А., Селезнева А. В., Русанова К. Д.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org

В работе представлены основные результаты по определению параметров проведения технологических операций плазменного травления по фоторезистивной маске и последующего метода химической очистки для удаления полимерной высадки при изготовлении ИС по технологическим нормам 250 нм и ниже.
Ключевые слова: фотолитография; дефектность; плазменное травление; химическая очистка; РЭМ; полимерная высадка.

Одним из характерных видов дефектов, возникающих при удалении фоторезистивных масок (ФРМ) при помощи плазменного травления и химической обработки, является полимерная высадка. Подобные дефекты на различных этапах изготовления ИС могут привести к деградации подзатворного диэлектрика, токам утечки между основными областями транзисторных структур и между металлическими шинами, а также к искажению геометрии элементов (например, к уменьшению расстояния между проводящими дорожками).

Для устранения полимерной высадки были проведены эксперименты с группами полупроводниковых пластин со слоем оксида кремния и сформированной ФРМ с топологическими размерами 250 и 130 нм. Последовательность операций состояла из плазменного травления пластин и жидкостной химической очистки. После плазменного травления наблюдалось образование полимерной высадки вследствие реакции фоторезиста с углеродсодержащими газами. Контроль наличия полимерной высадки проводился с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). На основе результатов РЭМ-контроля выполнялись подбор и сравнение режимов травления — изменялись расход газов и состав газовой смеси, а также сравнение методов химической обработки — изменялся состав реагентов смеси для удаления полимерной высадки.

Анализ результатов, полученных в ходе экспериментов, позволяет сделать вывод о том, что уменьшение потока C_4F_8 на этапе плазменного травления позволяет уменьшить образование полимерной высадки. Режим травления с добавлением O_2 в состав газа образует более плотную по структуре высадку, которая не удаляется ни одним из использованных режимов химической очистки — на пластинах остается большое количество дефектов. При обработке в стандартном растворе для удаления полимерной высадки наблюдалось подтравливание нижележащего слоя металлизации, при обработке в измененном растворе данный недостаток отсутствовал. При проведении обработки, состоящей из операций плазменного травления с уменьшенным потоком C_4F_8 и химической очистки в измененном растворе,

остатков полимерной высадки не наблюдалось. Применение подобранных параметров плазменного травления и метода химической очистки в измененном растворе для удаления полимерной высадки позволит снизить общую дефектность производственных процессов и увеличить выход годных изделий для основных технологий, включая 250, 130 нм и ниже.

УДК 621.382.323

Методология оперативного контроля надежности наноразмерных МОП-транзисторов при воздействии горячих электронов

Воеводин А. В., Селецкий А. В., к. т. н., Михайлов А. А., Матвеев Н. Н., Скоморохов Д. В.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
avoevodin@niime.ru

Исследованы N-канальные МОП-транзисторы с длиной затвора 90 нм при воздействии горячих электронов в экстремальном режиме стресса. Приведены результаты. Предложена методология оперативного контроля надежности для оценки стабильности серийных технологических процессов и при разработке технологического маршрута.

Ключевые слова: оперативный контроль надежности; надежность; горячие носители; горячие электроны; ускоренные испытания; WLR; Fast WLR.

Одним из ключевых факторов деградации субмикронных МОП-транзисторов, определяющих их надежность, является инжекция горячих носителей в подзатворный диэлектрик [1]. Измерения надежностных характеристик элементной базы современных технологий с нанометровыми проектными нормами проводятся с помощью ускоренных WLR (wafer level reliability) измерений на пластине. Но так же остро стоит задача оперативного контроля надежности на производстве. Согласно ОСТ 11 0999-99, оперативный контроль надежности, в том числе на воздействие «горячих электронов», проводится с помощью тестовых структур контроля параметров рабочих пластин [2].

Исследовались 90-нм МОП-транзисторы по технологии на объемном кремнии с типоразмерами W/L = 10/0,09; 10/0,1; 10/0,2 (мкм/мкм).

На первом этапе были проведены полноформатные WLR-исследования длительностью стресса tstress = 12000 и tstress = 20000 секунд для каждого из нескольких стрессовых режимов. С помощью математической модели проведены расчеты времени наработки до отказа (TTF) с экстраполяцией на рабочее напряжение Vdd = 1,2 В согласно плану квалификации и методике JEDEC [3].

На втором этапе проведены исследования предпробойных характеристик транзисторов с поиском экстремально высоких возможных напряжений стрессового воздействия для ускорения деградационных процессов. Далее проведены исследования на «горячие электроны» тестовых структур в найденных режимах стрессовых напряжений, лежащих близко к области мягкого пробоя. Это позволило получить все еще стабильные характеристики, сократив время стресса до tstress = 200 с, что оказалось достаточным для достижения критерия условного отказа.

Проведены анализ результатов измерений и сравнение с экстремальными режимами. Построены и проанализированы графики сдвига ЭФП (Ilin, Isat, Vth) от накопленного времени стресса. Построены функции вероятности отказа от накопленного времени стресса. Время tstress может быть сокращено без потери

информативности (тренд сохраняется) до 100 с, что вполне приемлемо и может быть использовано при оперативном контроле надежностных характеристик стабилизированного технологического процесса [4]. Отмечается выраженный тренд и достаточная кучность характеристик с различных точек на пластине с учетом параметрического разброса параметров. При построении функции вероятности распределения отказов от накопленного времени сохраняется корреляция и отмечается неизменность наклона характеристики (параметр Sigma) относительно WLR-измерений.

Установлено, что при оперативном контроле надежности нет необходимости рассчитывать прогнозное значение TTF, приведенное к напряжению питания, не нужно использовать математическую модель и ее подстройку под результаты измерения. Объем измерений (количество режимов) при этом сокращается. Достаточно оперировать параметром TTF, найденным при напряжении стресса. Установлен еще один контролируемый параметр надежности — Sigma-наклон графика функции распределения вероятности от времени стресса.

Сформулирована методология оперативного контроля надежности, основанная на измерениях воздействия «горячих электронов» при экстремально высоком режиме стрессовых напряжений. Контроль стабильности предложено осуществлять путем мониторинга параметров надежности — TTF и Sigma. Данный контроль может стать индикатором ухода технологических параметров от норм и предотвратит затраты на производство, не соответствующие заявленной надежности продукции [5]. Отслеженные изменения в характеристиках надежности сигнализируют о необходимости более детального исследования на надежность обычными методами WLR. Методология также может найти применение в качестве экспресс-анализа надежности при разработке приборов и технологических маршрутов.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — 800 с.
2. ОСТ 11 0999-99. Микросхемы интегральные. Обеспечение качества в процессе разработки. Требования к системе качества разработки.
3. Jedec JESD28-A, Procedure for Measuring N-Channel MOSFET Hot-Carrier-Induced Degradation Under DC Stress.
4. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
5. Martin A., Vollertsen R.-P. An introduction to fast wafer level reliability monitoring for integrated circuit mass production // Microelectronics Reliability, 2004. Vol. 44. P. 1209–1231.

УДК 621.3.049.77

Методология оценки состояния базовых технологий и PDK в условиях изменений

Панасюк В. Н., д. т. н., Королева А. Н., к. т. н., Шипицин Д. С., к. ф.-м. н., Потупчик А. Г., Селецкий А. В., к. т. н.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
akoroleva@niime.ru

В работе рассмотрены методологические вопросы оценки состояния базовых технологий, включающие воспроизводимость и настроенность технологического процесса, а также соответствие параметрам SPICE-моделей в составе PDK. Описаны принципы и подходы по выбору наиболее критических параметров для оценки состояния базовых технологий и PDK в условиях наличия больших данных и ограниченного временного ресурса для принятия решений в отношении технологического процесса и PDK.
Ключевые слова: базовая технология; PDK; стабильность; воспроизводимость.

Несмотря на широкое использование отечественных базовых технологий 250, 180, 90 нм, в отраслевой нормативной базе отсутствуют единые требования к составу и критериям квалификации базовых технологий и опций, позволяющие их ранжировать по степени пригодности для проектирования и производства СБИС [1]. В целях проведения первичной квалификации базовых технологий в АО «НИИМЭ» совместно с производственной линией разработан и внедрен квалификационный реестр базовых технологий и опций, который помимо технологической части включает DRM, PDK, параметрический монитор, нормы электрофизических параметров тестовых структур для базовых технологий, достигнутые результаты по изделиям [1]. Так, АО «НИИМЭ» провело внутреннюю квалификацию 18 базовых технологий, более 60 опций и соответствующих им КСП, успешно разработало на их основе более 100 видов изделий с проектными нормами 250, 180, 90 нм, которые освоены в рамках ОКР или доведены до уровня серийных поставок.

Однако, несмотря на наличие первичной квалификации базовых технологий, вопрос дальнейшего управления базовыми технологиями остается открытым. Основополагающим фактором, определяющим качество БТ, является стабильность формируемой физической и топологической структуры [3], которая в силу различных факторов [2] может быть подвержена серьезным изменениям. Таким образом, управление базовыми технологиями предусматривает, с одной стороны, оценку стабильности и воспроизводимости формируемой физической структуры, а с другой — на основании полученных данных оценку соответствия SPICE-моделей текущему состоянию техпроцесса (что важно для дизайн-центров). Для разработки и формирования физической структуры кристаллов СБИС с использованием базовых технологий требуется более 400 технологических операций, большое количество измерений, более 500 правил проектирования, более 100 параметров SPICE-моделей и т. п. В этой ситуации важна интегральная оценка больших данных и появляется необходимость разработки методологии оценки состояния качества базовой технологии.

В АО «НИИМЭ» разработана и внедрена в системе менеджмента качества процедура такой оценки, в основу которой заложены следующие принципы и подходы.

1. Электрические параметры тестовых структур параметрического монитора являются интегральной оценкой физической и топологической структуры элементной базы (транзисторов, резисторов, конденсаторов и др.).
2. Выбираются критические электрические параметры, состоящие из двух групп:
   - группа параметров элементной базы, которые могут быть также рассчитаны с помощью SPICE-моделей (пороговые и пробивные напряжения, токи насыщения и утечки);
   - группа параметров, характеризующих физическую структуру (поверхностное сопротивление слоев, сопротивление контактных переходов, толщина окисла и т. п.).
3. Выбирается большое количество партий и длительный период наблюдения (не менее трех лет).
4. По каждому критическому параметру строятся контрольный график и гистограмма распределения.
5. По результатам рассмотрения гистограмм проводится оценка нормальности/абнормальности распределения, при абнормальности распределения рассматривается контрольный график для выявления времени и условий выпуска соответствующих партий.
6. Для нормально распределенных гистограмм рассчитываются индексы Cp/Cpk. Для критических параметров индексы установлены на уровне 1,33.
7. Для параметров, имеющих индекс ≤1,33, принимается решение о разработке дополнительных действий по приведению в соответствие технологического процесса, для параметров ≥1,33 выполняется сравнение диапазонов 6σ с диапазоном угловых значений соответствующих SPICE-моделей.
8. Отдельно рассматривается фактор применимости базовой технологии — для серийных поставок малой номенклатуры СБИС или для поставок малых партий большой номенклатуры СБИС: для серийных поставок оцениваются данные по ПВГ изделий — по пластинам, кристаллам, готовым изделиям, для большой номенклатуры малых партий — результаты испытаний готовых изделий в рамках НИОКР.

В результате данной оценки принимаются решения: в отношении технологического процесса и в отношении возможности применения PDK в текущей конфигурации для дальнейшего проектирования СБИС. Здесь важно отметить ограничения, которые накладывает нормативная база при разработке и поставке пластин с кристаллами заказанных элементов, а именно обязательства изготовителя по обеспечению стабильности электрических параметров базовых технологических процессов в соответствии с техническими условиями на пластины. А в случае необходимости изменений технологического процесса, требующих изменения правил проектирования и SPICE-моделей, данная ситуация квалифицируется как разработка нового базового технологического процесса. Это потребует изменения электрофизических параметров тестовых структур и, как следствие, перепроектирования изделий, выпуска новых комплектов КД и ТД на микросхему. Данная ситуация несет серьезные риски, прежде всего для дизайн-центров, осуществляющих разработку и поставку микросхем.

В результате внедрения данной методологии в АО «НИИМЭ» был проведен мониторинг двух базовых технологий уровня 180 нм, по результатам которых были приняты решения о возможности использования PDK в текущей конфигурации для проектирования СБИС, а также проводятся дополнительные мероприятия, связанные с поддержанием параметров воспроизводимости и настроенности технологического процесса. Запланированы работы и по другим наиболее востребованным базовым технологиям в целях обеспечения дизайн-центров возможностями эффективной разработки и изготовления СБИС.

Литература

1. Панасюк В. Н., Королева А. Н., Игнатов П. В., Шипицин Д. С. Проблемы управления качеством базовых технологий микроэлектроники, используемых при проектировании и производстве СБИС // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 178–179.
2. Панасюк В. Н., Королева А. Н., Игнатов П. В. и др. Отдельные аспекты анализа и оценки качества базовых технологий с проектными нормами 180 и 90 нм в условиях ограниченных ресурсов // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 3 (187). — С. 77–88. DOI: 10.7868/S2410993222030101. EDN CPFVSE.
3. Красников Г. Я. Тенденции развития микроэлектронных технологий // Чтения академика В. Н. Болтинского. Сборник статей. — Москва, 2024. — С. 18–31.

УДК 537.533.35

Исследование компенсации проявления эффекта искажения элементов фоторезистивной маски при разрушающем РЭМ-анализе

Рудометов Я. А., Шелкунов Д. Ю., Демидова Ю. Б., к. т. н.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org

В работе рассмотрено решение задачи по компенсации эффекта искажения геометрии элементов фоторезистивной маски с размерами 130 нм и менее, возникающего в процессе анализа формируемых структур на растровом электронном микроскопе.

Ключевые слова: электронная микроскопия; фоторезистивная маска; shrinkage-эффект; критические размеры; пробоподготовка.

На сегодняшний день остается актуальной проблема анализа геометрии и критических размеров (CD) элементов фоторезистивных масок (ФРМ) при контроле фотолитографии с технологическими размерами 130 нм и менее. В некоторых случаях эта задача выполняется с использованием разрушающего исследования на растровом электронном микроскопе (РЭМ). Воздействие электронного пучка РЭМ на исследуемый объект приводит к испарению поверхности ФРМ при получении последней даже минимальной дозы электронного потока (проявляется так называемый shrinkage-эффект). При этом профиль элементов заметно искажается, отчего результаты исследований нельзя считать достоверными, а измерения близкими к прецизионным [1, 2].

Проблема искажения элементов ФРМ существует как для неразрушающего, так и для разрушающего контроля. Для неразрушающего контроля в автоматическом режиме приемлемым решением является минимизация дозы экспозиции при измерениях с помощью применения специальных измерительных методик. Однако даже с помощью них избавиться от эффекта искажения элементов ФРМ не представляется возможным. При масштабировании технологии до уровня 90 нм и менее осуществлять прецизионный контроль CD становится все сложнее в связи с использованием фоторезистов с более высокой массой испаряемого материала. Для одних и тех же материалов изменение размеров в процентном соотношении становится больше. Для разрушающего анализа с помощью РЭМ характерны повышенные дозы электронного пучка, получаемые образцами в силу отсутствия возможности реализации автоматизированных методик, поэтому существует необходимость компенсации эффекта иными способами.

В качестве одного из возможных способов получения реальных размеров структур при разрушающем анализе на РЭМ можно выделить декорирование образцов посредством напыления проводящих пленок, которые могут отвести избыточный заряд пучка микроскопа, а также сформировать собой «жесткий каркас» для ФРМ. Даже при проявлении эффекта искажения размеров этот «каркас» должен отразить истинные размеры структур. Данный принцип используется при локальном исследовании с применением фокусированного ионного пучка (ФИП).

В эксперименте участвовала кремниевая пластина диаметром 200 мм со слоями антиотражающего покрытия (BARC) толщиной 570 Å и химически усиленного фоторезиста для KrF-фотолитографии толщиной 300 нм. Экспериментальные элементы представляли собой массивы линий с целевой шириной 130 нм. При напылении пленки хрома толщиной 160 нм и последующего скола образца в рабочей плоскости выявлено, что из-за возникающих механических напряжений в плоскости скола металл деформируется и искажает профиль элементов ФРМ ввиду пластичности. Соответственно, для корректной реализации разрушающего исследования элементов с напыленной металлической пленкой необходимо использование ионного пучка как метода, не оставляющего механической деформации в рабочей зоне исследования.

При применении методики травления ионным пучком получены приемлемые результаты с минимальным искажением геометрии, что дает основания утверждать, что гипотеза о представлении реальных размеров элементов ФРМ после напыления металлической пленки более чем реалистична. Планируются дальнейшие исследования работы, включающие в себя использование фокусированного ионного пучка и ионной полировки на больших площадях после нанесения проводящих пленок разного состава и толщин.

Литература

1. Habermas A., Hong D., Ross M. F., Livesay W. R. 193-nm CD shrinkage under SEM: modeling the mechanism // SPIE Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVI, 2002. Vol. 4689. P. 92–101. DOI: 10.1117/12.473436.
2. Foucher J., Pargon E., Martin M. The CD metrology perspectives and future trends // SPIE Lithography Asia, 2008. Vol. 7140. P. 88–100. DOI: 10.1117/12.805296.

УДК 537.533

Разработка режима ионной полировки большой площади для разрушающего анализа контактов ИС с помощью РЭМ

Рудометов Я. А., Русанова К. Д.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org

В работе рассмотрено решение задачи разработки режима ионной полировки образцов для растровой электронной микроскопии. Использование метода позволяет проводить пробоподготовку без использования фокусированного ионного пучка двулучевого микроскопа на больших площадях и с низкими временными затратами.
Ключевые слова: ионная полировка; электронная микроскопия; пробоподготовка; разрушающий контроль.

При проведении разрушающего анализа интегральных схем (ИС) с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ) зачастую возникают задачи исследования элементов с хрупкой геометрией, состоящих из тонких слоев, например контактов между слоями или к полупроводнику. Для актуальных отечественных технологических норм (130 нм и менее) характерны элементы структур, требующие прямого анализа. Задача, направленная на контроль результатов любых техпроцессов маршрута для дальнейшего повышения качества и выхода годных, может быть решена с помощью исследования торцов сколов образцов полупроводниковых пластин с изделиями, а также с использованием фокусированного ионного пучка (ФИП), имеющегося в двулучевых микроскопах. Еще одним решением является ионная полировка. Преимущество данного метода заключается в большей относительно ФИП рабочей площади, из-за чего вероятность обнаружить дефекты с низкой плотностью в объеме ИС становится значительно выше. Так же как и ФИП, метод позволяет избежать механической деформации структур на рабочей поверхности образца. При использовании данного метода существует ряд трудностей, включающих в себя перераспределение материала при полировке, а также повреждение целевых элементов исследования. Актуальной прикладной задачей является разработка режима ионной полировки [1, 2].

В эксперименте участвовала кремниевая пластина с элементами многослойной алюминиевой металлизации с вольфрамовыми контактами (четыре слоя). Целью исследования являлся контроль заполнения контактов. Первоначальный режим ионной полировки через маску длительностью 1 час с ускоряющим напряжением 6 кВ, разработанный ранее для сквозного травления подложки, оказался неподходящим в связи с сильным перераспределением материала, из-за чего искомые элементы оказались закрыты. Было решено подобрать временной режим травления.

Были взяты три временных интервала через маску — 5, 10 и 15 минут, без изменения ускоряющего напряжения с варьированием угла падения пучка на ±30 градусов. Прицеливание пучка осуществлялось по оптическому микроскопу, где центр пучка был на границе образца (границе торца скола). Как показали

предварительные эксперименты, выставление центра пучка на ребро маски вызывает большее перераспределение материала образца.

Полировка в течение 5 минут показала хорошие результаты зачистки контактов от материала, претерпевшего механическую деформацию, отчего элементы на торце скола оказались хорошо различимы, поверхность не подверглась значительной деформации и перераспределению материала. Полировка в течение 10 минут привела к деформации элементов на торце скола, однако на плоскости соприкосновения с маской получился ровный «срез». При использовании режима на 15 минут произошло значительное перераспределение материала, отчего элементы оказались закрыты, и торец скола оказался непригодным для исследования в силу деформации контактов.

При отсутствии доступности двулучевого РЭМ с ФИП или задачах, требующих исследования больших площадей при контроле любых техпроцессов маршрута производства ИС, применение ионной полировки целесообразно. При этом при необходимости зачистки торца скола от деформированного вследствие скола материала имеет смысл использовать режим 5 минут и меньше, а при полировке, претендующей на прецизионность попадания, можно выставить маску с помощью оптического микроскопа с приемлемым увеличением. Метод ионной полировки позволяет получить лучшее качество изображения, чем при исследовании торцов сколов без модификации образцов, и вместе с этим на большей площади и со значительно меньшими временными затратами, чем при использовании ФИП. Метод применим для технологических норм 130 нм и менее в связи с минимальными повреждениями внутренней структуры образцов, что позволяет без применения ФИП и расширенной пробоподготовки получить информацию для улучшения актуальных технологических процессов.

Литература

1. Kolosov O.V., Grishin I. and Jones R. Material sensitive scanning probe microscopy of subsurface semiconductor nanostructures via beam exit Ar ion polishing // Nanotechnology, 2011. № 22 (18). 8 p. DOI: 10.1088/0957-4484/22/18/185702.
2. Süess M.J., Mueller E., Wepf R. Minimization of amorphous layer in Ar+ ion milling for UHR-EM // Ultramicroscopy, 2011. № 111 (8). P. 1224–1232. DOI: 10.1016/j.ultramic.2011.03.004.

УДК 004.94:621.382.323:538.971

Моделирование деградации p-канального МОП-транзистора, вызванной эффектом температурной нестабильности при отрицательном смещении затвора

Шарипов А. И.[1], Лапин А. Е.[1], Псху Д. А.[1,2]
[1] ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
asharipov@nm-tech.org, alapin@nm-tech.org, pshu@nm-tech.org
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Представлены результаты калибровки параметров реакционно-диффузионной модели деградации характеристик МОП-транзисторов, вызванной эффектом NBTI, на основании экспериментальных данных. Модель позволяет оценивать влияние NBTI при разработке или оптимизации конструкции приборов.

Ключевые слова: надежность; NBTI; реакционно-диффузионная модель; TCAD; алгоритмы оптимизации; BFGS.

Эффект отрицательной термополевой нестабильности (negative bias temperature instability — NBTI) после своего открытия несколько десятилетий назад относится к одной из самых актуальных проблем надежности субмикронных полевых транзисторов (МОПТ). Данный эффект проявляется в виде сдвига (деградации) порогового напряжения и других электрических характеристик приборов при их работе на повышенных температурах, а также высоком потенциале на затворе, что сокращает срок их службы.

Технологические и конструктивные решения, с применением которых изготовлен транзистор, оказывают первостепенное влияние на его надежность, оптимизация конструкции транзисторной структуры позволяет снизить деградацию характеристик и увеличить срок его службы. При разработке приборов, помимо достижения целевых значений электрофизических характеристик, необходимо также учитывать процессы деградации параметров разрабатываемых транзисторов. Следовательно, существует необходимость в наличии откалиброванной модели деградации, обеспечивающей наиболее приближенный к реальности результат моделирования.

В данной работе представлены результаты калибровки параметров реакционно-диффузионной [1] модели деградации на основании данных ускоренных испытаний 2,5 и 3,3 В *p*-канальных полевых транзисторов, изготовленных по КМОП-технологии с нормами 250 нм, на стойкость к NBTI-эффекту. Модель откалибрована в широком диапазоне стрессовых напряжений и температур с использованием методов оптимизации.

Использование откалиброванной модели позволяет оценивать надежность приборов, тем самым сокращая время разработки и внедрения новых технологических опций в существующие и разрабатываемые маршруты. При этом описанная в работе методика ускоряет процесс перекалибровки модели в случае необходимости при появлении новых экспериментальных данных.

Литература

1. Penzin O. et al. MOSFET degradation kinetics and its simulation // IEEE Transactions on Electron Devices, 2003. Vol. 50. № 6. P. 1445–1450.

УДК 621.382.3:537.2

Исследование особенностей испытаний МОП-транзисторов на стойкость к эффекту термополевой нестабильности

Псху Д. А.[1,2], Максимов Д. А.[1]
[1] ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
pshu@nm-tech.org
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Представлены результаты исследования восстановления характеристик МОП-транзисторов при проведении ускоренных испытаний на стойкость к эффекту BTI. Разработаны рекомендации к методикам тестирования и средствам проведения измерений для повышения достоверности результатов оценки надежности.

Ключевые слова: МОП-транзистор; термополевая нестабильность; ускоренные испытания; надежность.

Эффект термополевой нестабильности (BTI — bias temperature instability) является одним из основных механизмов деградации МОП-транзисторов. При переходе к субмикронным топологическим нормам интегральных схем наблюдается увеличение влияния эффекта BTI на надежность *p*-канальных МОП-транзисторов при отрицательном смещении затвора [1], а применение подзатворных диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью и уменьшение длины канала усиливает влияние эффекта BTI на надежность *n*-канальных приборов при положительном смещении затвора [2].

Отслеживание эффекта BTI в МОП-транзисторах затруднено из-за частичного восстановления характеристик испытанного прибора при снятии стрессового воздействия и зависит от реализации алгоритма тестирования. Данный факт в том числе обуславливает упразднение старого международного стандарта методики испытаний JEDEC Standard JESD90 [3] в 2021 году и переход к универсальной методике, изложенной в стандарте JEDEC Standard JESD241 [4]. Однако, помимо выбора методики тестирования, получаемые результаты могут также зависеть от их реализации на измерительном оборудовании, в связи с чем целью настоящей работы является практическая оценка влияния времени задержки между стрессовым воздействием и измерением параметров на результаты ускоренных испытаний МОП-транзисторов на стойкость к BTI.

Проведенное в работе исследование влияния эффекта восстановления порогового напряжения, измеренного в линейном режиме, V_{tlin}, при ускоренных BTI-испытаниях образцов *p*-канальных МОП-транзисторов с напряжением питания 3,3 В, изготовленных по технологии КМОП 250 нм, с применением методик, указанных выше, позволило установить, что в процессе контроля деградации V_{tlin} между фазами стрессового воздействия не рекомендуется проводить измерение других электрических параметров. Для испытанных образцов дополнительное измерение тока стока в линейном режиме, как самого быстрого из возможных для контроля параметров, приводит к отклонению ΔV_{tlin} до 13 % к 1000-й секунде тестирования относительно методики, контролирующей только V_{tlin}. Методики испытаний,

предусматривающие временные задержки между фазами стрессового воздействия и измерения параметров прибора, равные 1 мс и более, не учитывают эффект восстановления порогового напряжения образцов *p*-канальных МОП-транзисторов.

В работе показано, что уменьшение времени задержки между стрессовым воздействием и измерением параметров МОП-транзистора в методиках оценки BTI оказывает влияние как на абсолютное отклонение, так и на скорость деградации V_{tlin}, способствуя ее снижению. Ввиду широкой применимости рассматриваемых методик испытаний по отношению к образцам МОП-транзисторов, изготовленных по технологическим процессам субмикронного уровня, полученные результаты исследования качественно являются универсальными, однако будут количественно отличаться в зависимости от испытуемых приборов. В случае образцов *p*-канальных МОП-транзисторов показано, что уменьшение времени задержки в алгоритме тестирования с 10 мс до 1 мкс приводит к уменьшению прогнозируемого $|\Delta V_{tlin}|$ за срок службы на 41,5 %.

Литература

1. Schroder D. K. Negative bias temperature instability: What do we understand? // Microelectronics Reliability, 2007. Vol. 47. P. 841–852.
2. Ribes G., Mitard J., Denais M., Bruyere S., Monsieur F., Parthasarathy C., Vincent E., Ghibaudo G. Review on High-k Dielectrics Reliability Issues // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2005. Vol. 5. № 1. P. 5–19.
3. JEDEC Standard JESD90. A procedure for measuring p-channel MOSFET negative bias temperature instabilities. November, 2004. Arlington: JEDEC Solid State Technology Association, 2004. 20 p.
4. JEDEC Standard JESD241. Procedure for Wafer-Level DC Characterization of Bias Temperature Instabilities. December, 2015. Arlington: JEDEC Solid State Technology Association, 2015. 32 p.

УДК 004.942

Исследование влияния температуры и мощности на интенсивность отказов транзистора

Чашкин Л. Б., Полесский С. Н., Тумковский С. Р.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
hse@hse.ru

Данное исследование анализирует взаимосвязь температуры и мощности в германиевом транзисторе МП37, выявляя их совместное влияние на интенсивность отказов через экспериментальные измерения и цифровое моделирование с использованием цифрового двойника. Основным результатом стало обнаружение критической точки температуры, после которой характер зависимости интенсивности отказов от температуры изменяется.
Ключевые слова: электронные модули; цифровые двойники; надежность.

Интенсивность отказов представляет собой ключевой показатель надежности электронных компонентов, количественно характеризующий вероятность их выхода из строя в единицу времени при заданных условиях эксплуатации. Этот параметр имеет критическое значение при проектировании и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры, особенно работающей в экстремальных условиях. Определение интенсивности отказов позволяет не только прогнозировать срок службы оборудования, но и оптимизировать стратегии технического обслуживания, минимизировать простои оборудования и предотвращать аварийные ситуации.

В контексте полупроводниковых приборов, таких как транзисторы, интенсивность отказов существенно зависит от двух ключевых факторов: рабочей температуры и рассеиваемой мощности. Традиционные методы расчета надежности часто рассматривают температуру и мощность как независимые переменные, однако эксперименты, проведенные в данной работе, показали, что эти параметры находятся в сложной взаимосвязи, что требует особого подхода к их анализу.

Математическая модель стандартного подхода предполагает, что $\lambda = f(T, P)$, где T и P — независимые переменные температуры и мощности соответственно. В данной работе дополнительно учитывается зависимость мощности P от температуры T, что влияет на характер функции интенсивности отказов $\lambda = f(T, P(T))$.

В исследовании был проведен анализ влияния этих факторов на примере германиевого транзистора МП37, используемого в усилительном каскаде с общим эмиттером. Экспериментальная часть работы включала контроль измерений электрических и тепловых параметров транзистора в диапазоне температур от 27 до 50 °C. В перспективе планируется расширение диапазона температур.

Особенностью методики исследования стало использование цифрового двойника [1] транзисторного каскада, что позволило проводить параллельное сравнение реальных измерений с результатами компьютерного моделирования. Такой подход обеспечивает высокую точность получаемых данных и возможность верификации теоретических моделей [2].

Результаты исследования выявили несколько важных закономерностей. Во-первых, была подтверждена нелинейная зависимость интенсивности отказов от температуры. При нагреве транзистора до 37,5 °C наблюдался рост рассеиваемой

мощности, что закономерно приводило к увеличению интенсивности отказов. Однако при превышении этого температурного порога мощность начинала снижаться, что связано с ростом обратных токов при высоких температурах. Это явление привело к изменению характера зависимости интенсивности отказов: если в начальной фазе нагрева она определялась совместным действием температуры и мощности, то в высокотемпературной области основным фактором становилась именно температура.

Практическая значимость исследования заключается в возможности более точного прогнозирования надежности электронных устройств, работающих в условиях переменных тепловых режимов.

Проведенное исследование демонстрирует важность комплексного подхода к оценке надежности электронных компонентов, учитывающего взаимное влияние различных физических факторов.

Дальнейшие исследования предполагают расширение модели для других типов транзисторов, а также учет оценки интенсивности отказов транзистора как интегрального показателя надежности всего электронного модуля. Планируется расширение диапазона температур в положительную и отрицательную сторону.

В данной научной работе использованы результаты проекта № ФИ-2025-4, выполненного в рамках программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2025 году.

Литература

1. ГОСТ Р 57700.37-2001 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».
2. Тумковский С. Р., Полесский С. Н., Королев П. С., Чашкин Л. Б., Цветков В. Э., Костюк А. А., Мырова Л. О. Разработка аппаратно-программной платформы для создания цифровых двойников функциональных узлов РЭА // Электросвязь, 2025. — № 6. — С. 37–46.

УДК 621.382

Потеря состояния во FRAM-устройствах на основе тонких пленок оксида гафния-циркония при низких рабочих напряжениях

Калика Е. Б., Марголин И. Г., к. ф.-м. н. Чуприк А. А.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
kalika.eb@phystech.edu

В работе исследуется потеря состояния в устойствах FRAM на основе оксида гафния при низких рабочих напряжениях. На основе экспериментальных данных старения пленок HZO предложена модель, позволяющая рассчитывать время хранения состояния и подбирать оптимальное значение напряжения записи и чтения.

Ключевые слова: FRAM; оксид гафния; энергонезависимая память.

На протяжении последнего десятилетия в сфере современных технологий хранения данных особое место занимают оксид гафния (HfO_2) и оксид гафния-циркония ($Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$, HZO) благодаря их сегнетоэлектрическим свойствам, которые сохраняются при толщинах менее 10 нм, что решает проблему масштабируемости устройств [1]. Устройства сегнетоэлектрической памяти с произвольным доступом (FRAM) на основе оксида гафния имеют наносекундную скорость записи, низкое энергопотребление, и, кроме того, было показано, что их выносливость на несколько порядков превышает выносливость текущего лидера рынка памяти — флеш-память [2]. А ввиду электронной природы записи информации выносливость сегнетоэлектрической памяти потенциально неограничена.

Одной из проблем, мешающих коммерциализации устройств FRAM на основе оксида гафния, является потеря состояния, возникающая из-за явления импринта — сдвига коэрцитивных напряжений в пленке со временем, вследствие которого напряжение переключения некоторых доменов может превысить рабочее напряжение, что приводит к уменьшению значения переключаемой поляризации и может потенциально вызвать ошибку считывания. Данный эффект также называют «старением» пленок. Решением этой проблемы является использование высоких рабочих напряжений, однако они приводят к усилению паразитных явлений в пленке и ускоряют ее деградацию. С другой стороны, низкие рабочие напряжения гарантируют хорошую выносливость устройств, но приводят к частичному переключению пленки, что, как было показано, способствует быстрой потере состояния [3]. Следовательно, выносливость и время хранения состояния в устройствах энергонезависимой памяти связаны друг с другом обратной зависимостью и, таким образом, одной из ключевых задач сейчас является выбор оптимального рабочего напряжения в устройствах FRAM. Исследование данного вопроса усложняется тем, что, согласно требованиям рынка памяти, записанное состояние должно сохраняться в устройстве на протяжении 10 лет. Прямые измерения на таком длинном временном промежутке невозможны, а существующие сегодня методы либо не имеют достаточной физической базы, либо предполагают сильный нагрев

образца, вследствие которого в структуре появляются дополнительные эффекты, влияющие на скорость старения.

В настоящей работе исследуется влияние рабочего напряжения на скорость потери состояния в устройствах FRAM на основе сегнетоэлектрического HZO. Для этого в первую очередь была проведена серия экспериментов для изучения старения частично и полностью переключенных пленок оксида гафния, которая позволила предложить физический механизм, обуславливающий явление потери состояния в оксиде гафния. Затем на основе полученных данных была разработана теоретическая модель, позволяющая на основе малого количества экспериментальных данных рассчитывать время хранения состояния в МДМ-структурах на основе HZO и подбирать оптимальное значение рабочего напряжения. Теоретические предсказания модели согласуются с экспериментальными данными потери состояния.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (соглашение № 075-03-2025-662, проект FSMG-2025-0025).

Литература

1. Böscke T. S., Müller J., Bräuhaus D., Schröder U., Böttger U. Evolution of phases and ferroelectric properties of thin $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ films according to the thickness and annealing temperature // Applied Physics Letters, 2013. Vol. 102. № 24. P. 242905.
2. Mikheev V. V., Kondratyuk E. V., Chouprik A. A. Retention Model and Express Retention Test of Ferroelectric HfO_2-Based Memory // Physical Review Applied, 2022. Vol. 18. P. 064084.
3. Müller J., Böscke T. S., Müller S., Yurchuk E., Polakowski P. et al. Ferroelectric hafnium oxide: A CMOS-compatible and highly scalable approach to future ferroelectric memories // 2013 IEEE International Electron Devices Meeting, 2013. P. 10.8.1–10.8.4.

Влияние условий формирования лазерных граней на надежность полупроводниковых лазеров с гребневой конструкцией волновода

Симонов А. В.
ООО «Остек-ЭК»
121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2
simonov.a@ostec-group.ru

Рассмотрена стабильность зеркал для RWL-лазеров с пассивацией ZnSe при разных способах подготовки поверхности (UHV-скалывание и очистка в атомарном водороде). Проведены структурные исследования поверхностей зеркал лазеров и сравнение оптоэлектрических характеристик при длительной непрерывной работе.

Ключевые слова: полупроводниковые лазеры; лазеры с волноводом гребенчатого типа; RWL; катастрофическое оптическое повреждение зеркал; COMD; надежность; пассивация; очистка атомарным водородом; скалывание в вакууме; UHV.

Лазерные диоды на основе GaAs с торцевым излучением относятся к числу наиболее эффективных лазерных источников, доступных в настоящее время, что привело к широкому распространению лазерных линеек (laser bars) для накачки и обработки материалов. Эффективность полупроводниковых лазеров с торцевым излучением на основе GaAs также крайне полезна для будущих применений в LiDAR. Следовательно, в последние годы были приложены значительные усилия для повышения максимальной выходной мощности и эффективности полупроводниковых лазеров. Новые приложения требуют миниатюрных источников света высокой яркости и, следовательно, зависят от стабилизированных по длине волны полупроводниковых лазеров с гребневой конструкцией волновода (RWL) на основе GaAs. Общим для всех этих приложений является потребность в высокой надежности при постоянно растущих выходных мощностях.

Катастрофическое оптическое повреждение зеркал (COMD) является одной из основных причин отказа, ограничивающих надежность лазеров на основе GaAs.

Исходя из вышесказанного, этапы формирования и защиты зеркал резонатора RWL становятся технологически важными. Выбор способа подготовки и последующей пассивации лазерных граней влияет на эксплуатационные параметры: выходную оптическую мощность, порог катастрофического оптического повреждения (COD), долговечность и общую надежность.

За последние десятилетия были разработаны многочисленные решения для повышения стабильности лазерных зеркал:

- скалывание в вакууме и последующий *in situ* процесс пассивации с применением аморфного кремния (E2-process);
- перемешивание квантовых ям;
- обработка граней при помощи ионно-лучевой обработки;
- очистка граней атомарным водородом после скалывания на атмосфере с дальнейшей эпитаксиальной ZnSe-пассивацией;

- скалывание и формирование лазерных торцевых граней в сверхвысоком вакууме (ultra-high vacuum, UHV) с последующей пассивацией ZnSe.

В статье исследована стабильность лазерных зеркал, сколотых в UHV с *in situ* пассивацией при помощи ZnSe, и проведено сравнение полученных результатов с лазерами, грани которых были сколоты на атмосфере, очищены атомарным водородом и далее пассивированы ZnSe.

Проведенные структурные исследования поверхностей демонстрируют, что *in situ* пассивация после UHV-скалывания улучшает стабильность зеркал по сравнению с пассивацией после скалывания на атмосфере и очистки атомарным водородом. STEM-исследования подтверждают, что улучшение стабильности зеркал коррелирует с уменьшением дефектов на границе раздела между ZnSe и (Al,Ga)As.

Проведено сравнение результатов тестирования жизненного цикла лазеров. Лазерные грани, обработанные в UVH, демонстрируют превосходные характеристики при длительной непрерывной работе на длине волны 1064 нм. Улучшение времени жизни при использовании UHV-скалывания является значительным: время жизни увеличивается более чем в три раза для RWL с длиной волны 1064 нм, при этом возможна работа на более высоких мощностях.

Литература

1. Boschker J. E. et al. Stability of ZnSe-passivated laser facets cleaved in air and in ultra-high vacuum // 2021 27th International Semiconductor Laser Conference (ISLC). IEEE, 2021.
2. Ressel P., Spengler U., Mogilatenko A., Knigge A., Tränkle G. Ferdinand-Braun-Institut Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik Symposium «Optical Coatings for Laser Applications», Buchs, CH, 2019.

Прямой гидрофильный бондинг алмаза (100) с напылением подложками из SiO_2

Губкин А. А.
ООО «Остек-ЭК»
121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2
Gubkin.A@ostec-group.ru

Разработан метод прямого гидрофильного бондинга монокристаллических алмазных подложек с подложками SiO_2, выращенными методом PECVD. Приведены результаты оптимизации шероховатости поверхности алмаза и обработки, обеспечивающие высокую прочность сдвига соединения. Метод позволяет создавать подложки по технологии «алмаз на изоляторе» в низкотемпературных условиях.
Ключевые слова: прямой бондинг; гидрофильный бондинг; алмаз на изоляторе; DOI; квантовые технологии; кубиты; PECVD; шероховатость поверхности; прочность на двиг.

Алмаз признан ключевым материалом для квантовых технологий (на основе NV-, SnV-центров) и силовой электроники благодаря уникальным оптическим, электронным и тепловым свойствам. Однако широкое внедрение алмазных систем сдерживается отсутствием доступных подложек по технологии «алмаз на изоляторе» (DOI, Diamond-On-Insulator), необходимых для фотонных структур и эффективного теплоотвода. Существующие методы соединения алмаза с диэлектриками часто требуют высоких температур или приводят к дефектам на границе раздела.

В данной работе предложен метод прямого гидрофильного соединения монокристаллических алмазных подложек (100) с SiO_2-слоями, выращенными методом PECVD на кремнии. Технология включает:

- оптимизацию шероховатости поверхности алмаза;
- активацию поверхности раствором «пиранья»;
- низкотемпературный отжиг (≤200 °C).

Экспериментально установлено, что шероховатость поверхности и химический состав являются критическими факторами для формирования прочного соединения. С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) подтвержден механизм связи через реакции дегидратации C–OH-групп на границе раздела алмаз — SiO_2.

Метод обеспечивает создание подложек по технологии «алмаз на изоляторе» без применения высокотемпературных процессов, что исключает деградацию материалов. Это открывает возможности для:

- масштабируемого производства квантовых устройств на алмазе;
- интеграции алмазных компонентов в силовую электронику;
- разработки гетерогенных систем с термочувствительными элементами.

Перспективы работы включают адаптацию технологии для подложек большего размера и других диэлектриков (Si_3N_4, AlN), а также отработку процессов для промышленного внедрения.

Литература

1. Tianyin Chen, Jeffrel Hermias, Salahuddin Nur and Ryoichi Ishihara. Hydrophilic direct bonding of (100) diamond and deposited SiO_2 substrates.

УДК 621.3.049.77

Технические требования к фотошаблонам критических литографических слоев технологии уровня 28 нм и методы их оценки

Балан Н. Н., к. т. н., Васин А. А., Иванов В. В., Клочкова Е. Л., Панкратов А. Л., Соколова Е. В.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
apankratov@niime.ru

В работе описываются методы оценки базовых технических требований к фотошаблонам на основе технологических требований к фоторезистивной маске, характеристик типового литографического оборудования и применяемых техник RET для основных групп сложности операций проекционной фотолитографии в технологии уровня 28 нм.
Ключевые слова: проекционная фотолитография; фотошаблон; допуск на линейные размеры; линейность; точность размещения элементов рисунка; размер дефекта.

Совершенствование процессов проекционной фотолитографии является важнейшим фактором, определяющим развитие как полупроводниковой промышленности, так и электронной техники в целом [1]. Геометрия фоторезистивной маски на пластине должна удовлетворять ряду требований, предъявляемых технологией к минимальному полупериоду формируемого в фоторезисте рисунка, допускам на критический линейный размер (КЛР) элемента фоторезистивной маски при необходимой глубине фокуса (DOF), а также к точности совмещения [2] (табл. 1). Характеристики оборудования, фотошаблонов и используемых материалов в свою очередь должны обеспечивать возможность создания на полупроводниковой пластине такого рисунка.

Таблица 1. Обобщенные требования к возможностям проекционной фотолитографии для критических слоев технологий 90, 65 и 28 нм

Уровень технологии	Период рисунка, нм	Номинал КЛР, нм	Допуск на КЛР, ±нм	DOF≥, нм	Точность совмещения (3σ), нм
90 нм	220–260	85–110	~9	400	20
65 нм	180–200	70–90	~8	250–350	17
28 нм	90–120	30–45	~4	150–200	6

Переход на более продвинутые проектные нормы технологии неизбежно сопровождается ужесточением указанных требований и, в частности, приводит к существенному удорожанию комплекта ФШ. С каждым новым уровнем технологии его цена увеличивается в среднем в 1,5–2 раза, достигая величин порядка 1 млн долл. для проектных норм 28 нм [3], что делает актуальной задачу корректной предварительной оценки технических требований к фотошаблонам критических литографических слоев осваиваемой технологии.

Рассматриваемые в данной работе методы позволяют при помощи моделирования процесса проекционной фотолитографии оценить необходимые базовые технические характеристики фотошаблонов критических литографических слоев технологии уровня 28 нм, опираясь на возможности литографического оборудования и технологические требования, предъявляемые к литографическим операциям.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
2. Балан Н. Н. и др. Система требований к фотошаблонам для проекционной фотолитографии, применяемым в производстве полупроводниковых изделий современных проектных норм // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-1 (119). — С. 122–131.
3. SemiWiki.com: LithoVision — Economics in the 3D Era. By Scotten Jones, IC-Knowledge LLC. — URL: https://semiwiki.com/semiconductor-services/ic-knowledge/283426-lithovision-economics-in-the-3d-era, 2020.

УДК 621.3.049.77

Особенности решения некоторых задач вычислительной литографии для критических слоев технологии уровня 28 нм

Балан Н. Н., к. т. н., Иванов В. В., Клочкова Е. Л., Соколова Е. В.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
nbalan@niime.ru

Описываются отличительные особенности решения задач вычислительной литографии для технологии уровня 28 нм, в частности необходимость векторного описания световых волн и учета трехмерной геометрии маскирующего слоя фотошаблона при расчете дифракционных порядков изображения, а также использования оптимизационных алгоритмов при определении наилучшей формы внеосевого осветителя.

Ключевые слова: проекционная фотолитография; фотошаблон; векторное описание дифракции; поляризованный источник.

Освоение новых проектных норм серийного производства кремниевой микроэлектроники требует как минимум уменьшения размера полупериода структур, переносимых на полупроводниковую пластину в процессе проекционной фотолитографии [1]. Это достигается как совершенствованием литографических установок, так и применением новых поколений техник RET (Resolution Enhancement Techniques), состоящих в сочетании внеосевого освещения фотошаблона (в общем случае фазового) с коррекцией его топологии для получения на пластине фоторезистивной маски необходимой геометрии. Применение техник RET позволяет минимизировать влияние паразитных дифракционных оптических эффектов или так называемых эффектов оптической близости и, таким образом, в полной мере реализовать потенциал существующего оборудования, сделав возможной литографию структур с размерами полупериода элементов, значительно меньшими длины волны рабочего излучения, хотя и с рядом ограничений на их конфигурацию.

Переход на более продвинутые уровни технологии неизбежно влечет существенные изменения в используемых вычислительных процедурах практически на всех этапах разработки и применения техник RET. Особое влияние на их эффективность оказывают оптические модели, описывающие процесс формирования дифракционных порядков рисунком фотошаблона.

При значениях числовой апертуры NA > 0,6 коэффициенты пропускания для разных поляризаций уже не могут считаться одинаковыми, что требует векторного описания дифракционных явлений. В тех случаях, когда размеры элементов менее 2λ, а толщина маскирующего слоя на фотошаблоне при этом сравнима с $\lambda/2$, становится невозможно пренебречь дифракцией на топографии шаблона и просто предположить, что функция пропускания — это идеальная «тень» рисунка на фотошаблоне (граничное условие Кирхгофа) [2]. Поэтому точный расчет процесса формирования дифракционных порядков изображения требует решения уравнений Максвелла для заданных материалов с учетом особенностей трехмерной геометрии фотошаблона и конкретной падающей световой волны [3].

Помимо этого, задача создания эффективного RET-решения требует проведения оптимизационных расчетов, направленных на выбор наилучшей формы

осветителя, имеющего в литографическом оборудовании уровня 28 нм сложную пиксельную структуру [4] и возможность управления поляризацией [5].

Литература

1. Красников Г. Я. и др. Особенности технологии, компонентов и библиотек уровня 28 нм // Международный форум «Микроэлектроника-2019», 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули», Сборник тезисов. Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019 г. — С. 45–47.
2. Mack C. A. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. — John Wiley & Sons, 2007.
3. Erdmann A. Optical and EUV lithography: a modeling perspective. SPIE Press, 2021.
4. Bekaert J. et al. Scanner matching for standard and freeform illumination shapes using FlexRay // Proc. SPIE 7973, Optical Microlithography XXIV, 79731I, 2011. Vol. 7973.
5. ASML Product Catalog. — ASML, 2013.

УДК 004.076.4

Расчет электрических характеристик режимов записи/стирания элементов энергонезависимой памяти на основе транзисторов с плавающим затвором

Сорокин Д. В.[1,2], д. т. н., Шелепин Н. А.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
dbmoksor@gmail.com
[2] Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН
119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А

Представлена модель записи и стирания EEPROM-ячейки с плавающим затвором с учетом физико-электрических процессов в структуре «кремний — туннельный диэлектрик — плавающий затвор — диэлектрик — управляющий затвор». Расчеты производятся на основе уравнений электростатики с учетом туннелирования электронов в плавающий затвор и обратно по механизму Фаулера — Нордгейма. Показано, что результаты расчетного порогового напряжения согласуются с экспериментальными значениями, полученными при реальных испытаниях (–1,8 В после записи и +2,8 В после стирания). Модель может использоваться для предсказания характеристик EEPROM- и FLASH-ячеек и разработки их эквивалентных моделей SPICE.

Ключевые слова: EEPROM; энергонезависимая память; пороговое напряжение; плавающий затвор; туннельный ток.

Энергонезависимая память типа EEPROM остается важным компонентом в современных микросхемах благодаря возможности многократной перезаписи информации. Для надежного проектирования и оптимизации режимов программирования необходимы физические модели, описывающие процессы записи и стирания на уровне структуры. Важно учитывать распределение напряжений, зарядов в многослойных диэлектриках типа ONO.

Целью данной работы является разработка и реализация физико-математической модели EEPROM-ячейки с плавающим затвором, позволяющей описывать и предсказывать поведение порогового напряжения в процессах записи и стирания. Особое внимание уделяется расчету токов туннелирования по механизму Фаулера — Нордгейма и анализу динамики заряда на плавающем затворе при воздействии импульсных напряжений на управляющий затвор.

Модель реализована в среде Python и учитывает геометрию ячейки, а также размеры туннельной области. Между управляющим и плавающим затвором располагается трехслойный диэлектрик типа ONO (SiO_2–Si_3N_4–SiO_2). Для каждой точки во времени рассчитываются напряжения на всех элементах структуры, электрические поля в диэлектриках и плотности туннельного тока в тонком оксиде, моделируемого по уравнению Фаулера — Нордгейма. Также учитывается изменение заряда на плавающем затворе под действием туннельного тока. Импульсы записи и стирания задаются в виде трапеции с фронтом и спадом по 650 мкс и плато длительностью 2 мс, что позволяет смоделировать полный цикл работы ячейки.

Математическая модель построена на основе известных работ с общим описанием принципов функционирования элементов энергонезависимой памяти [1, 2] и изложенными в работе [3] основными соотношениями, обеспечивающими методы моделирования конкретных структур транзисторов с плавающим затвором.

В ходе моделирования получены временные зависимости ключевых параметров EEPROM-ячейки при воздействии импульсов записи и стирания. Расчеты показали изменение заряда на плавающем затворе в результате туннелирования электронов через тонкий оксид, что сопровождается предсказуемым смещением порогового напряжения. После импульса записи наблюдается накопление отрицательного заряда, соответствующее снижению порогового напряжения до –1,8 В. При последующем импульсе стирания заряд убывает и пороговое напряжение возрастает до +2,8 В, что совпадает с экспериментально измеренными значениями. Модель адекватно описывает оба режима работы и может использоваться для прогнозирования характеристик ячейки при различных формах программных импульсов. Это достигнуто при корректном подборе начального заряда на плавающем затворе и параметров импульсов. Полученное совпадение подтверждает физическую состоятельность модели и возможность ее использования для предварительного анализа электрических характеристик EEPROM-ячеек без необходимости проведения полной экспериментальной серии.

Разработана физико-математическая модель EEPROM-ячейки, учитывающая многослойную диэлектрическую структуру, емкостные связи и туннельные токи по механизму Фаулера — Нордгейма. Модель позволяет описывать процессы накопления и удаления заряда на плавающем затворе при воздействии программных импульсов, а также предсказывать изменение порогового напряжения. Согласование расчетов с экспериментом демонстрирует ее применимость для оптимизации режимов записи и стирания, а также для разработки компактных SPICE-моделей энергонезависимой памяти.

Литература

1. Pavan P., Bez R., Olivo P., Enrico Z. Flash memory cells-an overview // Proc. IEEE, 1997. Vol. 85. № 8. P. 1248–1271.
2. Kolodny A., Nieh S., Eitan B., Shappir J. Analysis and Modeling of Floating-Gate EEPROM Cells // IEEE Trans. Electron Devices, 1986. Vol. 33. № 6. P. 835–844.
3. Шелепин Н. А. Основные положения физико-математической модели элемента памяти с плавающим затвором в режимах записи/стирания // 11-я научная конференция «ЭКБ и электронные модули». Сборник тезисов. — Парк науки и искусства «Сириус», 2025.

Особенности конструкции и технологии производства кристаллов для кремниевой силовой ЭКБ

Романов Д. А.[1], Кравчук Е. А.[1], Чернышев Ю. П.[1], Быкова А. В.[2], к. т. н. Машевич П. Р.[3]

[1] ООО «СИТРОНИКС Смарт Технологии»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2
dromanov@sitronics-smart.com
[2] АО «Микрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Силовая ЭКБ является базовым элементом микроэлектроники, на которой построено большинство сложных электронных устройств, начиная от вычислительной и бытовой техники, автомобилей и заканчивая мощными энергетическими установками. Наибольшее влияние технологический уровень силовой ЭКБ оказывает в таких отраслях промышленности, как авиационная, автомобильная, машиностроительная, энергетическая, железнодорожная, судостроительная и оборонная. Основными областями применения силовой ЭКБ являются современные высокоэффективные системы для электроэнергетики; энергосберегающее оборудование для промышленности; бортовое электрооборудование для авиации и космических аппаратов, надводных и подводных судов; электрооборудование для автомобильной промышленности, мощных самосвалов, экскаваторов, электромобилей; преобразовательное оборудование для импульсной и альтернативной энергетики (солнечная, ветровая, термоядерная, ЛТС); энергосберегающее оборудование для ЖКХ. Уход основных поставщиков силовых модулей и транзисторов, таких как Infineon, Mitsubishi, Fuji, Semikron, Ixys, STMicroelectronics и др., создал дефицит в поставках и обслуживании на рынке силовой электроники. Ряд компаний, которые использовали их продукцию, находятся в активном поиске альтернативных решений. Решающую роль в силовой ЭКБ занимает разработка конструкции и технологии производства современной кремниевой силовой электронно-компонентной базы (ЭКБ): полевых транзисторов типа «металл — оксид — полупроводник» (MOSFET-транзисторы), биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT-транзисторы), быстровосстанавливающихся диодов (FRD- и FRED-диоды), а также полупроводниковых модулей на основе MOSFET-транзисторов, IGBT-транзисторов и FRD- и FRED-диодов. Рассмотрены особенности конструкции и технологии производства IGBT-транзисторов, FRD- и FRED-диодов по технологии SPT (Soft Punch-Through) для изделий от 12-го до 65-го класса. Детально рассмотрены технологические операции формирования *n*+-буферного слоя и структуры обратной стороны по технологии SPT, обеспечивающей уникальные характеристики IGBT-транзисторов, FRD- и FRED-диодов, применяемых в кремниевой силовой ЭКБ.

Ключевые слова: кремниевая силовая электронно-компонентная база (ЭКБ); IGBT-транзисторы; FRD- и FRED-диоды; технология производства; особенности конструкции; Non Punch-Through (NPT); Soft Punch-Through (SPT).

Актуальность темы

В настоящее время приоритетными особенностями конструкции и технологиями производства современной кремниевой силовой ЭКБ являются технология SPT+ IGBT для изделий от 25-го до 65-го класса; технология SPT+ Trench и RC SPT+ Trench IGBT для изделий от 0,6-го до 65-го класса; технология SPT FRD с мягким переключением для изделий от 0,6-го до 65-го класса. Важной задачей является определение приоритетных технологий, которые могут быть реализованы на существующих производственных мощностях и которые смогут обеспечить требуемые технические параметры конечного продукта для использования в критических областях промышленности и ВПК, осуществить импортозамещение.

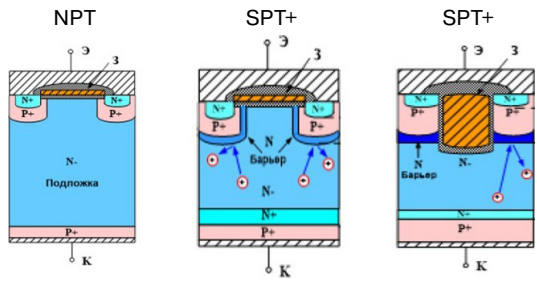


Рис. 1. Особенности контракции и технологии производства кристаллов: NPT, SPT+, SPT+

Главной задачей является разработка и создание новой современной отечественной ЭКБ силовой кремниевой электроники, реализация которой позволит создать технологии производства полупроводниковых материалов и комплектующих с характеристиками, отвечающими современным и перспективным потребностям разработчиков радиоэлектронной продукции в интересах обороноспособности и безопасности государства.

Работы выполнены на оборудовании АО «Микрон».

УДК 537.312.54

Эффекты ионизирующего излучения в сдвоенном микромощном компараторе напряжения

Кульченков Е. А., Рыбалка С. Б., Демидов А. А.
Брянский государственный технический университет
241035, г. Брянск, б-р 50 лет Октября, 7
ewgeniy2000@mail.ru

Экспериментально исследовано влияние эффектов поглощенной дозы и мощности дозы ионизирующего излучения на работу разработанного микромощного компаратора напряжения ИС-К2 и его зарубежного аналога LM393.
Ключевые слова: эффекты поглощенной дозы; эффекты мощности дозы; компаратор напряжения.

Задача разработки и серийного изготовления изделий электронной компонентой базы (ЭКБ) актуальна для обеспечения технологической независимости и безопасности объектов критической информационной инфраструктуры. Исследование радиационной стойкости разрабатываемой ЭКБ позволяет не только выполнить требования технического задания, но и получить уникальные радиационные отклики ЭКБ на ионизирующее излучение, которые могут служить «паспортом» для обеспечения доверенности изделий.

Экспериментально был исследован компаратор напряжения ИС-К2, разработанный в БГТУ [1] и изготовленный АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» [2], и его зарубежный налог аналог LM393 [3]) в корпусе SO-8. Исследование проводилось с помощью рентгеновского комплекса РИК-0401 [4] (анодное напряжение — 70 кВ, анодный ток — 200 мкА, мощность поглощенной дозы излучения — 150 ед/с (ед. — единицы компаратора ДРИ-0401)) и лазерного комплекса «РАДОН-23» [4] (длина волны — 1064 нм, максимальная энергия импульса излучения — 120 мДж, длительность импульса — 10 нс, диаметр пучка — 11 мм). Были измерены основные параметры ИС-К2 и LM393: ток потребления, входное напряжение смещения при высоком и низком напряжении питания, входные токи смещения, выходное напряжение низкого уровня и т.д. Полученные экспериментальные зависимости основных характеристик показали, что разработанный ИС-К2 по электрическим параметры близок к его зарубежному аналогу LM393.

Во время рентгеновского облучения ИС-К2 и LM393 находились в активном электрическом режиме при напряжении питания 5 В и токе нагрузки 4 мА. Исследования, проведенные с помощью рентгеновского комплекса РИК-0401, показали близкий характер изменения электрических параметров для ИС-К2 и LM393 с ростом поглощенной дозы излучения. Установлено, что основные параметры ИС-К2 и LM393 не выходят за нормы в диапазоне суммарной поглощенной дозы излучения до $\sim 1000 \cdot 10^3$ ед.

При импульсном лазерном облучении, формируемом комплексом «РАДОН-23», ИС-К2 и LM393 находились при температуре 25 °С в активном электрическом режиме: напряжение питания — 5 В, ток нагрузки — 4 мА, входное напряжение — 1 В. Установлено, что при плотности энергии в импульсе 1 мДж/см^2 время прерывания работоспособности (ВПР) для ИС-К2 и LM393 составило 5 и 15 мкс соответственно. При увеличении плотности энергии ВПР возрастало и при 180 мДж/см^2 для ИС-К2

и LM393 ВПР составило ~25 мкс. Отметим, что форма отклика выходного напряжения низкого уровня у ИС-К2 и LM393 несколько отличается.

Проведенное исследование радиационной стойкости компараторов ИС-К2 и LM393 позволило диагностировать наличие параметров, чувствительных к ионизирующему излучению. Установлено, что в исследуемом интервале ионизирующего излучения тиристорный эффект для ИС-К2 и LM393 не возникает.

Результаты НИОКТР достигнуты в ходе реализации проекта «Интегральные микросхемы преобразователей аналоговых сигналов в металлополимерных корпусных исполнениях разных типов: разработка и освоение технологии, замещение импортных аналогов и организация серийного производства» (соглашение с Минобрнауки России от 27.02.2025 г. № 075-11-2025-021) с использованием мер государственной поддержки, предусмотренных Постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218.

Литература

1. ФГБОУ ВО «БГТУ»: офиц. сайт. — URL: https://www.tu-bryansk.ru (дата обращения 10.07.2025).
2. АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»: офиц. сайт. — URL: https://group-kremny.ru (дата обращения 10.07.2025).
3. LM193, LM293, LM393, LM393W Datasheet. Low-power, dual-voltage comparators. URL: https://www.st.com/resource/en/datasheet/lm393.pdf (дата обращения 12.07.2025).
4. АО «ЭНПО СПЭЛС»: офиц. сайт. — URL: https://www.spels.ru (дата обращения 10.07.2025).

УДК 621.382.2/.3, ББК 32.853

Особенности проектирования наноразмерных КМОП СБИС объемного кремния с повышенной радиационной стойкостью

Герасимов Ю. М.[1], к. т. н., Краснюк А. А.[1,2], к. т. н.
[1] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
aakrasnyuk@mephi.ru
[2] НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
aakr@cs.niisi.ras.ru,

В настоящее время получила дальнейшее развитие методология радиационно стойкого и доверенного проектирования (РСП, англ. RHBD) КМОП наноразмерных СБИС СнК и ОЗУ по технологиям объемного кремния (ОК) уровня 180–90 нм в части повышения их радиационой стойкости. На основе проведенных исследований даны рекомендации по выбору схемотехнических и конструктивно-топологических решений, технологических опций и электрических режимов работы элементов при внешних воздействиях, позволяющих ослабить их влияние на параметры СБИС на этапе проектирования.
Ключевые слова: КМОП СБИС; «система-в-корпусе» (СвК); СОЗУ; RHBD.

Субмикронные и наноразмерные КМОП СБИС обьемного кремния (ОК) уровня от 180 нм 28 нм (далее нано-СБИС) представляют интерес для создания в России массовой доверенной ЭКБ, предназначенной для работы в экстремальных условиях как при радиационных воздействиях в условиях открытого космоса, так и при наличии внешних воздействий температуры и ЭМИ. Данные технологии позволяют создавать СБИС типа системы в корпусе (СВК) и СОЗУ по доступным коммерческим и специализированным технологиям обьемного кремния категории не хуже РС2, содержащих десятки-сотни миллионов элементов на кристалле [1]. Для заданного уровня технологии создание таких СБИС возможно при использовании методологии радиационно стойкого проектирования RHBD [2–5].

Решаются проблемы внутритранзисторных и межприборных токов утечки. Предлагается модель «внутритранзисторного» тока утечки СБИС, определяемая как сумма токов всех ее элементов $N_{эл}$: $I_{утΣ} = \sum_{i}^{N_{эл}} I_{утi}$, а ток утечки i цифрового элемента можно представить в следующем виде:

$$I_{утi} \approx 2a \cdot I_0 \cdot L_{n0}/L_{эфф} \cdot (N_{par} + N_{ser}/k_j), \quad (1)$$

где $L_{эфф}$ — эффективная длина канала паразитного n-МОПТ, не зависящая от W_{n0}, но зависящая от L_{n0} и особенностей его конструктивно-топологического исполнения (линейный или с концевыми уширениями), $a = 1...0$ — коэффициент режима работы при облучении ($a = 1$ в режиме закрытых транзисторов, $a \approx 0$ в режимах одного из открытых для ячейки памяти), I_0 — максимальный «внутритранзисторный» ток утечки n-МОПТ при $L_{эфф} = L_{n0}$ для линейного n-МОПТ, и $L_{эфф} > L_{n0}$ для транзисторов с концевыми уширениями; N_{par} — число отдельных и параллельно соединенных n-МОП-транзисторов в элементе; N_{ser} — число последовательных групп

транзисторов в элементе; k_j — число последовательно соединенных транзисторов в *j* группе.

Модель «межприборных» токов утечки существенно зависит как от ширин областей n+ — n+ соседних приборных n-МОПТ, так и расстояний между ними. «Межприборная» утечка n+ — n-well зависит от расстояния между соответствующей n+ областью транзистора в состоянии лог.0 и карманом в состоянии лог.1., а также от электрического режима работы элемента. Как правило, STI окисел между этими областями большей частью не покрыт поликремниевой или металлической разводкой, что затрудняет расчет этих утечек. На уровне конкретного элемента суммарные токи утечки значительно меньше рабочих токов приборных n-МОПТ ($I_{on}/I_{off} \gg 10^2$) и нарушения работоспособности элементов в СБИС не наблюдается. Наличие функциональных отказов следствие ,как правило, низкого качества проектирования.

Проведены исследования библиотечных элементов различной топологической реализации (табл. 1).

В целом, подтверждено, что современные КМОП-технологии объемного кремния (ОК) уровня 250–90 нм позволяют создавать с использованием методологии радиационно стойкого проектирования RHBD СБИС СвК и СОЗУ категории РС2, удовлетворяющие высоким требованиям доверенной аппаратуры для аэрокосмических и других применений. Проблема обеспечения высокой дозовой стойкости (до 1 Мрад) и отсутствие эффекта «защелкивания» (до 100 Мэв·см^2/мг) в СБИС СнК и ОЗУ достижима в рамках КМОП техпроцессов ОК уровня 250–90 нм с перспективой перехода на технологии до 28 нм. Для создания РС2 СБИС СнК и ОЗУ по КМОП нанометровым технологиям ОК, как вариант, необходимо использовать «жесткие» p+ и n+ охраны с максимально возможным числом контактов к шинам земли и питания. Использование кольцевых МОПТ во все случаях не целесообразно, возможно за исключением аналоговых блоков ограниченного использования, если это обосновано по результатам моделирования и исследования блоков на тестовом кристалле.

Таблица 1. Сравнение токов утечки различных ЭП 180 нм в режиме хранения

№ п/п	Тип ЭП	Относительная площадь ЭП	Статический ток после D = 128 крад, нА/бит
1	Коммерческий РС0 1-port 6Tn cell	S0	64
2	Собственный РС2 1-port 6Tncell	1.64*S0	0,043
3	Коммерческий РС0 2-port 8Tn cell	2,38*S0	27
4	Собственный РС2 2-port 8Tn cell	2,19*S0!	0,082
5	Собственный РС3 1-port 8Tp KT-cell	3,06*S0	<0,00002

УДК 621.38

Импульсное лазерное испытательное оборудование и его возможности для определения чувствительности полупроводниковых приборов к воздействию ионизирующего излучения

Ватуев А. С., Шарапов А. А., Рубанов П. В.
АО «Научно-исследовательский институт приборов»
140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8
ASVatuev@niipribor.ru

В работе рассмотрены характеристики и функциональные возможности испытательного оборудования на основе импульсных лазеров, используемых в АО «НИИП». Представлены направления исследовательских и экспериментальных работ, выполняемых на данных установках, и проведен обзор экспериментальных результатов.

Ключевые слова: лазерное излучение; радиационная стойкость; высокопроизводительные методы испытаний.

Введение

Особенности импульсных лазерных источников — высокая производительность и воспроизводимость характеристик излучения, гибкость в задании энергии и длительности импульсов — мотивируют специалистов в области радиационной стойкости уделять большое внимание внедрению и развитию данного типа испытательного оборудования. Дополнительно этому способствует введение обновленных стандартов и нормативных документов в области проведения радиационных испытаний.

Большим количеством исследовательских коллективов создаются и эксплуатируются разнообразные лазерные системы — с различной длительностью импульса и длиной волны излучения, что позволяет реализовывать в том числе многофотонные механизмы поглощения. Возможно применение как сфокусированных, так и коллимированных пучков. Технические характеристики конкретных лазерных установок, закладываемые в них при проектировании, обусловлены конкретными испытательными и исследовательскими направлениями применения данных устройств.

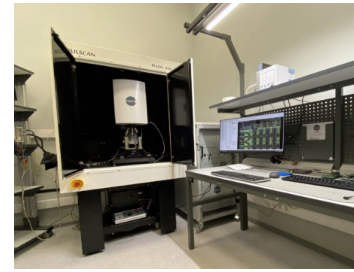
Лазерные установки АО «НИИП»

На базе АО «НИИП» размещены установка с перестраиваемой длительностью импульса (рис. 1*а*) и установка сфокусированного лазерного излучения (ЛИ) Pulsys PULSCAN (рис. 1*б*).

Характеристики источника ЛИ установки с перестраиваемой длительностью импульса приведены в табл. 1.

Ниже приведены характеристики установки сфокусированного ЛИ Pulsys PULSCAN. Установка имеет два источника ЛИ, характеристики которых приведены в табл. 2.

а



б

Рис. 1. Лазерные установки АО «НИИП»

Таблица 1. Характеристики установки с перестраиваемой длительностью импульса

Длина волны, фундаментальная, нм	1064,12
Эффективная длительность импульса	Полная энергия ЛИ в импульсе
9,5 нс	18,4 мДж
98,4 нс	102,6 мДж
1,05 мкс	121,2 мДж
9,85 мкс	126,6 мДж
Диаметр пятна лазерного излучения на объекте испытаний, мм	50
Диапазон программного управления коэффициентом ослабления полной энергии импульса ЛИ	От 1 до 10^5

Таблица 2. Характеристики установки Pulsys PULSCAN

Наименование характеристики	Тип источника лазерного излучения	
	PICO	2P
Длина волны лазерного излучения	1064 нм	1550 нм
Длительность импульса	30 пс	450 фс
Минимальная энергия импульса, нДж	0,0076	0,0067
Максимальная энергия импульса, нДж	28,55	5,90

Практические возможности установок

Характеристики установки с перестраиваемой длительностью обусловлены требованиями обновленного комплекса стандартов к испытаниям ЭКБ на стойкость к ионизационному импульсному воздействию с различными амплитудно-временными характеристиками (АВХ): возможность перестройки длительности импульса позволяет эффективно исследовать зависимость уровней возникновения радиационных эффектов от мощности воздействия (пример продемонстрирован на рис. 2).

Диапазон длительностей импульсов установки подобран таким образом, чтобы проводить оценку стойкости во всем представляющем практический интерес диапазоне длительностей с последующим учетом АВХ импульса (расчетом параметра Kτ) расчетно-экспериментальным методом.

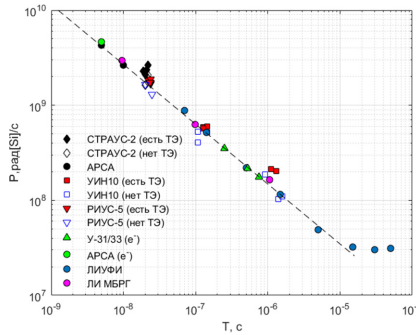


Рис. 2. Зависимость уровня возникновения тиристорного эффекта от длительности импульса ИИ [1]

Использование установки Pulsys PULSCAN связано в первую очередь с исследованиями стойкости ЭКБ к одиночным радиационным эффектам. Облучение кремниевых приборов ЛИ с использованием различных источников установки инициирует процессы одно- или двухфотонного поглощения, что обеспечивает соответственно или равномерное поглощение излучения по глубине приборной структуры, или локализацию поглощения на определенной глубине. Это может быть важно для поиска наиболее чувствительных к ионизационному воздействию областей и для исследования их топологических характеристик. Пример проведенного сканирования поверхности кристалла ЭКБ с картой чувствительных областей приведен на рис. 3.

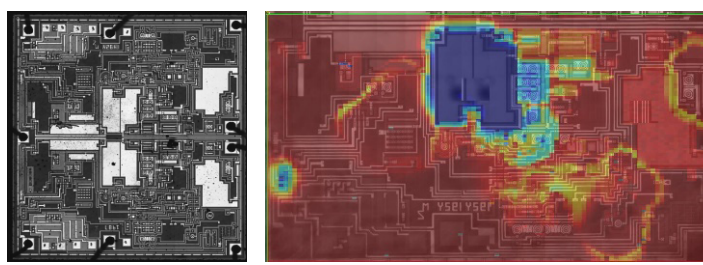


Рис. 3. Результаты сканирующего воздействия ЛИ

Литература

1. Согоян А. В., Ватуев А. С. и др. Исследование влияния амплитудно-временных характеристик импульсного излучения на уровни отказов ИС // 28-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» — «Стойкость-2025».

УДК 621.38

Влияние рассеяния ионизирующего излучения космического пространства на дозу за многослойной защитой

Рубанов П. В., Шарапов А. А., Ватуев А. С.
АО «Научно-исследовательский институт приборов»
140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8
PVRubanov@niipribor.ru

Работа посвящена необходимости учета рассеяния ионизирующего излучения в расчетах дозы при его прохождении через различные многослойные среды защиты. Приведены примеры расчета локальных дозовых нагрузок с применением метода Монте-Карло в ПО GEANT4.

Ключевые слова: радиационная стойкость; метод Монте-Карло; излучение космического пространства; поглощенная доза.

Введение

Разработчики программного обеспечения (ПО), предназначенного для расчета локальных дозовых нагрузок (ЛДН), непрестанно занимаются усовершенствованием применяемых методов и моделей как для повышения корректности получаемых расчетных результатов, так и для оптимизации производительности.

Одним из наиболее популярных для применения в расчетном ПО является «лучевой» метод оценки ЛДН, заключающийся в разбиении пространства, окружающего интересующую точку, на сектора и проведении через каждый из них луча, позволяющего оценить массовую защиту в данном направлении. Существуют различные вариации такого подхода [1, 2], объединенные одной общей особенностью — оценка величины защиты в направлении осуществляется суммированием $\sum \rho_i d_i$ без учета расстояния, взаимного расположения и среды между слоями защиты, влияющих на рассеяние ионизирующего излучения, а следовательно, и на величины поглощенных доз в конкретных точках.

Проведение расчетов

Для оценки влияния вышеописанных факторов были проведены расчеты посредством ПО GEANT4. Воздействующее излучение — протоны с энергией 100 МэВ и электроны с энергией 5 МэВ. В качестве рассматриваемых сред между пластинами при расчетах выбраны вакуум и воздух.

Трехслойная геометрия защиты представляет собой алюминиевые квадратные пластины со стороной 100 мм и толщиной по 2 мм (0,54 г/см^2) с расположенным за каждой из них тонким вакуумным детектором толщиной 0,1 мм со стороной 10 мм. Таким образом, перед последним из детекторов интегральная толщина защиты составляет 1,62 г/см^2. Расстояние между слоями из пластин и соответствующими им детекторами варьируется от 0 до 100 мм. Вид модели защиты приведен на рис. 1. Исходные точки запуска частиц были равномерно распределены на внешней поверхности пластины по площади детектора с интервалом 1 мм; характерные точки, выбранные для анализа и демонстрации полученных результатов показаны на рис. 2.

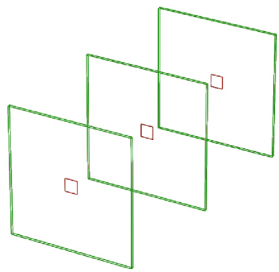


Рис. 1. Модель трехслойной защиты

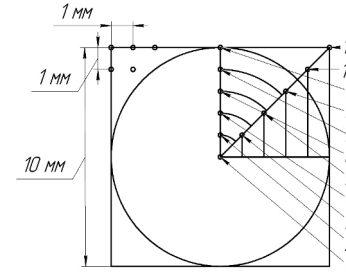


Рис. 2. Расчетные точки

Результаты

Результаты моделирования приведены на рис. 3.

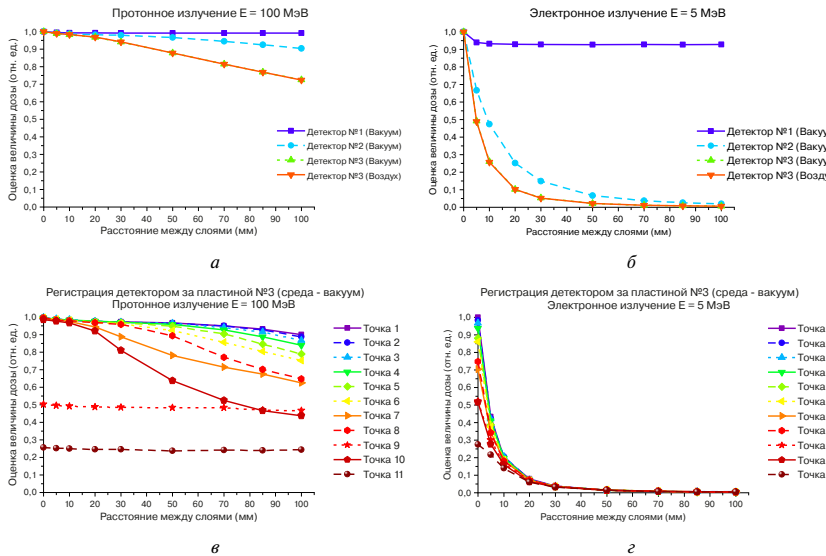


Рис. 3. Зависимости оценки величины ЛДН от расстояния между слоями защиты и от среды: *а, б* — интегральная доза протонного излучения, зарегистрированная детектором за каждой из пластин; *в, г* — локальные дозы, зарегистрированные в каждой из расчетных точек (рис. 2) детектором за пластиной № 3

Видно, что увеличение расстояния между слоями защиты приводит к понижению оцениваемого значения дозы за счет рассеяния частиц, вследствие которого некоторая их часть (как первичных частиц, так и вторичных) более не взаимодействует с детекторами за пластинами № 2 и 3, причем чем ближе рассматриваемая точка к краю детектора, тем меньше вероятность взаимодействия частиц с детектором.

Влияние среды, напротив, крайне несущественно и практически не сказывается на оценке величины дозы даже за последним из слоев защиты.

Моделирование в ПО GEANT4 демонстрирует, что оценка ЛДН варьируется в зависимости от конструкции рассматриваемого объекта даже при неизменной суммарной величине массовой защиты $\sum \rho_i d_i$. Наблюдаемое снижение расчетной величины дозы вследствие рассеяния частиц указывает на то, что применение методов, игнорирующих этот эффект, приводит к повышению консервативности результатов оценки, причем ее степень тем больше, чем выше количество конструкционных слоев, выступающих в качестве защиты, и чем более данные слои пространственно разнесены.

Литература

1. Гильванов П. Р., Козюков А. Е., Кожухов М. В. Особенности применения программ расчета локальных поглощенных доз в трехмерной геометрии // 28-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» — «Стойкость-2025».
2. Зинченко В. Ф., Деревянко Д. Ю. Модификация метода секторирования с целью повышения точности прогнозирования дозовых нагрузок на радиоэлектронную аппаратуру космических аппаратов // 28-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» — «Стойкость-2025».

УДК 004.9:621.382

Особенности проектирования радиационно стойких и сбоеустойчивых микросхем

Шеховцов Д. В.[1], к. т. н., Шишаев А. И.[1], Смерек В. А.[2] к. т. н., Зольников В. К.[3], д. ф.-м. н.
[1] ООО «Систематика Консалтинг»
105082, г. Москва, ул. Большая Почтовая, 26, стр. 1
info@systematica-consulting.ru
[2] АО «НИИЭТ»
394033, г, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5
niiet@niiet.ru
[3] ВГЛТУ им. Г. Ф. Морозова
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8
vglta@vglta.vrn.ru

Приведены особенности создания радиационно стойких и сбоеустойчивых микросхем для критической гражданской инфраструктуры. Представлены примеры выбора доминирующих механизмов защиты при проектировании сбоеустойчивых микроконтроллеров.
Ключевые слова: сбоеустойчивость; СБИС; радиационная стойкость; радиационные эффекты; КНИ; тяжелые заряженные частицы; одиночные сбои; аппаратная избыточность; паразитные элементы; моделирование.

В настоящее время радиационные эффекты в полупроводниках достаточно хорошо изучены. Разработаны методы защиты интегральных схем от воздействия ионизирующего излучения: от схемотехнических, до технологических способов, в том числе архитектурных решений. Максимальный эффект достигается путем их комбинирования. Такие микросхемы используются преимущественно для создания космической и военной техники, их стоимость существенно выше коммерческих компонентов.

Вместе с этим потребность в подобных решения существует и в гражданская инфраструктура, существенная часть которой относится к критически важной:

- гражданская авиация;
- медицинская рентгенография;
- оборудование АЭС;
- установки исследования физики высоких энергий и т. п.

Применение сбоеустойчивых микросхем в данных отраслях накладывает ряд дополнительных требований: низкая стоимость ЭКБ, высокая производительность, повышенные объемы производства.

В докладе представлен общий обзор паразитных эффектов, возникающих при воздействии ионизирующего излучения, существующих способов защиты полупроводниковых структур на всех уровнях, разобрана аналитика выбора доминирующего механизма защиты СБИС.

Работа базируется на многолетнем опыте проектирования радиационно стойких микросхем, исследования их функционирования, применения в различных отраслях промышленности.

Литература

1. Смерек В. А. Автоматизация проектирования сбоеустойчивых сложных функциональных блоков микроэлектроники к воздействию тяжелых ядерных частиц: специальность 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (по отраслям)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора кандидата технических наук. — Воронеж, 2013. — 19 с.
2. Зольников В. К., Скворцова Т. В., Евдокимова С. А. и др. Разработка алгоритма расчета стойкости КМОП СБИС при радиационном воздействии // Моделирование информационных систем: Материалы Международной научно-практической конференции, Воронеж, 19–20 мая 2021 года. — Воронеж: ВГЛТУ им. Г. Ф. Морозова, 2021. — С. 423–431. DOI: 10.34220/MIS 423-431.

УДК 621.3.049

Формирование комплекта разработчика аналоговых микросхем с использованием платформы БМК на основе библиотеки схемотехнических и топологических решений

Дворников О. В.[1], Попов А. Э.[2], Прокопенко Н. Н.[2], Кузнецов Д. В.[2], Клейменкин Д. В.[2]

[1] ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»
220113, Беларусь, г. Минск, ул. Якуба Коласа, 73
oleg_dvornikov@tut.by
[2] Донской государственный технический университет
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Дано обоснование целесообразности создания специального набора типовых функциональных узлов малосерийных аналоговых микросхем для их реализации на основе идеологии базовых матричных кристаллов. Сформулированы рекомендации по наполнению библиотек, а также созданию комплекта разработчика микросхем данного класса.

Ключевые слова: аналоговая микросхема; базовый матричный кристалл.

Применение базовых матричных кристаллов (БМК) для разработки аналоговых интегральных микросхем позволяет резко снизить затраты ресурсов на единицу изделия, а также значительно сократить сроки их выпуска [1, 2, 3].

В этой связи представляется целесообразным формирование специальной библиотеки готовых и отработанных решений для быстрого создания аналоговых микросхем данного класса.

Наличие регулярной структуры кристалла БМК и набора компонентов с заранее известными параметрами позволяет оптимизировать процесс получения принципиальных схем и топологий металлизации, так как он начинается не с нуля, а использует заранее созданные и отработанные решения. Для работы при повышенных температурах перспективны арсенид-галлиевые БМК с соответствующими моделями [4].

Дополнительно библиотека решений может включать и готовые схемы следующих классов: операционные усилители; компараторы; линейные стабилизаторы напряжения; аналоговые коммутаторы-мультиплексоры; схемы управления импульсными источниками питания [5].

В целях повышения эффективности разработки на этапе моделирования для каждого элемента библиотеки схемотехнических решений должна быть сформирована макромодель узла (схемы).

Полная библиотека может содержать следующие разделы:

1) схемотехнические решения узлов аналоговых микросхем;
2) схемотехнические решения готовых схем;
3) топологические решения металлизации межсоединений;
4) макромодели узлов и готовых схем.

В этой связи представляется целесообразным создание для аналоговых БМК специального комплекта разработчика (PDK), включающего в себя комплект

SPICE-моделей элементов, схемотехнические решения отдельных узлов и типовых решений, библиотеку SPICE-макромоделей, топологические решения узлов и устройств в формате, например, GDSII.

Реализация PDK возможна в виде реляционной базы данных (БД), где хранилась бы вся перечисленная выше информация, а также текстовое описание схем на формальном (SPICE netlist) и естественном языке (например, по правилам написания формулы изобретения), ключевые слова для быстрого поиска нужного элемента. На первом этапе предполагается, что пользователь PDK синтезирует схему вручную из библиотечных элементов, основываясь на своем опыте. В дальнейшем возможна разработка надстройки для автоматизированного синтеза схемы (например, с использованием ИИ).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10069, https://rscf.ru/project/23-79-10069.

Литература

1. Дворников О., Чеховский В., Дятлов В., Прокопенко Н. Применение структурных кристаллов для создания интерфейсов датчиков // Современная электроника, 2014. — № 1. — С. 32–37.
2. Попов А. Э., Прокопенко Н. Н., Пахомов И. В., Кузнецов Д. В., Дворников О. В. Комплект аналоговых базовых матричных кристаллов как платформа быстрой разработки импортозамещающих аналоговых микросхем // Российский форум «Микроэлектроника-2024» 10-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. — М.: Техносфера, 2024. — С. 318–319.
3. Дворников О., Чеховский В., Попов А. Проектирование биполярных аналоговых базовых матричных кристаллов // Электронные компоненты, 2025. — № 1. — С. 29–34.
4. Дворников О. В., Павлючик А. А., Прокопенко Н. Н., Чеховский В. А., Кунц А. В., Чумаков В. Е. Унифицированные схемотехнические решения аналоговых арсенид-галлиевых микросхем // Известия вузов. Электроника, 2022. — Т. 27. — № 4. — С. 475–488. DOI: 10.24151/1561-5405-2022-27-4-475-488.
5. Крутчинский С. Г., Чибизов Д. Г., Щербинин И. П. и др. Каталог разработок Российско-Белорусского центра аналоговой микросхемотехники / Южно-Российский гос. ун-т экономики и сервиса; [под ред. Н. Н. Прокопенко]. — Шахты: Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, 2010. — 478 с. EDN QMVFEV.

УДК 004.383

Опыт разработки высоконадежных аппаратных платформ для гетерогенных вычислений на основе коммутаторов Switch Fabric

Кругляк К. В.
АО «НПФ «ДОЛОМАНТ»
117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, корп. 8
kruglyak@dolomant.ru

Разработана линейка вычислительных модулей различных архитектур стандарта CompactPCI Serial 3U и плата коммутатора PCI Express для построения высоконадежных гетерогенных суперкомпьютеров встраиваемого применения. Приведены характеристики модулей и основные параметры стандарта CompactPCI Serial. Показаны варианты построения гетерогенных вычислителей с применением данного комплекта модулей.
Ключевые слова: CompactPCI Serial; гетерогенные вычисления; PCI Express; switch fabric; графический ускоритель; ПЛИС.

В настоящее время в сегменте встраиваемых систем для жестких условий эксплуатации появляется все больше задач, для решения которых требуется не просто компьютер, а мультипроцессорная система, способная обрабатывать огромные объемы разнородной информации. Разнородная информация требует специфических алгоритмов обработки, что применительно к аппаратной составляющей системы трансформируется в требование одновременного применения вычислителей различных архитектур — x86, GPU, ПЛИС, взаимодействующих между собой по единому каналу с высокой пропускной способностью (fabric/фабрика). В первые годы основным подходом в решении таких задач была разработка уникальных систем. Однако, как правило, к концу проекта результат уже переставал удовлетворять конечного заказчика. Выходом на данный момент является концепция модульной электроники, основанной на стандарте CompactPCI Serial. Данный стандарт обладает целым рядом преимуществ:

- модульность;
- поддержка гетерогенных вычислений;
- масштабируемость;
- высокий модернизационный потенциал;
- коммерческая привлекательность относительно альтернатив (VPX);
- наличие на рынке большого числа готовых модулей различного функционала.

В номенклатуре продукции Fastwel CompactPCI Serial 3U на данный момент присутствуют:

- вычислительные модули на базе отечественных процессоров «Эльбрус 2С3», «Байкал-М»;
- вычислительные модули на базе процессоров x86 Intel Xeon и AMD Ryzen;
- графические ускорители на базе микросхем Nvidia и AMD;
- модули на базе ПЛИС Virtex и Kintex Ultrascale;
- коммутаторы PCI Express и Gigabit Ethernet;

- модули для физического масштабирования по каналам PCI Express;
- интерфейсные модули, модули ввода-вывода.

Каждый модуль имеет несколько исполнений для оптимизации конечной системы по критерию функционал/стоимость. Для всех модулей существует возможность покрытия лаком для ответственных применений. Вся продукция Fastwel ориентирована на применение в режиме 24/7 при повышенном уровне ударов/вибрации и колебаниях температур от −40 до +70 °C.

Для применения в особо сложных условиях эксплуатации или особо ответственных применений разработан конструктив, использующий исключительно кондуктивный теплоотвод.

Вся продукция разработана российскими специалистами в СКБ Fastwel и производится в России. Все модули вносятся в Реестр отечественной продукции Минпромторга по мере их готовности к серийному производству.

УДК 621.382

Интеграция полупроводниковых чувствительных элементов радиационной нагрузки в бортовые электронные системы космических аппаратов

Бакеренков А. С.
АО «Научно-исследовательский институт космического приборостроения»
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53
Bakerenkov_AS@orkkniikp.ru

Рассмотрены варианты конструктивных и схемотехнических решений по применению полупроводниковых чувствительных элементов дозовой нагрузки на основе *p*-канальных МОП-структур и чувствительных элементов для регистрации тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства на основе эпитаксиально-планарных диодных матриц в бортовых электронных системах космических аппаратов.

Ключевые слова: поглощенная доза; тяжелые заряженные частицы; космические аппараты; датчиковая аппаратура.

УДК 621.382

Сильноточная 3D GaN микросборка с двухсторонним теплоотводом, предназначенная для применения в модулях высокоплотных DC-DC преобразователей

Доценко В. В., Кодорова И. Ю., Полынцев Е. С., Кагадей В. А., Аксёнов А. А., Зиятдинов Р. М.
АО «НПП «Радар ммс», ОП НПК Томское
634040, г. Томск, ул. Владимира Высоцкого, 28, стр. 3
docenko_vv@radar-mms.com

Описана новая конструкция сильноточной 3D GaN микросборки с двухсторонним теплоотводом на основе двухуровневой металлической платы, а также керамической AlN платы с двухсторонней медной металлизацией и сквозными металлизированными отверстиями. Микросборка предназначена для применения в модулях высокоплотных DC-DC преобразователей.

Ключевые слова: силовая GaN электроника; микросборка; 3D интеграция; двухсторонний теплоотвод.

Величины коэффициента полезного действия (КПД), а также плотности мощности как на единицу массы (Вт/кг), так и на единицу объема (Вт/см^3) являются тремя ключевыми показателями развития преобразователей электрической энергии, используемых для электропитания автономных систем [1]. В последнее время в силовой электронике и, в частности, в импульсных DC-DC преобразователях наблюдается переход от Si к GaN электронной компонентной базе (ЭКБ) [2]. Это связано с улучшенными электрическими характеристиками GaN HEMT-транзистора: большей плотностью тока, пониженным сопротивлением в открытом состоянии и повышенной скоростью переключения, что означает гораздо более высокую частоту преобразования без увеличения потерь мощности. Большая частота переключения GaN HEMT-транзисторов позволяет использовать пассивные компоненты с меньшим размером, что снижает электромагнитные потери в преобразователях энергии, а также уменьшает их массогабаритные характеристики.

Однако преимущества GaN не могут быть полностью реализованы в варианте прямой замены Si компонентов на GaN ЭКБ. Это связано с тем, что высокие значения *dv/dt u di/dt*, характерные для силовых GaN HEMT, требуют снижения значений паразитных индуктивностей межсоединений в затворном и силовом контурах преобразователей. Еще один барьер, возникающий при переходе от Si к GaN ЭКБ, связан с ростом величины удельного тепловыделения (до 300 Вт/см^2) в активной области силового GaN-транзистора.

Преодоление этих барьеров особенно важно в случае сильноточных преобразователей электрической энергии. Например, для сильноточных DC-DC преобразователей с GaN-транзисторами в полумостовой конфигурации крайне важно разработать такую конструкцию модуля, которая одновременно обладала бы как малыми паразитными индуктивностями, так и эффективным теплоотводом.

В работе представлена новая конструкция сильноточной 3D GaN микросборки с двухсторонним теплоотводом, предназначенная для применения в модулях высокоплотных DC-DC преобразователей. Микросборка, характеризуется

пониженными значениями паразитной индуктивности затворного и силового контура, а также теплового сопротивления перехода горячая точка силовых GaN-транзисторов — окружающая среда. В предложенном решении силовые GaN-транзисторы и антипараллельные диоды Шоттки собраны на двухуровневой металлической плате, в которой реализован силовой контур модуля. Драйвер управления с необходимой обвязкой собраны на керамической AlN плате с двухсторонней медной металлизацией и сквозными металлизированными отверстиями, в которой реализованы затворный контур модуля.

Сильноточная 3D GaN микросборка с двухсторонним теплоотводом, осуществляемым от металлической и керамической плат, имеет максимальное рабочее напряжение не менее 160 В, выходной ток не менее 30 А при частоте переключения 500 кГц. Показано, что предложенная конструкция и технология производства металлической платы позволяет достичь значения плотности протекающего тока до 40 А/мм^2 и паразитной индуктивности силового контура до 1,6 нГн. Продемонстрировано, что применение металлической и керамической плат, обладающих высокой теплопроводностью, позволяет обеспечить эффективный двухсторонний теплоотвод от силовых GaN-транзисторов и достичь значения теплового сопротивления горячая точка транзисторов — окружающая среда в 18 К/Вт.

Литература

1. Qi Z., Pei Y., Wang L., Wang K. A highly integrated PCB embedded GaN full-bridge module with ultralow parasitic inductance // IEEE Transactions on Power Electronics, November 2021. Vol. 37. P. 4161–4173.
2. Pushpakaran B. N., Subburaj A. S., Bayne S. B. Commercial GaN-based power electronic systems: A review // Journal of electronic materials, 2020. Vol. 49. P. 6247–6262.

УДК 621.382.2/.3

Малошумящие усилители, изготовленные по технологическому процессу GA05-D-L-01

Кулиш А. М.[1,2], Фазылханов О. Р.[3]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] АО «Микроволновые системы»
105122, г. Москва, Щёлковское ш., 5, стр. 1
artem111mass@gmail.com
[3] АО «Светлана-Рост»
194156, г. Санкт-Петербург, просп. Энгельса, 27

В рамках сервиса MPW, организованного НИУ МИЭТ, на основе технологического процесса GA05-D-L-01 АО «Светлана-Рост» разработаны МИС МШУ X-диапазона. В докладе описаны этапы и результаты моделирования и их сравнение с измерениями S-параметров, коэффициента шума и потребляемой и выходной мощности.

Ключевые слова: GaAs pHEMT; СВЧ МИС; МШУ; двухпозиционный коммутатор; приемо-передающий модуль.

Монолитные интегральные схемы (МИС) малошумящих усилителей (МШУ) X-диапазона частот являются незаменимой частью приемо-передающих модулей в системах фазированных антенных решеток и измерительной аппаратуре. Ключевыми характеристиками МИС МШУ являются коэффициент шума и коэффициент усиления в требуемом диапазоне частот, величина потребляемой мощности.

В рамках сервиса MPW, организованного НИУ МИЭТ, предприятием АО «Микроволновые системы» разработаны МИС МШУ и МШУ с байпас-каналом X-диапазона на основе технологического процесса GaAs pHEMT с проектной нормой 0,5 мкм GA05-D-L-01, изготовленные на отечественном контрактном производстве АО «Светлана-Рост». МШУ, находящийся в составе обеих МИС, спроектирован с использованием методики совмещенного согласования, которая позволяет достичь минимального коэффициента шума при минимальных потерях на отражение сигнала от входа усилителя [1]. МИС МШУ с байпас-каналом состоит из МШУ, дополненного двухпозиционными коммутаторами, осуществляющими переключение между усилителем и линией передачи, за счет чего реализуется усиление входного сигнала на 20 дБ либо обеспечивается прохождение сигнала с затуханием не более 1,5 дБ, в зависимости от комбинации управляющих напряжений [2]. Режим транзисторов по постоянному току в составе обеих МИС задается с использованием схем истокового автосмещения, что позволяет сократить количество требуемых источников напряжения и исключить зависимость параметров МИС от точности установки внешнего напряжения затвор-исток транзисторов в усилительных каскадах. В докладе описаны этапы и результаты моделирования, сравнение результатов моделирования с результатами экспериментального исследования параметров матрицы рассеяния (S-параметров), коэффициента шума, выходной и потребляемой мощности изготовленных образцов МИС МШУ X-диапазона частот.

Литература

1. Лосев В. В., Кондратенко А. В., Сорвачёв П. С., Кулиш А. М. Проектирование МИС малошумящего усилителя X-диапазона частот на основе технологического процесса 0,5 мкм GaAs pHEMT // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2023. — № 4 (192). — С. 27–35. — URL: https://doi.org/10.7868/S2410993223040048. EDN: DGSRXL.
2. Кулиш А. М., Лосев В. В. Проектирование малошумящего усилителя с байпас-каналом X-диапазона частот с использованием библиотеки элементов технологического процесса 0,5 мкм GaAs pHEMT // Изв. вузов. Электроника, 2025. — Т. 30. — № 1. — С. 64–75. — URL: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2025-30-1-64-75. EDN: BCBBCN.

УДК 537.242+621.382.232+621.3.049.776.422

Моделирование воздействия электростатического разряда на полупроводниковое устройство защиты в кремниевом интерпозере

Емельяненко Ю. А., Россов А. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Было проведено приборно-технологическое моделирование воздействия электростатического разряда на полупроводниковые приборы защиты, а именно на 3D-диод на основе *p-n*-перехода и NMOS-транзистор. Определены основные характеристики этих приборов, критически важные для разработки системы ESD-защиты для использования в составе кремниевых интерпозеров при построении систем в корпусе.
Ключевые слова: ESD (electrostatic discharge); кремниевый интерпозер; HBM (human body model); 3D-диод.

По различным оценкам, около 30 % всех отказов электронных компонентов связаны с электростатическим разрядом, что приводит к экономическим и репутационным проблемам, а также поднимает вопросы надежности изделий. По мере миниатюризации и повышения степени интеграции микроэлектронных схем чувствительность к электростатическому разряду становится все выше, появляется необходимость в создании все более совершенных и сложных систем для защиты. Приборно-технологическое моделирование является важным этапом для разработки защиты от ESD (electrostatic discharge), в особенности для сложных и дорогих систем на кристалле или систем в корпусе. Оно позволяет оптимизировать конструкцию ESD-защиты, минимизировать вероятность возможного отказа. Одним из подходов построения систем в корпусе является использование в качестве коммутационной платы для электронных компонентов кремниевого интерпозера [1]. Создание ESD-защиты в кремниевом интерпозере позволит повысить выход годных изделий, снизить требования к антистатической защите при сборке и эксплуатации устройств, в особенности с учетом того, что отдельные типы ЭКБ, такие как GaAs или GaN СВЧ МИС, не имеют встроенной ESD-защиты [2].

Моделирование воздействия электростатического разряда было проведено в среде приборно-технологического моделирования. Для моделирования была создана структура испытуемого защитного прибора, активированы необходимые физические субмодели. В качестве приборов исследовался 3D-диод на основе *p-n*-перехода [3] и двух различных конструкций NMOS-транзисторов.

В результате моделирования воздействия электростатического разряда HBM (human body model) амплитудой 10000 В на 3D-диод были получены численные значения пикового тока, температуры, времени включения, а также диаграммы распределения плотности тока, температуры решетки, электростатического потенциала в структуре диода и временные зависимости тока. Проведенный анализ полученных характеристик показал, что наиболее уязвимыми к повреждению оказались области возле внутренних микроотверстий, 3D-диод оказался устойчив к воздействию ESD HBM 10000 В.

В ходе моделирования воздействия электростатического разряда на NMOS-транзисторы были получены численные значения пикового тока, температуры, времени включения, а также диаграммы распределения плотности тока, температуры решетки и вольт-амперные характеристики транзисторов во время прохождения события электростатического разряда. Обнаружены и исследованы эффекты влияния конструкции NMOS-транзистора на параметры, критически важные для разработки системы ESD-защиты.

Литература

1. Красников Г. Я., Панасенко П. В. и др. Исследование базовой конструкции малогабаритных СВЧ ППМ на основе кремниевого интерпозера // Российский форум «Микроэлектроника-2022», 2022. — С. 346–347.
2. Scholz M. et al. ESD protection design in active-lite interposer for 2.5 and 3D systems-in-package // 2015 37th Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium (EOS/ESD). IEEE, 2015. P. 1–10.
3. Courivaud B. et al. Reliability of ESD protection devices designed in a 3D technology // Microelectronics Reliability, 2014. Vol. 54. № 9–10. P. 2272–2277.

УДК 621.396.96

Программно-аппаратные модули для макетирования ЛЧМ-радара на платформе «СВЧ КИТ»

к. т. н. Будяков А. С.[1], Бриль Д. С.[1,2], Дранцев С. А.[1,2]
[1] ООО «Новые технологии»
107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 38
[2] МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
bas@n-teh.tech

Представлены низкочастотные программно-управляемые модули, расширяющие функциональность системы «СВЧ КИТ» — платформы для прототипирования на отечественной ЭКБ. Разработанные генератор модулирующего напряжения и цифровой частотомер на базе МК Milandr K1986BE92QI управляются из среды GNU Radio. Данное решение позволяет собрать и исследовать полнофункциональный макет ЛЧМ-радиовысотомера без привлечения внешних лабораторных измерительных приборов, что имеет высокую образовательную ценность.

Ключевые слова: СВЧ КИТ; GNU Radio; ЛЧМ-радар; учебный макет; отечественная ЭКБ; Milandr K1986BE92QI; образовательная платформа.

«СВЧ КИТ» [1] — это система быстрого прототипирования СВЧ-трактов на основе электронной компонентной базы (ЭКБ) отечественного производства. Для решения комплексных учебных и инженерных задач, таких как создание макета ЛЧМ-радара, стандартный набор платформы требует дополнения специализированными низкочастотными (НЧ) модулями управления и обработки.

В рамках данной работы были разработаны два ключевых модуля на базе микроконтроллера Milandr K1986BE92QI:

5) генератор модулирующего напряжения для формирования пилообразного сигнала управления ГУН;
6) цифровой частотомер для измерения частоты биений на выходе смесителя и вычисления дальности.

Ключевой особенностью комплекса является его интеграция с открытой программной средой GNU Radio. Управление модулями, передача и обработка оцифрованных данных выполняются в едином интерфейсе, что позволяет гибко модифицировать алгоритмы работы системы. Такой программно-аппаратный подход идеально подходит для внедрения в учебный процесс, так как позволяет студентам исследовать принципы радиолокации и обработки сигналов без необходимости в дорогостоящем измерительном оборудовании.

Создан программно-аппаратный комплекс, который позволяет, используя исключительно компоненты «СВЧ КИТ», собрать автономный функциональный макет ЛЧМ-радиовысотомера. Это наглядно демонстрирует, как платформа может быть использована для решения комплексных прикладных задач, и подтверждает ее высокую ценность в образовательной и научно-исследовательской деятельности.

Литература

1. «СВЧ-КИТ» [Электронный ресурс]: сайт. — URL: http://www.svch-kit.ru (дата обращения: 04.07.2025).

УДК 681.2

Автоматизированный стенд для комплексной проверки силовых датчиков тока

Махотин И. Д.[3], Ширин А. О.[1], Леухин И. Б.[1], Давыдов Г. Г.[2], Кессаринский Л. Н.[2], Телец В. А.[2]
[1] АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
ibleu@spels.ru
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
LNKessarinskiy@mephi.ru
[3] ООО «ИДМ-ПЛЮС»
124489, г. Москва, г. Зеленоград, Сосновая аллея, 6А, стр. 1
a.timofeev@idm-plus.ru

Разработан универсальный испытательный комплекс для датчиков тока с четырьмя модификациями (150А-2 кА), включающий единую систему управления на платформе LabVIEW. Комплекс обеспечивает высокоточное автоматизированное тестирование до 120 образцов одновременно в температурном диапазоне от −60 до +85 °C.

Ключевые слова: датчики тока; испытательный комплекс; автоматизированное тестирование; контроль качества.

В современном мире датчики тока играют ключевую роль в энергетике, транспорте, промышленной автоматизации и робототехнике, обеспечивая безопасность и стабильность энергосистем. Их массовое производство требует создания специализированных испытательных комплексов, способных гарантировать высокое качество продукции при больших объемах выпуска [1].

Разработка универсальной аттестованной испытательной установки позволит стандартизировать процессы тестирования, устранив различия в подходах между производителями. Это не только повысит конкурентоспособность отечественной продукции, но и создаст основу для формирования единых отраслевых стандартов контроля качества [2].

Для комплексного тестирования датчиков тока в различных рабочих диапазонах были разработаны четыре модификации испытательного стенда, различающиеся максимальным током нагрузки: до 150 А, 500 А, 1 кА и 2 кА соответственно. Все варианты выполнены по единой модульной архитектуре, включающей блок коммутации, набор унифицированных оснасток с контактирующими устройствами, модульную систему подключения контрольно-измерительного оборудования и централизованную систему питания. Такая конструкция обеспечивает идентичные условия тестирования во всех диапазонах при сохранении общего интерфейса управления.

Основные различия между модификациями стендов заключаются в конструкции силовых ключей и их рабочих характеристиках. В стенде для токов до 150 А применяются твердотельные управляемые тиристорные модули МТТ-800-12, см. рис. 1*а*, обеспечивающие эффективную коммутацию в этом диапазоне. Для стенда до 500 А используются электромеханические контакторы

типа КМ600-ДВ, см. рис. 1*б*, способные работать в диапазоне до 600 А в номинальном режиме. В высокотоковых конфигурациях (1–2 кА) реализован специальный трехэтапный алгоритм коммутации: первоначальная подача малого тока (10–15% от номинала) для обеспечения надежного контакта, полное замыкание цепи и последующий плавный выход на рабочий ток. Такой режим работы позволяет эксплуатировать электромеханические контакторы КМ600-ДВ при токах до 1–2 кА без особой потери долговечности.

а *б*

Рис. 1. Силовой ключ до 150 А на основе твердотельных тиристорных модулей МТТ-800-12 (*а*); силововой ключ до 500 А на основе электромеханических контакторов КМ600-ДВ (*б*)

Все стенды сохраняют ключевые функциональные возможности: последовательное тестирование датчиков (не более одного одновременно), прецизионные измерения с помощью эталонного мультиметра, возможность работы в экстремальных температурных условиях от −60 до +85 °C. Управление осуществляется через единый LabVIEW-интерфейс, включающий панель управления тестами, модуль настройки приборов и систему телеметрии для мониторинга параметров в реальном времени.

Таким образом, разработанный испытательный комплекс для датчиков тока объединяет четыре модификации (150 А, 500 А, 1 кА и 2 кА) с единой системой управления, обеспечивая стандартизированный контроль качества при серийном производстве. Конструкция сочетает унификацию основных компонентов с оптимизированными силовыми модулями для каждого диапазона токов, что позволяет одновременно тестировать до 120 датчиков с высокой точностью, сохраняя безопасность работы даже с высокими токами. Такое решение обеспечивает гибкость применения для различных типов датчиков при сохранении точности измерений во всем рабочем диапазоне — от единиц до тысяч ампер, полностью автоматизируя процесс испытаний.

Литература

1. Costa F., Poulichet P., Mazaleyrat F., Labouré E. The current sensors in power electronics, a review // EPE Journal 11(1): 7–18 February 2001.
2. Никифоров А. Ю., Согоян А. В. Электронные датчики: преобразователи температуры, фотоприемники. — М.: МИФИ, 2005. — 116 с.

УДК 621.373.52

Монолитная интегральная схема синтезатора частоты мм-диапазона длин волн

Баландин Д. А., Евлампиев А. Ю., Брынцев И. В.
ООО «ИПК Электрон-Маш»
124482, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Савелки, г. Зеленоград, к. 313А

Разработан монолитный SiGe-синтезатор частоты мм-диапазона длин волн на основе двухкаскадной петли ФАПЧ. На кристалле интегрированы генератор, управляемый напряжением, частотно-фазовый детектор, делитель частоты, вторая петля ФАПЧ реализована на отдельном кристалле. В первой петле ФАПЧ обеспечена синхронизация с частотой сравнения свыше 1 ГГц.
Ключевые слова: SiGe; синтезатор частоты; петля ФАПЧ; VCO; делитель частоты; синхронизация; ГУН; мм-диапазон.

Одним из перспективных направлений создания синтезаторов мм-диапазона являются монолитные решения по SiGe-технологии, которая позволяет обеспечить высокую рабочую частоту СВЧ и аналоговых блоков за счет высокого f_T, как правило, свыше 200 ГГц. Предложенный синтезатор выполнен в виде единого кристалла, на котором реализованы:

- управляемый напряжением генератор (ГУН) с диапазоном 42–48 ГГц;
- частотно-фазовый детектор (ЧФД);
- делитель частоты ГУН для первой петли ФАПЧ.

Все перечисленные блоки в составе синтезатора выполнены на основе быстродействующей эмиттерно-связанной логики, что предоставило ряд преимуществ [1].

Вторая петля ФАПЧ выполнена на отдельной микросхеме со встроенным генератором iFSY-320. Конструктивно синтезатор построен на двух каскадах ФАПЧ, что позволяет обеспечить высокую частоту сравнения во втором каскаде и снизить негармонические спектральные составляющие, связанные с искажениями ЧФД. Возможность управления частотой синтезатора обеспечивается программированием iFSY-320, который выступает в роли опорного генератора для второй петли ФАПЧ.

Экспериментальные исследования показали успешную синхронизацию обоих каскадов с внешним опорным сигналом частотой 10 МГц и формирование стабильного сигнала мм-диапазона.

Полученные результаты демонстрируют возможность интеграции всех ключевых блоков синтезатора на одном кристалле, обеспечив работу в мм-диапазоне длин волн [2].

Таким образом, предложенный синтезатор частоты сочетает в себе компактность монолитного исполнения и высокие динамические характеристики, что делает его перспективным решением для радиолокационных и телекоммуникационных систем нового поколения.

Литература

1. Баландин Д. А. Исследование путей снижения собственных шумов синтезаторов с фазовой автоподстройкой частоты // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-1 (119). — С. 156–160.
2. Kissinger D., Kahmen G. and Weigel R. Millimeter-Wave and Terahertz Transceivers in SiGe BiCMOS Technologies // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021. Vol. 69. № 10. P. 4541–4560.

Операционные усилители на отечественном комплементарно-биполярном техпроцессе (БиКМОП): технология, вызовы и перспективы

Семихатов И. А.
АО «ДЦ «Кристал»
105187, г. Москва, ул. Щербаковская, 53, корп. 3
isemikhatov@dckristal.com

Одним из ключевых направлений развития современной аналоговой микроэлектроники в России являются различные виды операционных усилителей (ОУ), создаваемые на основе отечественного комплементарно-биполярного (БиКМОП) технологического процесса. Этот подход сочетает преимущества биполярных и КМОП-транзисторов, открывая путь к созданию высокопроизводительных ОУ, критически важных для импортозамещения в ответственных секторах.

1. В части разработки это позволяет достичь уникальных комбинаций характеристик:

- высокая скорость плюс низкое потребление, что недостижимо в чисто биполярных или чисто КМОП-процессах;
- высокая точность (низкое смещение, низкий дрейф) плюс низкий шум — биполярные входные каскады;
- высокая выходная нагрузочная способность плюс Rail-to-Rail-выход — КМОП-биполярные выходные каскады;
- интеграция сложной аналоговой и цифровой логики — возможность реализации программируемых ОУ, ОУ с отключением и т. д.

Такие ОУ востребованы в прецизионной измерительной технике, высокоскоростных АЦП/ЦАП, системах связи, медицинском оборудовании, промышленной автоматике, автомобильной электронике.

2. Разработка и производство современных БиКМОП ОУ в России опирается на ограниченное число технологических линий на отечественных фабриках:

- АО «Ангстрем» (Зеленоград),
- АО «Микрон» (Зеленоград).

3. Отечественные разработки ОУ на БиКМОП техпроцессе:

- прецизионные ОУ (разработки ОУ для измерительных приборов и промышленных контроллеровв, например полные функциональные аналоги LTC2057, OPA2182);
- высокоскоростные ОУ (разработки ОУ для драйверов АЦП/ЦАП, активных фильтров, систем связи, например полные функциональные аналоги OPA855, ADA4899);
- ОУ с Rail-to-Rail-входами/выходами (универсальные ОУ общего назначения на БиКМОП, разрабатываемые как альтернатива импортным MCP6xxx, TLV9xxx, но с лучшими скоростными или точностными параметрами благодаря биполярным элементам);
- специализированные ОУ (инструментальные усилители (ИУ), программируемые ОУ (ПОУ), ОУ с токовым выходом: используется гибкость БиКМОП для интеграции сложных функций и аналоговых ключей).

4. Несмотря на имеющийся потенциал, развитие ОУ на отечественных БиКМОП-техпроцессах сталкивается с серьезными вызовами и проблемами:

- ограниченность и недостаточная зрелость техпроцессов;
- сложность проектирования;
- малые объемы и высокая стоимость конечных изделий;
- проблемы корпусирования и испытаний;
- конкуренция с КМОП и биполярными ОУ.

5. Стратегическими и перспективными направлениями на данный момент являются:

- концентрирование на специализации: не пытаться догнать ведущие зарубежные фабрики (TI/ADI) по всему спектру линеек. Сосредоточиться на нишевых ОУ с уникальными характеристиками;
- углубленная характеризация: повышение предсказуемости и стабильности параметров существующих БиКМОП-процессов;
- освоение новых процессов: ускорение внедрения и освоения БиКМОП 0,18 мкм. Исследование возможности внедрения более тонких норм;
- разработка БиКМОП ОУ как ключевых аналоговых блоков для сложных систем на кристалле (СнК): АЦП/ЦАП высокого разрешения, приемо-передатчики, контроллеры силовых приводов;
- инвестиции в САПР: ускорение развития и внедрения отечественных САПР для аналогового проектирования с поддержкой БиКМОП PDK;
- целевая подготовка: усиление программ подготовки и переподготовки инженеров-аналоговиков в ведущих вузах (МИЭТ, МФТИ, ЛЭТИ) с упором на БиКМОП-проектирование;
- долгосрочные заказы: формирование гарантированного госзаказа на высокотехнологичные ОУ для стратегических отраслей, не только в сфере ОПК.

Таким образом, операционные усилители на отечественном комплементарно-биполярном техпроцессе (БиКМОП) представляют собой одно из стратегических направлений для создания высокопроизводительной аналоговой компонентной базы в России. Обладая уникальным потенциалом для сочетания скорости, точности и функциональности, БиКМОП ОУ способны обеспечить импортозамещение в критически важных областях.

Для этого требуется преодоление ограничений, отладка существующих технологических процессов, решение проблемы дефицита кадров высокой квалификации, развитие отечественных САПР, налаживание экономически эффективного производства и решение проблем корпусирования.

Развитие отечественных БиКМОП ОУ — это не просто задача создания электронного компонента, это инвестиция в технологический суверенитет России в области высокотехнологичной аналоговой микроэлектроники.

Литература

1. АО «Ангстрем»: официальный сайт (разделы о технологиях, продукции). — URL: https://www.angstrem.ru.
2. АО «Микрон»: официальный сайт (разделы «Технологии», «Продукция», «Разработка». — URL: https://www.mikron.ru.
3. АО «НИИ «Субмикрон»: официальный сайт (раздел «Технологии»). — URL: https://submicron.ru.

УДК 681.2

Открытая модульная платформа для полунатурного тестирования доверенных систем блоков малых космических аппаратов

Суринович А. Д.[1], Егорова А. М.[1], Ширин А. О.[1], Леухин И. Б.[1], Кессаринский Л. Н.[2], Никифоров А. Ю.[2]
[1] АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
adsur@spels.ru
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
LNKessarinskiy@mephi.ru

Данная работа описывает примененный подход полунатурного имитационного функционального тестирования сложных систем для проверки блоков малых космических аппаратов. Конструкция системы реализована как открытая многоканальная модульная платформа, выполненная в виде шасси для типовых модулей.

Ключевые слова: HIL-тестирование; модульные системы; испытательный комплекс; автоматизированное тестирование; доверенные системы.

Блоки управления малыми космическими аппаратами являются сложными техническими устройствами, которые требуют высокой точности и надежности в работе. При переходе от опытного к серийному производству блоков необходимо проводить тестирование аппаратуры для обеспечения высокого качества и надежности работы всей системы [1]. Одним из наиболее эффективных методов такого тестирования является аппаратно-программная имитация внешних систем («полунатурное тестирование», или HIL тестирование) [2].

В рамках HIL-тестирования блоков малых космических аппаратов их окружение в спутнике заменяется программно-аппаратным имитатором, который взаимодействует с реальным вводом-выводом тестируемого устройства так, как если бы оно физически присутствовало. В частности, для системы электроснабжения космического аппарата HIL-моделирование позволяет имитировать различные режимы работы солнечных панелей, аккумуляторных батарей и потребителей электроэнергии, что необходимо для проверки корректности работы системы управления электропитанием.

Аппаратная часть разработанной HIL-системы реализована в виде открытой модульной платформы. Она представляет собой шасси с возможностью установки стандартизированных функциональных модулей. Управление платформой осуществляется посредством встроенной платы контроллера по интерфейсу USB или Ethernet. Программный интерфейс взаимодействия с платформой был разработан в среде LabVIEW. Графическая среда разработки программного обеспечения обеспечивает сопряжение оборудования и управляющего персонального компьютера через стандартные интерфейсы (GPIB, RS-232, USB, Ethernet). Автоматизация тестирования реализована при помощи среды разработки тестовых последовательностей TestStand. В ней формируются последовательности тестирования

блока за счет взаимодействия с программными драйверами модульной платформы, что обеспечивает гибкость и эффективность процесса проверки.

На рис. 1 представлена фотография блока шасси в стойке в процессе самотестирования. На фотографии отчетливо видны две основные составляющие:

1) работающая программа, которая управляет процессом самотестирования;
2) блок шасси, который успешно проходит тестирование.

Рис. 1. Блок шасси в стойке в процессе самотестирования

На текущий момент программное обеспечение платформы поддерживает работу трех модулей:

- модуля двухканального источника-измерителя;
- модуля измерителя мощности (до 180 Вт);
- модуля измерителя большой мощности (до 2,4 кВт).

Функционал разработанной программно-аппаратной платформы позволяет проводить пять различных видов тестирования системы управления электроснабжения МКА:

- имитация разряда аккумуляторной батареи;
- имитация источника напряжения питания;
- имитация генератора фототока;
- имитация перезаряжаемых элементов питания;
- имитация заряда аккумуляторной батареи.

Аппаратно-программная платформа открыта разработчикам, что дает возможность реализовать автоматизированные тестовые решения в виде законченных функциональных модулей, а также масштабировать их в составе системы. В данный момент идет расширение номенклатуры модулей. Платформа позволит выпускать модули АЦП/ЦАП, стандартных и специфических цифровых интерфейсов, коммутации, а также модулей программируемого сопротивления. Указанные разработки позволят реализовать имитатор аналоговых и цифровых датчиков, а также цифровых интерфейсов МКА.

Литература

1. Nikiforov A. Y., Boychenko D. V., Telets V. A. and coauthors. Basic trends in electronic components product range development: radiation hardness aspects // Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM. 30. «2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics, MIEL 2017 — Proceedings» 2017. P. 45–48.
2. Yadav Vikaskumar, Bhade Nilesh. (2024). Implementation of a Hybrid Hardware-in-the-Loop (HIL) Test System for Automotive Software Validation and Verification. 10.4271/2024-28-0252.

УДК 681.2

Комбинированная система синхронизации открытой многоканальной модульной платформы

Златин С. А.[1], Суринович А. Д.[1], Егорова А. М.[1], Леухин И. Б.[1], Ширин А. О.[1], Грицаенко Д. И.[1], Кессаринский Л. Н.[2], Телец В. А.[2]

[1] АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
adsur@spels.ru
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
LNKessarinskiy@mephi.ru

Разработана специализированная модульная платформа для полунатурного тестирования. В платформе реализована комбинированная система синхронизации, что обеспечивает детерминированность критических процессов и гибкую реакцию на асинхронные события при управлении через USB/Ethernet.

Ключевые слова: модульные системы; испытательный комплекс; автоматизированное тестирование; событийное управление; синхронизация.

Модульные системы строятся на трех основных архитектурах: магистральной, распределенной и гибридной. В магистральной системе мастером является только один модуль, который является контроллером связи с ПК. В распределенной и гибридной системах может быть несколько разных мастеров, что часто используется в системах управления промышленными процессами. Конфигурация с одним мастером обеспечивает простоту и предсказуемость работы, но имеет ограничения по отказоустойчивости и масштабируемости. Система с архитектурой, где есть несколько мастеров, устраняет эти недостатки за счет распределенного управления, обеспечивая высокую надежность и гибкость, однако требует сложных механизмов синхронизации [1].

Разработанная система представляет собой многоканальную модульную платформу для полунатурного тестирования, реализованную в конфигурации с одним мастером. Данная конфигурация обеспечивает оптимальное сочетание надежности, простоты реализации и соответствия требованиям проекта без избыточного усложнения архитектуры. Платформа поддерживает управление через интерфейсы USB или Ethernet с использованием SCPI-подобных команд. Каждый модуль адресуется по номеру своего слота и обладает собственным набором поддерживаемых команд, определяемым его функциональным назначением.

Представленная схема демонстрирует многоуровневую архитектуру системы управления, построенную на платформе LabVIEW с использованием комбинированного USB/Ethernet-интерфейса для связи между персональным компьютером (ПК) и аппаратными модулями. Система реализует принцип модульности, что обеспечивает гибкость и масштабируемость решения.

Программная часть высокого уровня реализована на языке LabVIEW, что обеспечивает графическое программирование управления системой, визуализацию данных, простоту создания пользовательского интерфейса и широкие возможности обработки сигналов. LabVIEW взаимодействует с аппаратной частью через

драйверы, используя стандарт VISA (Virtual Instrument Software Architecture), который предоставляет единый API для работы с различными интерфейсами.

Контроллер интерфейса выполняет ключевые функции, такие как преобразование протоколов (Ethernet/CDC в параллельную шину), обработка команд от ПК, управление функциональными модулями, организация обмена данными по 32-битной параллельной шине.

Функциональные модули содержат интерфейс для подключения к 32-битной параллельной шине, собственную программу обработки команд от контроллера, специализированный функционал (исполнение конкретных задач). Модули получают команды от контроллера и выполняют соответствующие операции, что позволяет легко расширять систему добавлением новых специализированных модулей. Иерархическая модель передачи данных изображена на рис. 1.

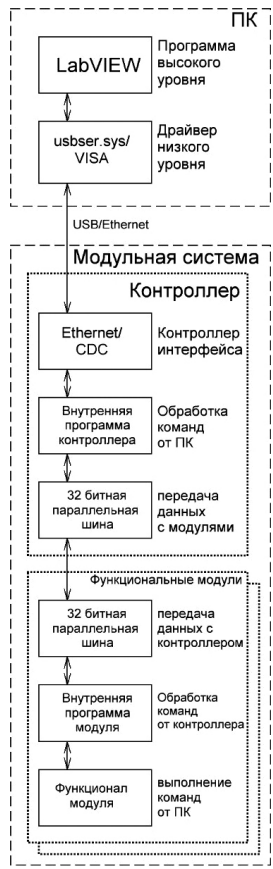


Рис. 1. Архитектура системы управления

Преимущества данной архитектуры:

1) позволяет легко добавлять новые функциональные блоки без изменения основной архитектуры;
2) комбинация USB и Ethernet обеспечивает различные варианты подключения;
3) система может быть расширена добавлением новых модулей;
4) четкое разделение на уровни упрощает разработку и отладку;
5) использование стандартов VISA, CDC обеспечивает совместимость и переносимость.

Представленная архитектура демонстрирует эффективный подход к построению модульных систем управления, сочетающий преимущества LabVIEW для верхнего уровня управления и надежные аппаратные решения для взаимодействия с физическими устройствами. Использование 32-битной параллельной шины обеспечивает высокую скорость передачи данных, одновременную передачу данных и управляющих сигналов и простую синхронизацию модулей, что делает подобное решение применимым в широком спектре задач автоматизации и управления.

Литература

1. Бобровский Д. В., Давыдов Г. Г., Петров А. Г., Яненко А. В., Ахметов А. О., Боруздина А. Б., Калашников О. А., Кессаринский Л. Н., Некрасов П. В., Никифоров А. Ю., Уланова А. В. Реализация базовых методов радиационных испытаний ЭКБ на основе аппаратно-программного комплекса аппаратуры National Instruments // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2012. — № 5 (97). — С. 91–104.

УДК 681.2

Разработка архитектуры открытой многоканальной модульной платформы

Шевлягин М. С.[1], Суринович А. Д.[1], Леухин И. Б.[1], Ширин А. О.[1], Кессаринский Л. Н.[2], Никифоров А. Ю.[2]
[1] АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
adsur@spels.ru
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
LNKessarinskiy@mephi.ru

Разработана открытая многоканальная модульная платформа для полунатурного тестирования с 32-битной шиной, адаптивной синхронизацией и событийным управлением. Решение обеспечивает экономическую эффективность при сохранении требуемой функциональности для специализированных измерительных задач.

Ключевые слова: модульные системы; испытательный комплекс; автоматизированное тестирование; синхронизация.

При создании сложных измерительных комплексов часто рассматриваются два основных подхода: использование стандартных платформ (PXI, LXI) или разработка специализированных решений. Стандартные платформы обеспечивают проверенную элементную базу и сокращают сроки разработки, однако могут иметь определенные ограничения [1]. В частности, закрытые архитектуры, такие как L-Card, не всегда позволяют реализовать необходимый функционал, а универсальные системы, например PXI, часто обладают избыточным функционалом для специализированных задач. В таких случаях разработка открытых модульных платформ представляет собой оптимальное решение. Подобные системы сочетают преимущества стандартизированных компонентов с возможностью точной адаптации под конкретные требования. Такой подход позволяет создать оптимизированное решение, учитывающее все нюансы конкретного применения, что особенно важно для ответственных измерительных систем и комплексов тестирования.

Аппаратная часть разработанной системы реализована в виде открытой многоканальной модульной платформы, предназначенной для полунатурного тестирования встроенных систем. Платформа представляет собой унифицированное шасси со стандартизированными слотами для установки различных измерительных и управляющих модулей.

В основе разработанной системы лежит высокопроизводительная 32-битная параллельная шина с DDR-синхронизацией, обеспечивающая эффективное взаимодействие модулей через уникальные адресные линии для каждого слота. Информация о максимальной скорости передачи данных и количестве используемых линий собирается контроллером при инициализации системы на минимальной частоте с использованием минимального количества линий (две линии данных и одна линия тактирующего сигнала). Таким образом, каждый модуль может реализовывать различные скорости передачи данных. Технические характеристики

системы обеспечивают скорость передачи данных до ~2 Гбит/с, что определяется предельными возможностями используемого контроллера и модулей. Это существенно больше ограничений, накладываемых интерфейсами общения с ПК (480 Мбит/с для USB и 100 Мбит/с для Ethernet). Это позволяет собирать модули практически на любом микроконтроллере или ПЛИС.

В дополнение к параллельной шине на каждый модуль приходит четыре синхронизирующих тактовых сигнала и шесть линий событий. Тактовые сигналы создаются контроллером системы, имеют push-pull-технологию и могут принимать значения частоты от 0,01 Гц до 40 МГц с ограничением разности между четырьмя сигналами не более 65535 раз. Сигналы событий выполнены по типу open drain и создаются модулями для сообщения друг другу о срабатывании запрограммированного условия.

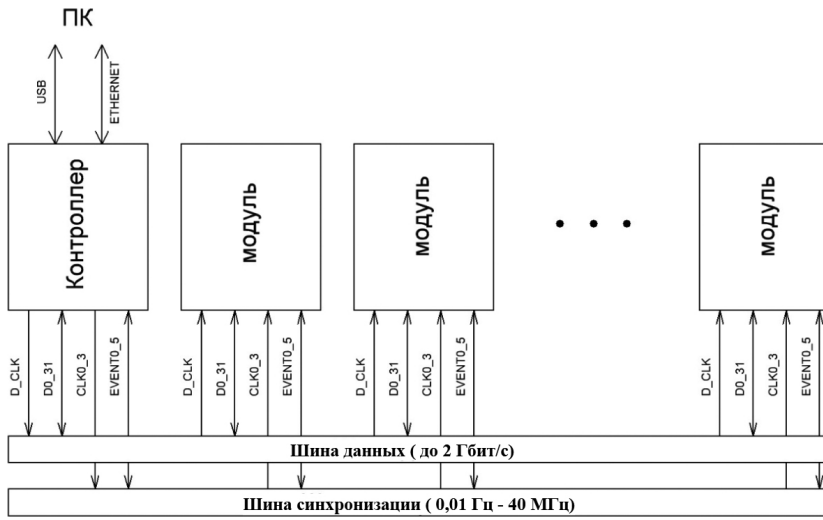


Рис. 1. Шины данных и синхронизации

Таким образом, разработанная открытая модульная система сочетает высокоскоростную передачу данных с гибкой системой синхронизации, обеспечивая универсальность аппаратной реализации на базе любых микроконтроллеров или ПЛИС. Архитектура платформы поддерживает независимое тактирование модулей, а также возможность запрограммировать несколько модулей на создание события на одной шине. Такое решение позволяет динамически конфигурировать временные параметры работы и создавать сложные синхронизированные измерительные комплексы.

Литература

1. Бобровский Д. В., Давыдов Г. Г., Петров А. Г., Яненко А. В., Ахметов А. О., Боруздина А. Б., Калашников О. А., Кессаринский Л. Н., Некрасов П. В., Никифоров А. Ю., Уланова А. В. Реализация базовых методов радиационных испытаний ЭКБ на основе аппаратно-программного комплекса аппаратуры National Instruments — Известия высших учебных заведений. Электроника, 2012. — № 5 (97). — С. 91–104.

Методологическая основа выявления троянов и уязвимостей в СФ-блоках процессорных подсистем прикладного класса при разработке доверенных СБИС

Сидорин Ю. Ю.[1], Кессаринский Л. Н.[2], к. т. н., Никифоров А. Ю.[2], д. т. н., Телец В. А.[2], д. т. н.
[1] АО «НТЦ «Атлас»
127018, г. Москва, ул. Образцова, 38
sidorin_yuyu@rnd.stcnet.ru
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

Предложены основы методической системы выявления уязвимостей в СФ-блоках процессоров, включающие:
- функционально-структурную модель троянов;
- факторы скрытности аппаратных троянов;
- набор типовых критических компонент процессорных подсистем, являющихся активами в контексте безопасности.

Ключевые слова: аппаратные трояны; верификация СФ-блоков; критические компоненты процессора; параметрическая модель трояна; оценка методов выявления троянов.

В современных условиях для обеспечения безопасности критической информационной инфраструктуры ключевую роль играют корректность функционирования и отсутствие уязвимостей в аппаратных платформах вычислительных систем. Уязвимости и аппаратные трояны в СФ-блоках процессоров могут быть источниками угроз кибербезопасности и функциональной безопасности вплоть до уровня распределенных систем КИИ. Эффективной защитной мерой является система выявления троянов и уязвимостей на этапе разработки СБИС. В рамках данной работы предлагаются основы для разработки методической базы такой системы.

Определение перечня критических сигналов и блоков процессора

Анализ на уровне RTL современных процессоров прикладного класса без предварительной декомпозиции на отдельные подсистемы и выделения наиболее критичных из них практически невозможен. В рамках данной работы предлагается структурное представление процессора, построенное с точки зрения нарушителя, внедряющего аппаратные трояны, выделяющее критические для кибербезопасности и функциональной безопасности компоненты. Верхний уровень таксономии образуют категории, определяемые критическими сигналами и данными, которые в них обрабатываются. В состав критических сигналов входят: адреса, режим выполнения, обрабатываемые данные, конфигурационные параметры функционирования, внешние сигналы, внутренние микроархитектурные сигналы. Приводится классификация типовых функциональных подсистем процессоров в соответствии с данными категориями. Для каждой функциональной подсистемы процессора приводятся варианты компонентов троянов, которые нарушитель может подключать к критическим сигналам и данным в этой подсистеме.

Выбор параметрической модели трояна, определяющей критерии различения для поиска

Подходы к выявлению уязвимостей, в том числе вызванных троянами, подразделяются на два типа:

1) верификация на соответствие спецификации, которая задает корректное функционирование и (или) все варианты некорректного поведения;
2) целенаправленный поиск элементов ФС-блока, отвечающих определенным критериям (шаблонам), позволяющим отличить их от функциональных элементов процессора.

Разработка спецификации прикладных процессоров, включая верификацию ее полноты и достаточности, представляет собой чрезвычайно сложную задачу. Так как обоснованного достижения требуемой надежности посредством целенаправленного поиска также к настоящему моменту не получено, оба подхода не самодостаточны. Необходимо включать в разработку доверенной ЭКБ специализированные процессы выявления уязвимостей и троянов на всех уровнях представления.

В данной работе проведен анализ моделей, определяющих критерии и шаблоны поиска явно или неявно, использованных в работах, описывающих методы выявления троянов. Общей базовой гипотезой в них является то, что нарушитель ведет себя рационально при реализации троянов и стремится снизить вероятность выявления их в рамках процессов типового этапа разработки. В качестве результата анализа предложена модель, использующая понятия контролируемости и наблюдаемости сигналов, определенных в рамках методической базы технологии постпроизводственного тестирования ИС.

Определение репрезентативной функционально-параметрической модели аппаратных троянов в процессорах

Для оценки практической эффективности методов поиска троянов, как правило, используются базы типовых реализаций. Достоверность оценки существенно зависит от представительности базы относительно общей совокупности актуальных угроз. Для оценки необходима модель, представляющая все множество актуальных троянов и включающая все значимые характеристики, определяющие скрытность. Наличие такой модели позволяет сформировать объективные критерии оценки методик выявления троянов и оптимизировать их по уровню достоверности обнаружения при заданном уровне помех и ресурсов. В результате проведенного анализа предложена обобщенная модель, позволяющая оценивать полноту тестовых наборов.

УДК 621.3.049

Рациональный статистический подход к радиационному контролю партий пластин изделий микроэлектроники в доверенном производстве

Московская Ю. М.[1], Никифоров А. Ю.[2], Телец В. А.[2], Бойченко Д. В.[1], Кессаринский Л. Н.[2]

[1] АО «ЭНПО СПЭЛС», обособленное подразделение «Зеленоград»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

Разработаны алгоритм и реализующая его методика проведения радиационных испытаний производственных партий пластин, учитывающая статистическую однородность изделий по радиационным откликам. Показано, что выявление и учет статистических закономерностей на этапе подготовки и освоения микросхем в производстве позволяют снизить затраты на контроль партий пластин в процессе серийного производства.

Ключевые слова: доверенное производство; статистический контроль; радиационная стойкость.

Доверенное производство должно обеспечивать неизменность поставок качественного (работоспособного в течение всего жизненного цикла в заявленных режимам и условиях эксплуатации) и безопасного (в части информационной, технологической и функциональной безопасности) изделия (см. ПНСТ 911-2024).

Подтверждение заявленных в технических условиях (ТУ) требований на протяжении всего периода серийного производства обеспечиваются путем верификации соответствия каждой партии изделия заданным уровням качества, надежности и стойкости к ВВФ, в том числе по радиационной стойкости, при предъявлении соответствующих требований. Если исключить случаи недекларированной коррекции схемно-топологического исполнения изделия, то сохранность требуемого уровня качества обеспечивается стабильностью технологического процесса (ТП). Параметры ТП, определяющие радиационную стойкость (РС), имеют особенность, которая выражается в резкой зависимости параметров изделия от изменения режимов и условий проведения технологических операций и используемых при производстве исходных материалов. Поэтому важно, чтобы ТП изготовления ИС с требованиями по РС находился в статистически управляемом состоянии, а для этого необходимо выявить закономерности в отклонениях характеристик ИС не только в процессе мониторинга электрических параметров в нормальных условиях и в диапазоне температур среды, но и в условиях воздействия ионизирующих излучений [1]. Соответствие изделий требованиям РС в процессе серийного производства отслеживается путем проведения испытаний производственных партий пластин (ППП) по группе Е ОСТ В 11.0998, однако в действующей практике статистическая изменчивость контролируемых параметров ИС от партии к партии не отслеживается.

Испытания по группе Е на сегодняшний день остаются одной из самых ресурсоемких операций контроля качества в серийном производстве. Основная причина

высокой стоимости и длительности — отсутствие четко установленного общепринятого порядка проведения испытаний. Существующие подходы не интегрируют данные, полученные на предыдущих этапах жизненного цикла для выявления закономерностей, которые можно использовать не только для упрощения контроля по группе Е, но и в целях мониторинга изменений как технологического процесса, так и внесения схемно-топологических коррекций на этапе серийного производства [2]. Поэтому актуальной является разработка алгоритма и реализующей его методики радиационного контроля партий пластин в доверенном производстве. Предлагается следующее.

В ходе работ по выявлению статистических закономерностей формируется опорная выборка — накопленная выборка из не менее чем трех однородных партий одного типономинала, для которой устанавливаются:

- разбросы от партии к партии для определения границ статистического регулирования;
- уровни испытательного воздействия, необходимые для подтверждения заявленных требований ТУ с учетом разбросов от партии к партии и норм испытаний.

По результатам анализа в случае установления однородности производственных партий пластин, испытанных на этапе подготовки и освоения производства, проводится уточнение норм на параметры с учетом установленных разбросов от партии к партии и корректировка программы — методики испытаний в части норм на испытательные воздействия, последовательности проведения испытаний и состава параметров критериев годности. Все образцы из состава однородных партий принимаются в качестве выборки, которую впоследствии используют для анализа контролируемой партии [3]. Результаты испытаний каждой серийной контролируемой партии сравниваются с результатами испытаний опорной выборки.

В случае установления однородности каждой последующей партии, как это и должно быть при серийном производстве, алгоритм проведения испытаний существенно упрощается за счет:

- установления меры уровня воздействия, необходимого для подтверждения соответствия изделий заданным требованиям, в единицах испытательных установок;
- выбора коэффициента калибровки контролируемой партии для лазерной и рентгеновской установок из ряда значений, найденных для выборок, входящих в состав опорной;
- проведения контроля по обоснованно сокращенному составу параметров путем исключения из состава контролируемых параметров, не обладающих чувствительностью к испытательным воздействиям;
- корректировки норм испытаний в сторону уменьшения путем учета объема всех образцов из однородных выборок как представителей генеральной совокупности всех проконтролированных партий механизма синхронизации для поддержания единого системного времени [3].

Если в результате статистического анализа контролируемая производственная партия пластин и ранее испытанные партии неоднородны (как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения уровня стойкости):

- испытания контролируемой партии проводятся в соответствии с алгоритмом при проведении работ по выявлению статистических закономерностей

с калибровкой источников лазерного и рентгеновского излучения при их использовании;

- требуется проведение анализа причин возникновения неоднородности, так как это свидетельствует о наличии отклонения в технологическом процессе.

Таким образом, использование выявленных статистических закономерностей упростит процедуру испытаний по группе Е в серийном производстве и снизит издержки. Анализ однородности партий под воздействием ионизирующих излучений выступает как дополнительный метод выявления неоговоренных корректировок, возникающих в процессе серийного производства, что особенно актуально при выполнении заказов на контрактных фабриках.

Литература

1. Московская Ю. М., Бойченко Д. В. Прогнозный контроль стабильности радиационной стойкости микросхем в серийном производстве I. Система и алгоритмы реализации для различных категорий изделий. Микроэлектроника 53, 688–695 (2024). https://doi.org/10.1134/S1063739724700859.
2. Kessarinskiy L. N., Shirin A. O. and Hovsepyan H. A. The Use of Microelectronics Radiation Behavior as Physical Uncloned Function to Find Counterfeit, 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, 2020. P. 1–3. DOI: 10.1109/MWENT47943.2020.9067496.
3. Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Fastovets D. V., Moskovskaya Yu. M., Sogojan A. V. and Nikiforov A. Yu. Nonparametric statistical analysis of radiation hardness threshold variation in CMOS IC wafer lots series with the aim of process monitoring // IEEE 31st Int. Conf. on Microelectronics (MIEL), Niš, 2019, IEEE, 2019. P. 193–196. https://doi.org/10.1109/MIEL.2019.8889642.

Актуальность ДИС и вопросы возникающие в практической плоскости нового направления электроники

Харченко М. Э.
АО «ВЗПП-С»
394033, г. Воронеж, Ленинский просп., 119а
harchenko@vzpp-s.ru

С указом Президента Российской Федерации № 166 от 30.03.2022 г., утверждающим необходимость мер по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры (далее КИИ), отрасль электроники приобрела не только актуальное направление, включающее ряд новых терминов и определений, но и целый комплекс ограничительных мер, нацеленных на обеспечение безопасности Государства в данной сфере. В связи с этим за последние годы было разработано значительное количество ПНСТ, регламентирующих меры обеспечения доверенности не только в сферах программного обеспечения и программно-аппаратных комплексов (далее ПАК), как это подразумевала изначальная формулировка Указа, но и в сопутствующих направлениях, в том числе в области микроэлектроники.

Таким образом, в объективной реальности в связи с имеющимися санкционными, организационными, диверсионными и др. рисками, программно-аппаратный комплекс (ПАК) не может считаться доверенным и быть применен в КИИ если не выполнен ряд мер по обеспечению ключевых аспектов безопасности, в том числе информационной, технологической и функциональной. Все это является невозможным без обеспечения доверенности наиболее критических электронных компонентов ПАК, влияющих на выполнение основной функции объекта КИИ и его надежность.

В качестве первого шага к обеспечению доверенности компонентов ПАК было разработано ОТУ на доверенные интегральные схемы (ДИС), которое в данный момент находится в стадии утверждения.

Представленные материалы основана на субъективном мнении ряда участников жизненного цикла изделий электронной компонентной базы, возникшем в процессе рассмотрения практического подхода к разработке и применению изделий осваиваемых в соответствии ОТУ на ДИС.

В ОТУ отсутствует ограничение на то, кто может являться инициатором, однако исходя из изложенного в нем подхода им может быть разработчик или изготовитель ПАК, а также разработчик ДИС при наличии у последнего маркетинговой проработки рынка комплектующих ПАК и учете всех требований безопасности и контроля разрабатываемых изделий, достаточных для конечного потребителя (разработчика или изготовителя ПАК). Однако в данном случае не все так однозначно, ведь частичную доверенность, в некоторых случаях достаточную для конечного потребителя, можно обеспечить и на уровне второго поставщика путем проведения комплекса мероприятий по подтверждению соответствия заявленных параметрам и требованиям заказчика, методом проведения измерений и испытаний от каждой из партий, при этом все требования должны быть регламентированы в ОТУ на ДИС. Исходя из этого можно предположить два вполне очевидных варианта инициации ОКР (табл. 1)

Таблица 1. Порядок инициации ОКР по освоению ДИС

	Вариант 1	Вариант 2
Инициатор ОКР	Разработчик ПАК (Заказчик)	Разработчик ДИС или второй поставщик
Источник финансирования	За счет собственные средств разработчика ПАК или Исполнителя ОКР	За счет собственные средств Исполнителя ОКР
Исходные данные для ОКР	Технические требования, подготовленные разработчиком ПАК	Маркетинговая проработка рынка, в рамках которой определяются целевые требования к изделию и потребность.
Техническое задание	Разрабатывается Заказчиком или Исполнителем на основе ТТ Заказчика	ТЗ проходит внутреннее согласование по примеру изделий категории «ОТК»

Однако несмотря на то, что существует вариант 2, он обладает рядом рисков, связанных с возможным отсутствием спроса, ведь потребность в конечном изделии определяет разработчик ПАК на основе достаточности подтверждаемых требований доверенности и целевой модели применения. Для того чтобы представить из чего в первом приближении состоит доверенность предлагается разделить данное направление на «группы доверенности» в зависимости от степени контроля за этапами освоения и поставки ДИС. С целью визуализации данного представления предлагается вариант классификатора, представленного в табл. 2.

На самом деле групп может быть больше, однако в данном случае продемонстрированы основные, наиболее отвечающие подходу, изложенному в ОТУ на ДИС. Вариант получения прямого доступа дизайн центра или второго поставщика, обладающего компетенциями в кристальном производстве, непосредственно к зарубежной фабрике-изготовителю кристалла не рассматривался, так как является не надежным и крайне маловероятным.

Таким образом, из таблицы 2 можно сделать вывод, что группа 1 больше подходит кристальному производству или предприятию полного цикла, группа 2 относится к дизайн центру, группа 3 сборочному производству или второму поставщику, а группа 4 является примером модели «доверенного второго поставщика».

Следующим критичным вопросом является отсутствие в ОТУ технических требований к изделию, как это было ранее в ОТУ на изделия категории качества «ОТК» и «ВП». Дело в том, что данные ОТУ являются универсальным документам, и учесть в них все возможные модели применения ДИС и ПАК в целом попросту невозможно. Предполагаемый в ОТУ подход подразумевает, что все технические требования будут определены на этапе эскизного проекта исходя из потребностей Заказчиков, которыми в данном случае являются разработчики ПАК. Так как порядка применения двух ОТУ для одного изделия (к примеру добавление ОТУ на ДИС в части требований доверенности) на данный момент не существует и в дальнейшем он является маловероятным ввиду идеологической несовместимости, изложение требований к ДИС должно быть выполнено в форме «ТУ полных характеристик», что в свою очередь повышает трудоемкость разработки документации на осваиваемое изделие.

Таблица 2. Классификатор доверенности

Группа	1	2	3	4
Контроль процесса разработки (в т. ч. топологии)	ДА	ДА	НЕТ	НЕТ
Контроль процесса производства и измерения кристаллов	ДА	ДА[3] / НЕТ	НЕТ	НЕТ
Контроль идентичности и ЭП кристалла[1]	ДА (при необходимости)	ДА (при необходимости)	ДА (при необходимости)	ДА (при необходимости)
Контроль процесса сборки изделий[2]	В соответствии с КД и ТД	В соответствии с КД и ТД	В соответствии с КД и ТД	НЕТ
Контроль проведения измерений и испытаний[1]	В соответствии с требованиями ТУ	В соответствии с требованиями ТУ	В соответствии с требованиями ТУ	В соответствии с требованиями ТУ

1. Непосредственно исполнителем или сертифицированным центром.
2. Непосредственно исполнителем или как услуга по разработке конструктивного исполнения (включая разработку КД и ТД) с последующей сборкой.
3. В случае наличия определенных договоренностей с кристальной фабрикой на изготовление пластин с кристаллами заказанных элементов и наличии КД и ТД на данную продукцию.

На данном этапе становится понятно, как и кем должна быть инициирована разработка ДИС и каким аспектам доверенности отвечать, однако остается широкий сектор организационных вопросов на данный момент, не имеющих готового решения и требующих более глубокой проработки.

Подводя итоги, можно сделать вывод о том, что тематика ДИС и доверенности в целом требует существенной проработки, в том числе в части озвученных в статье вопросов, но уже сейчас приходит осознание некоторых ее границ и векторов развития, что дает надежду на появление новых рынков сбыта изделий ЭКБ и стабильность в отечественной электронике в ближайшем будущем.

Zero-Client — доверенное взаимодействие в инфраструктуре виртуальных рабочих столов пользователей

Шелупанов А. А., Брагин Д. С., Конев А. А.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
president@tusur.ru

Отсутствие отраслевых и национальных стандартов доверенного взаимодействия поставщиков и потребителей облачных услуг вида DaaS тормозит развитие российского рынка сервисных услуг в модели добавленной ценности. Экономически выгодные подходы удаленной работы с использованием сервисов DaaS доступны только крупным корпоративным игрокам и часто основаны на применении иностранных технологических решений. Существующие на рынке решения VDI основаны на иностранных стандартах в сфере защиты информации и не предусматривают реализацию доверенной среды от клиентского рабочего места до облачной системы обработки и хранения информации.

Целью работы является проектирование и реализация технологии доверенного взаимодействия на базе российских стандартов информационной безопасности между пользователями и облачными сервисами на базе VDI (Virtual Desktop Infrastructure), обеспечивающее открытие рынка доверенных взаимодействий для широкого круга коммерческих и государственных структур. Такое решение востребовано и на международном рынке в случаях, когда некоторые иностранные решения DaaS не рассматриваются, как доверенные в должной степени. Результатом реализации проекта является разработка, изготовление и испытание опытных образцов программно-аппаратного комплекса, реализующего технологии доверенного взаимодействия компонентов решения для удаленного доступа к инфраструктуре виртуальных рабочих столов пользователей VDI. При этом под доверенным взаимодействием попонимается обеспечение взаимной аутентификации и авторизации компонентов, участвующих во взаимодействии, а также конфиденциальности и целостности информации, которой обмениваются участники взаимодействия.

Первой задачей для подключения к удаленному рабочему столу и ресурсам является идентификация, авторизация и аутентификация, реализация которых строится на основе выверенных криптографических решениях. В настоящий момент крупные национальные проекты, например, Госуслуги, СМЭВ и внутриотраслевые системы удаленных рабочих столов для осуществления этих задач используют зарубежные криптографические алгоритмы, что является фактором риска, в связи со сложившейся геополитической обстановкой. Данный фактор, а также то, что основными потребителями являются сотрудники органов исполнительной власти и государственных организаций, имеющих доступ к государственным ИС, указывает на необходимость создания своей системы управления доступом, построенной на отечественных криптографических алгоритмах, позволиющей снизить риски и расширить возможности продаж на открытом рынке.

Второй задачей при разработке проекта является защита канала связи. Одним из способов осуществления данной задачи является реализация интеграции с аппаратурой КРК (квантового распределения ключей) по стандартизированным в РФ протоколам для возможности получения и использования квантово-защищенных ключей (КЗК) для криптографической защиты информации между участниками взаимодействия. Это обеспечивает защиту каналов данных от перспективных угроз и защиту от внутреннего нарушителя.

Созданные в ЦК НТИ «Технологии доверенного взаимодействия» опытные образцы ПАК Zero-Client-U и ZeroClient-R, а также ПО для компонентов облачных сервисов (Trusted Cloud Services) позволило создать технологическое решение в окружении, близком к реальному.

УДК 004.052.42

Эмуляция механизмов защиты адресных пространств периферийных устройств в доверенной среде

к. т. н. Гревцев Н. А., к. т. н. Чибисов П. А., Зубковский П. С., к. т. н. Аряшев С. И.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
chibisov@cs.niisi.ras.ru

Статья посвящена повышению безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами за счет разработки доверенных микропроцессоров с аппаратной изоляцией периферийных устройств. Предложена реализация блока управления памятью ввода-вывода (IOMMU) в системном эмуляторе, обеспечивающего контроль доступа устройств к памяти через трансляцию адресов и механизм pagewalk.

Ключевые слова: доверенный микропроцессор; изоляция периферии; аппаратная безопасность; IOMMU; архитектурное моделирование; DMA-атаки.

В процессе цифровой трансформации промышленности растет спрос на доверенную отечественную номенклатурную базу для АСУ ТП, соответствующую строгим требованиям по надежности. Объединение распределенных систем в сети требует доверенных платформ с реализованными политиками безопасности, включая аппаратную изоляцию и защиту данных. Создание отечественных доверенных микропроцессоров с поддержкой технологий, подобных IOMMU (аппаратная виртуализация, управление доступом устройств к памяти), является стратегическим решением. Контроллер IOMMU обеспечивает трансляцию адресов, контроль границ доступа и защиту от ошибочных/несанкционированных обращений устройств к памяти.

Для ускорения разработки и повышения безопасности применяется имитационное моделирование архитектуры микропроцессора на этапе покомандной эмуляции [1]. Это позволяет исследовать угрозы и отрабатывать защитные механизмы IOMMU [2] виртуально, до создания аппаратного прототипа. В данной работе проведена оптимизация и доработка подсистемы IOMMU для соответствия критериям доверенности, интегрированная в эмулятор ВИРКОМ64 (разработка НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ) [3]. Ключевым практическим результатом стала успешная загрузка и работа ОС Linux с использованием контроллера IOMMU, реализованного в эмуляторе, через сетевой контроллер в эмулируемой среде, подтверждающая работоспособность решения. Демонстрируется функционирование IOMMU для блокировки несанкционированного доступа (например, через DMA-устройства) с детализацией работы алгоритмов трансляции и обработки ошибок. Также проводится демонстрация парирования угроз доступа к привилегированным данным в соответствии с перечнем угроз ФСТЭК России. Предложенное в работе решение позволяет тестировать архитектурные механизмы защиты на этапе RTL-моделирования, сокращая риски пропуска уязвимостей и оптимизируя цикл разработки доверенных систем.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме FNEF-2024-0003.

Литература

1. Аряшев С. И., Гревцев Н. А., Зубковский П. С., Чибисов П. А., Кулешов А. С., Петров К. А. Разработка программных моделей доверенного универсального микропроцессора и микропроцессорной системы на его основе // Программные продукты и системы, 2022.
2. IOMMU protection against I/O attacks: a vulnerability and a proof of concept [Электронный ресурс]. URL: https://journal-bcs.springeropen.com/articles/10.1186/s13173-017-0066-7.
3. Гревцев Н. А., Зубковский П. С., Чибисов П. А. Применение имитационного моделирования микропроцессора для оптимизации архитектуры подсистем памяти // Наноиндустрия, 2024. — Т. 17. — № S10-1 (128). — С. 58–62.

УДК 621.3.049

Вычисления с применением операций на эллиптических кривых на основе ПЛИС

Турбин Д. С.[1,2], Краснюк А. А.[2,3], к. т. н.
[1] АО «ЭНПО СПЭЛС»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
dstur@spels.ru
[2] НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
aakr@cs.niisi.ras.ru,
[3] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
aakrasnyuk@mephi.ru

Проведен анализ алгоритмов быстродействующего умножения и деления для арифметики полей Галуа *GF*(2m) на примере вычислений эллиптических кривых с возможностью аппаратной интерпретации оптимизированного алгоритма с использованием ПЛИС.

Ключевые слова: алгебра Галуа; система остаточных классов; эллиптические кривые.

Введение

Одним из основных ограничений энергоэффективности алгоритмов защиты и преобразования данных, распознавания образов и систем искусственного интеллекта, цифровой фильтрации изображений, расчета траекторий и маршрута движения автономного транспорта является высокая вычислительная сложность дискретных ортогональных преобразований [1]. Алгоритмы быстродействующего умножения и деления для арифметики полей Галуа GF(2m) широко известны и применимы как в сетях передачи данных с использованием кодов Рида — Соломона, так и в криптографических алгоритмах, например AES (Advanced Encryption Standard). При аппаратной реализации устройств, работающих на традиционных принципах гарвардской архитектуры, возникает необходимость в построении модулей для быстрого умножения больших многочленов. Используя для этой цели систему остаточных классов (СОК) и связанную с ней полиадическую систему счисления, можно осуществить замену вычисления произведений больших многочленов параллельным умножением значительно меньших многочленов. Частным случаем применения алгебры и полей Галуа являются вычисления с применением операций на эллиптических кривых. Аппаратная интерпретация данных алгоритмов на основе ПЛИС представляет интерес для широкого круга задач, решаемых автономными вычислительными системами, в частности на основе методов подстановочных таблиц.

Алгоритм преобразования на основе СОК

Эллиптические кривые представляют собой особый вид геометрических кривых на плоскости. Они определяются уравнением вида

$$Y^2 = x^3 + ax + b, \quad (1)$$

где a и b — параметры, характеризующие конкретную кривую [2].

Данные кривые обладают следующими свойствами:

1) симметрия относительно оси x: если существует точка $R(x, y)$, существует возможность вычислить координаты обратной точки $-R(x, -y)$;
2) закон сложения точек на эллиптической кривой: прямая, проходящая через точки A и B, пересекает кривую в точке C. Точка C принимается равной $C = A + B$;
3) закон умножения точки на число: касательная к любой точке A на кривой пересекает кривую в ровно одной точке, обозначаемой $-2A$.

Таким образом, определены операции инверсии, сложения и умножения на скаляр. При этом не существует операции, обратной умножению точки эллиптического пространства на скаляр, что делает данный процесс применимым в криптографии для шифрования данных. Для обеспечения возможности выполнения обратного процесса при наличии некоего криптографического ключа можно перенести алгебраические вычисления на эллиптических кривых в структуру конечных полей (пространство Галуа). В данной структуре операции сложения и умножения определяются над конечным набором элементов. Каждый элемент поля является представителем класса эквивалентности по заданной арифметической операции, к примеру, по остатку от деления на число, что позволяет использовать вычисления в системах остаточных классов. Таким образом, формула эллиптической кривой на конечном поле принимает вид.

$$y^2 \bmod p = (x^3 + ax + b) \bmod p, \tag{2}$$

где p — основание, определяющее порядок конечного поля, следовательно, кривая принимает вид набора конечных точек (рис. 1).

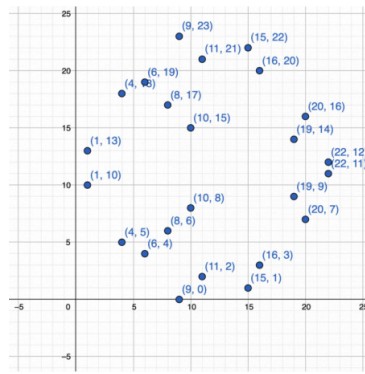


Рис. 1. Представление эллиптической кривой в конечном поле по основанию $p = 23$

Апробация результатов

В качестве вычислительного устройства для практической имплементации алгоритма вычислений эллиптических кривых с использованием принципов системы остаточных классов для уменьшения объема вычислений с помощью подстановочных таблиц использовался модуль NI PXIe-7962R, оснащенный ПЛИС Xilinx

Virtex-5 [3]. Для оценки эффективности алгоритма была разработана его модификация для работы с 32-битными переменными. Подстановочная таблица содержала в себе все возможные варианты значений эллиптической кривой при заданном основании, вычисление произведений осуществлялось методом взятия одного из значений таблицы в зависимости от входных данных (1).

Показана эффективность предложенного вычислительного алгоритма с возможностью выполнения операций умножения-деления в конечном поле за один такт.

Заключение

Проведен анализ алгоритмов быстродействующих операций умножения-деления для ортогональных преобразований, которые практически могут быть оптимизированы с применением вычислений в пространстве Галуа и системы остаточных классов. В качестве объекта исследований и оптимизации был выбран алгоритм шифрования на основе эллиптических кривых, так как составление LUT для него в целях использования СОК элементарно алгоритмизируется и не требует длительной перепроверки как при смене основания СОК, так и смене параметров кривой.

В ходе апробации было выявлено, что операции умножения-деления в пространствах Галуа GF(2m) элементов числа, представленного в СОК, действительно выполнялись одновременно. Помимо этого, общее время выполнения данных операций для одного числа равнялось одному такту работы устройства. Представляет интерес имплементация результатов исследований на технологии потоковых вычислений модулей FFT для энергоэффективных графических процессоров и модулей.

Публикация выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме FNEF-2024-0003.

Литература

1. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 448 с.
2. Коблиц Н. Курс теории чисел и криптографии: Перевод с англ. М.А. Михайловой и В.Е. Тараканова / Под ред. А.М. Зубкова. — М.: Научное издательство ТВП, 2001. — 260 с.
3. Шеремета Н.В., Турбин Д.С., Амбуркин К.М. Аппаратно-программный стенд контроля вероятности битовых ошибок СВЧ радиоприемных устройств с цифровыми выходами. — НИЯУ МИФИ, АО «ЭНПО СПЭЛС», Стойкость-2022.

УДК 519.722:519.246.2

Построение ФДСЧ с заданными теоретико-вероятностными свойствами

Лагутенко Д. В., Соколов Н. С.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org

Рассмотрены особенности разработки датчиков случайных чисел, зависящие не только от заданной теоретико-вероятностной модели, но и от особенностей проектирования, таких как технологический процесс, расположение на кристалле, размещение шин питания. Рассмотрены отличия реализации блоков ФДСЧ на технологии 110 нм фабрики донора и на отечественной технологии 130 нм компании ООО «НМ-Тех».

Ключевые слова: датчик случайных чисел; средства криптографической защиты информации (СКЗИ); теоретико-вероятная модель.

Введение

В настоящие время широкое распространение получили СКЗИ, реализуемые на базе низко малогаритных низко потребляемых аппаратных устройств. К таким устройствам можно отнести микроконтроллеры, микропроцессоры и т. д., содержащие в составе физический датчик случайного числа. Для каждого из таких устройств физический датчик случайных чисел приходится разработаться специально, поскольку общепризнанные датчики случайных чисел, используемые в своей такие как шумовой диод, чисто технически не могут быть применены в малоразмерных устройствах из-за своих размеров и вольт-амперных характеристик.

Анализ разработки датчиков случайных чисел с заданными теоретико-вероятностными свойствами

При разработке физических датчиков случайных чисел для такого класса устройств большое значение имеет обоснование его статических свойств. Обоснование статистических свойств датчиков проводиться как с помощью измерений с помощью тестов NIST, так и с помощью теоретико-вероятностной модели того случайного процесса, в соответствии с которым получается выходная последовательность ФДСЧ. При этом также необходимо учитывать не менее важные критерии для ФДСЧ, такие как малые линейные размеры и низкое энергопотребление, требующиеся при разработке конечного изделия.

В некоторых случаях представляется возможным построить ФДСЧ с известными наперед заданными свойствами выходной последовательности, в котором начальные состояния подчиняются теоретическо-вероятностному распределению. К примеру, начальными состояниями служат паразитные токи на конденсаторах. Проблемой является необходимость проверки датчиков случайных чисел на кристалле, так как схемотехническая реализация не отражает истинную работу блока.

Параметры сигналов в интегральных микросхемах (ИМС) определяются с одной стороны физической природой процессов, протекающих в единичных приборах, а с другой стороны конструктивно-технологическим исполнением самого единичного прибора.

Еще одной важной проблемой при разработке такого рода датчиков является перенос схемотехнического решения с зарубежных микроэлектронных производств на отечественные микроэлектронные производства.

Приборы, используемые в схемотехнических решениях под отечественные и западные технологические процессы, могут отличаться. При этом сама теоретико-вероятностная модель остается постоянной и неизменяемой. В этом случае, необходимо проводить перерасчет под отечественные технологии производства интегральных микросхем.

Например, при разработке кольцевых генераторов на разных технологических процессах важно учитывать технологические характеристики и особенности приборов, так как для достижения определенной частоты блока количество инверторов будет отличаться не только у разных фабрик изготовителей, но и внутри одной фабрики в зависимости от технологии.

Для решения задачи было пересмотрены существующие схемотехнические решения, не влияющие на теоретико-вероятностную модель.

Практическая реализация и тестирование блоков ФДСЧ с заданными теоретико-вероятностной моделями на технологиях 110 нм и 130 нм показало отличие уровней шумов транзисторов, стабильностью генерации энтропии и энергопотреблением. На технологии 110 нм удалось добиться более высокой скорости генерации за счет меньших паразитных емкостей, однако на 130 нм вариант показал лучшую устойчивость к температурным колебаниям благодаря большей толщине затворов, при этом она обеспечивает более стабильную работу блоков за счет меньшей подверженности паразитным эффектам.

Основное преимущество реализации ФДСЧ на отечественной технологии 130 нм заключается в полном контроле над производственной цепочкой: отечественный техпроцесс исключает риски скрытых уязвимостей или аппаратных закладок, которые теоретически могут присутствовать в чипах, выпущенных на иностранных фабриках. Это критически важно для криптографических систем, где доверие к источнику случайности напрямую влияет на стойкость защиты.

Таким образом, работы по переносу датчиков случайных чисел на отечественную технологию является актуальной на сегодняшний момент, поскольку они используются во многих встраиваемых системах и являются перспективными для продажи внешним заказчикам.

Литература

1. Зиновьев Д. В., Лебедев А. В., Никитин А. П., о некоторых аспектах проектирования и практической реализации генераторов случайных чисел низкого энергопотребления // Тезисы 10-го межведомственного научно-практического семинара «Системы и средства защиты информации», 2018.
2. Meltem Sönmez Turan, Elaine Barker, John Kelsey, Kerry A. McKay, Mary L. Baish, Mike Boyle, Recommendation for the Entropy Sources Used for Random Bit Generation // NIST Special Publication 800-90B, 2018. 84 p
3. Выписка из Требований к СКЗИ-НР доступна на сайте fsb.ru. — URL: http://www.fsb.ru/fsb/science/single.htm%21id%3D1043 7338%40fsbResearchart.html.

УДК 681.5.015

Физически неклонируемая функция в программируемой логике и аналоговых схемах

Лукьянова Я. А.[1], Певцов Е. Ф.[1], Лебедев В. Р.[2], Коротаев Ю. А.[1]
[1] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
[2] YADRO
123376, г. Москва, ул. Рочдельская 15, стр. 15

Предложены методы реализации физически неклонируемой функции (ФНФ) для идентификации микросхем. Разработана методика исследования ФНФ «арбитр» в ПЛИС Artyx-7 на аппаратных мультиплексорах MUXF7. Также рассмотрен вариант реализации ФНФ, в который используется чувствительность порогового напряжения МОП-транзисторов к вариациям технологического процесса.

Ключевые слова: физически неклонируемая функция; программируемые логические схемы; индефикация микросхем; пороговое напряжение.

Приведен краткий обзор публикаций, посвященный разработкам и исследованиям физически неклонируемых функций (ФНФ) как одного из эффективных способов реализации основ доверенного проектирования и эксплуатации интегральных схем. Рассмотрены варианты таксонометрии и критерии оценки качества ФНФ, физически функционирующих как встроенный «отпечаток пальца» чипа и обеспечивающих преимущества, связанные с безопасностью. Приведены примеры современных разработок ФНФ, как специально встраиваемых в цифровые схемы модулей ФНФ (на основе кольцевых генераторов, схем типа «арбитр», устройств анализа задержек и переходных процессов, на основе различных вариантов схем памяти), так и аналоговых схем, в которых для аутентификации применяются методы прямого определения характеристик электронных компонентов (пороговых напряжений транзисторов, нелинейные изменения проводимости диодов Шоттки, емкости участков цепей, сопротивления межсоединений, и др.).

Как один из примеров реализации ФНФ предложен способ реализации и методика экспериментальных исследований физически неклонируемых функций типа «арбитр» в схемах программируемой логики, предназначенных для применения в информационных системах [1]. При выполнении работы решалась задача определения возможности генерирования уникальных идентификаторов ПЛИС в ФНФ типа «арбитр» с использованием цепей разной длины, влияние перемещения физической цепи, включающей ФНФ из одной топологической области в другую, а также влияние температуры на ФНФ. В ходе выполнения работы на основе soft-процессора MicroBlaze в блочном дизайне проекта с использование IP интегратора разработана методика экспериментальных исследований ФНФ для идентификации экземпляров ИС семейства Artyx-7. Особенность предложенной реализации состоит в том, что в качестве мультиплексоров в схеме арбитра используются аппаратные мультиплексоры MUXF7, а не LUT, причем так как длина цепи и способ размещения могут изменяться, то для их размещения на кристалле разработан скрипт на языке Tcl. Для разработки кода процессорной системы применены инструменты

SDK и язык C. Выполнены исследования реализации ФНФ десяти экземпляров ПЛИС этого семейства. Полученные результаты сводятся к следующему:

1) для реализации ФНФ типа «арбитр» на основе мультиплексоров достаточно сформировать последовательную цепочку из не менее 16 мультиплексоров в блоках slice. При этом уникальность ФНФ составляет более 90 % для всех исследованных микросхем;
2) показано, что при использовании соседних регионов slice повторение значений ФНФ составляет не превышает 2 %, что свидетельствует о высокой степени защищенности такой реализации от атак на основе машинного обучения;
3) для обеспечения стабильности ФНФ типа «арбитр» на основе мультиплексоров. реализованных в модулях slice ПЛИС, необходимо предпринимать меры, исключающие или компенсирующие влияние температуры.

Разработанная методика реализации ФНФ типа «арбитр» предназначена для генерации уникальных идентификационных ключей ПЛИС и, соответственно, может быть применена как одно из технических решений повышения доверенности при проектировании устройств на основе схем программируемой логики.

Во втором примере рассмотрен вариант реализации ФНФ, в который используется чувствительность порогового напряжения МОП-транзисторов к вариациям технологического процесса. В качестве базовой схемы для идентификации чипа при реализации в нем ФНФ применена разработка схемы источника опорного напряжения на bandgap-ячейках в котором использовалась стандартная библиотека PDK на основе технологического процесса 250 нм и рабочим напряжением питания схемы 3,3 В ±10 %. Инструментами САПР выполнено моделирование варианта реализации ФНФ, который состоит из набора транзисторных компонентов данной библиотеки, которые тестируются, чтобы определить точку, в которой начинает протекать ток. Запросом этой ФНФ является номер или расположение транзисторного компонента, а ответом — значение этого порогового напряжения. Полученные результаты показывает улучшение энергопотребления, надежности и устойчивости к старению по сравнению с цифровыми реализациями ФНФ.

Авторы считают, что в данной работе разработаны новые методы исследования реализаций физически неклонируемых функций, предназначенных для идентификации экземпляров интегральных схем программируемой логики, входящих в состав аппаратной части информационных систем для обеспечения их доверенного проектирования.

Литература

1. Комлева Е. Р., Никифоров М. Б. Физически неклонируемые функции. Проблемы и перспективы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2021. — № 6. — С. 61–69.

УДК 378.14.015.62:378.145

Гибридная подготовка специалистов: информационная безопасность + радиоэлектроника — уникальное сочетание на рынке труда

Дураковский А. П.[1], Марков А. С.[1,2]
[1] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
apdurakovskiy@mephi.ru
[2] АО НПО «ЭШЕЛОН»
107023, г. Москва, ул. Электрозаводская, 24, стр. 1

Разработана программа высшего образования, которая формирует новый тип специалистов, соответствующих вызовам эпохи санкций и технологической независимости. В условиях требований к безопасности критической инфраструктуры возникает потребность в специалистах, способных работать на стыке информационной безопасности и радиоэлектроники. Это не просто образование, а стратегический вклад в безопасность государства.
Ключевые слова: образовательная программа; информационная безопасность автоматизированных систем; радиоэлектронная промышленность; инженер-радиоэлектронщик; специалист по защите информации; профессиональные компетенции.

Проблематика:

- дефицит кадров для защиты радиоэлектронных систем (IoT, АСУ ТП, телеком) от современных угроз (аппаратные закладки, атаки через радиоканалы);
- узкопрофильность традиционных образовательных программ, не учитывающих гибридные компетенции;
- требования ФГОС 4.0 к практико-ориентированному обучению и интеграции с реальным сектором экономики.

Предлагаемое решение

Образовательная программа (ОП) по специальности «Информационная безопасность автоматизированных систем» со специализацией «Безопасность значимых объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) в радиоэлектронной промышленности», разработанная в соответствии с новыми образовательными стандартами, с учетом профессиональных стандартов для специалистов по безопасности автоматизированных систем и инженеров-радиоэлектронщиков. Отличительной особенностью ОП является ориентация на одновременное получение двух квалификаций — «специалист по защите информации» и «инженер-радиоэлектронщик», то есть гармонизация знаний на стыке этих двух разнородных сфер научно-технической деятельности. Таким образом, представляемая ОП ориентирована на подготовку достаточно уникальных специалистов, способных обеспечивать безопасность автоматизированных систем в радиоэлектронной промышленности (РЭП) и, наоборот, внедрять промышленные достижения в развитие аппаратной части технических комплексов защиты информации.

Некоторые формализованные параметры ОП

Форма обучения: очная.
Уровень образования: базовое высшее — специалитет.
Квалификации:
- специалист по защите информации;
- инженер-радиоэлектронщик.

Нормативный срок обучения: 6 лет.
Объем: 360 з.е. (12950 часов).
Объем времени на реализацию дисциплин специализации: 32 з.е.
Объем практики: 51 з.е.

Ключевые особенности образовательной программы

- Две квалификации:
  - *специалист по защите информации* (компетенции по разработке и внедрению систем защиты информации в автоматизированных системах КИИ);
  - *инженер-радиоэлектронщик* (компетенции проектирования защищенных электронных систем).
- Практико-ориентированный подход:
  - 30 % учебного времени — лабораторные работы и проекты (включая кейсы от предприятий ОПК);
  - цифровые двойники радиоэлектронных систем для моделирования кибератак.
- Гибридные дисциплины:
  - *«Криптография в радиоэлектронных системах»;*
  - *«Аппаратные методы защиты информации»;*
  - *«Безопасность киберфизических систем»;*
  - *«Доверенные программно-аппаратные комплексы»;*
  - *Блок по доверенной ЭКБ (российские аналоги импортных компонентов).*

Программа разработана в НИЯУ МИФИ на кафедре стратегических информационных исследований института интеллектуальных кибернетических систем.

Литература

1. Часть 8.1 статьи 12 Федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» (Собрание законодательства Российской Федерации, 2012, № 53, ст. 7598; 2018, № 32, ст. 5110).
2. Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 1 февраля 2022 г. № 89 (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 3 марта 2022 г., регистрационный № 67610).
3. Профессиональный стандарт: Специалист по защите информации в автоматизированных системах. Утвержден приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 14 сентября 2022 г. № 525н.
4. Профессиональный стандарт: Инженер-радиоэлектронщик в области радиотехники и телекоммуникаций. Утвержден приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 31 августа 2021 г. № 600н.

УДК 519.7

Анализ энергопотребления ARM-микроконтроллеров при реализации российских стандартов симметричного шифрования

Маро Е. А.
Южный федеральный университет
347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2
eamaro@sfedu.ru

В работе представлены результаты исследований, направленных на выявление инструкций микроконтроллеров со статистическими утечками по энергопотреблению при выполнении криптографических преобразований. Сформированы сигнатуры трасс энергопотребления, соответствующие отдельным раундам и преобразованиям шифрования исследуемых алгоритмов ГОСТ Р 34.12-2015 для архитектуры ARM. Выполнены наборы статистических тестов (t-тестов), по которым определен перечень инструкций, содержащих статистические утечки по энергопотреблению для различного числа раундов шифрования алгоритмов «Магма» и «Кузнечик».

Ключевые слова: средства криптографической защиты информации; симметричные алгоритмы шифрования; ГОСТ Р 34.12-2015; энергопотребление; статистические утечки; эмулятор ELMO.

Современные программно-аппаратные комплексы (ПАК) и электронные ключевые блоки (ЭКБ) играют ключевую роль в защите критической информационной инфраструктуры: энергосетей, транспорта, банковских систем, телекоммуникаций и многих других. Однако безопасность подобных информационных систем может быть нарушена через использование сценариев атак по побочным каналам на аппаратные средства, в частности, через проведение анализа энергопотребления микроконтроллеров при выполнении инструкций.

Учитывая важность анализа безопасности различных реализаций криптографических систем, следует отдельно рассматривать стойкость применяемых микроконтроллеров (и средств защиты информации на их базе) к атакам по побочным каналам. Первым этапом оценки стойкости реализаций криптографических средств защиты к атакам по побочным каналам является выявление утечки, присущей работе криптосистемы.

Одним из универсальных каналов утечки для криптографических систем служит канал энергопотребления. Выделяют следующие разновидности атак, в которых используется информация об энергопотреблении: простой анализ энергопотребления, дифференциальный анализ энергопотребления, корреляционный анализа энергопотребления и анализ на основе шаблонов. Использование высокореалистичных эмуляторов энергопотребления криптографический устройств, построенных на различных типах микроконтроллерных устройств в сочетании с набором статистических тестов позволяет формировать и в дальнейшем исследовать реализации на наличие каналов утечки (в том числе каналов утечки n-ого порядка для маскированных реализаций). В качестве примеров средств построения

моделей утечек можно привести следующие программные средства: ELMO [1], Silk, Sleak, Rainbow и т. д.

ARM-архитектуры в защищенных ПАК в качестве механизмов противодействия атакам по побочным каналам энергопотребления обеспечивают аппаратную изоляцию (TrustZone Technology), но исследования [2] выявили утечки через разделяемые ресурсы (кеш, энергопотребление ядра). RISC-V архитектура за счет открытости позволяет внедрять специализированные защиты (PMP, TEE), специализированные расширения наборов инструкций (например Xkgost для эффективной реализации основных преобразований российских криптографических алгоритмов) [3], но при этом отсутствие стандартных криптографических расширений усложняет безопасную реализацию [4, 5].

В данном исследовании проведено моделирование трасс энергопотребления криптографических средств защиты информации на базе эмулятора ELMO, в основе которых используется реализация алгоритма ГОСТ Р 34.12-2015 [6] (n = 64 «Магма» и n = 128 «Кузнечик») в режиме простой замены, и выполнен поиск наличия каналов утечки, путем выявления наборов инструкций, для которых имеются статистические зависимости энергопотребления устройства при выполнении инструкций от значения обрабатываемых данных (по результатам t-теста). Трасса энергопотребления полнораундового шифра «Кузнечик» показана на рис. 1.

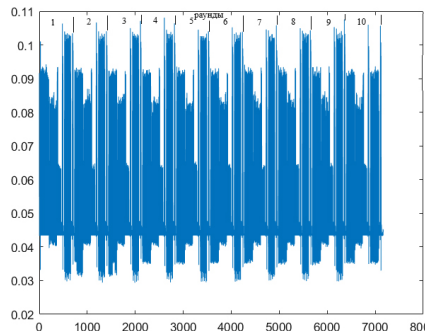


Рис. 1. Сгенерированная с помощью инструмента ELMO трасса энергопотребления при выполнении десяти раундов алгоритма «Кузнечик»

Литература

1. McCann D. et al. Towards Practical Tools for Side Channel Aware Software Engineering: ‘Grey Box’ Modelling for Instruction Leakages // USENIX Security Symposium, 2017. P. 199–216.
2. Zhang N., Sun K., Shands D., Lou W. and Hou Y. T. TruSense: Information Leakage from TrustZone // IEEE INFOCOM 2018. IEEE Conference on Computer Communications, Honolulu, HI, USA, 2018. P. 1097–1105. DOI: 10.1109/INFOCOM.2018.8486293.
3. Матюков А. В. Расширение системы команд RISC-V для ускорения алгоритмов ГОСТ-криптографии // Материалы конференции РусКрипто’2025.

4. Werner M., Schilling R., Unterluggauer T., Mangard S. Protecting RISC-V processors against physical attacks // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, DATE 2019, Florence, Italy, March 25–29, 2019. J. Teich and F. Fummi, Eds. IEEE, 2019. P. 1136–1141.
5. De Mulder E., Gummalla S., Hutter M. Protecting RISC-V against side-channel attacks // Proceedings of the 56th Annual Design Automation Conference 2019, DAC 2019, Las Vegas, NV, USA, June 02–06, 2019. ACM, 2019. P. 45.
6. ГОСТ Р 34.12-2015 «Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры». — URL: https://tc26.ru/standard/gost/GOST_R_3412-2015.pdf.

УДК 621.389

Научно-технические и экономические проблемы производства отечественных пассивных электронных компонентов для применения в составе объектов критической гражданской инфраструктуры

Верник П. А.
АНО Консорциум «Пассивные электронные компоненты»
107031, г. Москва, ул. Петровка, 15/13, стр. 5
info@anokpek.ru

Проведен анализ производства российских пассивных компонентов, применяемых в критической гражданской инфраструктуре. Выделены научно-технические и экономические проблемы, решение которых требует системного подхода и совершенствования господдержки. Предложены возможные решения данных проблем.

Ключевые слова: пассивные электронные компоненты; критическая гражданская инфраструктура; отечественное производство; государственная поддержка.

Реализуемые государством меры способствуют увеличению доли отечественных пассивных электронных компонентов (ПЭК). Однако применение импортных компонентов сохраняется на высоком уровне, особенно в гражданской электронике. По данным на 2024 г. в составе отечественной гражданской РЭА (включая вычислительную и телекоммуникационную технику, являющуюся основой критической инфраструктуры) по отдельным типам ПЭК доля импорта составляла до 99% [1]. Зависимость от импортных ПЭК при производстве критической инфраструктуры отрицательно воздействует на национальную безопасность [2].

При росте производства отечественной радиоэлектроники ее доля на внутреннем рынке стабильна по годам и составляет порядка 50% [3]. С 2020 по 2024 г. объем производства радиоэлектроники в России увеличился в 2,15 раза до 3,5 трлн руб., количество позиций в реестре российской радиоэлектронной продукции выросло в 10 раз и превысило 28 тыс. Развитие отрасли в условиях господдержки отразилось на численности работников. На 2023 г. в отрасли работали 438 тыс. чел., что более чем в 1,5 раза превышает данный показатель за 2017 г. [4].

По результатам проведенного Консорциумом «Пассивные электронные компоненты» анализа данных отечественных производителей ПЭК определена научно-техническая проблематика:

- разработка отечественных технологий мирового уровня и передовых технологий для выпуска новых перспективных ПЭК и улучшения качественных характеристик текущей продукции;
- разработка материалов для обеспечения технологической независимости и достижения значений качественных характеристик ПЭК не уступающих импортным аналогам;
- разработка производственного, вспомогательных и измерительного оборудования, соответствующего передовым технологиям ПЭК и обеспечивающего высокую производительность.

Приоритетной задачей является разработка отечественных материалов для ПЭК. Зависимость от импорта материалов (в т. ч. из дружественных стран) может стать критической уязвимостью и при изменении геополитической ситуации, либо рыночной конъюнктуры, вызвать дефицит отельных позиций ПЭК с последующей цепной остановкой производств.

Также по результатам анализа выделены экономические проблемы производства ПЭК:

- конкурентное давление со стороны зарубежных поставщиков, препятствующее массовому выводу на рынок отечественных ПЭК;
- малый заказ со стороны потребителей и малый объем производства ПЭК, не позволяющий оптимизировать и снижать себестоимость;
- отсутствие недорогих и качественных отечественных материалов (равно применение импортных материалов) не позволяет снижать себестоимость;
- недостаточность собственных и высокая стоимость заемных средств, необходимых для технологического развития;
- отсутствие практики применения механизмов стратегического партнерства производителей и потребителей ПЭК (гарантированный заказ, форвардный контракт, договор купли-продажи будущей вещи и др.).

Решение проблем потребует совершенствования инструментария господдержки, внедрения организационных инноваций, а также выработки новых моделей сотрудничества производственных и научных организаций. Решению проблем будет способствовать:

- доработка нормативной среды для массового запуска Комплексных научно-технических программ и проектов (КНТП);
- внедрение механизмов комплексной господдержки для повышения конкурентоспособности отечественных ПЭК;
- консолидация потенциалов научных организаций и производственных предприятий;
- создание механизма трансфера научных достижений научных и образовательных организаций в промышленность;
- субсидирование поисковых и прикладных научных исследований для развития технологий ПЭК, материалов и оборудования для них, с последующим внедрением в производство;
- госфинансирование работ по патентной аналитике и технологической разведке в сфере ПЭК в целях выявления перспективных мировых технологий.

Состыковка и объединение возможностей отечественных производственных, научных и технологических организаций является необходимым условием достижения технологического суверенитета критической инфраструктуры и важнейшей задачей, на решении которой сконцентрирована работа Консорциума «Пассивные электронные компоненты».

Литература

1. Верник П. А. Пассивные электронные компоненты для создания доверенных программно-аппаратных комплексов и систем // Безопасность информационных технологий, 2024. — Т. 31. — № 3. — С. 11–13.

2. Бендиков М.А., Ганичев Н.А. Электронная импортозависимость и пути ее преодоления (на примере космической промышленности) // Экономический анализ: теория и практика, 2015. — № 3 (402). — С. 2–17.
3. Каспарова Е. Дискуссионный баттл «Надо ли запретить ввоз китайской ЭКБ, если есть отечественное производство?» на выставке Expoelectronica 2025 // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2025. — № 5 (246) — С. 48–52.
4. Тресорук А.А. Состояние радиоэлектронной промышленности: формирование новых тенденций развития // Научные труды. Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, 2024. — № 4. — С. 115–134.

УДК 681.326.3

Доверенные ПАК на основе отечественной ЭКБ

Аряшев С. И.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
aserg@cs.niisi.ras.ru

НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ разрабатывает доверенные программно-аппаратные комплексы на базе отечественной электронной компонентной базы, основанной на доверенных сложнофункциональных блоках.
Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс; ПАК; программируемый логический контроллер; сложнофункциональный блок; доверенная ЭКБ.

НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ разрабатываются доверенные программно-аппаратные комплексы на базе отечественной электронной компонентной базы собственной разработки с использованием доверенных сложнофункциональных блоков.

Программно-аппаратные комплексы построены на основе программируемых логических контроллеров (ПЛК) разработки НИИСИ и успешно применяются в ряде отраслей: теплоэнергетический комплекс, транспорт, пищевая промышленность и т. д., для автоматизации производства.

В основе ПЛК лежат доверенные микросхемы, разработанные НИИСИ: отечественные микропроцессор и микроконтроллер, а также собственное программное обеспечение. Микросхемы размещены в каталоге продукции ГИСП Минпромторга РФ. ПО входит в реестр российского программного обеспечения Минцифры.

Обеспечение информационной безопасности значимых объектов КИИ с использованием доверенных аппаратных платформ

Юсупов Р. Р.
Старший вице-президент Kraftway
АО «Крафтвэй корпорэйшн ПЛС»
249032, г. Обнинск, Киевское ш., 64

С учетом проникновения микроэлектроники во все уровни жизни и, что особенно важно, перехода на цифровые технологии объектов критической инфраструктуры должен измениться подход к проектированию радиоэлектронной аппаратуры. Если сформулировать его кратко, то это применение принципа secure-by-design.

Это широкое понятие, однако очевидно, что на самом нижнем уровне цифровых технологий находятся интегральные микросхемы, т. е. интегральные микросхемы должны обеспечивать так называемый zero trust уровень безопасности, на котором строится вся дальнейшая система информационной безопасности. В связи с этим есть очевидная необходимость стандартизации подхода к проектированию встроенных систем защиты интегральных микросхем в целях формирования типовых IP- блоков, методов проектирования, а также интеграции модулей безопасности микросхем со средствами мониторинга и управления безопасностью.

Такой подход позволит включить ИМС со встроенными функциями защиты информации в общую систему защиты информации.

В докладе предлагается рассмотреть следующие вопросы:

- типовые информационные угрозы интегральных микросхем (ИМС) и систем на кристалле (СнК):
  - виды несанкционированных воздействий на кристалл микросхемы;
  - виды аппаратных и программных сбоев интегральной микросхемы вследствие воздействий;
- блок «нулевого» доверия ИМС и СНК (корень доверия, root-of-trust):
  - назначение;
  - типовая функциональная схема;
  - описание модулей блока «нулевого» доверия;
  - типовые сценарии использования;
- защита блока «нулевого» доверия от внешних воздействий;
- защита встроенного ПО ИМС и СНК с помощью блока «нулевого» доверия;
- безопасное обновление встроенного ПО ИМС и СНК.

УДК 004.054

Оценка доверия к ПАК с помощью мутации встроенного программного обеспечения

Овасапян Т. Д., к. т. н., Грибков Н. А.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
otd@ibks.spbstu.ru

В докладе представлен подход к оценке доверия к ПАК на основе мутации встроенного программного обеспечения. Модификации вносятся непосредственно в прошивку, после чего анализируется поведение устройства. Подход позволяет выявить поведенческие аномалии и потенциальные ошибки и, указывающие на возможные недекларированные возможности и уязвимости в ПАК.

Ключевые слова: встроенное программное обеспечение; мутация кода; большие языковые модели; энтропия; неопределенность.

В докладе рассматривается метод активного тестирования программно-аппаратных комплексов (ПАК), направленный на формализованную оценку их доверенности. Актуальность данной задачи обусловлена необходимостью верификации надежности и предсказуемости функционирования ПАК, которые могут производиться сторонними организациями, с использованием закрытых процессов, оборудования и технологий. В условиях отсутствия полного доверия к производственным цепочкам возрастает риск внедрения недекларированных возможностей или скрытых отклонений в логике функционирования, которые невозможно выявить при помощи исключительно статических или формально-документированных проверок [1]. В связи с этим, практическое значение приобретают методы, позволяющие эмпирически исследовать поведение ПАК в ходе выполнения контролируемо модифицированного программного обеспечения.

Предлагаемый метод основан на генерации и загрузке множества вариантов встроенного программного обеспечения, полученных путем целенаправленной мутации исходного кода прошивки. Мутации вносятся в функционально значимые участки программы и направлены на изменение структуры, логики выполнения, управления потоками и параметрами взаимодействия с периферийными устройствами. В частности, модификации могут включать: реорганизацию блоков кода, инверсию логических условий, изменение приоритетов задач, трансформации структур обработки прерываний, изменение параметров обращения к регистрам или интерфейсам, а также удаление или добавление функциональных компонентов, поддерживаемых архитектурой целевого ПАК. Для генерации таких вариантов предполагается использовать большие языковые модели (Large Language Models, LLM), такие как GPT-4, Code Llama и аналогичные, которые уже демонстрируют высокую эффективность в задачах синтаксически корректной генерации и рефакторинга программного кода в различных языковых и архитектурных контекстах [2].

Поведение ПАК при исполнении каждой из мутированных версий прошивки регистрируется и анализируется по совокупности показателей. В частности, проводится оценка: стабильности исполнения, фактов возникновения сбоев и отказов, изменения выходных данных, появления новых или нехарактерных состояний

системы, поведения сетевых интерфейсов, распределения и динамики потребления аппаратных ресурсов (памяти, процессорного времени, периферии), а также иных метрик, отражающих функционирование устройства. Для предварительной проверки корректности и допустимости к исполнению сгенерированных версий прошивки могут использоваться программные средства, обеспечивающие моделирование или анализ исполнения кода в изолированной среде [3]. Кроме того, для оценки степени доверия применяются обобщенные информационные критерии, в том числе подходы, основанные на анализе изменения энтропии множества наблюдаемых состояний, возникающих в ходе экспериментов.

Методика ориентирована на использование в рамках сертификации, верификации и приемочного тестирования ПАК, применяемых на критически значимых объектах информационной инфраструктуры. Она обеспечивает дополнительный уровень контроля, позволяющий выявлять скрытые отклонения от эталонного поведения и формализованно оценивать доверие к устройству даже при отсутствии полного знания о его внутреннем устройстве, происхождении или каналах поставки.

Литература

1. Halak B. Cist: A threat modelling approach for hardware supply chain security // Hardware Supply Chain Security: Threat Modelling, Emerging Attacks and Countermeasures, 2021. P. 3–65.
2. Wang J., Chen Y. A review on code generation with llms: Application and evaluation // 2023 IEEE International Conference on Medical Artificial Intelligence (MedAI). IEEE, 2023 P. 284–289.
3. Malmain R., Fioraldi A., Francillon A. LibAFL QEMU: A library for fuzzing-oriented emulation // BAR 2024, Workshop on Binary Analysis Research, colocated with NDSS 2024, 2024.

Обеспечение доверия к встроенному программному обеспечению защищенных микроконтроллеров на всем жизненном цикле изделия

Шелупанов А. А., Брагин Д. С., Конев А. А.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40, president@tusur.ru

Для успешного развития информатизации общества в окружении интенсивно растущих киберугроз с непредсказуемым изменением векторов атак необходимо создавать условия, обеспечивающие требования безопасного обмена информацией с заданными характеристиками функциональной надежности. Это особенно актуально в отношении критически важных объектов, прежде всего в таких отраслях, как атомная и тепловая энергетика, железнодорожный и воздушный транспорт, химические производства, банковские системы, здравоохранение, где удачно проведенная кибератака приводит к серьезным последствиям.

Одним из ключевых подходов в создании доверенных систем является использование защищенных микроконтроллеров с полностью контролируемым жизненным циклом изделия от разработки кристалла до создания информационных систем на их основе. Под защищенными микроконтроллерами (ЗМК) понимаются специализированные полупроводниковые устройства, имеющие на кристалле помимо стандартного процессорного ядра дополнительные аппаратные блоки — криптографические акселераторы и схемы защиты. Область применения защищенных микроконтроллеров — это системы, в том числе и встраиваемые, которые требуют повышенного уровня защиты хранимых и обрабатываемых в них данных.

Отличительной особенностью защищенных микроконтроллеров, помимо наличия криптоакселераторов, является их способность противостоять атакам — попыткам получения секретных данных путем воздействия на кристалл и/или снятия и анализа различных показателей в ходе работы микроконтроллера. Такая аппаратная защищенность достигается применением на уровне кристалла специальных мер защиты: добавлением в архитектуру датчиков частоты и напряжения, зашумлением сигналов, применением дополнительных защитных слоев, усложняющих вскрытие микроконтроллера, и т. д. То есть вся программная логика и секретные данные, реализующие функции безопасности конечной системы и необходимые для ее функционирования, могут быть вынесены из потенциально уязвимой блочной аппаратно-программной среды в отдельное защищенное полупроводниковое устройство.

Для встроенного программного обеспечения существует множество решений, помогающих обеспечить его защиту, но ключевым фактором, который часто упускается из виду, является безопасность производственного процесса, в ходе которого программное обеспечение записывается (инсталлируется) в микроконтроллер в процессе его серийного производства. При этом безопасность следует рассматривать не как рутинную функцию, но как один из базовых аспектов жизненного цикла системы.

В работе представлена созданная в ЦК НТИ «Технологии доверенного взаимодействия» технология обеспечения доверия через сквозную защищенную разработку аппаратного и программного обеспечения ДСЗР (доверие через сквозную защищенную разработку), которая является эффективным способом предотвращения взломов информационной системы. ДСЗР — это обеспечение безопасности на всех этапах производственного процесса, от концептуальной (замысла продукта) до финальной фазы (вывода продукта с рынка) и утилизации.

УДК 621.3.049.771

Доверенные микросхемы: принципы разработки доверенных микросхем

Лебедев А. В.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org

Рассмотрены особенности разработки доверенных микросхем для применения в составе изделий, использующихся в объектах критической инфраструктуры и изделиях спецприменения.

Ключевые слова: доверенность; микросхемы; защита данных; проектирование.

В настоящее время термин «доверенная микросхема» стал очень популярным. При этом под доверенной микросхемой разные авторы понимают совершенно разные понятия. Кто-то под термином доверенности понимает надежность (reliability). Надежная микросхема — значит доверенная. Кто-то под «термином» доверенность понимает безопасность (safety). Безопасная — значит доверенная. При этом категории безопасности не озвучиваются. Многие под термином «доверенность» понимают доверие (trust). Кто-то под доверенной микросхемой понимает российскую микросхему. Если микросхема российская — значит это доверенная. При этом опять же не указываются критерии, по которым микросхему можно считать российской. Это критерии по ПП 719, или же российской микросхемой является микросхема целиком и полностью состоящая из российских сложнофункциональных блоков? Кто-то считает доверенными микросхемами микросхемы, получавшие сертификат ФСТЭК России или ФСБ России

Как было показано выше, термин «доверие» не имеет нормативного и даже консолидированного определения. Каждый из участников рынка доверенной электронной компонентной базы трактует этот термин по-своему. Также есть путаница, какой регулятор отвечает за доверенные микросхемы: ФСТЭК России или ФСБ России. В нормативно-правовой базе регуляторов также не перечислены требования к разработке доверенных микросхем.

Со стороны регуляторной базы понятие доверенных микросхем пытаются курировать ТК-167 (группа по разработке доверенной ЭКБ) и различные рабочие группы при госкорпорациях (Росатом, Ростех и т. д.)

Многие авторы пытаются выделить принципы функциональной и технологической безопасности при проектировании доверенной ЭКБ.

Более правильным было сказать, что доверенные микросхемы — микросхемы, состоящие из российских сложнофункциональных блоков, разработанных в российских САПР на доверенных программно-аппаратных комплексах российского производства под управлением российских операционных систем, так как «закладки» или недокументированные возможности закладываются на этапе проектирования ЭКБ.

В связи с этим предлагается термином «доверенная микросхема под объекты КИИ» обозначать микросхему, разработанную из сложнофункциональных блоков, аттестованных на отечественном микроэлектронном производстве

и произведенных на российском микроэлектронном производстве с последующей аттестацией у регуляторов ФСБ России или ФСТЭК России.

Также необходимо зафиксировать термин «доверенная микросхема» в нормативно-правовых документах Минпромторга Российской Федерации на законодательном уровне.

Такой подход дает возможность проверки проектирования и производства микросхем на каждом шагу жизненного цикла.

УДК 621.382.3

Размерные эффекты в нелинейных моделях AlGaN/GaN HEMT

Торхов Н. А.[1,3], Шутов Д. Г.[1], Колковский Ю. В.[1,2], Манько А. С.[3]
[1] АО «НПП «Пульсар»
105187, г. Москва, Окружной проезд, 27
administrator@pulsarnpp.ru
[2] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
rector@mirea.ru
[3] Севастопольский государственный университет
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
priem@sevsu.ru

Было получено, что в нелинейных моделях AlGaN/GaN HEMT размерные эффекты проявляются в нелинейной зависимости значений аддитивных параметров не только пассивных, но и активных их эквивалентных элементов от количества секций и ширины канала транзистора.
Ключевые слова: GaN; HEMT; нелинейная модель; размерные эффекты.

Компактные линейные и нелинейные модели играют важную роль как в разработке и оптимизации мощных AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistor (далее — HEMT) с заданными приборными характеристиками, так и в дизайне интегральных СВЧ-схем на их основе [1]. В частности, было показано, что латеральные 3D микро- и нанонеоднородности гетероэпитаксиальных структур AlGaN/GaN HEMT оказывают синергетические влияние практически на весь спектр аддитивных параметров эквивалентных элементов линейных моделей HEMT, проявляющееся в зависимости их относительных значений от ширины канала d и количества секций n-размерных эффектов [2]. Так, были получены законы преобразования значений аддитивных параметров пассивных эквивалентных элементов линейных моделей, позволяющие прогнозировать частотные зависимости малосигнальных S-параметров таких HEMT в зависимости от d и n. Комплексное влияние размерных эффектов на интегральные приборные характеристики таких HEMT (уровень выходной мощности P_{in}, коэффициент усиления по мощности K_y и коэффициент шума $K_ш$ [3]) позволяют предположить, что и значения аддитивных параметров эквивалентных элементов нелинейных моделей таких HEMT в зависимости от n и d также должны подчиняться аналогичным закономерностям.

Восстановленные значения параметров эквивалентных элементов нелинейных моделей (например модель Tajima, или Angelov) изготовленных AlGaN/GaN HEMT диапазона 0,5–8 ГГц с периферией $W_{ij} = d_i \cdot n_j$ (где, $d_1 = 50$; $d_2 = 80$; $d_3 = 100$ и $d_4 = 150$ мкм, а $n_1 = 1$; $n_2 = 2$; $n_3 = 4$; $n_4 = 8$; $n_5 = 12$) на подложках SiC с использованием программного обеспечения FCM (Focus Compact Modeling) от Focus Microwaves продемонстрировали аналогичные размерные эффекты. Было получено, что в общей сложности не только пассивные, но и активные эквивалентные элементы нелинейных моделей (например, источник тока $I_{GS} = I_{GS}(U_{GS})$ — FCM-Tajima-CS) подчиняются аналогичным закономерностям. На это, например, может

указывать непропорциональное изменение токов насыщения стока $I_{dss}(W_{ij})$ расположенных на одном чипе HEMT: $I_{dss} = I_{dss}(W_{i,j})$.

Литература

1. Коколов А. А., Шеерман Ф. И., Бабак Л. И. Обзор математических моделей СВЧ полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов // Наноэлектроника СВЧ. Анализ, синтез и проектирование устройств. Доклады ТУСУРа, часть 1, декабрь 2010. — № 2 (22). — С. 118–123.
2. Torkhov N. A., Babak L. I., Kokolov A. A. The Influence of AlGaN/GaN Heteroepitaxial Structure Fractal Geometry on Size Effects in Microwave Characteristics of AlGaN/GaN HEMTs // Symmetry, 2019. Vol. 11. № 12. P. 1495. DOI: 10.3390/sym11121495.
3. Торхов Н. А., Шутов Д. Г., Колковский Ю. В., Жабина Е. Ю. Применение синергетических подходов в методах проектирования мощных AlGaN/GaN HEMT с заданными приборными характеристиками // Российский форум «Микроэлектроника-2024», 10-я научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. Научно-технологический университет «Сириус», 23–28 сентября 2024 г. — М.: Техносфера, 2024. — С. 448–449.

УДК 519.876.5

Анализ линий передачи и переходных отверстий на печатных платах и интегральных схемах на основе современного математического аппарата

Кухарук В. С., Ухин В. А.
АО «ЭРЕМЕКС»
115088, г. Москва, ул. Угрешская, 27, стр. 1
kukharuk@eremex.ru

В докладе рассматриваются математические методы и подходы, применяемые для анализа целостности сигналов и минимизации потерь на печатных платах и интегральных схемах. Указывается, что высокоэффективными являются численные методы, которые достаточно легко поддаются автоматизации. Представленный в докладе математический аппарат реализован в САПР SimPCB Lite от компании «ЭРЕМЕКС».

Ключевые слова: САПР; метод граничных элементов; энергия магнитного поля; энергия электрического поля; SimPCB Lite; анализ линии передачи; переходное отверстие; печатная плата; интегральная схема.

Спроектировать современное электронное устройство практически невозможно без выполнения определенного рода вычислений. Для быстродействующих устройств, реализованных на печатных платах (ПП) и интегральных схемах (ИС), важно оценивать целостность сигналов, что позволяет предотвратить их деградацию.

Анализ целостности сигналов выполняется на основе первичных и вторичных параметров линий передачи (ЛП) и переходных отверстий (ПО). Это емкость, индуктивность, активное сопротивление, проводимость диэлектрика и волновое сопротивление. Существует достаточно большое количество способов вычисления указанных выше параметров. Самый простой — использование аналитических формул. Однако он не получил широкого распространения, так как не обладает высокой точностью и имеет целый ряд ограничений [1].

Наибольшее распространение получили численные методы. Они обеспечивают высокую точность, приемлемое время расчета, способны рассчитывать достаточно сложные структуры ЛП и ПО [2]. В данной работе рассматривается метод граничных элементов (BEM). Данный метод позволяет эффективно решать задачи, связанные с многослойными структурами ПП и ИС. В настоящее время в САПР реализован математический аппарат для решения электростатической и магнитной задачи, что позволяет вычислять матрицы первичных и вторичных параметров ЛП и ПО [3].

Продемонстрировано, что с помощью метода граничных элементов возможно эффективно решать следующие задачи:

- расчет без потерь — определение первичных и вторичных параметров линий передачи и переходных отверстий (емкость, индуктивность, волновое сопротивление, задержка сигнала и т. д.);
- частотный анализ (импеданс, индуктивность, сопротивление, проводимость диэлектрика, ослабление сигнала);

- расчет S-параметров одиночных и дифференциальных ЛП;
- вычисление перекрестных помех без учета потерь.

Литература

1. Кечиев Л. Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники — М.: Грифон, 2017. — С. 13.
2. Кухарук В. С., Коломенский Д. С., Ухин В. А., Смирнова О. В. Обзор основных возможностей инструмента SimPCB для расчета параметров линий передач в программе Delta Design // Современная электроника, 2024. — № 5. — С. 34–36.
3. Ухин В. А., Коломенский Д. С., Кухарук В. С., Смирнова О. В. Методы расчета волнового сопротивления линий // Современная электроника, 2023. — № 9. — С. 40–42.

УДК 004.4

Применение маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ как программное обеспечение

Верник П. А.[1], Аряшев С. С.[2]
[1] АНО «Институт стратегий развития»
107031, г. Москва, ул. Петровка, 15/13, стр. 5
Center@isd.center
[2] АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы»
125285, г. Москва, ул. Беговая, 13, подвал пом. 6, комн. 1

Обосновывается актуальность и приводятся результаты работ по созданию и применению компонентов отечественных САПР для маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ, в том числе системы управления жизненным циклом, и средств обеспечения доверенности при производстве СБИС на недоверенных фабриках.
Ключевые слова: доверенная ЭКБ; контролируемое проектирование; САПР; управление жизненным циклом.

Для электронной промышленности открывается новый рынок специальной электронной компонентной базы (ЭКБ) для доверенных аппаратно-программных платформ, предназначенных для стратегических объектов и систем цифрового управления критической информационной инфраструктурой [1].

Актуальной является задача создания отечественных средств проектирования и управления проектами по разработке доверенной ЭКБ, а также инструментов обеспечения доверенности с учетом производства кристаллов на недоверенных фабриках.

Разработка сверхбольших интегральных схем (СБИС) является сложным процессом, включающим множество итерационно повторяющихся обменов данными между отдельными инструментами, базами данных и системами. Оптимизация этого процесса может быть достигнута применением системы управления жизненным циклом ЭКБ, что позволит также сократить в разы время вывода изделий на рынок.

В 2021–2025 гг. в рамках государственных мер поддержки отечественных разработчиков средств производства электроники АО «НПЦ СпецЭлектронСистемы» и НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ был создан и в настоящее время успешно внедрен образец системы доверенного проектирования, построенной на основе собственных оригинальных решений.

Основными компонентами данной системы являются:

- система управления проектами и жизненным циклом изделий ЭКБ контролируемого маршрута «Золотой чип»;
- электронная база данных (БД) доверенных библиотек элементов и сложнофункциональных (СФ) блоков;
- программный комплекс подготовки конструкторской документации (КД) СБИС, верификации топологии и электрической принципиальной схемы СБИС, сборки проектов для мультизапусков;
- система поддержки маршрута контролируемого проектирования для испытаний и сертификации готовых СБИС при их изготовлении на недоверенном производстве.

Совокупность компонентов системы доверенного проектирования решает следующие задачи:

- проектирование СБИС;
- отслеживание и управление проектами;
- контроль качества;
- верификация и подготовка к производству;
- производство изделий;
- управление комплексными проектами;
- управление продажами изделий.

Структурная схема системы доверенного проектирования представлена на рис. 1.

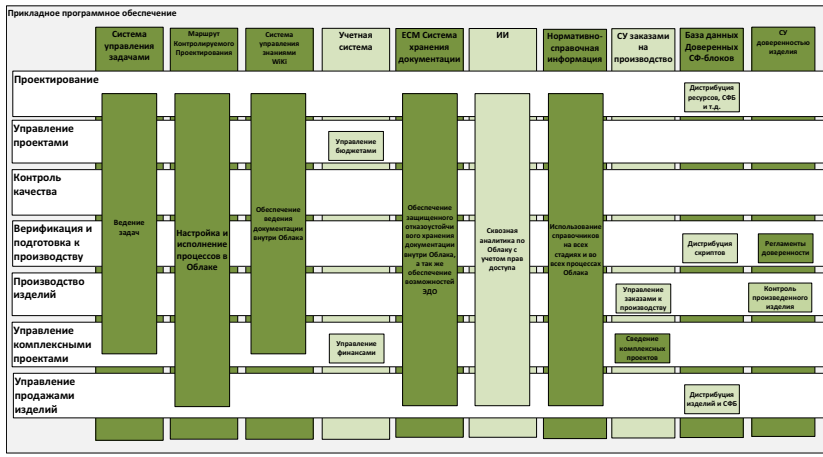


Рис. 1. Структурная схема системы доверенного проектирования

Система доверенного проектирования имеет облачную гибридную структуру с защищенным доступом через веб-интерфейс, что позволяет обеспечить ее гибкость и реализовать управление контролируемым проектированием.

Обеспечение доверенности разрабатываемых изделий реализуется на всех этапах проектирования, передачи на производство и испытания готовых образцов.

В текущем году запущено обучение студентов ведущих вузов в ПО «Золотой чип». В системе управления студенты обучаются проектированию цифровых СБИС и написанию RTL-моделей.

Литература

1. Попов С. А. «Микроэлектроника-2022» глазами связиста // Первая миля, 2022. — № 7. — С. 20–26.
2. Механик А. Г. Гром грянул, пора перекреститься // Стимул, 7 марта 2022. — URL: https://stimul.online/articles/sreda/grom-gryanul-pora-perekrestitsya (дата обращения: 16.08.2023).
3. Власов С. Е. Государством созданы условия для формирования отечественной инфраструктуры проектирования изделий радиоэлектроники // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2021. — № 3. — С. 14–19.

УДК 004.42

Подходы к интеграции отечественных инструментов проектирования цифровых СБИС на основе Единой проектной среды

Переверзев А. Л.[1,2], д. т. н., Коршунов А. В.[1,2], к. т. н., Седов А. Ю.[1], Фаворов М. Ю.[1]

[1] АО «Международный научно-технологический центр МИЭТ»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 10, стр. 1
a.korshunov@istc-miet.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Представлена единая проектная среда (ЕПС) для отечественных маршрутов проектирования цифровых СБИС, поддерживающая реализацию проектов в базисе СБИС, ПЛИС и БМК. ЕПС должна обеспечить построение маршрутов с использованием BPMN, интеграцию с отечественными и коммерческими САПР, контроль версий, автоматизацию типовых процедур, а также воспроизводимость и прослеживаемость результатов проектирования.

Ключевые слова: система автоматизации проектирования; цифровой маршрут; бизнес-процесс; BPMN; автоматизация.

Проблемы, связанные с ростом сложности разрабатываемых цифровых СБИС и СнК, привели к появлению комплексных сред автоматизации проектирования, обеспечивающих интеграцию различных инструментов и унификацию маршрутов проектирования. На мировом рынке существуют как коммерческие решения Synopsys LYNX [1], так и open-source-решения, например SiliconCompiler [2], поддерживающие соответственно коммерческие и открытые инструменты САПР электроники.

В рамках проводимых ОКР разрабатывается единая проектная среда (ЕПС), ориентированная на поддержку полного жизненного цикла проектирования цифровых СБИС с возможностью реализации как ASIC-проектов, так и отечественных ПЛИС и БМК с интеграцией отечественных инструментов САПР.

Ключевыми особенностями разработанной ЕПС являются использование нотации BPMN (Business Process Model and Notation) [3] для формализации вызова и визуализации маршрутов проектирования; поддержка широкого набора маршрутов проектирования (СБИС, ПЛИС, БМК, техпроцессы 250–90 нм); возможность интеграции с коммерческими и открытыми САПР; наличие ролевой модели управления, включающей проектировщиков, руководителей проектов, дизайнеров маршрутов и администраторов. ЕПС обеспечивает унификацию маршрута у пользователей, прослеживаемость данных и воспроизводимость результатов, что особенно важно при внедрении стандартов качества и взаимодействии между распределенными командами.

ЕПС предусматривает гибкие варианты развертывания: поддерживаются как толстый клиент для локального использования в составе корпоративной инфраструктуры, так и тонкий веб-клиент для удаленного доступа через облачные решения, включая частные и гибридные облака. Для автоматизации задач

на пользовательском уровне предусмотрена поддержка скриптовых языков, таких как Python и Tcl, что позволяет интегрировать ЕПС в существующие среды и адаптировать процессы под конкретные требования проектных команд. Планируется реализация интерфейсов для интеграции с системами контроля версий (Git) и системами отслеживания ошибок.

Преимуществом предложенного подхода является его адаптивность к специфике дизайн-центров, позволяющая повысить координацию между участниками процесса разработки (заказчик — проектировщик — поставщик САПР), интегрировать отечественные инструменты САПР и обеспечить контроль качества на всех этапах проектирования. ЕПС позволит существенно сократить сроки адаптации существующих процессов проектирования под новые САПР, а также упростить аудит и анализ хода проектирования при внедрении отечественных маршрутов проектирования СБИС.

Литература

1. Synopsys Lynx Design System [Электронный ресурс]. — URL: https://www.synopsys.com/implementation-and-signoff/rtl-to-gdsii/lynx-design-system.html (дата обращения: 13.07.2025).
2. SiliconCompiler is an open source framework which automates the translation from source code to silicon [Электронный ресурс]. — URL: https://siliconcompiler.com (дата обращения: 13.07.2025).
3. Muehlen zur M., Recker J. How much language is enough? Theoretical and practical use of BPMN // Business Process Management Journal, 2008. Vol. 14. № 5. P. 744–758.

УДК 621.3.011.7

Метод синтеза топологии СВЧ монолитных интегральных усилительных каскадов

Сальников А. С., Билевич Д. В., Степанов В. И., Добуш И. М., Метель А. А., Горяинов А. Е., Калентьев А. А.
ООО «50ом Технолоджиз»
634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 147
andrei.salnikov@50ohm.tech

В докладе рассмотрена модификация ранее предложенного метода синтеза топологии СВЧ монолитных интегральных схем на основе материалов группы A^3B^5. Предложенные улучшения заключаются в новом способе кодирования топологии и позволяют повысить эффективность работы метода. Усовершенствованный метод позволяет получить топологии усилительных каскадов. Продемонстрирован синтез топологии СВЧ-усилителя на основе отечественной технологии.

Ключевые слова: синтез топологии; СВЧ монолитная интегральная схема; усилительные каскады; интеллектуальная САПР.

Под синтезом топологии будем понимать автоматизированную процедуру получения топологии по заданным требованиям, известной электрической схеме и топологии отдельных элементов. Исследования автоматизированного проектирования актуальны и в настоящее время связаны в большей степени с развитием искусственного интеллекта. В качестве примеров можно привести подход «обратного проектирования», в котором используются неинтуитивные шаблоны и искусственные нейронные сети, описывающие их характеристики [1], представление топологии в виде вариационного автокодировщика [2], обучение языковых моделей, выполняющих команды инженера по доработке топологии [3].

Ранее был представлен метод синтеза топологии и продемонстрирована его применимость для синтеза секции аттенюатора, секции фазовращателя, СВЧ-коммутатора [4]. Метод синтеза заключается в применении комбинации алгоритмов: первого размещения на основе анализа графа, оптимизации топологии алгоритмом дифференциальной эволюции, дополнительной оптимизации алгоритмом имитации отжига с эффектом памяти. Целевая функция (ЦФ) формулируется на основе требований и учитывает расстояние между элементами, площадь кристалла, длину соединительных линий и другие критерии. Трассировка выполняется модифицированным A* алгоритмом. Серия численных экспериментов подтвердила, что с ростом числа элементов эффективность алгоритмов падает (большее время, меньшее значение ЦФ при том же числе итераций). В предыдущих задачах удавалось снизить число элементов за счет симметрии или ручной трассировки цепей управления, однако в усилителях, особенно многокаскадных, число элементов велико, а эти приемы не применимы. Для улучшения эффективности алгоритмов были предложены модификации: 1) применение относительных координат, которые отсчитываются не от начала координат, а от связанных между собой элементов, 2) представление топологии в виде упорядоченного дерева с объединением элементов в функциональные группы (например, согласующие цепи, цепи

обратной связи, цепи питания и т. п.). Численные эксперименты показали увеличение быстродействия в 5,2 раза без снижения качества решения.

Далее модифицированная версия метода была применена для синтеза топологии 2–4 ГГц однокаскадного усилителя на основе отечественного 0,5 мкм GaN HEMT-технологического процесса (АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург). Принципиальная электрическая схема усилителя была синтезирована с помощью интеллектуальной платформы 50ohm Tech Circuit Studio. Время синтеза топологии составило около 8 часов, т. к. в ЦФ был добавлен критерий, обеспечивающий возможность полной трассировки решения. Топология была экспортирована в коммерческую САПР, где выполнено моделирование ее электрических характеристик. На момент подготовки тезисов микросхема находится на изготовлении.

В докладе представлена модификация метода синтеза топологии, повышающая эффективность и позволяющая применить его для синтеза усилительных каскадов. Синтез топологии дополняет синтез электрических схем [5], образуя полный цикл автоматизированного проектирования, что значительно повышает производительность труда разработчиков СВЧ монолитных интегральных схем.

Литература

1. Karahan E. A. et al. Deep-learning enabled generalized inverse design of multi-port radio-frequency and sub-terahertz passives and integrated circuits // Nature Communications, 2024. Vol. 15. № 1. P. 10734.
2. Wang P.-C. et al. Layout Synthesis of Analog Primitive Cells with Variational Autoencoder // 19th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design. Funchal, Portugal: IEEE, 2023. P. 1–4.
3. Liu B. et al. Layoutcopilot: An LLM-powered multi-agent collaborative framework for interactive analog layout design // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2025 [в печати].
4. Сальников А. С. и др. Методы синтеза топологии СВЧ монолитных интегральных схем // 10-я научная конференция «ЭКБ и электронные модули»: Сборник тезисов. Сириус, 23–28 сентября 2024 г. — М.: Техносфера, 2024. — С. 364–365.
5. Калентьев А. А. и др. Интеллектуальная САПР «Смекалец»: быстрый и простой синтез СВЧ интегральных схем // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2022. — № 3 (214). — С. 76–81.

Моделирование аналогового тракта радиотехнических систем в Engee-РТС

к. т. н. Балакин Д. А.
АО Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента»
117418, г. Москва, Нахимовский просп., 51

Современные радиотехнические системы (РТС) имеют чрезвычайно сложную приемо-передающую структуру как в аналоговом, так и в цифровом тракте (в том числе и цифровые алгоритмы обработки). Для успешного применения РТС на практике разработчики используют модели, позволяющие имитировать узлы и алгоритмы РТС. Обычно основной упор при моделировании делается на цифровую часть, в то время как в аналоговом тракте возникают такие явления, как шумы, паразитные сигналы, зеркальные эффекты, фазовые смещения, несоответствия между синфазной и квадратурной составляющими, сдвиг постоянной составляющей, фазовый шум локального генератора, уровень внеполосных и побочных составлявших спектра, неравномерность АЧХ и фронт импульса. Если их не учесть на этапе моделирования, а потом на этапе разработки, то могут возникнуть последствия, которые уже не исправить за счет цифровых методов. В связи с этим моделирование аналогового тракта является актуальной задачей

В докладе представлены результаты разработки моделей аналогового тракта для РТС, выполненных в рамках проекта Engee-РТС. Модели базируются на методе гармонического баланса, что дает возможность проводить многотональный анализ схем с преобразованием комбинационных частот, а также умножителей частоты, смесителей, усилителей, модуляторов и многих других устройств. В качестве объекта исследования выступает модель аналоговой части приемо-передающий тракта РТС. Модель состоит из двух частей — линейной и нелинейной. Линейная часть передатчика представляет собой полосовой фильтр, выполненный на пассивных элементах, в свою очередь приемная часть также базируется на пассивных элементах. Нелинейная часть передатчика — это усилитель, а у приемника это смеситель и усилитель сигнала, также моделируется фазовый сдвиг для формирования синфазного и квадратурного канала.

Топологический редактор для аналогового маршрута: пути развития

Ерохин Р. В., Шеблаев М. В., Яхонтов А. Н.
ООО «ПК Аквариус»

Стратегия развития отечественной микроэлектроники [1] предусматривает создание производств с технологическими нормами до 28 нм к 2030 году. В рамках программы развития микроэлектроники запущены проекты создания отечественной САПР микроэлектроники. Работы, запланированные к 2027 году, предусматривают создание САПР, поддерживающих доступные на текущий момент техпроцессы до 90 нм.

Компания «ПК Аквариус» принимает участие в создании средств редактирования топологии для аналогового маршрута проектирования. Редактор топологии «Декарт», призванный заменить такие продукты, как Synopsys Custom Compiler или Cadence Virtuoso Layout Editor, разрабатывается в тесном сотрудничестве инженеров-разработчиков с архитекторами ПО и программистами и позволяет рассчитывать на результат в виде программного продукта, который будет максимально функционален, удобен и полезен конечным пользователям. Уже сейчас стоит не только задуматься о выполнении текущего проекта, но и заложить необходимый базис под будущие возможности, востребованные в последующих поколениях САПР.

Развитие топологического редактора до мощного и самодостаточного средства САПР предполагает эволюционное развитие заложенных в проект концепций и доведение их до совершенства с точки зрения полноты функциональности и удобства пользователя. Также немаловажным аспектом является максимальная бесшовность перехода с замещаемых САПР на отечественную разработку без потери качества и продуктивности инженера-разработчика.

Топологический редактор — это в первую очередь работа с геометрическими объектами. Традиционно большую часть времени инженеры-проектировщики имеют дело с объектами, которые представляют собой многоугольники или прямоугольники со сторонами, параллельными осям координат или имеющими с ними углы, кратные 45 градусам. С другой стороны, возможность повторного использования разрабатываемых программных компонентов на разных этапах и в разных маршрутах проектирования — цифровом, аналоговом, СВЧ, подготовки ФШ — может потребовать более сложных алгоритмов для работы с фигурами любой сложности, содержащих произвольные гладкие кривые как элементы геометрии. Такая возможность должна быть заложена в геометрическое ядро нового поколения. Кроме того, геометрическое ядро должно обеспечивать работу не только с отдельными фигурами, но и с группированными объектами — по слою, по топологии, по иерархии, а также обеспечивать логические операции над слоями и группами (XOR/OR/AND/ANDNOT...).

Развитие топологического редактора и применение иерархического подхода в проектировании топологии неизбежно ведут к появлению функциональности планировщика — средства первичного размещения и формирования эскиза проекта, позволяющего проводить планирование и манипуляции с портами

ввода-вывода, использовать «софт-блоки», формирующие образ компонентов проекта на верхнем уровне, и генерировать варианты первичного размещения компонентов с различными стратегиями. Здесь напрямую важно взаимодействие с элементами маршрута цифрового проектирования [2]. Такое взаимодействие должно предполагать архитектурное планирование не только внутри аналогового маршрута, но и между различными маршрутами.

В рассмотрение должны попасть согласованность по используемым протоколам, языкам автоматизации, совместному доступу к данным с использованием УБД, рассмотрена возможность использования системы контроля версий и т. д.

В первую очередь топологический редактор должен стать универсальным инструментом инженера-тополога. Немало усилий уже потрачено и будет еще больше уделено работе с UI/UX-исследованиями в кооперации с техническими дизайнерами для создания гибкого, интуитивного и настраиваемого интерфейса.

Задача разработки качественного и конкурентноспособного программного продукта в сжатые сроки (минуя эволюционный этап развития ПО) предельно амбициозна, но уникальна и заманчива. Своевременное перспективное планирование необходимо для успешной реализации программы аналогового маршрута проектирования и стратегии развития отечественных САПР в целом.

Литература

1. Шпак В. Развитие электронной промышленности России в условиях меняющегося мира. — М.: Техносфера, 2024.
2. Сазонов В. В., Шеблаев М. В. Разработка подсистемы топологического проектирования САПР СБИС, 2023.

УДК 621.3

Инженерный анализ электроники от T1: технологии опережения

Харитонович А. И.
ООО «ТС Интеграция», ИТ-холдинг «Т1»
aikharitonovich@t1.ru

Представлены принципы технологий инженерного анализа T1, позволяющие значительно увеличить эффективность инженерного анализа электроники в сравнении с зарубежными аналогами на примерах из области теплового, электромагнитного анализа и анализа механической прочности. Особое внимание уделено решению мультидисциплинарных. задач.
Ключевые слова: CAE; CADFlo; инженерный анализ; охлаждение электроники; целостность питания; целостность сигнала; электромагнетизм; моделирование; расчеты; виртуальные эксперименты.

Инженерный анализ T1, интегрированный в САПР CADFlo — российский многофункциональный и мультидисциплинарный расчетный комплекс для анализа теплообмена, прочности, оптики и электромагнетизма.

Отличительной особенностью инженерного анализа T1 является возможность получения высокоточных результатов значительно быстрее и с меньшими трудозатратами в сравнении с существующими зарубежными аналогами благодаря уникальным расчетным технологиям, разработанным российскими математиками и программистами.

Зарубежные расчетные комплексы, такие как ANSYS, зарекомендовали себя как решения, позволяющие получить высокоточный результат. Однако, чтобы получить этот результат, необходимо соблюсти определенные требования, выдвигаемые решателем к расчетной сетке. В реальной задаче инженеру почти наверняка придется совершить определенные манипуляции с изначальной конструкторской моделью для того, чтобы удовлетворить требования сеточного генератора и решателя. Таким образом, основные временные затраты при решении сложных промышленных задач, как правило, приходятся не на решение самой задачи решателем, а на подготовку этой задачи, которая осуществляется человеком. Эта часть решения, в зависимости от сложности задачи, может занимать до 90% и более от всего затраченного времени решения.

В отличие от всех зарубежных комплексов, в инженерном анализе T1 реализованы оригинальные методы, позволяющие получить высокоточный результат без трудоемких упрощений. Например, точное решение в CADFlo можно получить, не разрешая пограничный слой расчетной сеткой по высоте слоя. Это возможно благодаря наличию в CADFLO уникальной интегральной модели пограничного слоя, который позволяет получить интегральные характеристики слоя, такие как напряжение трения и тепловой поток на стенке, не прибегая к классическим подходам. Такой подход существенно экономит время пользователя и немного экономит время расчета, так как размерность сетки в CADFlo, позволяющая получить результат той же высокой точности, на порядок меньше.

Кроме того, в CADFlo интегрированы эмпирические (полученные в результате эксперимента) данные, которые автоматически используются в определенных ситуациях в том случае, когда численные методы не могут дать точный результат на имеющейся расчетной сетке, что позволяет получить точные расчеты в десятки раз быстрее.

Наконец, в продукте используются аналитические модели, которые также автоматически включаются локально в тех местах, где это допустимо и где классическое численное решение не может дать точный результат на имеющейся расчетной сетке, заменяя численное решение.

Таким образом, CADFlo, будучи построенным на классических принципах вычислительной гидрогазодинамики, дополнен оригинальными новыми CAE-технологиями, которые комбинируются вместе с классическими подходами, значительно сокращая время, потраченное пользователем на решение задачи без потери точности. Так, например, при решении задачи продувки пластинчатого теплообменника используются все вышеупомянутые оригинальные технологии, что позволяет получить более высокую точность результатов расчета в 35 раз быстрее, чем в зарубежном аналоге.

Необходимо отметить возможность глубокой интеграции различных физических процессов внутри продукта — теплообмена, электромагнетизма, механической прочности. Благодаря тому что все дисциплины разрабатываются непосредственно одной командой разработчиков (а не являются независимыми разработками, формально собранными под одним брендом, между которыми сложно осуществить эффективную интеграцию, как в случае зарубежных аналогов), междисциплинарный обмен данными происходит наиболее эффективным способом на «низком» уровне. Так, например, задача индукционного нагрева считается в восемь раз быстрее при той же точности, что и в признанном зарубежном аналоге.

Новые CAE-технологии, внедренные российскими разработчиками в CADFlo, позволяют получать точные результаты быстрее зарубежных аналогов, что делает импортозамещение не только формальным, но и эффективным.

УДК 53.088

Нормирование полосы предельной погрешности АЦП в проективной модели измерения

Цыбульский О. А., к. т. н., доцент
Димитровградский инженерно-технологический институт — филиал НИЯУ МИФИ
433511, г. Димитровград, ул. Куйбышева, 294
multimer@list.ru

Доклад посвящен нормированию полосы предельной погрешности АЦП, основанному на проективной модели измерения. Нормирование учитывает интегральную нелинейность преобразования.
Ключевые слова: проективная теория измерения; АЦП; точность; нормирование погрешности измерения.

В метрологии общепринятое уравнение измерения описывается линейной функцией. Соответственно, изменение абсолютной погрешности по диапазону также описывается линейной функцией. Линейное нормирование с учетом только аддитивной и мультипликативной составляющих недостаточно для точных систем, где выражена интегральная нелинейность (INL). Для таких случаев необходимы более сложные методы нормирования и коррекции.

В практических расчетах INL включают в состав мультипликативной погрешности, но при оценке точности и калибровке отдельно анализируют и корректируют нелинейность. Однозначного алгоритма оценки погрешности интегральной нелинейности нет. Нет и общепринятой модели преобразования АЦП, которая учитывает интегральную нелинейность.

Важность учета и коррекции INL определяется следующими причинами:

- в системах с высокими требованиями к точности (медицинская техника, навигация, промышленная автоматизация) даже небольшие значения INL существенно влияют на качество измерений;
- в цифровой обработке сигналов нелинейность приводит к появлению гармонических искажений и ухудшению отношения сигнал/шум.

Для уменьшения погрешности, вызванной нелинейностью, применяют многоточечную калибровку с помощью таблиц калибровочных коэффициентов, а также цифровую обработку сигнала. Такой подход требует существенных затрат.

INL является одним из ключевых параметров, ограничивающих точность АЦП в измерительных системах. Поэтому первостепенной задачей является создание модели измерений, которая бы учитывала интегральную нелинейность. Влияющих величин, вызывающих отклонение от линейной характеристики, достаточно много. Поэтому важно определить вид нелинейности, оказывающий наибольшее влияние на характеристику преобразования АЦП, чтобы учесть ее в модели измерения.

В качестве модели измерения применена модель проективного измерительного преобразования [1]. Проективное преобразование описывается дробно-линейной функцией и включает линейное преобразование в качестве частного случая. Проективное преобразование широко распространено в измерительной

технике как параметрическое преобразование (измерительные мосты, делители). Они имеют дробно-линейную функцию преобразования, а полоса их абсолютной погрешности нормируется функцией, включающей три составляющие предельной погрешности [1, 2]:

$$\Delta X = \delta_а X_н + \delta_м X + \delta_г \frac{X^2}{X_в}, \quad (1)$$

где $\delta_г = \Delta_г / X_в$ — составляющая относительной погрешности, определяемая погрешностью от нелинейности (гиперболической) при $X = X_в$.

Дополнительно к аддитивной $\delta_а$ и мультипликативной $\delta_м$ составляющим погрешности в формуле нормирования присутствует интегральная нелинейность, характерная для дробно-линейной функции преобразования.

Результатом измерительного преобразования АЦП является код K, равный отношению измеряемой величины X к опорной величине $X_{оп}$:

$$K = X / X_{оп}. \quad (2)$$

Т. е. АЦП тоже выполняет функцию делителя с переменным коэффициентом деления. И также должен описываться дробно-линейной функцией преобразования и полосой абсолютной погрешности, нормируемой функцией (1). Для подтверждения этого положения приведено сравнение характеристики INL, рассчитанной по формуле (1) рис. 1, и экспериментальные данные рис. 2 для 16-разрядного АЦП AD7680 Analog Devices.

Сравнение показывает соответствие результата нормирования полосы погрешности формулой (1) экспериментальному результату. Следовательно, для повышения точности нормирования погрешности значение INL должно выделяться в отдельный член формулы (1) полосы предельной погрешности, что позволяет:

- более адекватно описать реальное распределение погрешности по диапазону измерений;
- избежать избыточного завышения полосы погрешности;
- корректно сравнить приборы и их метрологические характеристики.

Проективная модель измерения позволяет эффективно скорректировать все составляющие полосы предельной погрешности АЦП (1), включая погрешность INL. Преимущество проективной модели измерения показано на примере российского микроконтроллера К1986ВУ024 («Миландр»).

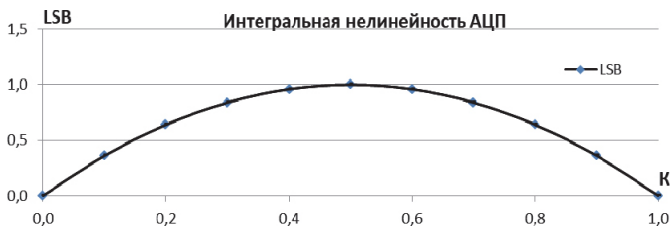


Рис. 1. Отклонение характеристики АЦП AD7680 от линейной функции, выраженное через LSB по (1)

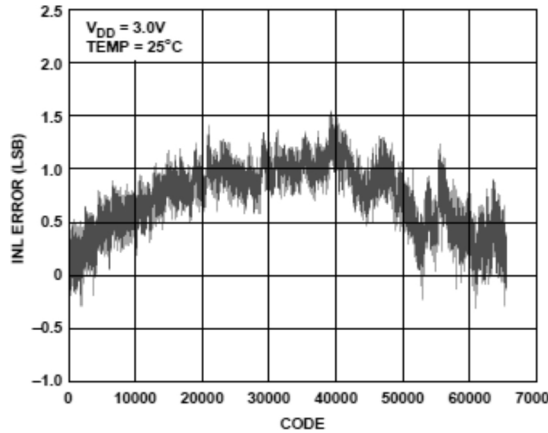


Рис. 2. Интегральная нелинейность AD7680. Typical INL (datasheet)

Литература

1. Цыбульский О.А. Основы проективной теории измерений: монография. — Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2022. — 156 с. — ISBN 978-5-6045061-3-4.
2. Цыбульский О.А. Проективная модель измерений. Проективные АЦП // 9-я научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник докладов. Наноиндустрия, 2024. Спецвыпуск № 10s. — Т. 17 (128). — С. 232–235.

УДК 621.383

Моделирование объемных эффектов при проектировании элементов фоточувствительных микросхем

Ельников Д. С., Кононов А. А., Маклаков А. М., к. т. н. Пугачёв А. А., Соколов С. В.
АО «Научно-производственное предприятие «Пульсар»
105187, г. Москва, Окружной проезд, 27
elnikov_ds@pulsarnpp.ru

Разработаны методы учета объемных эффектов при TCAD-моделировании фоточувствительных ПЗС и КМОП-фотодиодных ИС: эквивалентные преобразования структур элементов, сочетание трехмерного и двумерного моделирования, замена целевой функции, применение вспомогательных структур элементов

Приведены примеры применения методов и подходов.

Ключевые слова: ФПЗС; КМОП-ФД; TCAD-моделирование; объемные эффекты.

Основным инструментом проектирования фоточувствительных (ФЧ) ИС на приборах с зарядовой связью и фоточувствительных элементов КМОП-фотодиодных ИС является приборно-технологическое моделирование: разработка новой ФЧ ИС в первую очередь требует разработки ее фоточувствительного элемента. Фоточувствительный элемент должен обеспечивать эффективный сбор фотогенерированных носителей заряда, для чего требуется знание распределений их потоков в объеме полупроводника в течение цикла работы.

Требования малого времени моделирования обусловлены особенностями проектирования ФЧ ИС:

- области электрических полей трехмерны и имеют протяженность от единиц до десятков микрометров;
- моделируемый фрагмент ФЧ ИС имеет значительные размеры, в то время как основная «область интереса» имеет существенно меньший размер, что требует применения сеток с большим числом узлов (свыше 500000);
- поиск значений технологических, электрических и геометрических параметров, обеспечивающих выполнение поставленных к ФЧ ИС требований, происходит путем их многократного перебора (до 100 шагов и более).

Для решения данных проблем был разработан ряд приемов и методов моделирования:

- преобразование структуры элемента или фрагмента ФЧ ИС;
- замена целевой функции;
- сочетание трехмерного и двумерного моделирования;
- применение вспомогательных моделей струкктур.

Преобразование структуры и замена целевой функции были применены для определения геометрических параметров микролинз, выходных сдвиговых регистров с лавинным усилением зарядовых пакетов, при расчете разрешающей способности и квантовой эффективности ФЧ ИС и при моделировании КМОП-фотодиодных фотоприемных элементов [1, 2, 3]. При моделировании регистра с лавинным усилением применено сочетание трехмерного и двумерного моделирования [4, 5].

Разработанные методы TCAD-моделирования дают возможность повысить точность учета объемных геометрических эффектов и снизить вычислительные затраты. В ряде случаев разработанные подходы являются единственным средством решения задачи и могут быть использованы для приборно-технологического моделирования не только фоточувствительных микросхем, но и ИС других классов.

Литература

1. Кононов А. А., Поспелова М. А. Пугачёв А. А., Соколов С. В. Применение приборно-технологического моделирования при проектировании фоточувствительных ПЗС и КМОП-фотодиодных СБИС // Международная конференция «Микроэлектроника-2015». Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование, производство и применение. Алушта, 2015 г. Сборник тезисов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. — С. 236–238.
2. Кононов А. А., Пугачёв А. А., Ельников Д. С. Оптимизация фотоприемной ячейки ПЗС с обратной засветкой по критерию модуляции ее выходного сигнала // Международный форум «Микроэлектроника-2016». 2-я научная конференция «Интегральные схемы и микроэлектронные модули». Республика Крым, г. Алушта, 26–30 сентября 2016 г. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. — С. 238–241.
3. Коптев Н. С., Пугачёв А. А. Методика определения параметров микролинз для элементов фоточувствительной ПЗС ИС с помощью TCAD-моделирования // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2020. — Вып. 2 (257). — С. 28–36.
4. Кононов А. А., Коптев Н. С., Пугачёв А. А. Определение конструкции ПЗС-регистра с лавинным усилением // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2021. — Вып. 1 (260). — С. 34–50.
5. Пугачёв А. А. Методики моделирования разрешающей способности фоточувствительных СБИС с учетом внешних факторов // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2018. — Вып. 4 (251). — С. 8–15.

УДК 621.382

Основные положения физико-математической модели элемента памяти с плавающим затвором в режимах записи-стирания

д. т. н., проф. Шелепин Н. А.
Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН
119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А

Энергонезависимая память на основе транзисторов с плавающим затвором (ТПЗ) появилась в 1971 году в компании Intel в виде **EPROM (Erasable Programmable Read-Only Memory).** Это была перепрограммируемая ПЗУ, в которую запись информации осуществлялась электрически, а стирание — ультрафиолетовым светом [1]. А уже в 1972 году в Японии была продемонстрирована память, названная **EEPROM**, в которой и запись, и стирание информации осуществлялись электрически. Каждая ячейка памяти этого типа содержит два транзистора: транзистор с плавающим затвором для хранения 1 бита информации и транзистор для управления режимами чтения-записи. Разрез физической структуры ТПЗ схематично показан на рис. 1. Состояние логического нуля и логической единицы в ТПЗ реализуется управлением порогового напряжения ТПЗ вследствие изменения величины заряда электронов в плавающем затворе. Инжекция электронов в ПЗ осуществляется за счет туннелирования при приложении к управляющему затвору более высокого напряжения, чем при функционировании в режиме чтения.

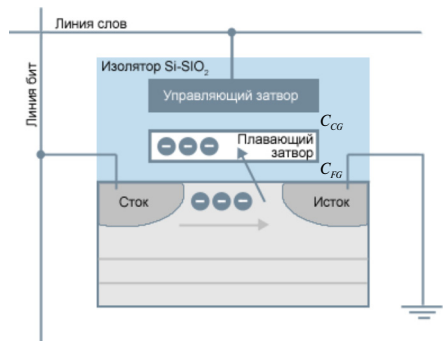


Рис. 1. Структура транзистора с плавающим затвором

Дальнейшее развитие технологий и конструкторских решений привело к созданию схем памяти, ячейка которых содержит только один транзистор с плавающим затвором: сначала (в 1980 г.) флеш-память NOR-типа, затем (1987) и NAND-типа [1]. Несмотря на большой срок, прошедший от разработки конструктивно-технологических основ энергонезависимой памяти на основе транзистора с плавающим затвором и их описания в публикациях [2], при проектировании данных микросхем имеется весьма существенная сложность. Она заключается в отсутствии компактной модели транзистора с плавающим затвором, которая

обеспечивала бы моделирование электрических процессов в режимах записи и стирания. Большинство разработчиков микросхем имеют отдельные модели ТПЗ для режима «записано» и для режима «стерто».

Целью данной работы является рассмотрение возможностей аналитического описания функционирования ПТЗ при режимах записи и стирания для последующей трансляции в компактную SPICE-модель.

Рассмотрим МДП-структуру с плавающим затвором (т.е. без приложения напряжений между стоком и истоком). При подаче на управляющий затвор напряжения V_{CG} и отсутствии на ПЗ инжектированного заряда электронов на ПЗ устанавливается потенциал

$$V_{FG} = V_{CG} \cdot (C_{FG}/(C_{FG} + C_{CG})), \quad (1)$$

где C_{FG} — емкость между плавающим затвором (ПЗ) и подложкой, C_{CG} — емкость между управляющим затвором (УЗ) и ПЗ.

В случае наличия на ПЗ инжектированного заряда Q_{FG} уравнение (1) приходит к виду

$$V_{FG} = (V_{CG} + Q_S \cdot d_2/\varepsilon) \cdot (d_1/(d_1 + d_2)) = (V_{CG} + Q_S \cdot d_2/\varepsilon)/(1 + d_2/d_1), \quad (2)$$

где $Q_S = Q_{FG}/S$ — поверхностная плотность инжектированного заряда в ПЗ, S — площадь ПЗ относительно подложки, d_1 и d_2 — толщины диэлектриков соответственно между ПЗ и подложкой и между ПЗ и УЗ, ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Полученное уравнение (2) также может быть представлено в виде

$$V_{FG} = (V_{CG} + Q_{FG}/C_{CG}) \cdot 1/(1 + C_{FG}/C_{CG}). \quad (2a)$$

Таким образом, формулы (2) устанавливают зависимость потенциала на ПЗ от параметров структуры и потенциала на УЗ.

На следующем этапе определим соотношения для тока, которым электроны инжектируются в ПЗ и обратно.

Рассмотрим случай, когда запись и стирание осуществляются методом туннелирования. В простейшем случае, но вполне пригодном для моделирования, формула Фаулера — Нордхейма для плотности туннельного тока выглядит следующим образом:

$$J = AE^2 \cdot exp(-B/E), \quad (3)$$

где A и B — коэффициенты, зависящие от параметров конкретной структуры ТПЗ, которые необходимо определить из измерений тестовых структур. Электрическое поле в диэлектрике очевидно определяется как $E = -V_{FG}/d_1$.

Определяя ПЗ в качестве обычного затвора компактной модели (например, BSIM-3), соединяем к ПЗ емкость C_{CG} и, добавляя в схему между подложкой и ПЗ управляемый по формуле (3) источник тока, получаем в первом приближении схему для моделирования ячейки памяти на основе ТПЗ во всех режимах. Очевидно, что самым сложным мероприятием для реализации данной методики является определение коэффициентов A и B. Для этого необходимо определить границы применимости формулы (3). Эти границы определяются: снизу — возможными токами утечки по поверхности пластин с тестовыми структурами, которые зависят от внешних условий, в частности от влажности в помещении, где проводятся

измерения; сверху — токами вблизи электрического пробоя диэлектрика, которые начинают «портить» его характеристики.

Кроме того, для более объективного моделирования ТПЗ его не совсем корректно моделировать как обычный МОП-транзистор с потенциалом на затворе, определяемым уравнением (2). Уравнение (2) справедливо в случае равенства потенциалов на стоке, истоке и подложке транзистора. Потенциал, поданный на сток транзистора, в свою очередь влияет на величину потенциала ПЗ, что приводит к отклонению характеристик ТПЗ от классических [2]. Следовательно, для более правильного моделирования характеристик ТПЗ необходимо получить дополнительные зависимости V_{FG} от потенциала на стоке.

Литература

1. Введение в SSD. Часть 4. Физическая. — URL: https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/491264.
2. Pavan P., Bez R., Olivo P., Zanoni E. Flash Memory Cells — An Overview // Proceedings of the IEEE, 1997. Vol. 85. № 8. P. 1248–1271.

УДК 621.382

Повышение тестопригодности аналоговых и аналого-цифровых микросхем

Куликов Д. В., к. т. н., Савельев Д. И., Дедов С. М.
АО «НИИМА «Прогресс»
125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54
d.kulikov@i-progress.tech, d.savelyev@i-progress.tech, s.dedov@i-progress.tech

Предложена реализация аналогового блока тестирования для повышения тестопригодности аналоговых и аналого-цифровых микросхем при незначительном увеличении внешних выводов микросхемы, что позволяет определить и локализовать ошибки в реализации аналоговых блоков, в том числе повысить качество микросхем, за счет отбраковки некондиционных изделий.
Ключевые слова: JTAG; BS; MBIST; LBIST; тестирование; АЦП; ЦАП; аналоговый ключ; буферный усилитель; моделирование.

Для тестирования цифровых микросхем известно множество методов тестирования, в том числе используемых для отбраковки: граничное сканирование (boundry scan), MBIST, LBIST и другие. Основная цель — определить работоспособность и локализовать ошибки в блоке для их парирования программными методами или исправить в следующем релизе изделия, при этом время на тестирование должно быть минимальным. Для аналоговых блоков и микросхем аналогичное автоматизированное тестирование затруднительно.

Предложен универсальный набор блоков, позволяющих проводить измерение и контроль внутренних узлов аналоговых блоков, не влияющих на характеристики аналогового блока в целом и состоящих из следующих блоков:

- аналоговый ключ;
- двойной ключ с подтяжкой средней точки к земле;
- буферный усилитель;
- буферный усилитель с малым напряжением смещения;
- мультиплексор.

При проектирование аналоговых микросхем и блоков определяются наиболее важные и критические узлы, влияющие как на работоспособность, так и на характеристики устройства в целом. Напряжение или ток данных узлов выводятся на внешний вывод микросхемы посредством предложенного набора блоков, что позволит контролировать их значения при тестировании и/или отбраковке микросхем.

Дополнительные аппаратные затраты незначительные — две дополнительные площадки ввода-вывода и 0,1 мм^2 для 16 контрольных точек (по технологии КМОП 0,18 мкм).

Увеличение сложности при разработке блоков за счет разработки дополнительных блоков и проведения моделирования влияния их на характеристики блока в целом компенсируется при тестировании конечных изделий получением дополнительных результатов измерений внутренних характеристик блоков.

В результате группой разработчиков реализован универсальный набор тестовых блоков и проведена их интеграция в микросхему микроконтроллера для тестирования сложнофункциональных блоков: 12-разрядного аналого-цифрового

преобразователя (АЦП), 12-разрядного цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и других.

Литература

1. Эннс В. И., Кобзев Ю. М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем. Краткий справочник разработчика. — 454 с.
2. Waltari M. E., Halonen K. Circuits techniques for low-voltage and high-speed A/D converters // Kluwer Academic Publishers, 2002.

УДК 004.057.7, 004.94

ПАК «Вентилятор» для ускорения моделирования RTL-систем на кристалле с Linux

Лукьянченко Г. А., Монахов А. М., Уманский М. В., Елизаров С. Г.
ООО «Мальт Систем»
119333, г. Москва, ул. Фотиевой, 5, стр. 1
info@maltsystem.ru

В докладе рассмотрены примеры применения ПАК «Вентилятор» для верификации актуальных промышленных дизайнов. Проведено сравнение с коммерческими и открытыми инструментами верификации, освещены ограничения текущей версии ПАК.
Ключевые слова: моделирование; отладка; верификация; RTL; открытые инструменты; open source.

Современные микропроцессоры, системы на кристалле (СнК) и другие сложные цифровые СБИС содержат в себе сотни миллионов базовых логических элементов (вентилей). В процессе разработки таких СБИС неизбежно встает задача верификации корректности функционирования их RTL-кода. Особенно остро эта проблема стоит для СнК, внутри которых процессор совмещен с высокоскоростными интерфейсами и периферийными устройствами.

В процессе разработки СнК, помимо верификации непосредственно RTL, необходимо проводить верификацию ОС, драйверов и других сложных программных компонентов. При этом для сокращения цикла разработки микросхемы и снижения вероятности ошибок в конечном устройстве необходимо начинать совместную верификацию RTL и ПО на ранних этапах проекта.

Именно эту задачу решает «Вентилятор», позволяя в том числе дополнить маршрут верификации СнК проверкой сложного ПО, моделирование исполнения которого в поведенческом RTL-симуляторе заняло бы недопустимо длительное время.

В докладе будут рассмотрены примеры применения ПАК «Вентилятор» для верификации актуальных промышленных дизайнов. Также будет проведено сравнение с коммерческими и открытыми инструментами верификации, освещены ограничения текущей версии ПАК.

Среди рассматриваемых дизайнов будут представлены многоядерная СнК с запуском ОС, крупный цифровой IP-блок, верификация нетлиста, выполненного по технологическим нормам 28 нм.

УДК 621.382

Разработка интегрированного метода трансформации топологии в процессе генерации фиктивных областей для достижения повышенных требований к планаризации отечественных КМОП КНИ-технологий

Милютин С. В., Надин А. С., Шипицин Д. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
smilyutin@niime.ru, anadin@niime.ru, dshipitsin@niime.ru

В данной работе описывается алгоритм трансформации топологии фиктивных областей (ФО) в активной области в целях достижения требуемой плотности заполнения на кристалле и с учетом повышенных требований к планаризации.

Ключевые слова: PDK; DRC; DRM; dummy; генератор; фиктивная область; финализация.

Введение

На этапе финализации топологии проекта необходимо выполнить ряд условий и правил, одним из которых является требование к планаризации поверхности пластины. Этапы планаризации обычно состоят из front-end-части, а это активная область и поликремний, и backend-end-части — всех уровней слоев металлизации, включая специфичные элементы памяти, MIM-конденсаторы и т. п. [2]. В КМОП КНИ-технологиях [1], где предъявляются высокие требования по плотности во front-end-части, разработчикам топологии необходимо учесть данные нормы при размещении аналоговых схем. В качестве основного инструмента, поставляемого в составе комплекта средств проектирования PDK и способствующего выполнению таких требований, используется генератор ФО. С помощью генератора ФО можно упростить и ускорить подготовку финальной топологии для сдачи проекта на производство.

Основные причины низкой плотности при генерации ФО

В ряде случаев не всегда получается полностью достигнуть требования по плотности. Причин может быть несколько:

- конструктивные особенности топологии проекта (design dependent);
- алгоритм работы генератора ФО;
- жесткие ограничения по пределам к требуемой плотности;
- рисунок заполнения ФО;
- квалификация тополога.

В КМОП КНИ 180 нм 6 металлов размеры dummy-элемента активной области (active; dummy) строго определены и привязаны к первому и второму проходу генератора, что усложняет и ограничивает возможности заполнения. При начальных условиях с размерами ФО в первом проходе 4×4 мкм с расстоянием 2 мкм между ними процент заполнения активной областью на кристалле равен 44,4 % (рис. 1).

В то же время предел по минимальной плотности слоя active равен 46 %, что не может быть достигнуто генератором ФО в текущем исполнении. При недостаточно плотной топологии с элементами электрической схемы в слое active

DRC-ошибки неизбежны [3]. Для достижения минимального порога по плотности при генерации ФО был рассмотрен способ относительной трансформации матричной структуры первого прохода в элементы второго (рис. 2). Выбор был обусловлен получением более плотной регулярной и фиксированной структуры самой матрицы элементов.

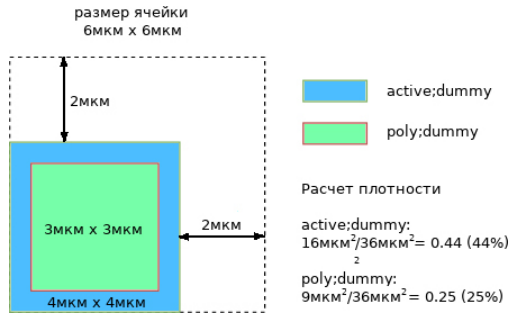


Рис. 1. Размеры матричной ячейки и параметры ФО при начальных условиях

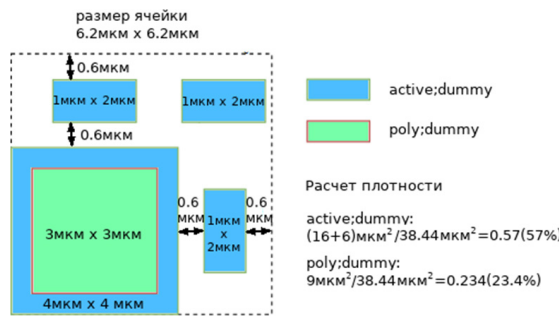


Рис. 2. Размеры матричной ячейки и параметры ФО в методе трансформации

За счет незначительного изменения расстояния между элементами ФО 4×4 мкм и размещения между ними элементов 1×2 мкм удалось увеличить плотность заполнения на 13% и в то же время сохранить минимальную плотность заполнения по поликремнию в пределах допустимой минимальной нормы 15%.

Проверка и отладка данного метода осуществлялись на готовых и разрабатываемых топологиях проектов.

Заключение

С помощью интегрированного метода трансформации была выполнена задача достижения минимального порога по плотности в слое active, существенно не повлиявшая на плотность заполнения по поликремнию на кристалле. Тем самым было нивелировано количество DRC-ошибок и улучшена планаризация топологий как существующих, так и будущих проектов.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
2. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4 (177). — С. 60–64.
3. Загидуллина О. Р., Надин А. С. Анализ «ложных» ошибок DRC при регрессионном тестировании командных файлов // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 817–818.

УДК 621.382.323

Результаты выполнения работ 2024–2025 гг. по проекту РНФ «Разработка и внедрение модифицированных SPICE-моделей и программно-аппаратных средств для экстракции их параметров для компонентов ИС и полупроводниковых приборов гражданского и специального назначений»

д. т. н. Петросянц К. О.[1], д. ф.-м. н. Куратов С. Е.[2]

[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
kpetrosyants@hse.ru
[2] Научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22

Описаны результаты разработки опытного образца программно-аппаратных средств для получения параметров моделей и отечественной библиотеки расширенных SPICE-моделей электронных компонентов, используемых для создания узлов и блоков РЭА гражданского и специального назначений.

Ключевые слова: SPICE-модели; экстракция параметров моделей; программно-аппаратные средства; специальные применения.

В ходе выполнения проекта РНФ № 24-91-19006 в рамках инициатив президента РФ в научно-технологической сфере по направлению «микроэлектроника» разработан опытный образец отечественной библиотеки SPICE-, SPICE-RAD-, SPICE-THERM-моделей электронных компонентов: дискретных биполярных и МОП-транзисторов, диодов, стабилитронов, микросхем цифровой логики, аналоговых ОУ, компараторов и др., пассивных R-, L-, C-элементов, трансформаторов, используемых для создания узлов и блоков РЭА.

Работа выполнялась поэтапно.

1. Заказчик (ФГУП «ВНИИА») представил для параметризации набор активных и пассивных компонентов.
2. Заказчиком и исполнителем подготовлены стенды и методики измерений: 1) статических ВАХ и ВФХ компонентов из п. 1 с помощью универсальных измерительных систем Agilent, Keithley (США), ФОРМУЛА ТТЗ (Россия); 2) частотных S-параметров с помощью систем Rohde — Schwarz (Германия) и «Планар» (Беларусь); 3) для измерений в диапазоне температур испытуемые приборы помещались в термокамеру.
3. Исполнителем проведены циклы измерений характеристик компонентов из п. 1 с помощью оборудования из п. 2.
4. С помощью стандартной программы-экстрактора IC-CAP определены параметры модифицированных SPICE-моделей полупроводниковых компонентов, работающих в нормальном режиме. Для определения параметров моделей SPICE-RAD и SPICE-THERM, учитывающих воздействия радиации и температуры, в программу-экстрактор IC-CAP встроены специальные дополнительные блоки.

5. Верифицированные SPICE-модели активных и пассивных компонентов включены в схемотехнические симуляторы заказчика System Vision (Mentor Graphics), Delta Design (Эремекс), LT Spice (Linear Technology) и др. SPICE-подобные программ.
6. Проведена валидация SPICE-моделей компонентов путем расчета тестового набора цифровых и аналоговых схем с помощью симуляторов из п. 5;
7. На основании положительных результатов верификации и валидации параметры SPICE-моделей компонентов занесены в базу данных для схемотехнических САПР предприятия заказчика.

Представленные работы и результаты могут рассматриваться как удачный пример апробации и внедрения отечественных разработок в промышленные САПР ЭКБ.

УДК 621.382

Эффективность применения временных моделей в цифроаналоговых маршрутах проектирования

Савин С. В., Чекмазов П. Ю., Шипицин Д. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
pchekmazov@niime.ru

В статье проводится сравнительный анализ и исследование различных временных моделей (ВМ), используемых для проведения статического временного анализа (СВА); в качестве объекта применения представлен цифроаналоговый кристалл EtherPhy, разработанный по технологии 90 нм; проанализированы алгоритмы формирования ВМ, объекты моделирования, место ВМ в маршруте проектирования (МП), преимущества и ограничения применения ВМ.
Ключевые слова: временная модель; статический временной анализ; цифроаналоговый маршрут проектирования; цифроаналоговый блок.

Временная верификация представляет собой крайне важный этап в процедурах физического проектирования иерархических изделий электронной техники класса система на кристалле.

При проведении процедур СВА возникает необходимость выбора решений для достижения компромисса между размерами проекта, т. е. временем выполнения СВА, и точностью моделирования.

Предлагаемая к рассмотрению информация описывает применение ВМ для характеризации цифроаналоговых проектов.

Весь модельный ряд временной отладки включает в себя шесть вариантов:

- Stamp Model (SM) → временной маркер,
- Quick Timing Model (QTM) → оперативная ВМ,
- Extracted Timing Model (ETM) → экстрагированная ВМ,
- High Accuracy Extracted Timing Model (ATM) → ETM высокой точности,
- Interface Logic Model (ILM) → логическая модель интерфейса,
- Full Timing Model → полная ВМ.

В данной работе будут рассмотрены преимущества и ограничения этих алгоритмов временного моделирования, а также обоснован выбор конкретной ВМ и ее практическое применение.

SM

Является языком моделирования и позволяет представить временное поведение блока путем создания списка утверждений (statements), которые потом компилируются в текстовый образ ВМ.

Имеет в своем составе мощные конструкции, которые позволяют описывать временные характеристики сложных блоков (CPU, DSP-ядра, контроллеры), также востребована для работы с проектами транзисторного уровня при отсутствии списка соединений.

QTM

Позволяет быстро и без трудоемких затрат создать ВМ незавершенного блока в целях выполнения первичного временного анализа, в дальнейшем происходит замена либо gate-списком соединений, либо эквивалентной моделью.

Является набором интерактивных команд (НЕ языком!), который может сохраняться в db/Stamp-формате.

ETM

Обеспечивает значительный выигрыш по характеристикам по сравнению с оригинальным списком соединений, но из-за абстрактного подхода к временным показателям цепей допускает потери в точности.

Поэтому ETM целесообразнее использовать на ранних стадиях МП, когда важно оперативное исследование альтернативных версий проекта.

Из-за того что детальная внутренняя реализация проектов остается скрытой для пользователя ETM подходит для сценариев повторного применения СФБ.

Благодаря тому, что ETM является библиотечной ячейкой, содержащей временные параметры (арки) в индустриальных форматах (LIB/Stamp), она без проблем используется любыми EDA-инструментами.

ATM

Концепция ATM — это высокоточная ВМ для иерархического временного анализа, которая основана на ETM-парадигме и устраняет ее ограничение по точности.

ILM

Для проектов, в которых переходные выходные разветвления входных портов (fanout) и входные разветвления выходных портов (fanin) управляются регистрами, ILM обеспечивает значительные улучшения по характеристикам «размер проекта / время выполнения STA» без потери точности.

Поэтому ILM применяется для иерархической временной аттестации.

FTM

Является более точным представлением, чем ILM, поскольку учитываются все компоненты списка соединений, а не только логика интерфейса.

Применяется в цифроаналоговых МП (Digital-on-Top), но имеет ограничения по размеру цифроаналоговых блоков.

Для аттестации применения предлагаемой ВМ в качестве тестового был выбран проект EtherPhy [90 nm Generic Process Design Kit (gpdk090) Technology + gsclib090 library].

Структура данного кристалла включает в себя 3 уровня иерархии, которые состоят из 15 блоков: 3 цифровых + 10 аналоговых + 2 цифроаналоговых.

В рамках цифро-аналогового МП проводился сравнительный СВА для ILM и FTM с дополнительным включением ECO-процедур, и по результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- процентное соотношение всех значений составляющих мощности для разных моделей (ILM и FTM) до и после искусственного внесения технических изменений в проект практически не изменилось: в сущности, везде значение ILM вполне сравнимо со значением FTM,

- поскольку ILM-методика используется только для цифровых блоков/маршрутов, то для цифроаналогового варианта эти результаты позволяют утверждать: точность FTM полностью компенсирует трудоемкость ее формирования, а раз она гораздо ближе к golden-стандарту SPICE-модели, а значит, и к реальному кремнию, то в определенных случаях применение FTM-методики полностью оправданно,
- таким образом, извечный выбор между оперативностью и точностью расчетов вполне обоснованно склоняется в пользу последней (разумеется, с учетом преимуществ и ограничений).

Представленные к рассмотрению материалы могут оказаться полезными для коллективов разработчиков цифроаналоговых изделий в проведении временной верификации.

Литература

1. Красников Г. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165).
2. Немудров В., Мартин Г. Системы на кристалле. Проектирование и развитие. — М.: Техносфера, 2004.
3. Бухтеев А. Методы и средства проектирования систем на кристалле // Chip news, 2003. — № 4.

УДК 621.3

Цифровые двойники и программно-аппаратные комплексы для конструкторско-технологической поддержки производства полупроводниковых компонентов от исходных материалов до готовых приборов (на примерах отечественной ЭКБ)

Петросянц К. О., д. т. н.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
kpetrosyants@hse.ru

В работе представлены цифровые двойники электронных полупроводниковых приборов, базовых технологических процессов, контрольно-измерительного оборудования и приборов в составе САПР с учетом внешних воздействующих факторов.

Ключевые слова: цифровые двойники; микроэлектроника; ЭКБ; TCAD; SPICE.

Применение средств САПР и информационных технологий в электронном производстве без связи с реальным технологическим процессом и оборудованием не дает желаемых результатов. Опыт ведущих мировых компаний показывает, что наиболее эффективным способом решения проблемы является использование цифровых двойников (ЦД), поддерживаемых программно-аппаратными комплексами на всех этапах разработки: от исходных материалов до готовых изделий.

В настоящей работе представлены ЦД для описания: 1) электрофизических параметров полупроводниковых и диэлектрических слоев и элементов структуры прибора, металлизации и др.; 2) базовых технологических процессов и технологического и контрольно-измерительного оборудования; 3) конструкций изготовленных полупроводниковых приборов; 4) систем параметризации и аттестации полупроводниковых приборов в соответствии с требованиями технического задания; 5) приборов в составе САПР РЭА с учетом реальных условий эксплуатации.

Перечисленные виды ЦД эффективно используются в процессе производства при поддержке программно-аппаратных комплексов, выполняющих следующие основные функции:

1) проведение измерений электрофизических параметров материалов и приборных структур в процессе их изготовления;
2) контроль и измерение электрических характеристик приборов в процессе их изготовления и после изготовления;
3) верификация TCAD, SPICE и ЦД всех уровней по экспериментальным результатам пп. 1 и 2;
4) включение верифицированных TCAD- и SPICE-моделей полупроводниковых приборов и ЦД в САПР различного уровня для расчета РЭА на их основе в реальных условиях эксплуатации (в том числе с учетом внешних воздействующих факторов, таких как температура, радиация и старение).

Приведены примеры использования ЦД в процессе производства отечественной ЭКБ.

УДК 004.4+621.382

Практический опыт применения и особенности отечественной платформы портирования топологий IP

Калашников В. С.[1,2], к. т. н., Керре А. Л.[1], Михайлова Е. А.[1,2], Розенфельд В. П.[1], Семенов М. Ю.[1], к. т. н., Сотников М. А.[1], к. т. н.
[1] ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлены практические аспекты применения отечественной платформы портирования топологий IP в задачах технологической миграции топологии реальных проектов в базис отечественных технологий. Рассматриваются решение таких задач для различных классов топологии (аналоговые блоки, стандартные ячейки, ячейки ввода-вывода), особенности маршрутов миграции, а также приводятся методы оценки качества топологии.

Ключевые слова: сжатие; модификация; топология; граф ограничений; миграция; технологические ограничения; коррекция нарушений; параметризованная ячейка; составной путь.

Введение

В процессе разработки базовых и цифроаналоговых IP в новом технологическом базисе часто возникают различного рода задачи по миграции (портированию) их топологии из других проектов. Значительно ускорить данный процесс позволяет отечественная платформа портирования топологий IP (далее — Платформа), разработанная в компании «НМ-Тех» в рамках ОКР «Порт-IP» [1, 2]. Далее рассмотрены примеры успешного применения Платформы при решении реальных задач автоматизированной разработки топологии.

Портирование топологии базовых IP

Разработка библиотек стандартных ячеек для различных применений. На основе имеющейся библиотеки высокой плотности (8T) по технологии 130 нм создано несколько вариантов новой быстродействующей библиотеки (10T–14T) для выбора оптимальной высоты ячеек. Применялся маршрут миграции под управлением целевой схемы [3], ширина части ячеек была уменьшена, вставлены дополнительные контакты и увеличено количество вариантов подключения.

Изменение параметров приборов в библиотеках стандартных ячеек. После изменения технологических норм (минимальная длина канала DGO-транзисторов увеличилась с 0,34 до 0,36 мкм) возникла задача приведения в соответствие с новыми правилами уже разработанной библиотеки стандартных ячеек DGO 10T по технологии 130 нм. В процессе миграции ширина части ячеек была уменьшена.

Проверка архитектурных правил совместимости в библиотеках стандартных ячеек. С применением расширенных возможностей Платформы, а именно утилиты проверки архитектурных правил совместимости ячеек, была выполнена соответствующая проверка для вновь разработанной библиотеки радиационно стойких

стандартных ячеек по технологии 250 нм, что позволило предотвратить потенциальные проблемы при интеграции ячеек в состав цифрового блока.

Миграция библиотеки стандартных ячеек из одного технологического базиса в другой и оценка качества полученной топологии. С применением Платформы выполнена миграция библиотеки стандартных ячеек из зарубежной технологии 180 нм в отечественную технологию 130 нм. В ходе миграции было произведено уменьшение ширины ячеек, вставлены дополнительные контакты и увеличено количество вариантов подключения. Качество полученной библиотеки было оценено с помощью метрик: оценки минимальной ширины для текущего размещения транзисторов, количества одиночных контактов к стоковым/истоковым областям транзисторов и количества внешних цепей, количества цепей с единственной точкой подключения [4].

Восстановление параметризованных ячеек из «плоской» топологии. В исходной «плоской» топологии ячеек ввода-вывода из библиотеки по зарубежной технологии 110 нм распознаны приборы, экстрагированы их параметры и произведена замена соответствующих фрагментов на параметризованные ячейки. Также были восстановлены составные пути (Multipart Path, MPP).

Миграция комплекта базовых IP из одного технологического базиса в другой. Для отладки отечественного технологического процесса 130 нм посредством изготовления проекта 8-разрядного микроконтроллера на базе ядра 8051 было выполнено его ускоренное проектирование с использованием комплекта базовых IP (включающего блок памяти, библиотеку стандартных ячеек, библиотеку ячеек ввода-вывода), портированных с помощью Платформы из отечественной технологии 250 нм. Общее время разработки топологии перечисленных компонентов заняло около 2 недель (включая несколько итераций по точной настройке).

Портирование топологии аналоговых IP-блоков

Миграция аналогового блока из отечественной технологии 180 нм в отечественную технологию 250 нм. В рамках образовательной деятельности выполнена миграция топологии и схемы проекта «дифференциального аттенюатора 6-бит» из отечественной технологии 180 нм в отечественную технологию 250 нм. Начальные результаты моделирования мигрированного блока показали соответствие требованиям разработчика.

Миграция блоков АЦП/ЦАП из зарубежной технологии 110 нм в технологию 250 нм. В ходе решения данной задачи мигрировали несколько подблоков из состава проектов АЦП и ЦАП для их разработки в новой технологии. Особенностью маршрута миграции являлось сохранение размеров приборов при увеличении остальных технологических норм более чем в два раза. Использовался маршрут миграции на основе графа ограничений [5] для минимального увеличения размеров топологии. Была произведена замена параметризованных ячеек (PCells), а также сокращение количества металлов (из 7 в 5).

Литература

1. Сотников М. А., Розенфельд В. П., Калашников В. С. и др. Отечественная САПР технологической миграции и синтеза топологии // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-1 (119). — С. 243–245. DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.243.245. EDN DIGEZS.

2. Керре А. Л., Сотников М. А., Розенфельд В. П., Смирнов Ю. Г. Подсистема миграции иерархических СФ-блоков // Наноиндустрия, 2024. — Т. 17. — № S10-1 (128). — С. 286–290. DOI: 10.22184/1993-8578.2024.17.10s.286.290. EDN EGOXOP.
3. Калашников В. С., Розенфельд В. П., Керре А. Л., Смирнов Ю. Г., Сотников М. А., Семенов М. Ю. Миграция топологии IP под управлением электрической схемы // Тезисы докладов 10-й научной конференции «ЭКБ и микроэлектронные модули». Российский форум «Микроэлектроника-2024».
4. Калашников В. С., Керре А. Л., Розенфельд В. П., Семёнов М. Ю., Смирнов Ю. Г., Сотников М. А., Царапкин С. Ф. Критерии качества топологии стандартных ячеек цифровых интегральных схем // Информационные технологии, 2023. — Т. 29. — № 9. — С. 447–456.
5. Розенфельд В. П., Сотников М. А., Топузов И. Г., Улуханов Э. А., Широ Е. Г. Система сжатия и миграции топологии стандартных ячеек // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем — 2005. Сборник научных трудов / Под общ. ред. А.Л. Стемпковского. — М.: ИППМ РАН, 2005.

УДК 004.896

Нейросетевые модели для оценки длины цепей на этапе размещения в СФ-блоках СБИС

Желудков Н. В.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
nvgel@cs.niisi.ras.ru

В работе предложены пять нейросетевых моделей для оценки длины цепей в СФ-блоках СБИС на этапе размещения ячеек. По итогам сравнения графовая модель SAGE демонстрирует лучшие результаты, превосходит в точности классическую модель HPWL в среднем в 4,4 раза, средняя ошибка предсказания составляет 25,8 %.
Ключевые слова: графовые нейронные сети; нетлист; топологическое проектирование СБИС.

Трассировка межсоединений — важный этап физического проектирования СФ-блоков, влияющий на частоту, энергопотребление и количество DRC-ошибок. Ранняя оценка длины цепей позволяет предсказать параметры блока, внести изменения в план размещения.

Для представления нетлиста СФ-блока в виде графа в работе используется метод, в котором узлы графа — это цепи, а ребра — стандартные ячейки, относящиеся к соответствующим цепям. Каждая цепь имеет 9-мерный вектор признаков, включающий в себя топологические и логические признаки цепи, а также реальную длину после детальной трассировки в качестве метки.

Для обучения моделей был создан датасет из 32 блоков из открытых источников [1–2]. Был проведен логический синтез и топологическое проектирование выбранных блоков для разметки датасета.

Для оценки длины цепей были предложены пять моделей машинного обучения. Модель MLP представляет из себя полносвязную нейронную сеть. Модель XGBoost основана на алгоритме градиентного бустинга. Также были предложены три модели, в основе которых лежат слои графовой свертки — GCN, GAT и SAGE [3–5], позволяющие учитывать при оценке длины цепи информацию о связях в графе. В качестве метрик точности моделей использовались средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя абсолютная ошибка в процентах (MAPE) и коэффициент детерминации (R^2).

Таблица 1. Сравнение точности моделей оценки длины цепей

Модель	MAE, мкм	MAPE, %	R^2
HPWL	28,3	112,1	0,799
MLP	17,5	35,4	0,939
XGBoost	19,8	44,0	0,904
GCN	16,3	26,0	0,980
GAT	16,5	26,7	0,979
SAGE	16,1	25,8	0,983

Наибольшей точности достигает модель SAGE. Это демонстрирует эффективность графовых моделей для оценки длины цепей.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме FNEF-2024-0003.

Литература

1. OpenABC: Open Access Benchmark Circuits for digital designs [Электронный ресурс]. — URL: https://github.com/NYU-MLDA/OpenABC (дата обращения: 13.07.2025).
2. OpenCores: The open source hardware community [Электронный ресурс]. — URL: https://opencores.org (дата обращения: 13.07.2025).
3. Qin A., He G., Wang H. SERGCN: Graph Convolutional Neural Networks with Skip-Edge Residual Connection for Node Classification Tasks // 2024 6th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI). Chongqing, China: IEEE, 2024. P. 1213–1219.
4. Vrahatis A. G., Lazaros K., Kotsiantis S. Graph Attention Networks: A Comprehensive Review of Methods and Applications // Future Internet, 2024. Vol. 16. №9. P. 318.
5. Hamilton W. L., Ying R., Leskovec J. Inductive representation learning on large graphs // Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems NIPS'17. Red Hook, NY, USA: Curran Associates Inc., 2017. P. 1025–1035.

УДК 681.5.015+004.333

Применение интервальных подходов к моделированию элементов энергонезависимой памяти ReRAM, FeRAM и MRAM

Морозов А. Ю., д. ф.-м. н., Абгарян К. К., д. ф.-м. н., Журавлев А. А., Ревизников Д. Л., д. ф.-м. н.
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
morozov@infway.ru

В работе показано, как на базе существующих математических моделей элементов энергонезависимой памяти можно, используя интервальные подходы, получить ограничения снизу и сверху на интересующие характеристики элементов. Полученные результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: ReRAM; FeRAM; MRAM; BAX; LLGS; интервальные данные; интервальные параметры; обратные задачи.

Построение макроскопических моделей элементов энергонезависимой памяти обычно основывается на представлении элемента в виде нелинейной динамической системы относительно переменной состояния. Выбор переменной состояния зависит от физических механизмов, лежащих в основе динамики переключения. Для элементов резистивной памяти ReRAM с активным оксидным слоем переменная состояния соответствует границе между областями с низкой и высокой концентрацией вакансий кислорода [1–2]. Элементы сегнетоэлектрической памяти FeRAM с одноосным характером поляризации, например с активным слоем из оксида гафния, могут быть описаны динамической системой относительно скалярной переменной состояния, в качестве которой может выступать осредненная по объему поляризация. Такие модели обычно строятся с использованием термодинамического подхода Ландау — Гинзбурга. Нами построена макроскопическая модель FeRAM с оксидным активным слоем, основанная на представлении элемента в виде нелинейной динамической системы относительно смещения атомов кислорода. В отличие от традиционного термодинамического подхода, где применяется разложение энергии по степеням поляризации, мы формулируем модель относительно осредненного смещения атомов кислорода в кристаллической ячейке, что позволяет напрямую использовать данные квантово-механического моделирования переключения поляризации. В основе макроскопической модели магниторезистивной памяти MRAM лежит представление элемента памяти как нелинейной динамической системы относительно осредненного по объему вектора намагниченности активного слоя. Здесь используется макроскопическое уравнение Ландау — Лифшица — Гилберта — Слончевского (LLGS). Правая часть уравнения учитывает вклады магнитной анизотропии, внешнего магнитного поля и переносимого спинового момента.

Параметрическая идентификация динамических моделей элементов энергонезависимой памяти, как правило, осуществляется по экспериментальным данным. Часто возникает ситуация, когда исходные данные задаются с некоторой

неопределенностью, которая может быть представлена в виде интервалов возможных значений. Как правило, речь идет о разбросах в полученных в ходе экспериментов вольт-амперных характеристиках (ВАХ) элементов памяти. Для таких задач является актуальным получение интервальных оценок интересующих величин по известным исходным интервальным данным. Применительно к прямым задачам речь идет о нахождении интервальных оценок решения по интервальным значениям параметров, а применительно к обратным задачам — об определении интервальных оценок параметров, при которых соответствующее интервальное решение содержало бы в себе экспериментальные данные. Для решения данных задач ранее авторами были разработаны эффективные подходы и семейства алгоритмов [3–5] на их основе.

В работе выполняется построение соответствующих интервальных моделей элементов энергонезависимой памяти ReRAM, FeRAM и MRAM. Построенные модели дают интервальные оценки интересующих величин, которые согласуются с экспериментальными данными, что демонстрирует эффективность используемых подходов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-01012).

Литература

1. Mladenov V. Analysis of Memory Matrices with HfO_2 Memristors in a PSpice Environment // Electronics, 2019. Vol. 8. № 4, 383, P. 16. DOI: 10.3390/electronics8040383.
2. Morozov A. Yu., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Mathematical model of a neuromorphic network based on memristive elements // Chaos, Solitons & Fractals, 2021. Vol. 143. 110548. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110548.
3. Морозов А. Ю., Журавлев А. А., Ревизников Д. Л. Анализ и оптимизация алгоритма адаптивной интерполяции численного решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений с интервальными параметрами // Дифференциальные уравнения, 2020. — Т. 56. — № 7. — С. 960–974. DOI: 10.1134/S0374064120070122.
4. Морозов А. Ю., Ревизников Д. Л. Алгоритм подвижного окна для параметрической идентификации динамических систем с прямоугольными и эллипсоидными областями неопределенности параметров // Дифференциальные уравнения, 2023. — Т. 59. — № 6. — С. 814–827. DOI: 10.31857/S0374064123060110.
5. Morozov A. Yu., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Interval Model of a Memristor Crossbar Network // Physica status solidi (b), 2022. Vol. 269. № 11. 2200150. DOI: 10.1002/pssb.202200150.

УДК 519.876.5

Реализация расширенных инструментов верификации дизайнов СнК в САПР микроэлектроники: анализ покрытия кода (Code Coverage), цифроаналоговое моделирование (Verilog-AMS), моделирование с учетом временных задержек (SDF)

Малышев Н. М.
АО «ЭРЕМЕКС»
117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108
malyshev.n@eremex.ru

Создана отечественная САПР функционального и логического проектирования ИМС. На ее платформе создаются инструменты, позволяющие проводить анализ покрытия кода, моделирование с учетом задержек SDF (standard delay format), а также цифроаналоговое проектирование и моделирование на языке Verilog-AMS. В работе рассматриваются особенности и методы реализации специализированного ПО, сравнение полученных результатов с аналогами. Дополнительно рассматриваются подходы к увеличению производительности моделирования и трансляции исходных данных в набор правил и инструкций
Ключевые слова: САПР; SystemVerilog; СнК; ИМС; функциональное моделирование; UVM.

Рост функциональности современных интегральных микросхем привел к сложности верификации их дизайна. Проводить верификацию необходимо до производства чипа. Это обусловливается удешевлением и ускорением вывода изделия на рынок. Исходя из этого, разработчику цифровой логики необходима широкая номенклатура инструментов, позволяющих проводить проверку соответствия разработанного устройства требованиям технического задания на каждом этапе проектирования: системном, функциональном, логическом и топологическом. В работе отражены проблематика и опыт создания расширенных модулей верификации дизайнов СнК функционального и логического уровней, а также сравнение их работы с подобными инструментами от Siemens, Cadence и Synopsys.

Стандартными модулями верификации функционального уровня следует считать компилятор, статический анализатор, динамический поведенческий симулятор RTL-уровня. Расширенными — анализатор покрытия кода, поддержку работы фреймворка верификации UVM (Universal Verification Methodology), модуль цифроаналогового моделирования. Под расширенными модулями верификации логического уровня понимается верификация логического нетлиста уровня технологических примитивов с учетом задержек формата SDF.

Основной сложностью работы является не столько создание расширенных модулей, сколько взаимодействие между собой расширенных и стандартных инструментов. Их взаимодействие не должно приводить к снижению общей производительности модуля моделирования. Под производительностью симулятора понимается скорость обработки событий RTL-уровня и gate-уровня в единицу времени моделирования. Обработка событийной части должна проводиться по стандарту SystemVerilog IEEE 1800-2017 [1] согласно установленным правилам включения

событий в очередь. Сам модуль моделирования, точнее его событийное колесо времени, должно быть дополнено обработкой взаимодействий цифровой и аналоговых частей. В данном взаимодействии аналоговая часть управляет цифровой с помощью кросс-доменного интерфейса connect_module [2]. Ядро моделирования должно быть дополнено аннотацией по задержкам, описываемым с помощью specify-блоков и SDF-файлов. Данные о задержках между входными и выходными портами Verilog/SystemVerilog вносят новые правила в работу колеса времени и обнаружение наступления событий, на которые должна реагировать модель. При работе колеса времени и при включенном сборе метрик полноты кодового покрытия (Code Coverage) должен производиться подсчет вызываемых элементов кода. Подсчет вызываемых элементов производится по строкам кода, по блокам, по переключениям, по выражениям, ветвлениям и состояниям, а также по переходам в конечных автоматах. Все эти метрики были реализованы с помощью AST-дерева компилятора и интегрированного с ним транслятора во внутреннее представление исполняемого кода.

В результате работ была проведена переработка ядра моделирования, скорость его работы увеличилась на два порядка. Также были интегрированы инструменты аннотации нетлиста задержками по стандарту SDF, сбор метрик по анализу покрытия кода, цифроаналоговое моделирование и поддержка UVM. Такие результаты были достигнуты благодаря разделению колеса времени на Verilog- и VHDL-части. Особенностью реализации можно считать отсутствие совместной обработки проектов на языках Verilog/SystemVerilog и VHDL.

Литература

1. IEEE Standard for SystemVerilog — Unified Hardware Design, Specification, and Verification Language. IEEE 1800-2017. New York, NY: IEEE, 2017. 1313 p.
2. Еремин А. С., Малышев Н. М. Задачи решения дифференциальных уравнений в САПР микроэлектроники. Сравнение подходов Verilog-AMS и SPICE // Сборник трудов Международной конференции, Воронеж, 4–6 декабря 2023. «Научно-исследовательские публикации», 2024. — С. 841–848. — URL: http://www.amm.vsu.ru/conf/archivs_download/AMCSM-2023.pdf.
3. Малышев Н. М., Поляков А. Библиотеки HDL-тестов для систем моделирования цифровой аппаратуры. Отечественная САПР проектирования микроэлектроники. Часть 1 // Современная электроника, 2023. — № 3. — С. 12–15. — URL: https://cloud.cta.ru/iblock/40c/40cb704dac60a420672a896df41d1848/SE_2023_3.pdf.

УДК 621.382

Одна модель СВЧ-транзистора в разных САПР: миф или реальность?

Попов А. А., к. т. н., Добуш И. М., к. т. н.
ООО «50ом Технолоджиз»
634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 147
artem.popov@50ohm.tech

Представлены результаты переноса версии Verilog-A компактной модели СВЧ-транзистора Angelov в различные САПР. Проведено сравнение характеристик модели, рассчитанных в разных САПР с использованием различных видов анализа цепей.

Ключевые слова: САПР; модель транзистора; Verilog-A.

Современная практика разработки СВЧ-устройств требует применения двух и более САПР для выполнения определенных задач маршрута проектирования, в связи с чем проблема синхронизации рассчитываемых характеристик разрабатываемого устройства в различных системах остается открытой. С одной стороны, при использовании поставляемой в комплекте с САПР модели транзистора специалисту необходимо убедиться, что реализация этой модели в двух (и более) САПР идентична. При этом нередки случаи, когда в разных САПР отличаются версии одной и той же модели, что приводит к расхождению рассчитываемых характеристик при одном и том же наборе параметров модели. С другой стороны, не все фабрики используют стандартные реализации моделей, поставляемые в комплекте с САПР: некоторые предпочитают составлять модели из блоков, задаваемых уравнениями. Это обеспечивает гибкость при учете особенностей технологического процесса, однако ограничивает возможность переноса модели в другую САПР, если в ней отсутствуют блоки для задания выражений, связывающих токи и напряжения.

Для российской микроэлектронной отрасли проблема синхронизации моделей элементов между различными САПР особенно актуальна. За последние три года было запущено несколько проектов по развитию технологий изготовления СВЧ МИС на основе материалов групп A^3B^5. Для сокращения трудозатрат на разработку, верификацию и валидацию моделей необходимо иметь инструмент, который позволит унифицировать создание моделей транзисторов в составе комплексных инструментов проектирования для различных САПР.

Одним из таких инструментов является язык описания аппаратуры Verilog-A, который все чаще применяется при создании моделей для SPICE-подобных симуляторов электронных схем. В Verilog-A компоненты описываются через систему узлов и ветвей, а для формирования уравнений эквивалентной схемы применяются законы Кирхгофа. На данный момент поддержка Verilog-A имеется в большинстве популярных САПР и международное сообщество по компактным моделям (Compact Model Coalition или CMC) [1] утвердило этот инструмент в качестве стандарта: по требованию CMC все новые модели как для кремниевых, так и для A^3B^5-технологий, поданные на рассмотрение в качестве отраслевого стандарта, должны быть реализованы именно на Verilog-A.

Кроме того, в связи с активным развитием направления создания отечественной САПР поддержка Verilog-A позволит:

1) при одинаковых условиях оперативно проводить сравнение по точности и скорости расчетов с зарубежными САПР, что обеспечит прозрачность при внедрении новых инструментов проектирования в существующие дизайн-центры;
2) стандартизирует процесс взаимодействия между фабриками, создателями САПР и разработчиками моделей транзисторов.

В рамках настоящей работы представлены результаты переноса популярной в СВЧ-электронике модели транзистора Angelov, реализованной на языке Verilog-A, в различные САПР. Для подтверждения работоспособности перенесенной модели проведено сравнение рассчитанных характеристик модели как на постоянном токе, так и в режимах малого и большого сигнала.

Литература

1. Compact Model Coalition [Электронный ресурс]. — URL: https://si2.org/compact-model-coalition.

УДК 004.4+621.382

Особенности отечественной платформы характеризации библиотек, применение и сравнение с зарубежными аналогами

Сорокин Т. М.[1], Макаров Г. Н.[1], Глущенко Д. В.[1], Бабинцев А. В.[1], Калашников В. С.[1,2], к. т. н., Семенов М. Ю.[1], к. т. н.
[1] ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлен обзор отечественной платформы характеризации библиотек стандартных ячеек и ячеек ввода-вывода, ее особенностей и результаты сравнения по точности и быстродействию с зарубежными коммерческими аналогами Cadence Liberate и Synopsys SiliconSmart, являющимися золотым стандартом мировой полупроводниковой индустрии.
Ключевые слова: характеризация; цифровые библиотеки; SPICE-моделирование; САПР; Liberty.

Актуальность разработки отечественной платформы характеризации библиотек

В связи с уходом основных поставщиков САПР из России возникла острая потребность в разработке отечественных аналогов САПР, в том числе отечественной платформы характеризации, нацеленной на российский рынок микроэлектроники и доступные отечественные технологии.

Обзор отечественной платформы характеризации библиотек

Отечественная платформа характеризации библиотек (далее — Платформа) представляет собой уникальный продукт, разработанный в компании «НМ-Тех» с нуля в рамках ОКР «Характеризация», предназначенный для характеризации простых и сложных стандартных элементов, а также ячеек ввода-вывода. Данный программный продукт не основан ни на open-source-решениях, ни на предыдущих разработках. При этом Платформа в высокой степени совместима с коммерческим аналогом Synopsys SiliconSmart, что позволит легко перейти с зарубежной САПР на отечественный продукт. Для пользователей иных систем характеризации, таких как Cadence Liberate, предусмотрен маршрут автоматической генерации установочных файлов на основе существующей liberty-модели, обеспечивающий структурную идентичность исходного liberty-файла и полученного после перехарактеризации с помощью отечественной Платформы.

Особенности отечественной платформы характеризации

Отечественная платформа характеризации ориентирована на российских пользователей и на использование с доступными отечественными технологиями уровня 250–90 нм. В отличие от аналогов, Платформа поддерживает, наряду с зарубежными SPICE-симуляторами, отечественный САПР схемотехнического моделирования SymSpice. Также Платформа полностью совместима с отечественной ОС Astra Linux [1].

Платформа построена по модульному принципу, что позволяет легко масштабировать ее для добавления новых SPICE-симуляторов, систем распределенных вычислений и так далее. Процесс характеризации разбит на этапы зачитывания установочных файлов, конфигурации и создания плана характеризации, собственно характеризации (моделирования подготовленных заданий) и создания выходных моделей; это позволяет гибко управлять маршрутом и получать промежуточные отчеты на разных этапах.

Для доступных отечественных технологий уровня 250–90 нм Платформа предоставляет полный набор необходимой функциональности для характеризации стандартных элементов и ячеек ввода-вывода [2], по сути являясь полным аналогом коммерческих зарубежных САПР для упомянутых технологических норм [3, 4]. При этом Платформа представляет и дополнительные функции, недоступные в упомянутых коммерческих САПР:

- инициализация последовательностных ячеек с гарантированным переключением всех выходов;
- уникальный алгоритм выбора нагрузочной емкости, сочетающий скорость поиска по выходным пинам и точность поиска по состояниям [5];
- простой и удобный способ характеризации ячеек блокировки тактового сигнала.

Сравнение отечественной платформы характеризации с зарубежными аналогами

В представленной работе приведены данные по сравнению отечественной платформы характеризации с зарубежными коммерческими аналогами — Cadence Liberate и Synopsys SiliconSmart, с точки зрения точности получаемых моделей, а также быстродействия. Сравнение точности проведено как поточечно для каждой полученной liberty-модели, так и интегрально на основе результатов прохождения полного RTL2GDS-маршрута для 8-битного RISC-ядра, включая сравнение данных, полученных из STA-анализа и SPICE-моделирования для одних и тех же путей [6].

Заключение

В докладе рассмотрены особенности отечественной платформы характеризации и основные области ее применения. Представлены результаты сравнения Платформы с зарубежными коммерческими аналогами, подтверждающие, что точность и быстродействие Платформы находятся на уровне САПР, являющихся золотым стандартом мировой полупроводниковой индустрии.

Литература

1. Российская операционная система. — URL: https://astralinux.ru.
2. Макаров Г. Н., Сорокин Т. М., Калашников В. С., Семенов М. Ю., Царапкин С. Ф., Гундарцев М. А. Требования к разработке отечественной системы характеризации библиотек стандартных ячеек и ячеек ввода-вывода // Информационные технологии, 2024. — № 10. — Т. 30. — С. 520–527.
3. SiliconSmart User Guide Q-2020.03, 2020.
4. Liberate characterization User Guide 20.1.
5. Сорокин Т. М., Макаров Г. Н., Анисимов Д. В. Программа оптимизированного поиска максимальной нагрузочной емкости стандартных цифровых ячеек: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024660875, 14.05.2024.
6. Tempus user guide 23.10. Appendix — Base Delay, SI Delay, and SI Glitch Correlation with Spice. P. 514–521.

УДК 004.9:621.382

Опыт разработки программного обеспечения экстракции паразитных компонентов интегральных микросхем

Сазонов В. В., д. ф.-м. н., Хапаев М. М., Шишаев А. И.
ООО «Систематика Консалтинг»
105082, г. Москва, ул. Большая Почтовая, 26, стр. 1
info@systematica-consulting.ru

Приведены основные принципы функционирования комплексного программного решения по экстракции паразитных компонентов аналоговых интегральных микросхем. Рассматривается метод приближенного вычисления паразитных компонентов.

Ключевые слова: САПР; физическая верификация; экстракция паразитных компонентов; моделирование; проектирование интегральных микросхем.

Уменьшение технологических норм проектирования и изготовления интегральных микросхем требует соблюдения более строгих правил проектирования и учета электродинамических эффектов, возникающих в полупроводниковых приборах и проводниках, их соединяющих (межсоединениях). При разработке схемотехнического решения используются идеальные модели полупроводниковых приборов; проводники, которые их соединяют, считаются также идеальными, имеющими нулевое сопротивление, не обладающими емкостью и индуктивностью. После размещения элементов на кристалле и трассировки межсоединений возникают реальные проводники с их сопротивлениями, емкостями и индуктивностями, которые отличаются от идеальных моделей. Такие емкости, сопротивления и индуктивности являются нежелательными, и их принято называть паразитными, а процесс вычисления этих параметров — экстракцией паразитных параметров или экстракцией паразитов [1].

В работе рассматривается опыт разработки комплексного решения по экстракции паразитных компонентов, основанного на методе приближенного вычисления паразитных компонентов на уровне межсоединений и транзисторном уровне.

Литература

1. Kao W. H., Chi-Yuan Lo M. Basel and Singh R. Parasitic extraction: current state of the art and future trends // Proceedings of the IEEE, 2001. Vol. 89. № 5. P. 729–739. DOI: 10.1109/5.929651.

УДК 621.382

SPICE-моделирование фотодиода

Осыкин А. А., Потупчик А. Г.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
aosykin@niime.ru, apotupchik@niime.ru

В работе рассматривается проблема создания SPICE-модели фотодиода, которая, в отличие от модели обыкновенного диода, должна учитывать влияние света на характеристики прибора. Воздействие света на фотодиод реализовано путем введения дополнительного терминала устройства, напряжение на котором эквивалентно мощности падающего излучения.
Ключевые слова: КМОП; фотодиод; SPICE; Verilog-A.

Модель фототока

Модель фототока предназначена для преобразования мощности падающего излучения в фототок диода и действительна в заданных условиях и со следующими ограничениями:

- весь свет попадает на светочувствительную область;
- свет не отражается;
- температурная модель отсутствует.

Фототок рассчитывается по формулам

$$I_{ph} = R_{ph} \cdot P_{ph},$$

$$R_{ph} = \eta \cdot \frac{\lambda q}{hc},$$

$$\eta = k_{PR}\left(1 - \frac{e^{-\alpha \cdot W}}{\alpha \cdot L_P + 1}\right) \cdot \frac{1}{e^{-k_{SR} \cdot (\lambda - \lambda_s)} + 1}, \quad (1)$$

где I_{ph} — фототок [А], R_{ph} — чувствительность [А/Вт], P_{ph} — мощность [Вт], η — квантовая эффективность, λ — длина волны [мкм], q — заряд электрона [Кл], h — постоянная Планка [Дж·с], c — скорость света [мкм/с], α — коэффициент поглощения, W — ширина ОПЗ, L_p — диффузионная длина, k_{SR} — коэффициент коррекции η из-за поверхностной рекомбинации, λ_s — коротковолновая граница чувствительности, k_{PR} — коэффициент «потери» фотонов.

Коэффициент поглощения описывается эмпирическим выражением

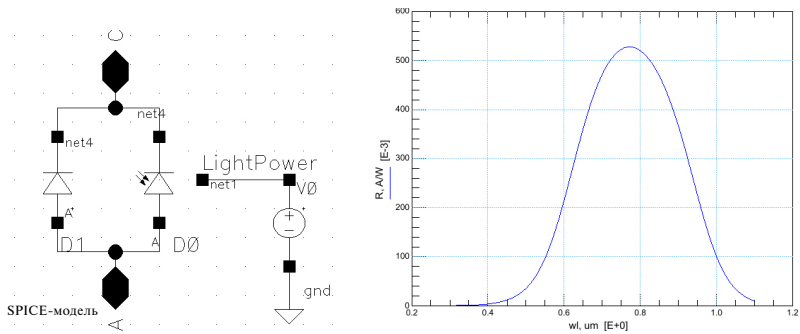
$$\alpha = \frac{25 \cdot e^{-7 \cdot \lambda}}{e^{k_alpha \cdot (\lambda - \lambda_l)} + 1} + 1{,}9 \cdot 10^{10} \cdot e^{-53 \cdot \lambda},$$

где λ_l — длинноволновая граница чувствительности, k_alpha — коэффициент коррекции поглощения для длинных волн.

Реализация SPICE-модели

Эквивалентная схема SPICE-модели фотодиода показана на рис. 1. Модель представляет собой два параллельных диода: D1 — диод, ответственный за темновой ток и ВФХ, имеет SPICE-модель встроенного в симулятор диода; D0 — трехтерминальный диод, выполненный в виде Verilog-A-модели, ответственный за фототок

прибора (рис. 1*а*). Ввод света через отдельный терминал позволяет задавать в том числе и импульсный источник света путем изменения постоянного источника напряжения на импульсный. Длина волны света является одним из входных параметров Verilog-A-модели. Она позволяет получить фототок диода для света разной длины волны, преобразовывая его из входной мощности, согласно зависимости ампер-ваттной чувствительности фотодиода от длины волны (рис. 1*б*).



а *б*

Рис. 1. Эквивалентная схема SPICE-модели фотодиода (*а*); ампер-ваттная характеристика (*б*)

Заключение

Прототип представленной модели фотодиода, адаптированный к определенной технологии, может быть использован для разработки как отдельных фотодиодов, так и пикселей фоточувствительной КМОП-матрицы в различных конфигурациях: с тремя (3Т) или четырьмя (4Т) транзисторами.

Литература

1. Orly Yadid-Pecht, Ralph Etienne-Cummings. CMOS images: from phototransduction to image processing. Springer, 2004.
2. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16-41.

УДК 004.41

Перспективный подход в области разработки CAE-систем — универсальный открытый API САПР

Лучин Д. В., Минаев А. А., Трофимов А. П., Филиппов Д. В.
ООО «КВАДРО КОД»
443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 35

Ключевые слова: CAE-системы; 3D-моделирование; СВЧ-устройства; антенны; электродинамика; САПР; API.

Предлагаемый авторами принцип решения задач создания отечественных САПР (CAE-систем) взамен зарубежных аналогов состоит в создании некоторого универсального инструмента, который позволил бы осуществить разработку в принципе любой САПР (CAE-системы) в рамках концепции использования единых базовых программных блоков и модулей. Доступ разработчиков САПР к этим блокам, очевидно, должен осуществляться через некий четко определенный (однозначно задокументированный вход и выход каждого блока и модуля) программный интерфейс. Назовем его универсальным открытым API САПР (API — Application Program Interface, интерфейс программирования приложения) и определим его необходимые функциональные возможности.

Опираясь на процесс моделирования, заложенный в коммерческие САПР, можно выделить следующие ключевые функциональные возможности универсального API САПР [1]:

- унифицированный подход к описанию создаваемых моделей;
- интеграция генераторов вычислительных сеток;
- интеграция вычислительных ядер (решателей);
- интеграция программных модулей параметрической оптимизации;
- интеграция программных модулей отображения результатов моделирования;
- управление конвейером расчетов вычислителей;
- предоставление форматов входных, выходных и промежуточных расчетных данных;
- управление параллельными вычислениями;
- предоставление функций интеграции с измерительным оборудованием.

На основе предложенного подхода обобщенная архитектура универсальной CAE-системы электродинамического моделирования может выглядеть так, как показано на рис. 1.

Предполагается, что такой подход приведет к появлению соответствующих специализированных САПР, охватывающих этапы жизненного цикла, начиная от нижнего уровня, на котором осуществляется разработка схемотехнических решений отдельно взятых СВЧ-микросхем и модулей, и заканчивая уровнем системного анализа, в рамках которого полученные в результате моделирования параметры и характеристики СВЧ-изделий используются как исходные данные для моделирования различных аспектов комплексного функционирования сложных радиотехнических систем: базовые станции сотовой радиосвязи, радиостанции различных диапазонов, станции спутниковой связи и т. д. К аспектам

комплексного функционирования таких систем относятся, например, электромагнитная совместимость, электромагнитная безопасность, распространение радиоволн, определение зон радиопокрытия и т. д.

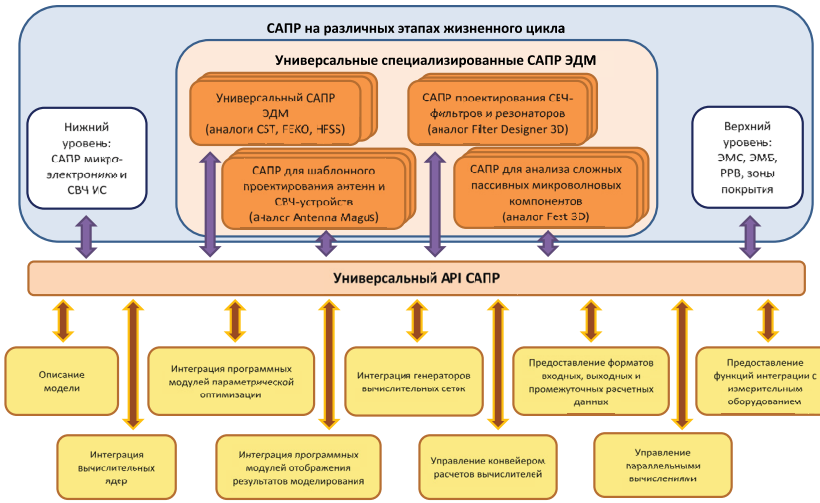


Рис. 1. Обобщенная архитектура универсальной CAE-системы электродинамического моделирования

Литература

1. Лучин Д. В., Минаев А. А., Трофимов А. П., Филиппов Д. В., Юдин В. В. Технологии создания САПР для разработки СВЧ-устройств и антенн / Под ред. В.В. Юдина. — Самара: ООО «Слово», 2025. — 268 с: ил.

Интеграция маршрутов проектирования аналоговых и СВЧ-микросхем. Планы развития САПР

Иванова Е. Н.
АО «Научно-производственное объединение «Критические информационные системы»
109240, г. Москва, ул. Гончарная, 15, стр. 1

Обзор опыта разработки САПР аналоговых ИС и САПР СВЧ МИС/ГИС. Обзор возможностей интеграции маршрутов между собой и с САПР цифровых схем. Описание планов развития линейки в дальнейших работах.
Ключевые слова: САПР; СВЧ МИС/ГИС; аналоговые ИС; маршрут проектирования; разработка инструментов САПР.

Данный доклад посвящен текущим разработкам в рамках программы электронного машиностроения.

На текущий момент ведется две ОКР по разработке базовых версий САПР аналоговых и СВЧ МИС/ГИС. В конце 2026 года в результате работ должны быть представлены полные маршруты проектирования с привязкой к существующим фабрикам.

Аналоговый маршрут проектирования представляет собой полный набор инструментов, позволяющий разрабатывать аналоговые схемы для технологии АО «НИИМЭ» CMOSF8 0,18.

СВЧ-маршрут подразумевает возможность разработки СВЧ МИС/ГИС для технологии 0,25 GaAs pHEMT НПО «Исток им. Шокина».

Возможность интеграции с цифровым маршрутом предполагается посредством использования единой базы данных, разрабатываемой в цифровом маршруте.

В следующих работах предполагается расширение функционала и добавление КСП на другие технологии, а также расширение в направлении СВЧ-антенн.

Отладка Tcl-скриптов: «современные» подходы и решения для сред разработки FPGA и ASIC

Коробков М. А., к. т. н.
Старший инженер по разработке СнК
YADRO

Язык Tcl (Tool Command Language) является нативным практически для всех инструментов разработки, предназначенных для проектирования FPGA, ASIC и верификации. Без сценариев на Tcl здесь невозможна ни разработка больших проектов, ни автоматизация их сборки.

Но, несмотря на многолетнюю поддержку Tcl в средах разработки, практика упорно доказывает: отладка Tcl-сценариев по-прежнему представляет значительную сложность. Это связано с отсутствием в средах проектирования для FPGA, ASIC и верификации полноценных инструментов отладки — с графическим интерфейсом, возможностью установки точек останова, просмотра стека вызова и другими привычными функциями.

Как решать проблемы с отладкой? В рамках своего выступления Михаил покажет возможные методы, рассмотрит нативные (интегрированные в сам язык) и расширенные способы отладки Tcl-сценариев.

УДК 004.41

Опыт разработки элементов CAE-системы электродинамического моделирования с использованием инструментария C3D Toolkit

Лучин Д. В., Минаев А. А., Трофимов А. П., Филиппов Д. В.
ООО «КВАДРО КОД»
443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 35

Изложены ключевые моменты опыта, приобретенного авторами при разработке элементов CAE-системы электродинамического моделирования с использованием инструментария C3D Toolkit.
Ключевые слова: CAE-системы; 3D-моделирование; СВЧ-устройства; антенны; электродинамика; САПР.

Современные системы и программные комплексы электродинамического моделирования (CAE-системы) обеспечивают решение задач по созданию антенно-фидерных устройств, СВЧ-устройств, радиосистем и т. д. с использованием вычислительной электродинамики на основе разработки и внедрения в процесс проектирования высокоэффективных и достаточно универсальных программно-аппаратных вычислительных средств. Неотъемлемой частью данного процесса является построение трехмерных электродинамических моделей на основе профессиональных геометрических ядер [1].

В условиях продвижения на российском рынке CAE-систем полностью отечественных разработок отечественные профессиональные геометрические ядра активно развиваются и находят все более широкое применение. Наиболее известным из них является отечественный программный продукт C3D Toolkit [1, 2]. Авторами был накоплен существенный опыт использования данного инструментария при разработке элементов CAE-системы, в частности при создании редактора электродинамической модели.

C3D Modeler поддерживает различные типы поверхностей и кривых, которые позволяют строить тела сложной формы. Для этого имеются следующие функции: булевы операции, операции симметрии, операции резки, скругления и фаски ребер, операции с тонкостенными телами и т. д.

Данный функционал позволяет достаточно эффективно создавать электродинамические модели следующих типов антенн и антенных решеток:

- тонкопроволочные вибраторные антенны (одиночные вибраторы, антенны Уда — Яги, логопериодические антенны);
- панельные антенны, представляющие собой комбинацию тонкопроволочных и поверхностных элементов;
- зеркальные антенны;
- одиночные рупорные антенны;
- линейные, плоские и кольцевые антенные решетки на основе моделей одиночных излучателей;
- элементы волноводных трактов в виде прямых и изогнутых секций волноводов прямоугольного и круглого сечения.

Благодаря открытой архитектуре геометрического ядра C3D Modeler, разработчикам предоставляется возможность создавать наследуемые объекты в целях расширения их свойств и параметров. На этой основе авторами был разработан справочник материалов, подобный применяемому в известной зарубежной САПР CST Studio Suite [1, 3], с помощью которого задаются электрофизические свойства всех элементов электродинамической модели.

Характерным для современных САПР является наличие возможности полной параметризации электродинамических моделей с охватом всего спектра параметров — от геометрии до свойств материалов, а также наличие «листа истории», хранящего все операции по созданию электродинамической модели. Реализация данной концепции, предлагаемая и опробованная авторами, базируется на использовании для описания переменных и операций по построению модели скриптовых языков на основе интеграции функционала C3D и скриптового динамического языка Lua [4].

Резюмируя практические результаты работы с инструментарием C3D, можно сказать следующее. Отечественное геометрическое ядро C3D по своим характеристикам составляет достаточно высокую конкуренцию зарубежным системам и содержит все необходимые инструменты для реализации построения геометрии электродинамических моделей объектов.

С другой стороны, инструментарий геометрического ядра C3D и модуля визуализации C3D Vision ориентирован на разработку CAD-систем и подобных им приложений.

Для полномасштабного применения ядра C3D при разработке профессиональных CAE-систем целесообразна реализация следующего функционала:

- наличие встроенного генератора вычислительных сеток (двумерных, объемных);
- наличие встроенных инструментов двумерной и трехмерной визуализации результатов моделирования.

Литература

1. Лучин Д. В., Минаев А. А., Трофимов А. П., Филиппов Д. В., Юдин В. В. Технологии создания САПР для разработки СВЧ-устройств и антенн / Под ред. В. В. Юдина. — Самара: ООО «Слово», 2025. — 268 с: ил.
2. URL: https://c3dlabs.ru/products/c3d-toolkit.
3. URL: https://software.cstechnology.ru/cststudiosuite?ysclid=md46mqt1ba579782573.
4. URL: https://www.lua.org.

Применение метода дифференцируемых алгоритмов размещения и трассировки к задаче автоматического создания топологии аналоговых интегральных схем

Щепетов Д. С.[1,3], Тимошенко А. Г.[2], Цепилова А.[2], Горинов А. А.[1]
[1] Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
dshchepetov@synth-cad.tech
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] ПАО «Софтлайн»
119021, г. Москва, ул. Льва Толстого, 5, стр. 1

Исследованы методы автоматической генерации топологии интегральных микросхем по схеме (нетлисту) с помощью дифференцируемых алгоритмов трассировки и размещения, на примере телескопического операционного усилителя показано, что подобные алгоритмы позволяют получить существенный выигрыш по времени генерации топологии со схожим качеством.
Ключевые слова: автоматизация проектирования аналоговых интегральных схем; дифференцируемые алгоритмы.

Маршрут аналогового проектирования значительно менее автоматизирован, чем цифровой. Особенно это заметно на этапе разработки топологии, который на практике полностью реализуется топологом вручную из-за большого количества требований компактности, симметричности размещения для определенных элементов (транзисторов или устройств – терминология [1]) и трудности их, требований, формализации.

В 2020 году была представлена работа [1], которая позволяет получить условия компактности и симметричности непосредственно из схемы. С помощью методов машинного обучения подобный подход позволяет разбить схему на набор схемотехнических шаблонов и автоматически задать условия как на сами шаблоны, так и на связи между ними. Этап трассировки и размещения (ТиР) формулировался в виде задачи условной оптимизации и решался с помощью соответствующих алгоритмов. Такой подход позволил ускорить процесс создания топологии с часов до минут и даже полностью спроектировать сложную аналогово-интегральную схему от спецификации до топологии без участия человека [2].

В текущей работе исследовалась возможность задать этап ТиР в дифференцируемом виде для обеспечения сквозной оптимизации (обучения) проектирования топологии и схемотехники. В рамках решения этой задачи был предложен алгоритм дифференцируемого размещения, основанный на работе [3], и новый дифференцируемый алгоритм трассировки. Предложенные алгоритмы были интегрированы в пакет Align и протестированы на примере телескопического операционного усилителя, входящего в демонстрационные примеры пакета. Было продемонстрировано, что с помощью методов дифференцируемого размещения и трассировки можно ускорить разработку топологии более чем в 10 раз с проигрышем по метрике компактности менее 5% (табл. 1).

Таблица 1. Значение метрик генерации топологии в зависимости от применяемого алгоритма

Параметр	Align	Align, диф. размещение	Align, полностью дифференцируемый	Идеальный случай
Скорость создания топологии, сек	840	504	**51**	0
Плотность (отношение площади транзисторов к общей площади), у.е.	**0,75**	0,72	0,72	1
Количество DRC/LVS-нарушений, ед.	0	0	0	0

Таким образом, показано, что применение дифференцируемых алгоритмов значительно сокращает время проектирования, сохраняя ключевые метрики близкими к исходному алгоритму, при этом добавляя возможность использования данного алгоритма в сквозных полностью дифференцируемых автоматических маршрутах аналогового проектирования.

Литература

1. Dhar T. et al. ALIGN: A system for automating analog layout // IEEE Design & Test, 2020. Vol. 38. № 2. P. 8–18.
2. Щепетов Д. С. и др. Методы схемотехнического и топологического синтеза аналоговых интегральных схем по спецификации с использованием методов машинного обучения и дифференцируемого программирования // Труды института системного программирования РАН, 2025. — Т. 37. — № 2. — С. 33–48.
3. Gusmão A. et al. Differentiable Constraints' Encoding for Gradient-Based Analog Integrated Circuit Placement Optimization // Electronics, 2022. Vol. 12. № 1. P. 110.

УДК 004.052; 316.422.44; 321.01; 621.382

Контролируемый маршрут проектирования для разработки доверенных СБИС в составе объектов критической информационной инфраструктуры

Аряшев С. И.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
aserg@cs.niisi.ras.ru

Рассматриваются вопросы обеспечения маршрута контролируемого проектирования (МКП) доверенных СБИС в составе изделий для объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ). Представлена структура жизненного цикла (ЖЦ) доверенных СБИС на основе контроля процессов разработки.

Ключевые слова: доверенность интегральных схем; контроль жизненного цикла интегральных схем; случайные ошибки; систематические ошибки; преднамеренные ошибки.

Разработка аппаратного обеспечения для объектов КИИ требует использования доверенных СБИС. Рост сложности современных интегральных схем (ИС) и нарушение цепочек поставок приводят к рискам нарушения доверенности ИС. Контроль жизненного цикла ИС должен включать все стадии — от создания документации до эксплуатации в составе электронных модулей, программно-аппаратных комплексов (ПАК), радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на объектах КИИ [1].

Процесс разработки СБИС включает следующие ключевые этапы:

1) определение требований и разработка системной спецификации;
2) разработка архитектуры и высокоуровневых моделей;
3) разработка электрических схем и синтезируемых RTL-моделей;
4) логический синтез и проектирование топологии;
5) изготовление кристаллов и корпусирование;
6) испытания и оценка соответствия требованиям;
7) обеспечение поддержки при поставке и эксплуатации.

Наличие случайных, преднамеренных ошибок, их систематизация, анализ причин их появления является основой для построения доверенных моделей СБИС, выбора и разработки методов, контрмер, обеспечивающих доверенность ИС на всех этапах жизненного цикла [2]. Для решения данной задачи используются компоненты отечественных САПР для МКП доверенных ИС, в том числе система управления ЖЦ и средств обеспечения доверенности при производстве ИС [3].

Литература

1. Кривошеин Б. Н., Покровский И. А. Понятия и критерии оценки технологической независимости и безопасности объектов критической информационной инфраструктуры // Безопасность информационных технологий, 2023. — Т. 30. — № 4. — С. 39–60. — URL: https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1561/1361 (дата обращения: 10.07.2025).

2. Мосин С. Г. Доверенность интегральных схем: характеристики и причины их нарушения // Безопасность информационных технологий, 2025. — Т. 32. — № 2. — С. 178–191. — URL: https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1788/1476 (дата обращения: 10.07.2025).
3. Верник П. А., Власов С. Е., Аряшев С. И., Петров К. А., Аряшев С. С. Результаты создания маршрута контролируемого проектирования доверенной ЭКБ // Наноиндустрия, 2024. — № S10-1. — С. 334–338.

УДК 004.4+621.382

Создание IBIS-моделей

Бабинцев А. В., Никончук С. В., Гриценко О. В.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org

Показана актуальность IBIS-моделей в маршруте проектирования. Представлен обзор маршрута разработки IBIS-моделей в компании «НМТех». На примере библиотеки, разрабатываемой в компании «НМТех», продемонстрированы методы создания и верификации IBIS-моделей, а также рассмотрены перспективы дальнейшего совершенствования процесса.
Ключевые слова: IBIS-моделирование; IBIS; целостность сигнала; signal integrity; I/O-буфер.

Большинство современных систем проектирования печатных плат поддерживают анализ целостности сигнала с использованием IBIS-моделей. Однако разработчики печатных плат часто сталкиваются с отсутствием IBIS-моделей для используемых компонентов и вынуждены запрашивать их у поставщиков.

Компания «НМТех» включает IBIS-модели в базовый комплект представлений библиотек интерфейсных элементов, поставляемых заказчикам. Данные модели содержат не только основные характеристики, необходимые для анализа целостности сигнала, но и дополнительные данные для анализа цепей питания, например дребезг от одновременного переключения выводов микросхемы (SSN, SSO).

В компании «НМТех» выработан маршрут создания IBIS-моделей на основе SPICE-моделирования. Особое внимание уделяется комплексной проверке качества, которая включает в себя:

- базовое тестирование модели на корректность и работоспособность;
- корреляцию результатов моделирования в IBIS с результатами транзисторного SPICE-моделирования для обеспечения достоверности и точности.

Наличие готовых IBIS-моделей позволяет заказчикам решать следующие задачи уже на ранних этапах проектирования микросхемы:

- выбор подходящих элементов для конкретных интерфейсов;
- прогнозирование поведения сигнала в линиях передачи;
- оценка отражений, искажений и помех;
- согласование импеданса;
- оптимизация расположения элементов и трассировки.

Гарантированное качество IBIS-моделей позволяет заказчикам доверять результатам моделирования, принимать обоснованные решения при проектировании, снижает вероятность ошибок и пересборок, а также ускоряет процесс разработки печатных плат.

В перспективе в компании «НМТех» будет внедрена процедура верификации IBIS-моделей на основе физических измерений микросхем. Также планируется разработка маршрута по созданию IBIS-моделей для продуктов с учетом разводки и корпуса.

Литература

1. IBIS Open Forum. IBIS Modeling Cookbook. Version 4.0. [Электронный ресурс]. URL: https://ibis.org/cookbook/cookbook-v4.pdf (дата обращения: 30.04.2025).
2. IBIS Open Forum. IBIS Quality Specification. Version 3.0. [Электронный ресурс]. URL: https://ibis.org/quality_ver3.0/quality_ver3.0.pdf (дата обращения: дата обращения: 30.04.2025).
3. IBIS Open Forum. IBIS Accuracy Handbook. [Электронный ресурс]. URL: https://ibis.org/accuracy/handbook.pdf (дата обращения: дата обращения: 30.04.2025).
4. Петросянц К. О., Харитонов И. А., Адонин А. С., Сидоров А. В., Александров А. В. Создание IBIS-моделей цифровых микросхем с учетом воздействия внешних факторов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем, 2012: сб. тр. / Отв. ред. В. С. Борискин; под общ. ред. А. Л. Стемпковского. — М.: ИППМ РАН, 2012. — С. 187–192.

УДК 621.3.049

Комплексная параметризация топологии иерархических микроэлектронных объектов

Буренева О. И., Миронов С. Э., Ширяев И. А., Шичкина Ю. А.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
semironovspb@yandex.ru

Приводится описание системы комплексной параметризации топологии сложных микроэлектронных объектов и методики проектирования иерархической топологии с ее помощью. Параметризируются структурные, схемотехнические, топологические, электрические, технологические характеристики.
Ключевые слова: комплексная параметризация топологии; сжатие топологии; согласование ячеек; генерация топологии; плотная упаковка.

Постоянное усложнение проектов, ужесточение требований к срокам разработки и многообразие параметров на всех этапах проектирования требуют создания средств комплексной параметризации проектов [1].

По уровням проектирования топологии иерархических микроэлектронных объектов возможны пять типов параметризации: структурная; схемотехническая; топологическая; электрическая; технологическая. Это порождает широкий спектр возможных вариантов реализации устройств. Для решения возникающих при этом проблем разрабатывается система комплексной параметризации топологии регулярных макроблоков СБИС Macroblock Layout Design [1], в состав которой входят:

- генератор топологии ячеек Cell Layout;
- система сжатия ячеек TopDesign;
- система управляемого иерархического сжатия топологии макроблоков Matching of Cells [2, 3];
- редактор топологических планов макроблоков Structural-Layout Design.

Система сжатия ячеек TopDesign [3, 4] решает задачи двух типов параметризации:

- технологической (автоматическая оперативная настройка топологии ячеек на требуемые проектные нормы);
- электрической (параметризация ширины и длины каналов транзисторов, ширины шин).

Топологическая параметризация обеспечивается генератором топологии ячеек по электрической схеме Cell Layout. Параметры топологии ячеек (положение выводов, основных шин, отдельных элементов внутренней разводки, число рядов транзисторов в ячейке и положение отдельных транзисторов) задают шаблоны топологии ячеек. Программа Cell Layout генерирует технологически независимые эскизы топологии ячеек, которые настраиваются на проектные нормы системой сжатия топологии ячеек TopDesign.

Задача схемотехнической параметризации решается путем выбора электрической схемы из библиотеки, подобно переменной перечисляемого типа.

Со структурной параметризацией связаны графический редактор топологических планов макроблоков Structural-Layout Design и система иерархического сжатия макроблоков Matching of Cells.

Графический редактор топологических планов параметризирует разрядности операндов, матрицирует ячейки и группы ячеек. В нем задаются коэффициенты формы и принципы топологической организации ячеек. Получаемые с его помощью «заготовки» используются программой Cell Layout при генерации эскизов топологии ячеек, а текстовые спецификации ячеек и макроблоков используются системой иерархического сжатия топологии Matching of Cells. Она согласовывает габариты ячеек макроблока и положение их выводов при настройке топологических эскизов на требуемые проектные нормы и собирает топологию макроблока.

Ниже приведен алгоритм проектирования топологии регулярных макроблоков в системе Macroblock Layout Design.

1. В графическом редакторе Structural-Layout Design проектируется топологический план макроблока. На плане размещаются магистральные шины, некоторые транзисторы и коммутационные компоненты.
2. Топологический план макроблока разбивается на ячейки по линиям границ ячеек. В состав ячеек включаются расположенные внутри их границ элементы.
3. Генерируются текстовые файлы трех типов:
   - спецификаций ячеек с описанием их границ и их выводов (для согласования ячеек);
   - шаблоны топологии ячеек (для генерации топологии ячеек с учетом внесенных разработчиком в ячейку транзисторов и коммутационных элементов);
   - спецификации макроблока (иерархическое структурированное описания топологии).
4. Программой Cell Layout по электрическим схемам (текстовые SPICE-netlist-описания) генерируются инвариантные к проектным нормам эскизы топологии ячеек
5. Программой Matching of Cells с помощью системы TopDesign с учетом требуемых проектных норм генерируются согласованные по габаритам и выводам описания топологии ячеек и собранного из них макроблока.

Литература

1. Миронов С. Э., Андреев Л. Е., Зибарев К. М. Технология комплексной параметризации топологических проектов регулярных макроблоков СБИС // IX Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем»: Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. Зеленоград, 05 — 08 октября 2020 г. — М.: ИППМ РАН, 2020. — Выпуск III. — С. 35–40. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-3-35-40.
2. Mironov S. E., Vasiliyev A. Yu., Safyannikov N. M. Means of Automating the Hierarchical Design of Complex Microelectronic Circuits with Uncertainty of Design Rules // Problems of advanced micro- and nanoelectronic systems development, 2018. P. 60–67. DOI: 10.31114/2078-7707-2018-3-60-67.

3. Зуев И. С., Миронов С. Э., Сафьянников Н. М. Проектирование специализированных кремниевых компиляторов в САПР параметризованных фрагментов КМОП БИС TopDesign. — СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. — 226 с., [20] с. цв. ил. ISBN 978-5-7629-2289-0.
4. Зуев И. С., Миронов С. Э., Сафьянников Н. М., Максимов А. Б. Виртуальное символьное проектирование параметризованных фрагментов КМОП БИС. — СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. — 236 с., [20] с. вкл. ISBN 978-5-7629-2196-1.

УДК 621.382.323

SPICE-моделирование мощных МОП-транзисторов

Петросянц К. О.[1], д. т. н., Харитонов И. А.[1], д. т. н., Исмаил-заде М. Р.[1], к. т. н., Самбурский Л. М.[1], к. т. н., Кожухов М. В.[1], к. т. н., Хлынов П. А.[1], Лаптев Д. С.[2], Бутин А. В.[2], Бутин И. В.[2]

[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
kpetrosyants@hse.ru
[2] Научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22

Представлены особенности структуры, электрических характеристик и SPICE-моделей мощных МОПТ, включая эффект квазинасыщения. Проведена верификация моделей на основе результатов измерения характеристик реальных приборов.

Ключевые слова: SPICE-модель; МОП-транзистор; температурно-зависимые параметры.

Одно из направлений работы в проекте № 24-91-19006 по Президентской программе развития микроэлектроники — создание библиотеки SPICE-моделей мощных МОП-транзисторов.

Особенности структур ряда мощных МОПТ и их заметное отличие от обычных МОПТ связаны с высоким пробивным напряжением сток-исток в сочетании с малым сопротивлением стока [1]. Для решения этих задач были предложены варианты структур и концепция области стока с низким сопротивлением (super-junction), а на ее основе — структура CoolMOS (рис. 1*а*, *б*). Из особенностей характеристик можно отметить эффект квазинасыщения, т. е. сгущение ветвей выходных ВАХ при больших токах вследствие ограничения проводимости области стока (рис. 2). Модель такого МОПТ представляет собой подсхему, включающую МОПТ и JFET (рис. 1*в*) [2], где МОПТ описывает ВАХ без учета квазинасыщения, а JFET — в области квазинасыщения.

Для структур мощных МОПТ без эффекта квазинасыщения в нашей работе используются более традиционные модели: BSIM3 (в случае необходимости точного моделирования в сверхширокомдиапазоне тока, от микроампер до десятков ампер) и более простая MOS3.

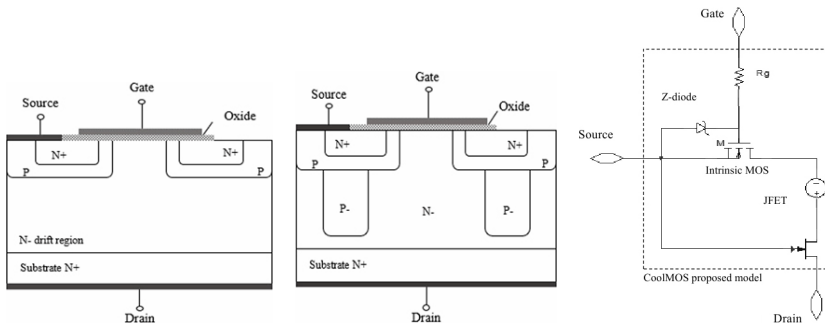
Для оценки температуры активных областей мощных МОПТ при их работе и предотвращения их перегрева традиционно используются эквивалентные тепловые модели, содержащие тепловые проводимости, сопротивления и емкости различных частей корпусов электронных компонентов вместе с элементами теплоотвода, например радиаторами, и зависящие от удельных теплопроводностей, плотности материалов и геометрических размеров частей корпуса компонента [3–6].

Эквивалентная тепловая схема мощного МОПТ представляется цепями Фостера или Кауэра [8]. Для совместного электротеплового моделирования используется SPICE-THERM-модель электронного компонента, что позволяет организовать обмен значениями мощности рассеяния P и температуры T активной области

компонента. Такой подход позволяет учесть и эффекты саморазогрева структуры мощного МОПТ.

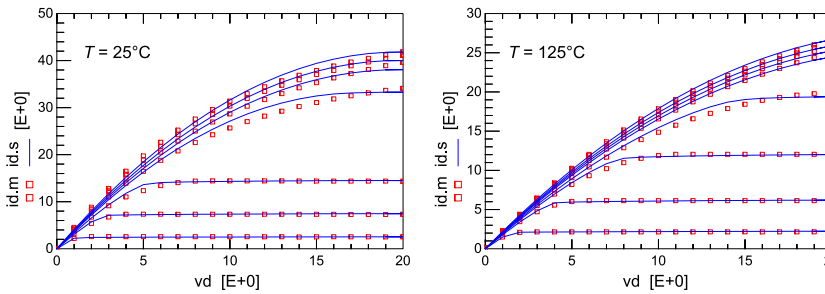
Для SPICE-моделей всех типов используется отработанный универсальный подход к организации процедуры определения (экстракции) параметров с использованием специализированного ПО. Необходимые электрические характеристики определяются с использованием измерительных стендов: на основе тестера полупроводниковых компонентов Formula TT3 и на основе комбинации отдельных КИП (генератора, осциллографа, источника питания).

Верификация SPICE-моделей с использованием измеренных характеристик обеспечивает среднеквадратическую погрешность не более 5–15 % для статических характеристик и 10–20 % для динамических характеристик.



а *б* *в*

Рис. 1. Разрезы структур планарного МОПТ (*а*) и CoolMOS МОПТ (*б*); макромодель CoolMOS МОПТ (*в*) [2]



а *б*

Рис. 2. Измеренные (значки) и смоделированные на основе модели CoolMOS (линии) выходные ВАХ высковольтного силового МОПТ при $T = 25$ °C (*а*) и $T = 125$ °C (*б*)

Литература

1. Laafar S., Maali A., Boumaaz N., Baraka K., Soulmani A. Spice Electrical Model of Coolmos Transistor Considering Quasi-Saturation Effect // Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2020. Vol. 98 (11).

2. Laafar S. et al. Spice electrical model of COOLMOS transistor considering quasi-saturation effect // Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2020. Vol. 98. № 11.
3. Li J. and Castellazzi A. et al. A physical RC network model for electrothermal analysis of a multichip SiC power module // IEEE Trans. on Power Electronics, March 2018. Vol. 33. № 3. P. 2494–2508.
4. Melito M., Gaito A., Sorrentino G. Thermal effects and junction temperature evaluation of Power MOSFETs/ AN4783 Application note.
5. Du B. and Hudgins J. L. et al. Transient electrothermal simulation of power semiconductor devices, // IEEE Trans. on Power Electronics , January 2010. Vol. 25. № 1. P. 237–248.
6. Shuhei Fukunaga, and Tsuyoshi Funaki. Transient thermal network model identification for power module packages // Proc. IEICE. Nonlinear Theory and Its Applications. Vol. 11. № 2. P. 157–169.

УДК 004.42

Создание отечественного инструмента для приборно-технологического моделирования интегральных схем

к. т. н. Красюков А. Ю.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
a_kras@org.miet.ru

Приведено описание программы приборно-технологического моделирования для кремниевых КМОП- и BCD-технологий как отечественного инструмента для разработки новых и модификации существующих маршрутов изготовления кремниевых интегральных схем.
Ключевые слова: отечественный САПР; технологическое моделирование; приборное моделирование; визуализация; кремниевая технология; окисление; имплантация; диффузия; расчет электрических характеристик.

Программы моделирования технологических процессов компаний Synopsys и Silvaco (США) широко используются при разработке новых и модернизации существующих маршрутов изготовления кремниевых интегральных схем. В современных условиях, ввиду экономических ограничений, отечественные разработчики ЭКБ уже лишены возможности пользоваться такими продуктами, что вызвало потребность в разработке собственных программ такого типа.

Разработанные решения направлены на создание программных модулей, позволяющих проводить моделирование технологических маршрутов изготовления интегральных схем в двумерном приближении, приборное моделирование работы интегральных схем в двумерном приближении, а также визуализировать данные приборно-технологического моделирования.

Программные модули разрабатываются в рамках ОКР «Разработка программы двумерного приборно-технологического моделирования для кремниевых КМОП- и BCD-технологий», шифр «Программа-ПТМ».

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- детализированы основные модели, параметры, алгоритмы и форматы файлов для программных модулей технологического, приборного моделирования, а также средств визуализации;
- реализация макетов каждого модуля на программном уровне;
- разработка проекта программы и методики испытаний макета каждого программного модуля;
- проведение предварительных испытаний макета каждого программного модуля.

Разработаны модели для технологического и приборного моделирования кремниевых технологий и систематизированы коэффициенты этих моделей из коммерческого аналога. Разработано описание форматов файлов для хранения сеток и одномерных и двумерных результатов расчетов, приведено описание внутренней структуры этих файлов. Разработано описание алгоритмов для технологического моделирования процессов ионной имплантации, окисления и диффузии, нанесения и удаления слоев. Описаны модели ионной имплантации с использованием

аналитических распределений Пирсона и двойного Пирсона. Разработан алгоритм моделирования процесса ионной имплантации.

Описаны модели окисления Дила — Гроува и Массуда с учетом влияния ориентации поверхности подложки, давления и состава газовой среды. Разработан алгоритм моделирования процесса окисления кремния. Описаны модели диффузии в диэлектриках и полупроводниках. Разработан алгоритм моделирования процесса диффузии примесей.

Разработано описание алгоритмов для расчета электрических характеристик полупроводниковых приборов.

Интегрированы материалы по разработке проекта программы визуализации результатов приборно-технологического моделирования в одномерном и двумерном приближениях.

УДК 519.688

Программные средства для моделирования и проектирования элементов дифракционной и интегральной оптики и оптоэлектроники

Игошин В. Д., Чугунов С. С., Макаренко А. О., Спиридонов С. И., Сахно Д. И., Кохановский А. Ю., Щербаков А. А.
Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А
alexey.shcherbakov@metalab.ifmo.ru

Представлены обзор разработок группы в области численных методов решения электродинамических задач и программных пакетов для моделирования элементов дифракционной и интегральной оптики, светодиодов, оптических систем с пространственными модуляторами света, включая дифракционные оптические нейронные сети.
Ключевые слова: дифракционные решетки; оптические системы; оптические волноводы; оптоэлектронные компоненты.

Численные модели и программные пакеты в области строгой и приближенной теории дифракции имеют обширные применения в дифракционной и интегральной оптики, фотолитографии, оптоэлектронике, лазерной физике и проекционной оптике. Проектирование высокоэффективных элементов и приборов требует привлечения и физических принципов, и быстрых численных алгоритмов, и современных методов программирования. При этом критической важностью обладает эффективность решения как прямых, так и обратных задач.

Нами были предложены и разработаны новые формулировки модальных и интегральных методов в области строгой теории дифракции для эффективного расчета оптических полей как в дальней, так и в ближней зонах излучения [1, 2]. Продемонстрирована возможность реализации методов с применением малоранговых тензорных аппроксимаций для проведения расчетов с логарифмической асимптотической сложностью [3]. Разработано программное обеспечение для моделирования и оптимизации дифракционных решеток, интегральных волноводных структур, элементов дифракционной оптики, светодиодов и солнечных элементов, оптических схем с дифракционными оптическими элементами и пространственными модуляторами света. Часть программ выложена для ознакомления в форме открытого кода на github-аккаунте лаборатории [4]. Отдельная библиотека SVETlANNa для моделирования оптических нейроморфных вычислителей и дифракционных нейронных сетей была разработана в рамках гранта Фонда содействия инновациям. Разработанные методы и программы могут найти широкое применение в традиционных упомянутых приложениях, а также в появляющихся задачах, связанных с оптическими реализациями нейроморфных вычислителей.

Литература

1. Shcherbakov A. A., Tishchenko A. V. New fast and memory-sparing method for rigorous electromagnetic analysis of 2D periodic dielectric structures // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 2012. Vol. 113. P. 158.

2. Shcherbakov A. A. Calculation of the electromagnetic scattering by non-spherical particles based on the volume integral equation in the spherical wave function basis // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 2019. Vol. 231. P. 102.
3. Levdik E., Shcherbakov A. A. Logarithmically complex rigorous Fourier space solution to the 1D grating diffraction problem // Comp. Phys. Commun., 2025. Vol. 310. P. 109530.
4. CompPhysLab: программы // CompPhysLab. URL: https://github.com/CompPhysLab (дата обращения: 12.07.2025).

УДК 621.396.721

Разработка многоканального приемо-передающего модуля со встроенным многоканальным IQ-модемом

Цыпленков Ю. С.[1], Баранов В. В.[2], Овчинников В. Г.[3]
[1] ООО «СИНТЕЗАТОР-НН»
603152, г. Нижний Новгород, ул. Ларина, 22Г
synthesprom@yandex.ru
[2] АО «ФНПЦ «ННИИРТ»
603950, г. Нижний Новгород, ул. Шапошникова, 5
dj_poteha@mail.ru
[3] АО «НПП «Полет»
603011, г. Нижний Новгород, пл. Комсомольская, 1
ovchinnikovvg@yandex.ru

Представлены результаты технического проектирования опытного образца многоканального приемо-передающего модуля со встроенным многоканальным IQ-модемом, предназначенного для преобразования квадратурных сигналов I и Q в высокочастотную область, частотной фильтрации, усиления, фильтрации гармоник, приема радиосигналов, усиления, фильтрации, преобразования в низкочастотную область с последующей фильтрацией продуктов преобразования, передачи данных в процессор обработки информации.
Ключевые слова: квадратурные сигналы; приемо-передающий модуль; IQ-модем; цифровая модуляция 256QAM; скорость передачи данных; ширина полосы сигнала; система беспроводной радиосвязи стандарта LTE.

Цель работы: разработать конструкторскую документацию и изготовить опытный образец многоканального приемо-передающего модуля со встроенным многоканальным IQ-модемом для применения в составе антенного модуля системы беспроводной радиосвязи стандарта LTE (Long-Term Evolution).

Постановка задачи

В целях реализации программы импортозамещения поставлена задача заменить базовые станции компании Huawei, аналогичные серии RRU5904 (компактная) LTE стандарта 3GPP TS 36.104 на отечественные многоканальные базовые станции, работающие в диапазоне частот 2,3-2,4 ГГц с выходной мощностью передающего тракта в каждом канале не менее 5 Вт и коэффициентом шума приемного тракта в каждом канале не более 3 дБ.

Основные характеристики:

1) диапазон рабочих частот от 2300 до 2400 МГц;
2) возможные полосы частот 1,4; 3; 5; 10; 15; 20; 80; 100 МГц;
3) количество приемо-передающих каналов — 16;
4) наличие фазовой когерентности сигнала локального гетеродина всех каналов (подводимых к квадратурным модуляторам и демодуляторам);
5) на входе каждого передающего канала и выходе каждого приемного канала сигнал подводится в I- и Q-квадратурах и центр его спектра находится на нулевой частоте;

6) наличие калибровочного порта для калибровки приемных каналов по фазе и амплитуде;
7) применяемые виды модуляции сигнала — QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM;
8) диапазон рабочих температур от −40 до +55 градусов.

Решение

Проведен анализ российских и зарубежных разработок и определен метод, который лег в основу разрабатываемого модуля, — это прямое преобразование частоты вверх с помощью квадратурного модулятора и прямое преобразование частоты вниз с помощью квадратурного демодулятора. Данный метод, в отличие от супергетеродинной схемы и схемы с полностью цифровым приемником, позволяет получить выходной сигнал на высокой частоте с более качественным спектром и одновременно достичь пониженного уровня побочных каналов приема, отстроивших от каналов низких порядков, которые могут быть отфильтрованы до заданного уровня. Фильтрация рабочей полосы сигнала перед транспонированием вверх в такой схеме происходит фильтрами нижних частот (ФНЧ), которые обеспечивают высокую идентичность и гладкость амплитудно-частотной и фазочастотной характеристики тракта.

Описание разрабатываемой продукции

Многоканальный приемо-передающий модуль со встроенным многоканальным IQ-модемом (далее по тексту — модуль) реализован в виде малогабаритного брызгозащищенного модуля, состоящего из 16 одноканальных приемо-передающих узлов, 16 узлов IQ-модема, двух делителей мощности сигнала калибровки передатчика, двух делителей мощности сигнала гетеродина, двух делителей мощности сигнала калибровки приемника, делителя мощности на два, двух узлов управления и двух узлов питания. Структурная схема модуля LTE представлена на рис. 1.

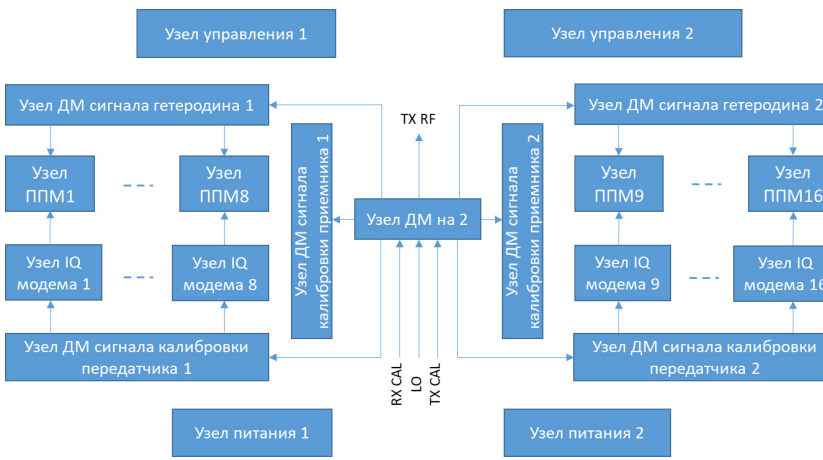


Рис. 1. Структурная схема модуля LTE

Модуль состоит из двух субмодулей, каждый из которых реализует функцию 8-канального приема, преобразования сигнала на высокую частоту, усиления и фильтрации квадратурных сигналов I и Q с последующим приемом, фильтрацией и демодуляцией на нулевую частоту. Конструктивно модуль состоит из двух корпусов — нижней и верхней частей, соединенных между собой через уплотнительный шнур для выполнения требований к изделию по брызго- и влагозащищенности (IP 54).

Описание элементов структурной схемы изделия

№	Наименование	Кол-во в модуле, шт.	Назначение
1	Узел ППМ	16	Усиление до заданного уровня мощности, фильтрация гармоник, прием, усиление и фильтрация.
2	Узел IQ-модема	16	Модуляция и демодуляция сигнала, фильтрация, усиление.
3	Узел делителя сигнала калибровки передатчика	2	Для усиления, фильтрации и деления сигнала калибровки передатчика на 8 каналов
4	Узел делителя сигнала гетеродина	2	Для усиления, фильтрации и деления сигнала гетеродина на 8 каналов
5	Узел делителя сигнала калибровки приемника	2	Для фильтрации и деления сигнала калибровки приемника на 8 каналов
6	Узел делителя сигнала на 2	1	Для фильтрации и деления внешних сигналов калибровки передатчика, калибровки приемника, сигнала гетеродина на 2 канала
7	Узел питания	2	Для преобразования и фильтрации входного напряжения −48 В в стабилизированные напряжения +28, +12, +5 В, необходимые для питания входящих в модуль узлов
8	Узел управления	2	Для приема внешних команд управления, обработки и выдачи кодов управления на входящие узлы модуля с помощью цифровых интерфейсов SPI и RS485

Полученные результаты

Проведен расчет многоканального приемо-передающего модуля со встроенным многоканальным IQ-модемом, получены оценочные характеристики приемного и передающего трактов, подготовлен технический проект. Разработана конструкторская документация на входящие узлы и модуль в целом, разработано программное обеспечение для управления режимами работы модуля в условиях, приближенных к реальным. Изготовлены отдельные узлы, корпуса, кабельные сборки, ведутся регулировочные работы.

Промышленная применимость

Разработанный опытный образец приемо-передающего модуля со встроенным многоканальным IQ-модемом является базовым элементом в системе радиосвязи стандарта LTE (рис. 2). По результатам положительных испытаний будет принято решение о запуске мелкосерийного производства данных изделий на территории Российской Федерации.

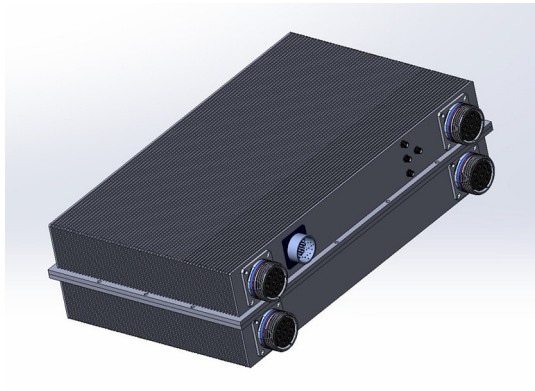


Рис. 2. Многоканальный приемо-передающий модуль со встроенным многоканальным IQ-модемом (3D-модель)

Литература

1. RRU5904 V100R016C10. Technical Specifications. Huawei Technologies Co., Ltd., 2020.
2. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 15.301-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. — М.: Стандартинформ, 2016.

Локализация передающего тракта базовых станций сетей связи стандартов LTE/5G

Долгов С. П.[1], Евстигнеев А. А.[1], Романовский С. М.[1], Савченко Е. М.[2], Першин А. Д.[2], Евлампьев А. Ю.[2], Дудин А. Л.[3], Шуков И. В.[3]
[1] ООО НПП «Радар-Прибор»
111123, г. Москва, ул. Плеханова, 6, корп. 30
[2] ООО «ИнноЦентр ВАО»
107023, г. Москва, Семёновская площадь, 1А
[3] АО «Светлана-Рост»
194156, г. Санкт-Петербург, просп. Энгельса, 27

В условиях необходимости локализации российские производители телекоммуникационного оборудования столкнулись с проблемой обеспечения СВЧ-усилителями радиомодулей базовых станций сетей 4G/LTE и 5G.

ООО НПП «Радар-Прибор» в сотрудничестве с ООО «ИнноЦентр ВАО» и АО «Светлана-Рост» провели исследования по разработке таких усилителей на различных вариантах GaN-транзисторов.

Были созданы усилительные тракты с выходной пиковой мощностью 300 Вт в диапазоне частот 2,5–2,7 ГГц по схеме Догерти с использованием ЭКБ:

- иностранного производства (NXP, Ampleon, Dynax)
- разработанной ООО «ИнноЦентр ВАО»;
- разработанной АО «Светлана-Рост».

Сравнительные испытания подтвердили, что российские разработки показывают характеристики, сопоставимые с иностранными аналогами.

Проведенная работа показывает, что создание полностью российских СВЧ-усилителей мощности для нужд телекоммуникационной отрасли технически возможно, присутствуют все необходимые компетенции от роста подложек до создания законченных радиотехнических изделий. Для обеспечения технико-экономических показателей серийное производство на сегодняшний день возможно с использованием кристаллов, изготовленных на зарубежных фабриках. При разворачивании начатого АО «Светлана-Рост» серийного производства мощных GaN-транзисторов до необходимых объемов выпуска станет возможна практически полная локализация радиочастотных трактов базовых станций.

В дальнейшем необходимо провести разработку передающих трактов на другие частотные диапазоны для расширения литерного ряда, включая диапазоны 5G.

GaN-усилитель мощности Ku-диапазона для использования в составе линии связи

Редька Ал. В., Радченко А. В., Матвеев А. Д.
АО «Микроволновые системы»
105122, г. Москва, Щелковское ш., 5, стр. 1

Разработан усилитель мощности Ku-диапазона со встроенным источником питания и модулем управления. Проведены измерения основных параметров усилителя мощности. Описываются особенности применения GaN элементной базы в составе аппаратуры радиолиний связи.
Ключевые слова: GaN элементная база; усилитель мощности; СВЧ; линии связи; Ku-диапазон.

В настоящее время скорость передачи данных в различных системах связи достигла больших значений. На этом прогресс не останавливается. От скорости и объема передаваемой за сеанс информации зависит качество получаемой абонентом связи.

Несомненно, применение GaN элементной базы в составе такой аппаратуры имеет свои преимущества (например, увеличение уровня выходной мощности с обеспечением достаточно неплохого уровня коэффициента полезного действия, уменьшение размеров аппаратуры и пр.), но и накладывает определенные ограничения на ее применение.

Высокий уровень выходной мощности одновременно с высоким КПД при применении GaN ЭКБ достигается в большинстве случаев за счет работы изделия при высоком уровне компрессии (которая может достигать 6–10 дБ). При этом для аппаратуры связи важна линейность, что особенно принципиально при работе с сигналами с различной фазовой модуляцией.

Нелинейность сигнала приводит к потере данных, а также к невозможности нормальной работы аппаратуры широкополосных систем связи.

АО «Микроволновые системы» разработан и изготовлен блок СВЧ-усилителя мощности Ku-диапазона с выходной мощностью не менее 10 Вт, работающий в линейном режиме. Проведены измерения IP3 (не более минус 21 дБн) и анализ их влияния на показатель качества модулированного сигнала, учитывающий искажения, вызванные QPSK-модуляцией.

УДК 623.482

Оценка коэффициента усиления СВЧ-тракта приемного канала с помощью положительной обратной связи

Карасев М. С.[1], к. т. н., Алексеев О. С.[2], Щёголев С. А.[1], Кинденов Д. С.[1]
[1] АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
info@istokmw.ru
[2] АО «НИИП имени В. В. Тихомирова»
14180, г. Жуковский, ул. Гагарина, 3

В работе представлено схемотехническое решение по формированию контролируемой положительной обратной связи, с помощью которой программными методами можно оценить значение коэффициента усиления приемного канала в режиме реального времени.
Ключевые слова: положительная обратная связь; приемный канал; коэффициент усиления.

В составе многоканальных приемных или приемо-передающих модулей при окончательных проверках значений коэффициентов усиления (КУ) приемных каналов результаты измерений сохраняются в базу данных и используются в дальнейшем при отладке, тестировании и организации текущего контроля КУ каналов в составе радиолокационной станции (РЛС). Однако реальное значение КУ приемного канала в процессе работы РЛС может меняться под воздействием различных факторов. В существующих многоканальных изделиях, используемых в составе перспективных РЛС, отсутствуют элементы, позволяющие определить действующее значение коэффициента усиления приемного канала, что влияет на надежность самого изделия и точность получения информации о цели.

В работе [1] приведена методика оценки КУ с помощью положительной обратной связи (ПОС). Однако оценка КУ производится за счет функций элементов основного СВЧ-тракта модуля, что влияет на точность получения значения КУ, а также затрагивает множество внешних узлов, отвечающих за управление амплитудой и фазой проходящего сигнала. Также основной СВЧ-тракт не имеет конкретной привязки к рабочему диапазону частот, а отсутствие замкнутости входа и выхода приемного канала при возникновении самовозбуждения может влиять на внешние составные части РЛС.

Предлагаемое решение задачи оценки КУ подразумевает использование набора простых функциональных узлов с минимальным набором управлений, установленных в ответвленную часть СВЧ-тракта и имеющих привязку к требуемому диапазону частот, в котором возникает самовозбуждение.

Литература

1. Карасев М. С. Оперативный контроль электрических параметров приемо-передающих модулей X-диапазона частот // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2021. — Вып. 3 (550). — С. 6–14.
2. Гостюхин В. Л., Трусов В. Н., Гостюхин А. В. Активные фазированные антенные решетки // Радиотехника, 2011. — 304 с.
3. Малахов Р. Ю. Антенные решетки современных радиоэлектронных систем. — М.: Доброе слово, 2015. — 208 с.

УДК 621.385.69

Мероприятия по совершенствованию технологических процессов, трудоемкости и материалоемкости серийно выпускаемых СВЧ-модулей

Кузьмина Ю. В., к. т. н., Щербаков С. В., к. т. н.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
info@istokmw.com

Разработан план мероприятий по совершенствованию технологических процессов, трудоемкости и материалоемкости серийно выпускаемых СВЧ-модулей. Проведена оценка эффективности проводимых в соответствии с планом работ.

Ключевые слова: технологический процесс; трудоемкость; материалоемкость; СВЧ-модуль.

Для крупносерийного предприятия, выпускающего продукцию двойного назначения, актуальными являются регулярно проводимые плановые мероприятия по оптимизации производства в целях повышения качества выпускаемых изделий и снижения брака за счет усовершенствования технологических процессов. Кроме того, актуальным остается вопрос по ежегодному согласованию с контролирующими органами величины трудоемкости в рамках действующих и пролонгируемых контрактов. В статье приведены результаты проведенных предприятием комплексных мероприятий на примере крупного выпуска СВЧ-модуля по гибридно-интегральной технологии с использованием ЭКБ собственного производства и покупной.

Разработке и внедрению плана мероприятий предшествует предварительный технико-экономический анализ показателей серийного производства модулей СВЧ, оценка состояния технологического оборудования, статус реализации программ по модернизациям, обновлениям парка оборудования, оценка трудозатрат, оценка качества используемых сырья и материалов. По результатам проведенного комплексного анализа был утвержден уточненный план организационно-технических мероприятий по совершенствованию технологических процессов за счет автоматизации, отработки техпроцессов в целях снижения коэффициентов запуска и увеличению показателя повторяемости, размещения производства некоторых узлов в сторонних организациях, усовершенствования конструкций вспомогательных оснасток, оптимизации отдельных операций, увеличения производительности технологической линии по производству монолитно-интегральных схем, используемых в качестве ЭКБ, замены некачественных сырья и материалов.

Таким образом, проводимые предприятием вышеуказанные мероприятия позволили повысить качество серийно выпускаемых модулей СВЧ, снизить технологическую трудоемкость за счет увеличения процента выхода годных изделий, узлов, деталей и входящих комплектующих изделий и, следовательно, сохранить конкурентоспособную цену на изделие на рынке.

Литература

1. Духновский М. П., Смирнова А. К., Федоров Ю. Ю., Щербаков С. В. Особенности технологии изготовления и применения алмазных теплоотводов в электронных СВЧ модулях // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 404–405.
2. Темнов А. М., Дудинов К. В., Красник В. А., Богданов Ю. М., Крутов А. В., Лапин В. Г., Щербаков С. В. Комплект широкополосных СВЧ-микросхем на гетероструктурах A^3B^5 для ППМ АФАР X-диапазона // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2010 — № 2 (505) — С. 39–49.

УДК 621.37

Проблемы и особенности проектирования систем вторичного электропитания для приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток РЛС

Вялов А. А.[1], Дмитриков В. Ф.[2], Исаев В. М.[1], Шушпанов Д. В.[2]
[1] АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
[2] Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
193232, г. Санкт-Петербург, просп. Большевиков, 22, корп. 1, лит. А, Ж

Рассмотрены основные проблемы и особенности проектирования систем вторичного электропитания для приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток РЛС: работа импульсного преобразователя напряжения (ИПН) на переменную импульсную нагрузку и вопросы устойчивости ИПН при построении системы электропитания.
Ключевые слова: приемо-передающий модуль; активная фазированная антенная решетка; импульсный преобразователь напряжения; распределенная система электропитания; устойчивость; электромагнитная совместимость.

В настоящее время разработчики радиолокационных станций проявляют повышенный интерес к радиолокационным комплексам на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР), которые по сравнению с пассивными решетками имеют существенные преимущества. Данная тенденция связана прежде всего с появлением малогабаритных приемо-передающих модулей (ППМ), которые размещаются непосредственно на полотне антенны.

Электропитание таких модулей может осуществляться различными способами, однако для любой системы электропитания в первую очередь должны соблюдаться следующие требования:

а) минимальная масса системы (особенно ее части, размещаемой на полотне антенны);

б) максимальная надежность;

в) максимальный КПД.

ППМ АФАР в зависимости от диапазона рабочих частот и выходной мощности обычно требуется одно напряжение в пределах от 10 до 50 В по наиболее мощному (основному) каналу. Такие системы питания строятся по одной из трех технологий:

- централизованная, в которой все потребители питаются от одного или нескольких мощных источников;
- децентрализованная, в которой каждый потребитель имеет свой источник питания;
- гибридная.

Выбор схемы зависит от многих факторов: типа носителя (космическое или авиационное базирование), формы и размеров полотна антенны, числа ППМ, номиналов питающих напряжений и токов потребления ППМ и др.

Особо следует отметить, что для ППМ АФАР критичным является качество напряжения ее питания как на приеме, так и на передаче. Любые пульсации, шумы,

нестабильности по питанию на линейном участке усиления работы ППМ приводят к амплитудной модуляции сигнала и ухудшению селекции и сопровождения цели.

Главной неприятной особенностью для модулей источников питания ППМ АФАР является тот факт, что они работают в ключевом режиме (КПД 95–98 %) на переменную импульсную нагрузку, изменяющуюся от нуля до 100 % за единицы микросекунд. Такой режим в ключевых устройствах сопровождается очень плохим качеством переходных процессов, т. е. появлением больших сверхтоков и перенапряжений на элементах импульсных преобразователей напряжения (ИПН) [1, 2].

Вторая принципиальная особенность, свойственная современным энергетически высокоэффективным ИПН модуляционного типа с отрицательной обратной связью (ООС), заключается в том, что они являются дискретно-нелинейными нестационарными динамическими устройствами с комплексными входными и выходными сопротивлениями и с отрицательной вещественной составляющей входного сопротивления. Такие устройства потенциально неустойчивы. В них могут возникать различные нелинейные колебания: квазипериодические, субгармонические, хаотические под действием различных возмущающих факторов (изменения входного напряжения, нагрузки, режимов работы ИПН и др.) [3].

Современные распределенные системы электропитания, агрегатированные (сложные, составные) приборы, содержащие ИПН модуляционного типа с ШИМ, ЧИМ или ФИМ, являются неразвязанными (неоднонаправленными) системами, их теория только развивается. Развитие теории и проектирование таких систем рассматриваются в работе.

Литература

1. Кушнерёв Н. А., Шумов М. А. Система электропитания активных фазированных антенных решеток // Антенны, 2007. — № 12 (127). — С. 63–69.
2. Дмитриков В. Ф., Петроченко А. Ю., Розанов А. А. Особенности проектирования отрицательной обратной связи и силового сглаживающего фильтра DC/DC преобразователя с импульсными нагрузками для приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток РЛС // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2021. — Т. 24. — № 1. — С. 78–88.
3. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания. — М.: Горячая линия — Телеком, 2018. — 540 с.

УДК 621.282.3

Схемотехнические способы купирования условий электрических деградаций в GaN HEMT

Миннебаев В. М.
АО «Микроволновые системы»
105122, г. Москва, Щелковское ш., 5, стр. 1

Гетероструктурные полевые транзисторы на основе нитрида галлия являются самыми перспективными активными элементами СВЧ, однако и они сталкиваются с проблемами надежности. В докладе представлены схемотехнические решения, позволяющие в значительной степени купировать условия, связанные с электрическими механизмами деградации, включая проблемы с неконтролируемым увеличением токов утечки затвора, пиковых превышений напряжения пробоя сток-исток, горячими электронами и фононами.
Ключевые слова: деградация; GaN HEMT; горячий электрон; горячий фонон; ток утечки; коллапс тока; саморазогрев; дефекты с глубокими уровнями; лавинно-инжекционная неустойчивость.

Классифицировать все механизмы деградации достаточно сложно, для лучшего понимания их, как правило, разделяют на три основных группы: электрические, тепловые и механические. Эти механизмы и их взаимосвязь показаны в так называемом треугольнике взаимодействий, демонстрирующем связи между электрическим, механическим и тепловым взаимодействиями (рис. 1) [1, 2].

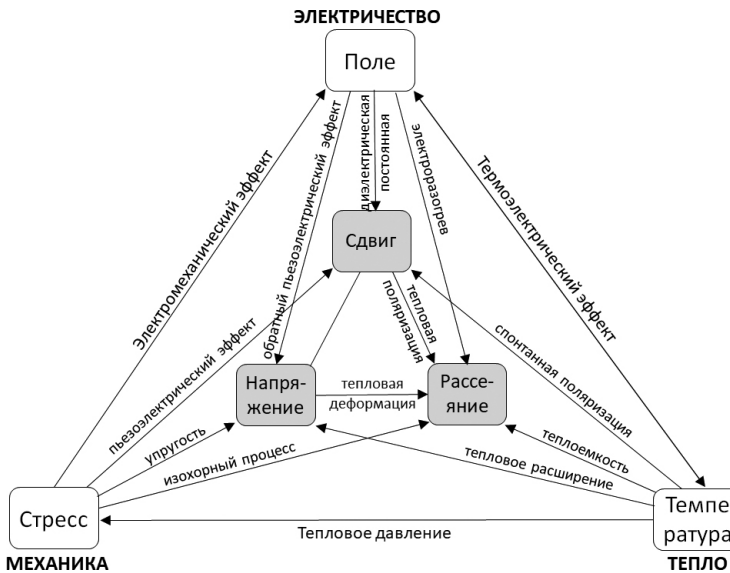


Рис. 1. Полный «треугольник взаимодействий»

GaN HEMT — это устройства, работающие, как правило, в режиме обеднения носителями, поэтому они требуют отрицательного напряжения для затвора и положительного напряжения для стока. Обеспечение и отрицательного, и положительного напряжения не всегда удобно в изделии применения. Кроме того, поскольку транзисторы работают в режиме обеднения, критически важно подавать отрицательное напряжение затвор-исток до того, как будет подано положительное напряжение сток-исток, поскольку в противном случае транзистор будет потреблять максимально возможный ток стока от источника питания, что может привести к избыточному рассеиванию тепла и выходу его из строя. Таким образом, необходимо использовать специальные схемы подачи питания. Еще одной из проблем применения GaN HEMT является ненулевое значение тока утечки затвора, что усугубляется особенностями применения GaN HEMT: высокими уровнем входной мощности, компрессией коэффициента усиления (до 6–10 дБ) и напряжением сток-исток. При этом в зависимости от режимов работы транзистора конструкции гетероструктуры AlGaN/GaN и постростовых процедур изготовления ток утечки затвора может изменяться разнонаправленно, то есть необходимы схемы питания затвора, позволяющие ограничивать ток утечки затвора [3]. Третьей особенностью применения является его использование в импульсном режиме работы, где преимущества GaN HEMT проявляются особенно ярко. При этом с учетом особенностей управления входной СВЧ-мощностью, напряжениями питания затвор-исток и сток-исток, а также конструктивными особенностями изделия применения требуются и схемотехнические решения для цепей подачи питания, и определенная циклограмма работы с учетом электрических параметров HEMT. Схемотехнические и конструктивные решения подробно представлены в докладе.

Литература

1. Миннебаев В. М. Электрические механизмы деградации полевых гетероструктурных транзисторов на основе нитрида галлия // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2021. — № 3 (262). — С. 4–24. DOI: 10.36845/2073-8250-2021-262-3-4-2.
2. Minnebaev V. M. Thermal and mechanical degradation mechanisms in heterostructural field-effect transistors based on gallium nitride // Russian Technology Journal, 2025. Vol. 13 (2). P. 57–73. DOI: 10.32362/2500-316X-2025-13-2-57-73.
3. Патент № RU2501155C1.

УДК 621.396.621.57

Передача информации в бортовые системы с ограниченным потреблением

Богомолов Е. С., Медеев Д. А.
АО «Завод ПРОТОН»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, 10

Проведено исследование приемника в С-диапазоне с двумя схемами включения низкобарьерного детекторного диода ZB-28.
Ключевые слова: бортовые системы; детекторный диод ZB-28; детекторный приемник.

Современные тенденции конструирования приемников в бортовых системах направлены на уменьшение потребления электроэнергии в целях увеличения времени автономной работы при ограниченных ресурсах электропитания. Для приема информации можно использовать стандартные схемы детектирования, построенные на активных компонентах, но не всегда это является возможным из-за их высокого потребления и сравнительно больших массогабаритных размеров. Если не требуется передача большого объема данных, то одним из решений может быть детекторный приемник, реализованный с помощью отечественного низкобарьерного детекторного диода ZB-28 [1]. Передача информации в бортовую систему происходит с помощью амплитудно-модулированного сигнала [2], кодированного через задержку между импульсами в течение заданного интервала времени.

В настоящей работе рассмотрены следующие вопросы:

- особенности схемы включения ФВЧ после диода;
- особенности схемы включения ФНЧ после диода;
- влияние тока смещения на характеристики сигнала;
- влияние согласования на характеристики сигнала.

Полученные результаты:

- амплитуда принятого сигнала в 5 раз выше у схемы с ФНЧ по сравнению со схемой ФВЧ;
- схема с ФВЧ имеет крутые фронты в сигнале, а после схемы с ФНЧ сигнал имеет зарезанные фронты;
- ток смещения в явном виде не улучшает характеристики сигнала;
- согласование улучшает характеристики сигнала.

В результате исследования разработана схема детекторного приемника в С-диапазоне, не требующая питания.

Литература

1. ZB-28 низкобарьерный детекторный диод [Электронный ресурс]. — URL: https://www.micran.ru/upload/iblock/315/b35cqxp3qsemrweyw0dfqwua6g1m6gns/ZB-28_V01.0003.pdf?ysclid=md1fva7mwx193678833 (дата обращения: 13.07.2025).
2. Амплитудная модуляция [Электронный ресурс]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Амплитудная_модуляция (дата обращения: 13.07.2025).

УДК 621.396.6

Компонентная база терагерцевой электроники

Галдецкий А. В., Кичаева Н. А., Щербаков С. В., к. т. н.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
info@istokmw.ru, scherbakov@istokmw.ru

Выполнен обзор использования излучения терагерцевого диапазона в радиоэлектронных системах различного назначения. Рассмотрены схемы построения передающих и приемных устройств терагерцевого излучения и особенности их реализации. Приведены некоторые конструктивные особенности электронных компонентов терагерцевого диапазона и технологий их создания.
Ключевые слова: электромагнитная волна; терагерцевый диапазон; электронный компонент; электровакуумный прибор; полупроводниковый прибор.

Терагерцевый диапазон электромагнитного спектра давно привлекает специалистов различных профессий своими уникальными свойствами (широкая полоса спектра, высокие точностные и проникающие характеристики, соизмеримость длины волны с физическими размерами молекул взаимодействующих веществ и др.), однако только относительно недавно определились основные практические области применения терагерцевых систем: радиоастрономия, молекулярные сенсоры в медицине и биологии, обнаружение и идентификация взрывчатых и вредных химических и биологических веществ, неразрушающая дефектоскопия в системах контроля технологических процессов, системы связи и телекоммуникаций, материаловедение. Это стало возможным благодаря бурному развитию электронных технологий и в целом электронного приборостроения, позволившего создавать приборы терагерцевого диапазона (генераторы, усилители, приемники, преобразователи), использующие различные физические принципы работы.

За рубежом развитие систем терагерцевого диапазона осуществляется в рамках государственных программ, в которых создается, как правило, полный комплекс технических и программных средств для решения конкретных задач, прежде всего военного предназначения. Коммерческая составляющая появляется после решения основных конструктивных, технологических и производственных задач.

В Российской Федерации разработкой приборов и систем терагерцевого диапазона преимущественно занимаются организации РАН. При этом разработки, как правило, не выходят на коммерческий рынок, а остаются в ограниченном применении для решения специальных, в большей степени исследовательских, задач и редко выходят за рамки технологических демонстраторов.

В представленном материале рассмотрены результаты зарубежных и отечественных разработок компонентов терагерцевого диапазона для генерации, усиления, приема и преобразования сигналов, в том числе электровакуумных приборов (ЛБВ) с уровнем выходной мощности 50–100 Вт на частоте 220 ГГц с мгновенной полосой 5 ГГц, выполненных в рамках программ HIFIVE (США), а также разработки серии ЛБВ в частотном диапазоне от 100 до 700 ГГц с выходной мощностью соответственно от 1000 до 0,1 Вт.

В области полупроводниковой терагерцевой электроники особый интерес представляют созданные в рамках программы GRYPHON (США) первый в мире

усилитель мощности, работающий на частоте 1 ТГц на основе 25-нм InP HEMT гетероструктурного транзистора, мощный монолитный усилитель с выходной мощностью 6,7–8,3 дБм на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs mHEMT в частотном диапазоне 280–310 ГГц, а также приборный ряд МИС-усилителей Фраунгоферского университета в диапазонах 75–330 ГГц с выходной мощностью до 15 дБм на основе технологий 130-нм SiGe HBT, 250-нм InP HBT, 35-нм InGaAs mHEMT.

Эти успехи демонстрируют возможности по построению полнономенклатурных рядов приборов СВЧ электроники в терагерцевом диапазоне. И это обусловлено необходимостью формирования на их основе практически безграничного телекоммуникационного пространства как по скорости, так и по объему передачи и приема информации. В этом пространстве могут транслироваться команды, графическая и любая другая информация от различного рода датчиков (технического зрения, радиолокаторов, датчиков физических величин, медицинских показателей и пр.), позволяющая в реальном масштабе времени осуществлять управление и своевременно реагировать на любые вызовы в сфере безопасности и достижения национальных целей.

Литература

1. Wu N., Jin Z., Zhou J. et al. High power 190 GHz frequency doubler based on GaAs Schottky diode // Journal of the Electron Devices Society, 2024. Vol. 2. P. 717–722.
2. Новости СВЧ-техники, № 4, 2025 / Под ред. Кичаевой Н.А., АО «НПП «Исток» им. Шокина».
3. Новости СВЧ-техники, № 2, 2023 / Под ред. Кичаевой Н.А., АО «НПП «Исток» им. Шокина».
4. Новости СВЧ-техники, № 8, 2022 / Под ред. Кичаевой Н.А., АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Некоторые решения для измерения и настройки параметров ЭКБ в интервале температур

Глазунов Р. В.
[1] *ООО «ОТК»*
400074, г. Волгоград, ул. Козловская, 48, пом. 1
[2] *T°Lab*
400074, г. Волгоград, ул. Козловская, 48, пом. 1

В докладе раскрыт накопленный опыт компании по созданию измерительных/настроечных стендов для элементов ЭКБ в интервале температур. Предлагаемые решения упрощают выполнение операций, увеличивают надежность и существенно снижают стоимость стендов.

Наиболее популярное применяемое решение по построению стендов настройки/испытаний ЭКБ является использование стандартной термокамеры, с размещенной в ней оснасткой, с подключением жгутом к внешним измерительным приборам. Данное решение обладает рядом недостатков — снижает объем использования термокамеры, имеет повышенные требования к кабельному материалу и разъемам (термостойкость), сохраняет ограниченность в количестве передаваемых сигналов и их полосы частот, дороговизну и нетехнологичность кабельных сборок.

Опыт компании показывает эффективность применения специальных климатических камер, оптимизированных для создания измерительных стендов. Предлагается к рассмотрению решение с проходной материнской платой backplane и наборов тестовых плат изделий; решение с поворотными дисковыми паллетами изделий и механической коммутацией ВЧ сигналов; решение с виброразвязкой изделий от испытательной камеры (например для измерения фазовых шумов).

Оборудование для предлагаемых решений серийно производится компанией.

Измерения транзистора методом LOAD-PULL с применением активной инжекции

Суконкин С. А.[1], Куртеев Е. Е., Кириллов А. В.[2], Синогин М. В.[2]
[1] ООО «Планар»
454091, г. Челябинск, ул. Елькина, 32
[2] ООО «ТАИР»
634041, г. Томск, просп. Кирова, 51 А, стр. 5

Поставлен эксперимент по построению измерительного комплекса на базе LOAD-PULL с системой активного согласования для СВЧ-транзисторов.
Ключевые слова: LOAD-PULL; согласование транзисторов; активная инжекция сигнала.

На сегодняшний день для создания микросхем с высокой выходной мощностью и КПД требуется построение точных моделей активных элементов (транзисторов, МИС и т. д.), входящих в такую схему. Модель должна описывать работу транзистора/устройства/элемента в широком диапазоне параметров:

- различные уровни напряжений стока и затвора;
- проверка работы элемента при различных импедансах нагрузки |Г| в целях нахождения оптимального значения импеданса, обеспечивающего наилучшие выходные характеристики;
- последующая оптимизация работы транзистора при изменении импеданса на кратных рабочих частотах;
- проверка модели на устойчивость.

Одним из факторов, сдерживающих развитие таких подходов к разработке, является отсутствие измерительных комплексов для создания и верификации таких измерительных моделей. Стандартный ВАЦ для такой задачи подходит плохо, поэтому требуется построение системы, способной решать такие задачи. В рамках работы, проведенной компанией ООО «Планар», были получены результаты, которые показывают принцип построения таких комплексов на базе ВАЦ с дополнительным оборудованием для активного согласования транзистора. При подготовке стенда были разработаны дополнительные узлы и алгоритмы их работы с ВАЦ, которые показали идентичность измерений со стендом компании Maury MW. Результаты эксперимента позволили сформировать требования к подобному измерительному комплексу и начать его разработку как отдельного направления продуктов компании ООО «Планар»

Литература

1. Дансмор Джоэль П. Измерение параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей 2-е издание. — М.: Техносфера, 2023. — С. 513–520.

УДК 621.317.7.023

Отечественная платформа широкополосного измерительного оборудования

Галдин И. В., Елизаров С. Г.
ООО «Мальт Систем»
119333, г. Москва, ул. Фотиевой, 5, стр. 1
info@maltsystem.ru

На основе цифроаналоговой СнК собственной разработки создан модуль генерации и захвата аналоговых данных Alpha. Разрешение — 8 бит, полос —а от DC до 16 ГГц. Разработана платформа широкополосного измерительного оборудования: цифровых генераторов, диджитайзеров, осциллографов и пр. Рассмотрены основные сложности, возникающие при разработке многоканального оборудования, и способы их решения.

Ключевые слова: АЦП; ЦАП; AWG; DSO; СВЧ; осциллограф; диджитайзер; генератор сигналов произвольной формы; синхронизация; Ethernet; PCIe.

Задачи разработки современных приемо-передающих устройств требуют не только высокочастотных (до 16 ГГц и выше), но и многоканальных систем тестирования. Так, для тестирования большинства подстандартов 100-гигабитного Ethernet требуется 4 синхронизированных канала, а для полноценного тестирования устройств PCI Express 6.0 может потребоваться до 16 каналов передачи и столько же — для приема. Большинство новых стандартов передачи используют вместо классической NRZ более сложную модуляцию даже при работе в пределах блока: PAM-4 уже приняты в PCI Express 6-го и 7-го поколения, также PAM-4 ожидается в DDR6. Есть все основания полагать, что тенденция на уплотнение каналов и применение еще более сложных модуляций повышает требования к тестированию физического уровня интерфейсов.

Решить проблему тестирования современных систем связи может измерительное оборудование, разработанное на основе модуля генерации и захвата аналоговых данных Alpha. В сердце модуля — СнК собственной разработки, состоящая из АЦП, ЦАП и интерфейса передачи данных. Вариантов памяти два — встроенная память 4 МБайт XCKU15P или 8 ГБайт VU37P, позволяющие сохранить, с учетом служебных данных, 3,4 мегасемплов или 6,8 гигасемплов. На рис. 1 представлена блок-схема 4-канальной версии диджитайзера. Поскольку объем трафика АЦП, с учетом служебной информации, достигает 600 Гигабит/с, обработать четыре канала с помощью ПЛИС или процессора общего назначения не представляется возможным. В нашем случае прием данных АЦП и первичную обработку производит ПЛИС Xilinx Kintex XCKU15P. Внутри ПЛИС реализована система отсчета реального времени. Полученные пакеты данных АЦП снабжаются метками времени и передаются далее либо сохраняются в память. Прием данных и назначение им меток никогда не прекращаются, даже во время простоя. Таким образом, начиная с инициализации прибора каждый семпл АЦП определен во времени, поэтому задача синхронизации каналов сводится к определению разницы во времени инициализации каналов.

Для понимания источников несинхронности рассмотрим систему тактирования на рис. 2. Несмотря на то что все каналы АЦП тактируются общим генератором, его частота на практике не превышает 1 ГГц и для АЦП со скоростью оцифровки в десятки

гигасемплов в секунду потребуется несколько каскадов умножения частоты, начальные положения которых необходимо синхронизировать. Характерное время сброса цифровых СБИС может составлять десятки наносекунд, в то время как точность синхронизации в один отсчет требует произвести сброс всех микросхем тракта за время меньшее, чем 15 пс, что при ближайшем рассмотрении не является достижимым. Вместо жесткой синхронизации при каждом включении прибора определяется разница во времени инициализации (сброса) АЦП и систем ФАПЧ. В качестве источника синхросигнала используется один из ЦАП нашей СнК. На время калибровки входы АЦП переключаются на ЦАП и производится спуск триггера на синхросигнал. Поскольку, как говорилось ранее, все пакеты данных АЦП имеют метки времени, измерить задержку распространения сигнала тактирования не составляет труда. Путь сигнала от ЦАП до каждого из АЦП, как и путь от внешнего разъема до АЦП, является пассивным, поэтому не требует измерения при каждом включении. Аналогичным способом можно синхронизировать и ЦАП генератора.

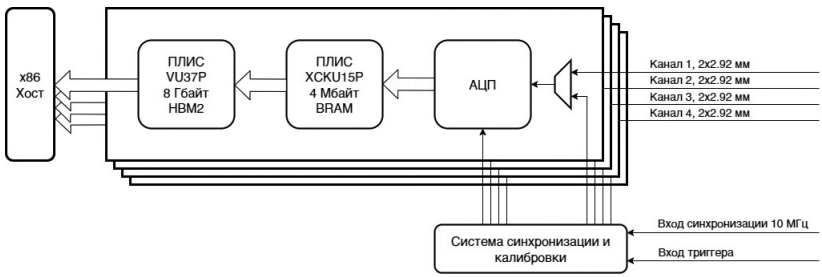


Рис. 1. Блок-схема 4-канального диджитайзера

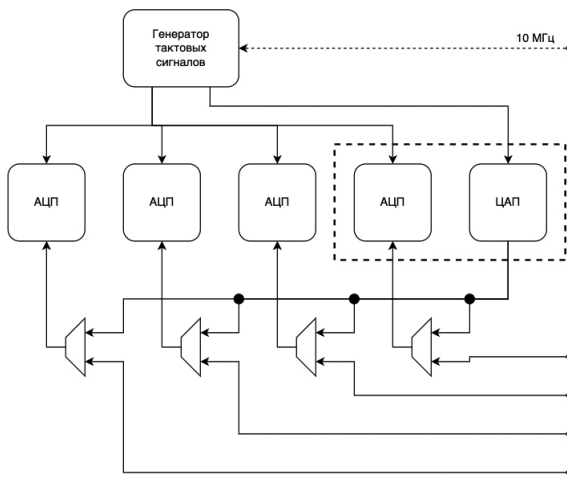


Рис. 2. Система синхронизации и калибровки

Предложенный метод имеет ряд недостатков:

- необходимость проводить синхронизацию при каждом включении;
- ограниченность в реализации режимов энернгосбережения;
- реальная длина выборки для многоканальной системы несколько меньше, чем для одноканальной;
- необходимость в базовой калибровке после каждого вмешательства в конструкцию прибора.

Вместе с тем есть ряд решающих преимуществ:

- высокая точность синхронизации;
- масштабируемость;
- совместимость со стандартами частоты.

Описанное решение позволяет нам реализовывать многоканальные диджитайзеры, осциллографы, генераторы сигналов произвольной формы и комплексные решения для тестирования высокоскоростных интерфейсов с полосой до 16 ГГц и точностью синхронизации каналов не хуже 20 пс.

Анализ параметров переходных процессов для устройств с пристройкой частоты в полосе свыше 25 ГГц

Румянцев К. В.
ООО «РШ Тех»
111250, г. Москва, проезд завода Серп и Молот, 6, корп. 1
kirill.rumyantsev@rsh-tech.ru

Приведен обзор существующих решений для анализа переходных процессов в системах с перестройкой частоты. Показаны преимущества и недостатки таких решений. Проведено сравнение характеристик нового анализатора спектра и фазовых шумов с классическими серийно производимыми осциллографами и анализаторами сигналов в части анализа переходных процессов. Представлена принципиальная схема реализации двухканального метода анализа переходных процессов, реализованная на базе анализатора спектра и фазовых шумов RSH Tech PSA. Приведены примеры реальных измерений и полученных результатов.

Ключевые слова: переходные процессы; перестройка частоты; измерение; анализатор; измерение; радиолокация; связь; БПЛА.

Измерение переходных процессов при перестройке частоты в радиоэлектронике — это классическая задача для разработчиков источников сигнала формирователей частоты и т. п. Особый интерес к таким видам анализа сигналов в последнее время связан с развитием устройств принцип работы которых подразумевает изменение рабочей частоты или скачкообразную перестройку. К таким средствам можно отнести радары, системы управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и системы их анализа и подавления, системы радиосвязи и другие аналогичные устройства.

При использовании осциллографа существует ряд практических ограничений. К таким ограничениям можно отнести следующие:

- высокая стоимость сверхширокополосных АЦП и осциллографов на их основе;
- узкий динамический диапазон широкополосного осциллографа (менее 50 дБ);
- сложность оценки профиля изменения мощности;
- отсутствие серийно производимых в РФ осциллографов с полосой выше 2 ГГц.

Другим решением является анализатор сигналов и спектра, с широкополосным АЦП. В таких устройствах диапазон входных частот составляет до 100 ГГц и даже выше.

Серийно производимые анализаторы сигналов имеют существенное преимущество перед широкополосными осциллографами по стоимости и динамическому диапазону при переходе к номиналам входных частот свыше 10 ГГц и ширине полос анализируемой перестройки от десятков до сотен мегагерц. Однако, несмотря на широкий диапазон частот входа имеют схожее с осциллографами ограничение по полосе анализа самого переходного процесса. При этом такие приборы,

во-первых, тоже являются сверх дорогостоящими, а во-вторых не позволяют оценивать перестройку в полосе сравнимой с частотным диапазоном работы анализатора.

Решение проблемы с шириной полосы перестройки может быть найдено при построении анализатора спектра(приемника) с двухканальной архитектурой входного тракта. Подобная архитектура применена в приборе PSA производимом компанией ООО «РШ Тех»

Принципиальная схема приема сигнала приведена на рис. 1.

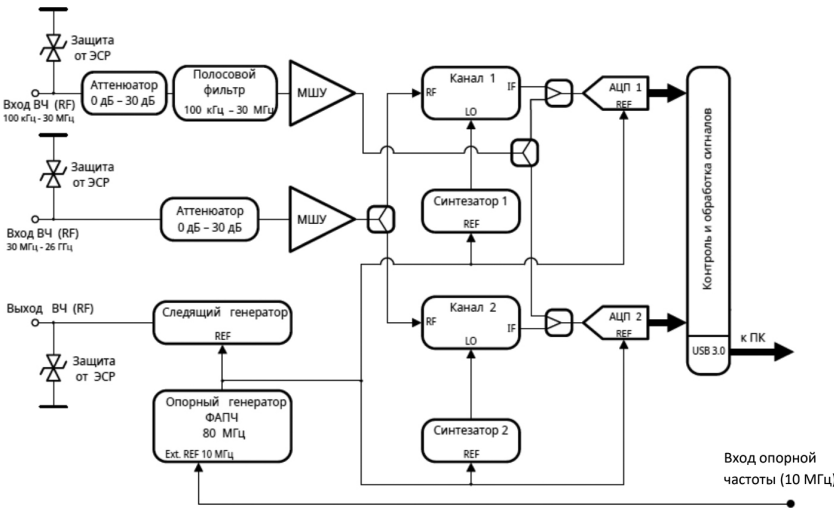


Рис. 1. Структурная схема анализатора спектра и фазовых шумов RSH Tech PSA

В режиме анализа переходного процесса частота приема одного канала настраивается на начальную частоту исследуемого устройства (ИУ), частота приема второго канала на конечную. Оцифровка сигнала ведется в узком (2 МГц) или широком (20 МГц) канале, по выбору пользователя. Срабатывание обеспечивается триггером по видеосигналу на втором канале. Оцифровка и запись сигнала на обоих каналах ведется синхронно и непрерывно в кольцевой буфер. При наступлении события запуска запись останавливается, обеспечивая временные рамки около 500 мс до и после момента запуска. Далее происходит фильтрация и математическая обработка данных с отображением двух кривых во временном диапазоне (см. рис. 2.). Синяя кривая — начальная частота, канал 2; зеленая кривая-частота перестройки, канал 1. Интерес может представлять профиль изменения частоты или фазы, а также статистический анализ изменения уровня мощности, частоты или фазы одного из каналов. Графический интерфейс прибора PSA и встроенные в него соответствующие функции позволяют отобразить данные характеристики.

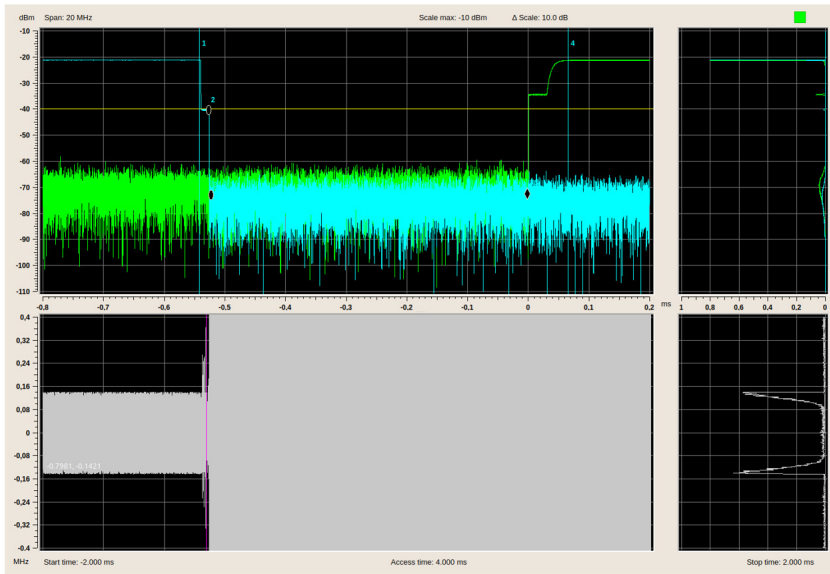


Рис. 2. Результат измерения переходного процесса генератора. Перестройка с 1 до 4 ГГц

Описанный выше алгоритм работы и управления прибором позволяет анализировать переходные процессы с временным разрешением до 100 нс, при ширине полосы анализа 20 МГц.

Так же можно выделить ряд преимуществ RSH Tech PSA, которые могут быть востребованны именно российскими пользователями:

- широкий динамический диапазон анализа мощности и невысокой стоимостью;
- возможность контроля профиля мощности, что типично для СВЧ-измерений;
- полоса доступной перестройки более 25 ГГц при невысокой стоимости решения.

Результаты предварительной тестовой эксплуатации показывают возможность применения данного изделия для измерения источников сигнала, используемых в системах радиолокации, радиосвязи и других радиоэлектронных устройствах, требующих контроля скорости перестройки рабочей частоты.

Литература

1. Frequency and Phase settling time measurements on PLL circuits, application note, 06/2018, www.rohde-schwarz.com.
2. Simplified analysis of frequency agile radars, application card, www.rohde-schwarz.com.
3. Раушер К., Йассен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа / пер. С. М. Смольского, 2-е издание. — Горячая линия-Телеком, 2014.
4. PSA08/13/26, Руководство пользователя.

УДК 621.317

Алгоритм измерений S-параметров калибровочных пластин с использованием специального эталона единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи микроэлектронных устройств на пластине

Бондаренко А. С.[1], к. т. н., Боровков А. С.[1,2], д. т. н., Малай И. М.[1,2], Михайлов П. Д.[1], к. т. н., Пивак А. В.[1], Раков А. В.[1], Семёнов В. А.[1], Смотрова Д. А.[1]

[1] ФГУП «ВНИИФТРИ»

141570, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)

bondarenko@vniiftri.ru, borovkov@vniiftri.ru, malay@vniiftri.ru, mih_pavel@vniiftri.ru, alexey.pivak@gmail.com, rakov@vniiftri.ru, smnv@vniiftri.ru, smotrova@vniiftri.ru

[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе описаны основные функции разрабатываемого специального эталона единиц комплексных коэффициентов отражения и комплексных коэффициентов передачи микроэлектронных структур, реализованных на пластине. Представлен порядок выполнения операций при передаче единиц данных параметров от специального эталона. Показаны функциональные возможности программного обеспечения эталона. Проведено сравнение результатов измерений, полученных с помощью программы Qalibria и программного обеспечения разрабатываемого специального эталона. Показана сходимость полученных результатов в пределах заданных погрешностей.

Ключевые слова: измерения на пластине; комплексный коэффициент отражения; комплексный коэффициент передачи; векторный анализатор цепей; калибровочная пластина; копланарная линия передачи.

Измерение S-параметров микроэлектронных структур на пластине является важнейшей операцией при их разработке и серийном производстве. В настоящий момент отсутствует единство измерений параметров микроэлектронных структур на пластине, что не позволяет обеспечить требуемый уровень качества производимой продукции. В целях решения данной проблемы во ФГУП «ВНИИФТРИ» ведется разработка специального эталона единиц комплексного коэффициента отражения (ККО) и комплексного коэффициента передачи микроэлектронных структур на пластине в диапазоне частот до 110 ГГц [1, 2].

В работе представлен алгоритм определения электрических характеристик калибровочной пластины, которые необходимы для дальнейшего определения S-параметров. Одна из основных операций алгоритма — определение значений погонной емкости линий передачи, которая является ключевым параметром для определения характеристического сопротивления линии передачи в данном виде измерений [3]. Разработано специальное программное обеспечение (ПО) для определения значений погонной емкости. Показана сходимость полученных результатов с результатами из паспорта на калибровочные пластины [4].

В ПО специального эталона отсчет показаний нескорректированных S-параметров проводится без применения заводской калибровки векторного анализатора цепей (ВАЦ). После этого проводится обработка нескорректированных результатов измерений различными алгоритмами калибровок, такими как Multiline TRL (mTRL), SOLT. Алгоритм mTRL является основным как наиболее точный. В составе алгоритма калибровки используются меры Thru (линия нулевой длины), Reflect (мера короткозамкнутая), Line (линии ненулевой длины). Для получения достоверных результатов измерений S-параметров алгоритмом mTRL необходимо учитывать погонную емкость для пересчета из собственного характеристического сопротивления линии передачи в характеристический импеданс измерительной системы.

В результате сравнительного анализа установлено, что максимальное расхождение определения ККО калибровочной меры на пластине не превышает 0,01 в диапазоне частот до 67 ГГц.

Литература

1. Малай И. М. Этапы создания и перспективные направления развития метрологического обеспечения в области радиоэлектронных измерений // Альманах современной метрологии: науч.-технич. журн, 2020. — № 1. — С. 65 — 82.
2. Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Семёнов В. А. Эталон единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи микроэлектронных структур на пластине // Наноиндустрия, 2021. Спецвыпуск 7s. — Т. 14. — С. 450 — 453. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.450.454.
3. Marks R. B. and Williams D. F. // Journal of Research of the Nation Institute of Standards and Technology. Vol. 97. № 5 September-October 1992. P. 534–561.
4. Бондаренко А. С., Боровков А. С., Малай И. М., Михайлов П. Д., Пивак А. В., Раков А. В., Семёнов В. А., Смотрова Д. А., Чирков И. П. Определение волнового сопротивления копланарной линии эталонной калибровочной пластины // XIII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 24–28 февраля 2025 г. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2025. — С. 129.

УДК 621.382

Сравнение способов реализации нелинейной модели СВЧ-транзистора в САПР

Попов А. А.[1], к. т. н., Добуш И. М.[1], к. т. н., Дудинов К. В.[2], Зыков Д. Д.[3], к. т. н.
[1] ООО «50ом Технолоджиз»
634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 147
artem.popov@50ohm.tech
[2] АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
kvdudinov@istokmw.ru
[3] ООО «Центр проектирования и технологий полупроводниковых изделий»
123592, г. Москва, ул. Кулакова, 20, корп. 1
d.zykov@i-pdk.ru

Представлены результаты переноса нелинейной модели отечественного интегрального СВЧ-транзистора, реализованной в виде блоков уравнений, на язык описания аппаратуры Verilog-A. Проведена оценка скорости расчета двух вариантов модели при использовании различных методов анализа, приведено сравнение рассчитываемых в САПР характеристик.

Ключевые слова: СВЧ-транзистор; нелинейная модель; САПР; SDD-блок; Verilog-A.

В стандартных библиотеках элементов современных коммерческих САПР СВЧ-устройств реализован целый ряд нелинейных моделей СВЧ-транзисторов, таких как Materka [1], EE-HEMT [2], Angelov [3], ASM-HEMT [4] и др. Основное ограничение этих моделей — отсутствие доступа к структуре эквивалентной схемы и математическим уравнениям, вследствие чего в модель невозможно внести какие-либо изменения для учета тех или иных особенностей транзистора и техпроцесса, по которому он изготовлен.

Для устранения этих ограничений в некоторых коммерческих САПР предусмотрены специальные элементы, характеристики которых могут быть рассчитаны по заданным нелинейным уравнениям. В частности, в популярной САПР Keysight PathWave ADS в качестве таких элементов выступают блоки, определяемые символьно (symbolically defined devices, или SDD-блоки). Основная идея использования таких блоков заключается в том, что пользователь может выбрать конечное число выводов и задать алгебраические выражения, связывающие токи и напряжения на этих выводах. Анализ литературы показывает, что SDD-блоки находят широкое применение в области моделирования транзисторов в случаях, когда в стандартной библиотеке САПР отсутствует реализация какой-либо нелинейной модели либо если в известной модели необходимо учесть дополнительные эффекты [5, 6].

Современной альтернативой SDD-блокам является специализированный язык описания аппаратуры Verilog-A, который используется в качестве стандарта для разработки моделей компонентов в симуляторах электронных схем [7]. В Verilog-A компоненты описываются через систему узлов и ветвей, а для формирования уравнений эквивалентной схемы применяются законы Кирхгофа.

На данный момент поддержка языка Verilog-A имеется в большинстве САПР, где присутствует SPICE-подобный симулятор электронных схем, вследствие чего

любая модель, реализованная на Verilog-A, может быть загружена в систему схемотехнического моделирования для анализа характеристик разрабатываемого устройства.

В настоящей работе представлены результаты переноса нелинейной модели интегрального транзистора производства АО «НПП «Исток» им. Шокина», составленной из SDD-блоков, на язык Verilog-A, проведено сравнение скорости расчета данных моделей на постоянном токе, а также в режимах малого и большого сигналов. По результатам расчетов проведено сравнение точности соответствия характеристик данных моделей и отмечены достоинства и недостатки использования рассмотренных вариантов реализации нелинейной модели.

Литература

1. Materka A., KacprzakT. Computer Calculation of Large-Signal GaAs FET Amplifier Characteristics // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1985. Vol. 33. № 2. P. 129–135.
2. Xu J., Zhang A., Gao J. Direct parameter extraction method of EEHEMT nonlinear model for InP HEMT // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 2023. P. e3140.
3. Angelov I., Andersson K., Schreurs D. et al. Large-signal modelling and comparison of AlGaN/GaN HEMTs and SiC MESFETs // 2006 Asia-Pacific Microwave Conference. — IEEE, 2006. Vol. 1. P. 279–282.
4. Khandelwal S., Chauhan Y.S., Fjeldly T.A. et al. ASM GaN: Industry Standard Model for GaN RF and Power Devices—Part 1: DC, CV, and RF Model // IEEE Transactions on Electron Devices. IEEE, 2019. Vol. 66. № 1. P. 80–86.
5. Pengelly R.S., Wood S.M., Milligan J.W. et al. A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. IEEE, 2012. Vol. 60. № 6. P. 1764–1783.
6. Xiaobin L., Dechun G., Weihua Y. et al. Implementation of mmWave AlGaN/GaN HEMTs and Power Amplifier MMICs // Microwave Journal, 2015. Vol. 58. № 2. P. 94.
7. McAndrew C.C., Coram G.J., Gullapalli K.K. et al. Best Practices for Compact Modeling in Verilog-A // IEEE Journal of the Electron Devices Society. IEEE, 2015. Vol. 3. № 5. P. 383–396.

Опыт разработки технологического процесса изготовления GaAs СВЧ монолитно-интегральных схем на основе малошумящего транзистора с длиной Т-образного затвора 150 нм

к. т. н. Ерофеев Е. В.
АО «НПФ Микран»
119034, г. Москва, ул. Остоженка, 28

На сегодняшний день для создания монолитно-интегральных схем малошумящих усилителей, одно- и многофункциональных схем управления амплитудой и фазой СВЧ-сигнала используется технологический процесс изготовления GaAs СВЧ монолитно-интегральных схем на основе малошумящего транзистора с длиной Т-образного затвора 150 нм.

В настоящей работе представлены результаты разработки технологического процесса изготовления GaAs СВЧ монолитно-интегральных схем на основе малошумящего транзистора с длиной Т-образного затвора 150 нм.

Для создания транзисторов использовались гетероэпитаксиальные структуры, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs диаметром 100 мм. Разработанный технологический процесс состоял из 10 блоков операций по формированию: 1 — мезаизоляции активных областей транзисторов, а также объемных резисторов; 2 — омических контактов к областям стока и истока транзисторов; 3 — Т-образного затвора с длиной основания 150 нм; 4 — тонкопленочных резисторов с удельным сопротивлением 50 Ом/кв; 5 — металлизации первого уровня с толщиной 1 мкм; 6 — диэлектрика конденсаторов с удельной емкостью 400 пФ/мм^2; 7 — металлизации второго уровня толщиной 2 мкм; 8 — утонения пластины до толщины 100 мкм; 9 — сквозных отверстий; 10 — металлизации обратной стороны толщиной 3,5 мкм.

Исследовались вольт-амперные, малосигнальные, шумовые и динамические характеристики малошумящего транзистора (ширина затвора 4×75 мкм), изготовленного по разработанному техпроцессу. При использовании разработанного технологического процесса был разработан и изготовлен перечень СВЧ монолитно-интегральных схем демонстраторов на различные диапазоны рабочих частот. В докладе представлены результаты измерений электрических параметров демонстраторов.

УДК 537.86:621.315.591

Реализация интегрированного механизма учета изменчивости технологического процесса в комплексном инструменте проектирования PDK SVR pHEMT05D

Медведев Р. С., Пушница И. С., Филаретов А. Г.
АО «Светлана-Рост»
194156, г. Санкт-Петербург, просп. Энгельса, 27, лит. АД, офис 208
info@svrosr.ru

Приведены положения, принятые во внимание при разработке механизма учета изменчивости технологического процесса при проектировании СВЧ МИС, описание его практического внедрения в PDK SVR pHEMT05 и пример применения при проектировании СВЧ интегральных микросхем.
Ключевые слова: СВЧ МИС; изменчивость; анализ; PDK; Монте-Карло; статистика; технология.

Применение статистических методов контроля технологических процессов (ТП) и отображение статистических моментов каждого контролируемого параметра ТП в действующей информационной системе поддержки технологий позволяют распространить статистические методы на прогнозирование выхода годных разработанных изделий СВЧ МИС с учетом текущей изменчивости ТП. В докладе обсуждаются основные положения, обосновывающие корректность применения метода Монте-Карло для определения влияния зафиксированной в информационной системе изменчивости параметров создаваемых пассивных элементов на выход годных изготавливаемых СВЧ-микросхем.

Продемонстрировано применение инструмента статистического анализа в САПР AWR DE — YIELD ANALYSIS, основанного на методе статистических испытаний Монте-Карло — применении случайных чисел с заданным распределением вероятностей. Инструмент YIELD ANALYSIS позволяет проводить расчет вариаций работы микросхем при заданных значениях вариаций параметров элементов.

В разработанном нами инструменте параметры элементов, участвующие в анализе, представляют собой параметры ТП. Источником сведений о передаваемых в инструмент YIELD ANALYSIS значениях вариаций параметров ТП являются зафиксированные в информационной системе поддержки ТП статистические моменты его параметров, полученные в ходе статистического контроля технологического процесса. Для проектирования микросхем с использованием разработанного нами комплексного инструмента проектирования (PDK) эти сведения внедрены в библиотеку элементов (PDK SVR pHEMT05 v.2.9.4).

Продемонстрирована связь коэффициента выхода годных при изготовлении разработанных СВЧ МИС с взаимным соотношением изменчивости ТП с установленным для МИС диапазоном допустимых значений ее параметров.

УДК 621.3.049.77

Результаты исследования СВЧ нитрид-галлиевых транзисторов по технологическому процессу D025GH

Дудинов К. В., Красник В. А., Рогачёв И. А., Добров А. В., Куликов П. В., Орехова О. А., Котосонова А. В., Берников Б. О.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
kvdudinov@istokmw.ru

В данной статье рассматриваются результаты исследования тестовых транзисторов по технологическому процессу D025GH. Исследовано влияние конструктивных параметров, таких как длина канала, и двух типов полевых электродов.

Ключевые слова: GaN; pHEMT; СВЧ-транзистор.

Введение

Благодаря своим параметрам, таким как напряжение пробоя, скорость насыщения электронов, ширина запрещенной зоны и высокая плотность двумерного электронного газа (ДЭГ), AlGaN/GaN HEMT-транзисторы используются в СВЧ-аппаратуре [1–4]. Сосредоточение электрического поля приводит к большим пикам электрического поля на электродах стока и затвора в AlGaN/GaN HEMT, что приводит к увеличению тока утечки и, как следствие, снижению напряжения пробоя устройства. Для повышения напряжения пробоя рассмотрен ряд стратегий, включая конструкцию полевых электродов (FP) [5, 6], оптимизацию расстояния сток-затвор, разработку пассивирующих пленок, буферный слой, легированный углеродом и железом [7], обратный барьерный слой AlGaN [8]. В вышеупомянутых методах увеличение пробивного напряжения может быть достигнуто за счет снижения пикового электрического поля на электродах. При разработке конструкции СВЧ-транзистора для технологического процесса D025GH наше внимание было сосредоточено на экспериментальном исследовании влияния геометрических размеров канальной области транзистора, включая конструкцию полевых электродов.

Влияние расстояния сток-исток на характеристики СВЧ-транзистора

Исследование проводилось на основе разрабатываемого типового технологического процесса D025GH на карбидокремниевой подложке (SiC) с топологической нормой $L_з = 0{,}25$ мкм. В целях оптимизации расстояния затвор-сток ($L_{зс}$) разработана конструкторская документация с возможностью вариантного исполнения конструкций транзисторов с различной длиной канала (или расстоянием сток-исток) транзисторов 2, 3 и 4 мкм (см. рис. 1). Поскольку расстояние затвор-исток ($L_{зи}$) является минимально возможным и фиксированным, то расстояние затвор-сток ($L_{зс}$) является практически однозначно определенным через расстояние сток-исток ($L_{си}$):

$$L_{зс} = L_{си} - L_{зи} - L_з, \quad (1)$$

где $L_з$ — длина затвора, $L_{зи}$ — расстояние затвор-исток, $L_{си}$ — расстояние сток-исток.

Результаты измерения пробивных напряжений, выходной мощности транзисторов представлены на рис. 2 и 3.

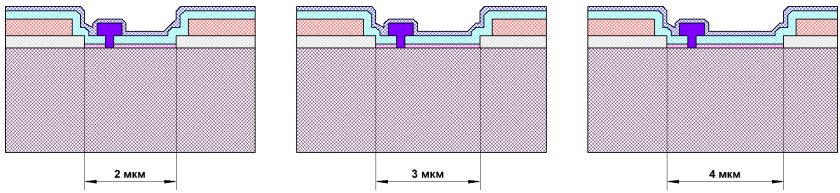


Рис. 1. Транзисторы с длиной канала транзисторов $L_{си}$ = 2, 3 и 4 мкм

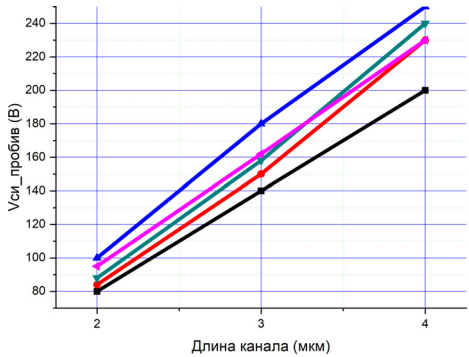


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения сток-исток от длины канала

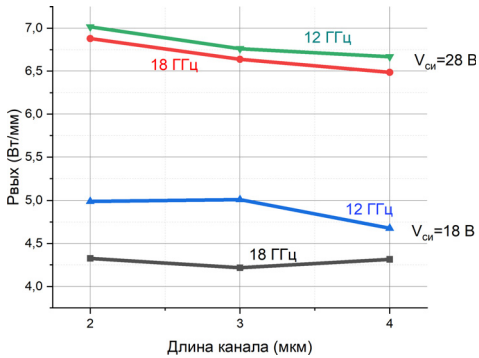


Рис. 3. Максимальная выходная мощность в зависимости от длины канала $L_{си}$ транзистора

Пробивное напряжение $V_{си_пробивное}$ измерялось следующим образом: на затвор-исток транзистора подавалось напряжение $V_{зи} = -10$ В, а на сток-истоке транзистора развертывалось напряжение $V_{си}$ в диапазоне от 0 до 240 В до тех пор, пока

ток стока (затвора) I_c не достигнет величины 1 мА/мм. Минимальное напряжение пробоя $V_{\text{си_пробивное}}$ ~ 80 В наблюдалось при длине канала $L_{\text{си}} = 2$ мкм. Максимальное напряжение пробоя $V_{\text{си_пробивное}} \geq 200$ В наблюдалось при длине канала $L_{\text{си}} = 4$ мкм. Целевому значению пробивного напряжения $V_{\text{си_пробивное}} = 120$ В для технологического процесса D025GH соответствует длина канала $L_{\text{си}} = 3$ мкм.

Экспериментальные данные показывают небольшой спад выходной мощности (≈0,5 Вт) в зависимости от длины канала $L_{\text{си}}$ при рабочем напряжении $V_{\text{си}} = 28$ В, что связано с ростом паразитного стокого сопротивления из-за увеличения расстояния затвор-сток ($L_{\text{зс}}$).

Влияние конструкции полевого электрода на характеристики СВЧ-транзистора

Также на основе разрабатываемого типового технологического процесса D025GH изготовлен набор тестовых транзисторов с двумя полевыми электродами: затворный полевой электрод (Gate Field Plate или GFP) с полевым электродом, соединенный с истоком (Source Field Plate или SFP), показанные на рис. 4, для транзисторов с длиной канала 3 и 4 мкм.

Полевой электрод типа GFP имеет «нависание» длиной ~0,45 мкм над стоковой областью канала с толщиной Si_3N_4 около 150 нм. Полевой электрод типа SFP выполнен в различных вариантах (версии V1, V2, V3 и V4) как по месту расположения в канале транзистора, так и по ширине полевого электрода (см. рис. 5).

Результаты измерения пробивных напряжений, выходной мощности транзисторов с двумя полевыми электродами представлены на рис. 6 и 7.

Измерения пробивного напряжения сток-исток в низкочастотном режиме (100 Гц) не выявили какого-либо значительного влияния на величину пробивного напряжения от использования двух типов полевого электрода (сравните рис. 2 и 6).

Сравнивая результаты измерения максимальной выходной мощности транзисторов (см. рис. 3 и 7), отметим, что максимальная выходная мощность для транзистора с одним полевым электродом (GFP) выше на ~0,5 Вт/мм, чем для транзисторов с двумя полевыми электродами (GFP и SFP).

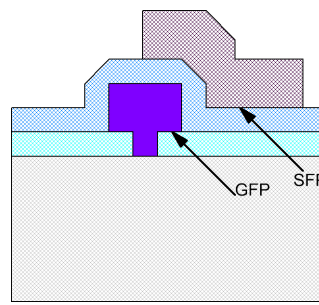


Рис. 4. Затворный полевой электрод — GFP и полевой электрод, соединенный с истоком, — SFP

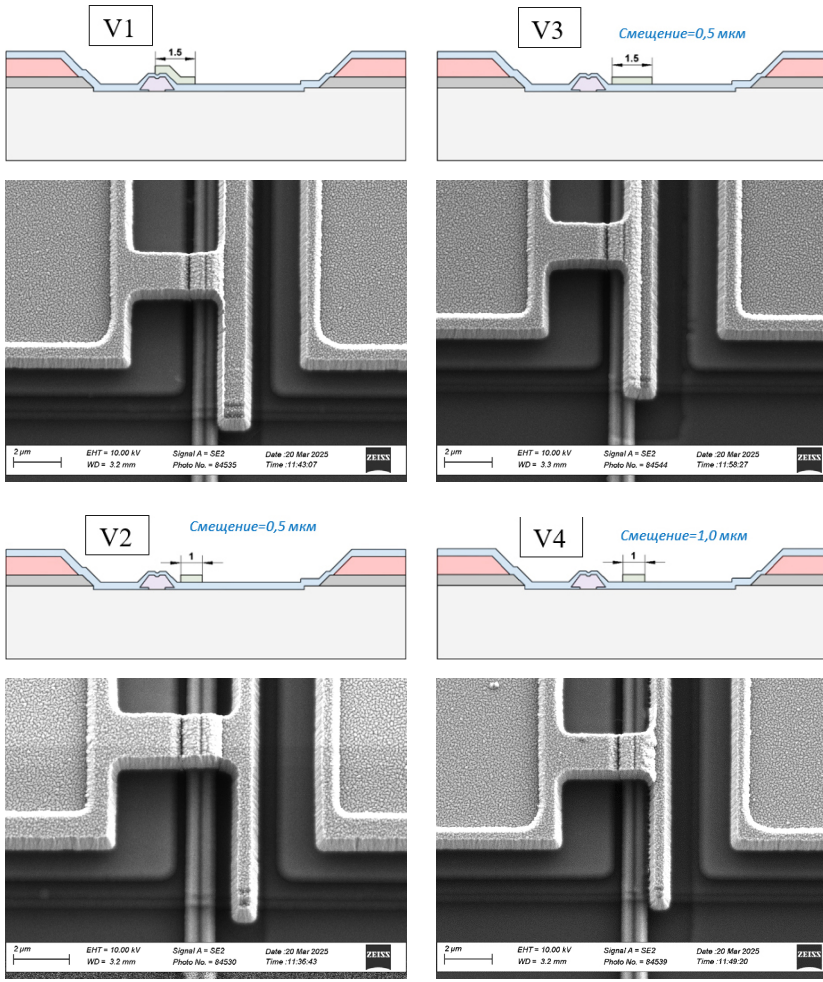


Рис. 5. Версии конструкции полевых электродов

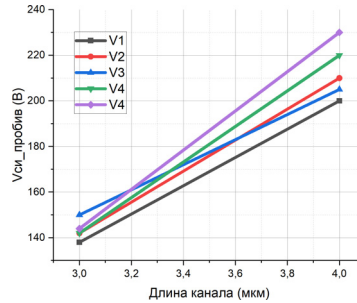


Рис. 6. Зависимость пробивного напряжения сток-исток для транзистора с двумя полевыми электродами (GFP и SFP)

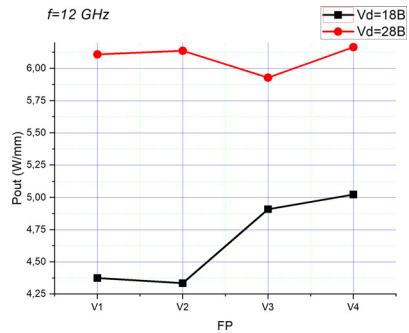


Рис. 7. Результаты измерения максимальной выходной мощности для транзисторов с двумя полевыми электродами (GFP и SFP версий V1, V2, V3 и V4)

Заключение

Представлено экспериментальное исследование тестовых транзисторов по технологическому процессу D025GH. Исследовано влияние конструктивных параметров, таких как длина канала, и двух типов полевых электродов. Целевому значению пробивного напряжения $V_{\text{си_пробивное}} = 120$ В для технологического процесса D025GH соответствует длина канала $L_{\text{си}} = 3$ мкм. Исследование использования полевых электродов двух типов GFP и SFP показало, что дополнительный полевой электрод SFP не дает заметного выигрыша по пробивному напряжению. Применение двух типов полевых электродов снижает максимальную выходную мощность приблизительно на ~0,5 Вт/мм.

Литература

1. Wu Y.-F., Saxler A., Moore M., Smith R., Sheppard S., Chavarkar P., Wisleder T., Mishra U. and Parikh P. 30-w/mm GaN HEMTs by field plate optimization // IEEE Electron Device Letters, 2004. Vol. 25. № 3. P. 117–119.

2. Moon J., Wu S., Wong D., Milosavljevic I., Conway A., Hashimoto P., Hu M., Antcliffe M. and Micovic M. Gate-recessed AlGaN-GaN HEMTs for high-performance millimeter-wave applications // IEEE Electron Device Letters, 2005. Vol. 26. № 6. P. 348–350.
3. Bordoloi S., Ray A. and Trivedi G. Access region stack engineering for mitigation of degradation in AlGaN/GaN HEMTs with field plate // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2022. Vol. 22. № 1. P. 73–84.
4. Bordoloi S., Ray A., Barman P. and Trivedi G. Investigation of electric field profile and associated parameters with embedded metal layer in field plate AlGaN/GaN HEMTs // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2236. № 1. IOP Publishing, 2022. P. 012005.
5. Xing H., Dora Y., Chini A., Heikman S., Keller S. and Mishra U. High breakdown voltage AlGaN-GaN HEMTs achieved by multiple field plates // IEEE Electron Device Letters, 2004. Vol. 25. № 4. P. 161–163.
6. Karmalkar S. and Mishra U. K. Enhancement of breakdown voltage in AlGaN/GaN high electron mobility transistors using a field plate // IEEE transactions on electron devices, 2001. Vol. 48. № 8. P. 1515–1521.
7. Li J. et al. Normally-off operation power AlGaN/GaN HFETt // 2004 Proceedings of the 16th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. IEEE, 2004. P. 369–372.
8. Bahat-Treidel E., Hilt O., Brunner F., Sidorov V., Wurfl J. and Trankle G. AlGaN/GaN/AlGaN DH-HEMTs breakdown voltage enhancement using multiple grating field plates (mgfps) // IEEE Transactions on Electron Devices, 2010. Vol. 57. № 6. P. 1208–1216.

Технологический процесс GaN на кремнии с топологической нормой 0,25 мкм в НИЦ «Курчатовский институт»

к. ф.-м. н. Занавескин Максим Леонидович
НИЦ «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

В НИЦ «Курчатовский институт» завершается разработка СВЧ технологического процесса 0,25 мкм GaN/Si с $U_п$ = 28 В на пластинах диаметром 100 мм. Работы проводятся в рамках ОКР «Т-НГ-2» по заказу МПТ РФ. Технология реализуется в парадигме контрактного производства типа foundry, производство дублируется на площадке ЗНТЦ на пластинах диаметром 150 мм. Комплект PDK разработан ООО «Инноцентр ВАО».

В докладе приводятся данные по испытаниям дискретных транзисторов, произведенных по разработанной технологии, а также данные по верификации моделей PDK по load-pull транзисторов и МИС. В импульсном режиме получены значения выходной мощности 60 Вт / 3 ГГц / 40 В с кристалла с периферией 12 мм. В непрерывном режиме получены значения выходной мощности 15 Вт / 5 ГГц / 28 В с кристалла периферией 3,24 мм.

20 июня 2025 года объявлен первый безвозмездный запуск MPW по разработанной технологии. Планируемый срок изготовления кристаллов — декабрь 2025 года. Фактически это первый запуск foundry по нитридной технологии в Российской Федерации.

УДК 621.3.011.73

ИИ в проектировании СВЧ МИС: глобальные тренды и вызовы 2025 года

Горяинов А. Е., к. т. н., Добуш И. М., к. т. н., Калентьев А. А., к. т. н., Сальников А. С., к. т. н., Файль Т. Н., Юлаев А. А., Метель Ю. А., Набережнев Н. А., Швоев В. С., Кабанова Е. В., Лубов Г. П., Метель А. А.
ООО «50ом Технолоджиз»
634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 147
alexey.kalentyev@50ohm.tech

Проведен анализ глобальных трендов и вызовов в области автоматизации проектирования СВЧ МИС с помощью методов ИИ. Выполнено сравнение различных подходов и инструментов с программной платформой 50ohm Tech Circuit Studio. Показано ускорение разработки СВЧ МИС на основе отечественных GaAs и GaN технологических процессов.

Ключевые слова: методы искусственного интеллекта; автоматизация проектирования; СВЧ монолитная интегральная схема; интеллектуальная САПР.

Сегодня методы искусственного интеллекта (ИИ) все активнее внедряются в различные сферы, включая медицину, транспорт и генерацию текста, изображений и видео. Многие области человеческой деятельности, до последнего времени считавшиеся не поддающимися автоматизации, значительно трансформируются под влиянием ИИ. Область разработки и эксплуатации радиотехнических систем, модулей и ЭКБ, требующая глубокой и всесторонней подготовки специалистов, также изменяется под воздействием подходов на основе ИИ. Современные технологии требуют все более сложных и интеллектуальных решений для обработки сигналов, проектирования схем и оптимизации систем. Крупные мировые разработчики САПР микроэлектроники активно исследуют и внедряют методы ИИ в маршруты проектирования [1].

В последние годы кратно возросло количество научных работ и новостных статей, посвященных применению ИИ в различных областях СВЧ-техники, например в задачах синтеза схемных и топологических решений СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) по заданным требованиям [2–3]; ускорения моделирования характеристик с помощью суррогатных моделей, представленных в виде обученной искусственной нейронной сети [4]; автоматизированного переноса проектов СВЧ МИС с одного техпроцесса TSMC на другой [5]. Основная цель этих работ — преодолеть так называемый разрыв в продуктивности [1], когда сложность проектов растет экспоненциально, а производительность человеческого труда — нет. ИИ, будучи обученным на основе экспертных знаний, может взять на себя рутинные задачи, тем самым освободив время инженеров для творческой работы.

Также следует заметить, что только небольшому количеству команд удается развить научные исследования до уровня, на котором возможно их внедрение в промышленность. Можно выделить следующие факторы, влияющие на этот процесс:

- ограниченное количество открытых данных в области СВЧ МИС для обучения моделей ИИ, т. к. компании не готовы делиться своей интеллектуальной собственностью;

- потребность непрерывного финансирования команд, не обладающих на ранних стадиях развития технологии готовым продуктом;
- учет потребностей рынка, включая бесшовную интеграцию разрабатываемых продуктов в традиционные маршруты проектирования;
- непрозрачность алгоритмов ИИ, затрудняющая объяснение принимаемых решений и поиск причин сбоев при проектировании с помощью ИИ и порождающая недоверие со стороны специалистов;
- необходимость создания сильных междисциплинарных команд, включающих специалистов в области СВЧ-техники, сфере ИТ и методов ИИ;
- высокий порог входа в отрасль разработки СВЧ МИС и серьезная конкуренция за молодых специалистов, например, со стороны отрасли ИТ.

В начале 2020-х годов совокупность перечисленных факторов привела к появлению ряда инициатив, нацеленных на создание программных продуктов, призванных кардинально повысить эффективность разработки СВЧ МИС. К их числу относятся: запуск в США в 2024 году программы AIDRFIC (Artificial Intelligence Driven Radio Frequency Integrated Circuit Design Enablement), направленной на адаптацию методов ИИ для проектирования радиочастотных ИС [6], в мае 2025 объявлено о поддержке трех проектов; в 2024 году дизайн-центр Miller MMIC (США) анонсировал RapidRF — платформу для проектирования СВЧ ИС на основе ИИ [7]; в 2022 году авторы настоящей работы представили концепцию, реализацию программных модулей и примеры использования интеллектуальной САПР «Смекалец» для синтеза схемных решений и эскизов топологий ИС СВЧ-диапазона [8].

В докладе проведен анализ основных глобальных трендов и вызовов в области автоматизации проектирования СВЧ ИС с помощью методов ИИ, выполнен анализ существующих работ и инициатив, а также проведено сравнение представленных подходов и инструментов с отечественной интеллектуальной САПР «Смекалец». В докладе представлены результаты разработки СВЧ МИС на основе технологических процессов 0,25 мкм GaAs pHEMT и 0,5 мкм GaN HEMT АО «Светлана-Рост» с помощью программной платформы 50ohm Tech Circuit Studio, входящей в состав САПР «Смекалец».

Литература

1. Sperling E. First-Time Silicon Success Plummets // Semiconductor Engineering, 2025. URL: https://semiengineering.com/first-time-silicon-success-plummets (дата обращения: 12.07.2025).
2. Karahan E. A. et al. Deep-learning enabled generalized inverse design of multi-port radio-frequency and sub-terahertz passives and integrated circuits // Nature communications, 2024. Vol. 15. № 1. P. 10734.
3. Liu B. et al. Layoutcopilot: An LLM-powered multi-agent collaborative framework for interactive analog layout design // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2025. (In Press)
4. Chae H. et al. ML-Assisted RF IC Design Enablement: the New Frontier of AI for EDA // Proceedings of the 30th Asia and South Pacific Design Automation Conference, 2025. P. 683–689.
5. Keysight and Synopsys Ease Transition from N6RF+ to N4P [Электронный ресурс] // EE Times Asia, 2025. — URL: https://www.eetasia.com/keysight-and-synopsys-ease-transition-from-n6rf-to-n4p (дата обращения: 12.07.2025).

6. Artificial Intelligence Driven Radio Frequency Integrated Circuit Design Enablement (AIDRFIC) Program // Natcast. URL: https://natcast.org/research-and-development/aidrfic (дата обращения: 12.07.2025).
7. AI-Driven Design Platform Speeds Up the Design Process of RF MMICs for Next-Gen Wireless Communications // everything RF, 2024. URL: https://www.everythingrf.com/news/details/18825-ai-driven-design-platform-speeds-up-the-design-process-of-rf-mmics-for-next-gen-wireless-communications (дата обращения: 12.07.2025).
8. Калентьев А.А. и др. Интеллектуальная САПР «Смекалец»: быстрый и простой синтез СВЧ интегральных схем // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2022. — № 3 (214). — С. 76–81.

УДК 004.89:621.3

Практическое внедрение ИИ для автоматизации проектирования СВЧ-трактов от документации до расчета

к. т. н., Будяков А. С.
ООО «Новые технологии»
107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 38, стр. 2, пом. 11/2
bas@n-teh.tech

Предлагается концепция и демонстрируется использование ИИ-ассистентов для автоматизации проектирования СВЧ-устройств через конвейер «экстракция — преобразование — расчет — тестирование» (ЭПРТ), который превращает справочную информацию в готовые к тестированию проекты.
Ключевые слова: ИИ-ассистент; САПР; СВЧ-тракт; YandexGPT; отечественная ЭКБ; СВЧ КИТ; РаТрак.

ИИ активно внедряется в высокотехнологичные области, но инженеры СВЧ-аппаратуры сталкиваются со сложными задачами поиска и анализа численных данных, выбора компонентов и т. д. Эти рутинные операции можно автоматизировать с помощью ИИ-агента, работающего по инструкциям на естественном языке.

Для практической реализации ИИ-помощника предлагается концепция четырехэтапного конвейера ЭПРТ.

Экстракция

Осуществляется извлечение технических параметров из PDF-файлов с техническими описаниями на отечественную электронную компонентную базу (ЭКБ). В качестве примера используется документация на отечественные широкополосные усилители СВЧ серии К1324 [1]. Планируется создание автоматизированного конвейера на базе облачных сервисов и нейросетевых моделей для распознавания и систематизации данных по запросу пользователя.

Преобразование

Полученные данные преобразуются в машиночитаемый формат JSON-библиотеки параметров. В качестве примера был разработан телеграм-бот [2] на основе YandexGPT с базой знаний в виде markdown-файлов документации [1], по запросу пользователя бот генерирует ответы на технические вопросы.

Расчет

Сейчас в ручном режиме применяется веб-калькулятор «РаТрак» [3], который позволяет с помощью загруженной JSON-библиотеки рассчитать ключевые параметры радиочастотного тракта. Развитием этого этапа является интеграция через API с ИИ-ассистентом, который будет самостоятельно подбирать компоненты в радиотракт, выполнять расчеты и выводить результаты на проверку.

Тестирование

Финальный и ключевой этап проектирования — экспериментальная проверка результатов. ИИ-ассистент поможет плавно перейти от теоретических расчетов в «РаТрак» к практике. Планируется интегрировать инструментарий с платформой «СВЧ КИТ» [4]. Телеграм-бот будет экспортировать результаты из «РаТрак» в онлайн-конструктор «СВЧ КИТ» [5] и предоставлять пользователю ссылку на проект.

Это позволит не просто получить цифры, а мгновенно визуализировать рассчитанный тракт в виде схемы сборки СВЧ-блоков для быстрого прототипирования.

Литература

1. Микросхемы — Широкополосные СВЧ-усилители [Электронный ресурс]. — URL: https://electron-engine.ru/produkciya/otechestvennaya-ekb/broadband_amplifiers (дата обращения: 12.07.2025).
2. ИИ-агент по ШПУ серии К1324 [Электронный ресурс]. — URL: https://t.me/K1324UV1_bot (дата обращения: 12.07.2025).
3. РаТрак: калькулятор РЧ-трактов v0.5.1 [Электронный ресурс]. — URL: https://n-teh.tech (дата обращения: 12.07.2025).
4. СВЧ-КИТ [Электронный ресурс]. — URL: http://www.svch-kit.ru (дата обращения: 12.07.2025).
5. Онлайн-конструктор «СВЧ-КИТ» [Электронный ресурс]. — URL: https://platform.svch-kit.ru (дата обращения: 12.07.2025).

УДК 621.3.049.779

Исследование частотно-временных параметров запросного сигнала твердотельного РСА на A^3B^5 компонентной базе при проведении натурных испытаний

Воронков О. В.[1], Каевицер Е. В.,[2,3]. Лемперт П. И.,[2] Лычагин А. Ю.[1]
[1] АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а
[2] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
[3] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Разработаны методика и технологическое оборудование для калибровки систем с синтезом апертуры, рассмотрены результаты работы системы с широкополосным запросным сигналом после применения калибровки.
Ключевые слова: калибровка систем с синтезом апертуры; РСА.

В работе исследована зависимость широкополосного сигнала радара с синтезом апертуры при появлении переходных процессов в блоках синтеза, формирования апертуры, усиления и распределения сигнала.

Рассмотрено влияние переходных процессов на характеристики радара при отработке алгоритмического обеспечения на основе натурного моделирования на радиоэлектронных средствах с анализом во временном и частотных доменах, с определением параметров запросных сигналов. Предложена методология калибровки радиотехнического средства при натурных и полунатурных испытаниях для отслеживания характеристик запросного сигнала в целях обеспечения стабильной работы радарной системы при натурных испытаниях.

Разработана контрольная оснастка для применения в натурных стендах имитационной отработки для применения измерения временных параметров запросного сигнала X-, Ka-, Ku-диапазонов на основе твердотельной ЭКБ производства АО «НПП «Исток». Подготовлены рекомендации к применению для полунатурных и натурных полигонов при проведении отработочных испытаний твердотельных РСА.

Литература

1. Петров С. А. «Цифровые» подходы к расширению динамического диапазона широкополосных инфрадинных преобразователей СВЧ // Ural Radio Engineering Journal, 2019. Vol. 3 (4). P. 356–368.

УДК 621.375.026

Разработка комплекта усилителей на основе GaN для front-end приемо-передающих модулей X-диапазона частот

Чибирев Р. А., Баранов Г. В., Дорофеев А. А., д. т. н., Мясников С. Ю., Россов А. С., Панасенко П. В., д. т. н.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
rchibirev@niime.ru

В работе представлена разработка комплекта GaN СВЧ МИС-усилителей для front-end-узла приемо-передающих модулей X-диапазона частот, включающего в себя малошумящий усилитель (МШУ), предварительный усилитель мощности (ПУМ) и выходной усилитель мощности (ВУМ). Обсуждаются особенности проектирования схем, а также приводятся результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: нитрид галлия (GaN); монолитная интегральная схема (МИС); приемо-передающий модуль (ППМ); усилитель мощности (УМ); малошумящий усилитель (МШУ); X-диапазон частот.

С ростом требований к выходной мощности, КПД, надежности, функциональности и габаритным размерам приемо-передающих трактов систем радиолокации, радиосвязи (в том числе SDR и другой РЭА) возникает потребность в создании монолитных интегральных схем входных/выходных усилительных каскадов (front-end) на базе GaN HEMT-технологий [1]. Данный класс технологий отличают высокие показатели пробивного напряжения и плотности выходной мощности усилительных транзисторов, высокое значение прочности транзисторов к уровню входной мощности, возможность реализации однокристального front-end-модуля, а также беспрецедентное значение времени наработки на отказ [2].

Таблица 1. Основные электрические характеристики разработанных GaN СВЧ МИС в рабочем диапазоне 8,5–11,5 ГГц

№ п/п	Тип СВЧ МИС	Основные электрические параметры	Значение	
			Мин.	Макс.
1	Малошумящий усилитель	Коэффициент усиления, дБ	25	—
		Коэффициент шума, дБ	—	2,0
		Уровень 1-дБ компрессии входной мощности, дБВт	–38	—
2	Предварительный усилитель мощности	Коэффициент усиления, дБ	20,0	—
		Выходная мощность насыщения, Вт	1,0	—
3	Выходной усилитель мощности	Выходная мощность, Вт	20	—
		КПД, %	38	—

В данной работе обсуждаются особенности проектирования и представлены результаты исследований параметров полного комплекта СВЧ МИС front-end-узла

для приемо-передающих модулей диапазона частот 8–12 ГГц: предварительный усилитель мощности, выходной усилитель мощности и малошумящий усилитель, изготовленных по 0,25-мкм GaN HEMT-технологии. Значения основных электрических параметров схем представлены в табл. 1. СВЧ-параметры разработанного комплекта МИС позволяют обеспечить их совместное использование в составе ППМ как с GaAs, так и Si СВЧ ЭКБ.

Литература

1. Lee H., Park H.-G., Le V.-D., Nguyen V.-P., Song J.-M., Lee B.-H., Park J.-D. X-band MMICs for a Low-Cost Radar Transmit/Receive Module in 250 nm GaN HEMT Technology // Sensors, 2023. Vol. 23. P. 4840.
2. D'Angelo S., Biondi A., Scappaviva F., Resca D. and Monaco V. A. A GaN MMIC chipset suitable for integration in future X-band spaceborne radar T/R module Frontends // 2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON), Krakow, Poland, 2016. P. 1–4.

УДК 621.396+621.375+621.396.6

Разработка диаграммообразующих кремниевых СВЧ ИС для применения в ППМ АФАР X-диапазона частот

Баранов Г. В., Гусев С. С., Котляров Е. Ю., к. т. н., Маркасов Е. Д., Панасенко П. В., д. т. н.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
sgusev@niime.ru

В работе представлена концепция построения современных малогабаритных многокристальных приемо-передающих модулей АФАР X-диапазона с использованием кремниевой СВЧ ЭКБ. Обсуждаются основные аспекты разработки кремниевых СВЧ интегральных микросхем фазовращателей и аттенюаторов с интегрированными усилителями для компенсации вносимых потерь.
Ключевые слова: КМОП; СВЧ; интегральная микросхема; фазовращатель; аттенюатор; X-диапазон.

В области радиолокации и телекоммуникаций востребованной и актуальной задачей является замещение решений реализации диаграммообразующих блоков на основе GaAs-технологий кремниевыми интегральными схемами отечественного производства в целях снижения стоимости РЭА. В рамках данной концепции подразумевается использование КМОП на объемном кремнии, КНИ КМОП или SiGe БиКМОП многофункциональных интегральных схем самостоятельно или совместно с входными/выходными усилительными каскадами (front-end) на основе GaAs или GaN, объединенных в 2,5D- или 3D-конструктив типа «система в корпусе» [1].

Неоспоримыми преимуществами использования кремниевых технологий являются массовый выпуск, обеспечивающий доступность продукции на отечественном рынке, низкая стоимость, малые габариты схем, низкое энергопотребление и возможность интеграции разнообразных вспомогательных электронных блоков (цифровые блоки управления, аналоговые блоки питания, блоки памяти и др.). Применительно к реализации СВЧ диаграммообразующих блоков на основе кремниевых технологий одной из ключевых проблем является большее по сравнению с A^3B^5 значение начальных потерь из-за относительно высокого уровня проводимости подложки (даже при использовании высокоомной подложки с удельным сопротивлением $\rho > 5$ кОм·см). Решение данной проблемы может заключаться в интеграции буферных усилителей в состав кремниевых СВЧ ИС для компенсации вносимых потерь и межузлового согласования.

Данная работа посвящена аспектам разработки интегральных микросхем фазовращателей и аттенюаторов с компенсацией вносимых потерь в СВЧ-диапазоне частот на основе библиотеки КМОП-техпроцесса с нормами 90 нм для использования в составе приемо-передающих модулей систем АФАР X-диапазона. В рамках данного исследования представлена разработка прототипов образцов интегральных схем с избыточным количеством тестовых площадок для возможности проведения измерений составляющих компонентов. Приведены основные характеристики экспериментальных образцов (коэффициент передачи, точка 1-дБ компрессии, разброс фазы/амплитуды сигнала и др.).

Результаты работы демонстрируют перспективность использования кремниевых технологий для создания высокоинтегрированных СВЧ диаграммобразующих компонентов приемо-передающих модулей, отвечающих современным требованиям к системам радиосвязи и радиолокации, а также принципиальную возможность их реализации в рамках технологий отечественного производств. Дальнейшее развитие разработки проекта предполагает оптимизацию интерфейсов питания, интеграцию цифрового управления, а также доработку схемотехнических и топологических решений в целях улучшения технических характеристик с учетом полученных данных измерений изготовленных прототипов узлов и верификации параметров тестовых элементов.

Литература

1. Красников Г. Я., Панасенко П. В., Волосов А. В. Состояние, проблемы и перспективы технологии квазимонолитных СВЧ-модулей // Российский форум «Микроэлектроника-2022»: Сборник тезисов 8-й научной конференции, Роза Хутор, 02–08 октября 2022 года. — С. 352–352.

УДК 621.3.049

СВЧ МИС IQ-демодулятора

Перепелица Д. Г.
ООО «Систематика Консалтинг»
115114, г. Москва, ул. Летниковская, 4, стр. 5
dperepelitsa@systematica-consulting.ru

Разработана СВЧ МИС IQ-демодулятора Ka-диапазона частот для построения приемных трактов на основе технологии GaAs pHEMT. Приведены характеристики разработанной СВЧ МИС. Показаны варианты построения преобразователей Ka-диапазона частот с применением данной СВЧ МИС.
Ключевые слова: IQ Demodulator; GaAs pHEMT; СВЧ МИС; преобразователь частоты.

СВЧ МИС квадратурного демодулятора состоит из двух двойных балансных смесителей, квадратурного делителя, синфазного делителя мощности Уилкинсона и двух фильтров нижних частот.

Преимущества IQ-демодуляторов:

- отсутствие внешнего полосно-пропускающего фильтра (с очень крутой частотой среза) по входу РЧ;
- преобразование на низкую (baseband) ПЧ;
- подавление зеркального канала приема (с внешним НЧ квадратурным мостом);
- габариты.

В рамках работы по созданию СВЧ МИС IQ-демодулятора были разработаны:

- трансформаторы Маршанда;
- делитель Уилкинсона;
- мост Ланге;
- квадратурный мост;
- фильтр нижних частот;
- двойной балансный смеситель.

При разработке СВЧ МИС IQ-демодулятора были получены высокие значения подавления зеркального канала и развязки LO-RF для выбранной технологии.

Разработка выполнялась специалистом ООО «Систематика Консалтинг». В результате была спроектирована СВЧ МИС IQ-демодулятора. СВЧ МИС является полностью заказной и производится по российской технологии с топологической нормой 250 нм.

Литература

1. IQ, Image Reject & Single Sideband Mixer Primer, Marki Microwave, Inc.

УДК 621.374.42

Статический СВЧ-делитель частоты миллиметрового диапазона длин волн

Баландин Д. А.[1], Брынцев И. В.[1,2], Евлампьев А. Ю.[1,2]
[1] ООО «ИПК «Электрон-Маш»
124482, г. Москва, г. Зеленоград, к. 313А
biv@electron-engine.ru
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

Работа посвящена разработке статического СВЧ-делителя частоты миллиметрового диапазона длин волн. В статье приведены результаты разработки и исследования делителя частоты с учетом потерь в измерительной оснастке и сравнение с импортными аналогами.

Ключевые слова: статический делитель частоты; миллиметровый диапазон; синтезатор частот; фазовый шум.

Изделия миллиметрового диапазона широко используются в беспроводных сетях ближнего действия, автомобильных радарах и перспективных стандартах мобильной связи для новых приложений, охватывающих частоты 28, 36, 45, 73 и 79 ГГц. Для таких приложений требуются синтезаторы частоты с широким диапазоном настройки, высокой точностью и минимальным энергопотреблением [1].

Одним из ключевых компонентов синтезаторов частоты, а также приемопередающих трактов радиолокационных и телекоммуникационных систем являются делители частоты [2]. Для повышения рабочих частот статических делителей частоты используют технологии с транзисторами, обладающими высокой граничной частотой [3]. Кроме того, проводится схемотехническая оптимизация с учетом требований к энергопотреблению, занимаемой площади кристалла и устойчивой работе в миллиметровом диапазоне [1]. Характеристики делителя частоты напрямую влияют на параметры всей системы, что подчеркивает актуальность их дальнейшего развития.

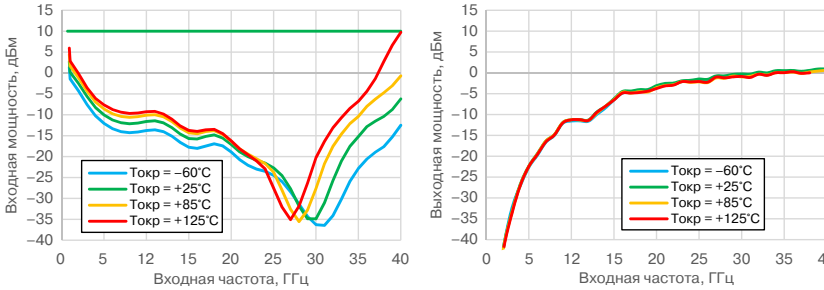
Была разработана СВЧ МИС статического делителя частоты с программируемым коэффициентом деления (КД) на 2, 4, 8 с входной частотой свыше 40 ГГц (рис. 1*а*). Диапазон чувствительности лежит в интервале от −10 до 10 дБм. Микросхема делителя частоты работает в диапазоне температур от −60 до 125 °С. Типовое значение выходной мощности составляет −3 дБм при входной частоте свыше 16 ГГц (рис. 1*б*). Снижение выходной мощности на входных частотах ниже 16 ГГц обусловлено использованием разделительных конденсаторов на выходе кристалла делителя частоты. Относительный уровень фазового шума делителя частоты составляет −150 дБ/Гц (КД = 2). Делитель частоты работает при напряжении питания 3,3 В с током потребления 124 мА. СВЧ МИС согласована по входу и выходу с линией с волновым сопротивлением 50 Ом. Выбор коэффициента деления выполняется при подаче логических уровней на управляющие выводы микросхемы в соответствии с таблицей истинности.

В миллиметровом диапазоне длин волн измерительная оснастка вносит существенные потери, что приводит к снижению чувствительности исследуемой

микросхемы. Представленные результаты измерения чувствительности приведены с учетом компенсации потерь оснастки (деэмбеддинга).

Параметры разработанной микросхемы делителя частоты соответствуют импортным аналогам: UXN40M7K, ASNT8133-KMC, HMC862A, HMC447LC3.

Разработанный делитель частоты доступен в металлоорганическом корпусе MO16-3030-01 и соответствует по габаритам и цоколевке микросхеме делителя частоты HMC862A.



а *б*

Рис. 1. Результаты измерений диапазона чувствительности (*а*) и выходной мощности от входной частоты (*б*) ($U_{пит}$ = 3,3 В, $P_{вх}$ = 0 дБм, КД = 8)

Литература

1. Дингес С., Кочемасов В. Делители частоты. Часть 1. Основные сведения о делителях частоты // Компоненты и технологии, 2019. — № 2 (211). — С. 6–16.
2. Будяков А. С., Савченко Е. М. Особенности разработки ИМС широкополосных делителей частоты // Электроника, микро- и наноэлектроника: Сборник научных трудов 11-й Российской научно-технической конференции, Нижний Новгород, 29 июня — 04 июля 2009 года / под ред. В. Я. Стенина. — М.: НИЯУ МИФИ, 2009. EDN URMJRN.
3. Баландин Д. А., Будяков А. С., Завьялов И. А., Савченко Е. М. СВЧ МИС широкополосного делителя частоты с переменным коэффициентом деления с диапазоном входных частот до 10 ГГц // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: Материалы X научно-технической конференции, Дубна, 12–14 октября 2011 года. — Дубна: Научно-производственное предприятие «Пульсар», 2011. — С. 71–74. EDN XMFEQH.

Практический опыт перевода микросхемы UHF-метки на отечественное производство

Беневоленский Д. В., Кириллова Е. В.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
kirillova@nm-tech.org, benevolensky@nm-tech.org

В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с разработкой кристалла ультравысокочастотной (UHF) беспроводной микросхемы на производстве фабрики-донора по технологии 110 нм, а также описан успешный опыт переноса схем и топологии готового изделия на отечественное производство на базе технологии C250G ООО «НМ-ТЕХ».
Ключевые слова: UHF-метка; ППЗУ EEPROM; технология C250G ООО «НМ-ТЕХ».

Разработанная микросхема UHF-метки соответствует ГОСТ Р 58701-2019 и является пассивной системой радиочастотной идентификации, работающей в частотном диапазоне от 860 до 960 МГц. ИМС состоит из цифровой и аналоговой частей, а блок энергонезависимой памяти ППЗУ EEPROM встроен в цифровую часть как IP-блок. Первоначально топология ИМС была разработана на фабрике-доноре по технологии 110 нм для отработки дизайна. Было произведено несколько запусков тестового кристалла для отладки аналогового модуля и цифровой части ИМС, а также был произведен запуск конечного продукта.

При переносе схем и топологии конечного продукта на отечественную элементную базу была произведена огромная работа по постановке производства блоков памяти ППЗУ на технологии C250G ООО «НМ-ТЕХ». Для отладки СФ аналоговых блоков совместно со статзащитой было выполнено несколько запусков тестового кристалла, а также в этом году был произведен запуск продукта, и мы ждем выхода пластин в сентябре 2025 года. Цифровая часть поддерживает перезапись памяти, блокировку отдельных участков памяти, команду уничтожения метки и также обязательный набор команд согласно ГОСТ. По желанию заказчика могут быть добавлены дополнительные функции аутентификации и криптографии, это поддерживается цифровой частью и показывает ее гибкость. Аналоговый блок состоит из блока выпрямителя-умножителя, блока источника опорного напряжения, блока регулятора напряжения, блока POR (сигнал включения питания), блока генератора импульсов и блока демодулятора. Блок статзащиты включен в аналоговую часть как IP-блок, который был разработан по специальным требованиям для подключения антенны, работоспособной в ультравысокочастотном диапазоне от 860 до 960 МГц при рабочих температурах от −40 до +85 °C и рабочих напряжениях от 40 мВ до 2 В при входной емкости не более 300f. Целевой уровень защиты от ESD по тесту HBM — от 1 до 2 кВ. В перспективе планируется развить эту работу до создания активной RFID-метки со встроенным источником питания для реализации интеграции наших изделий UHF в систему мониторинга эксплуатации ВЛЭП для своевременного выявления и устранения неисправностей, что обеспечивает высокую дальность и надежность связи и является ключевым фактором для эффективного контроля.

Литература

1. ГОСТ Р 58701-2019 (ИСО/МЭК 18000-63:2015).
2. ISO/IEC 18000-6. Information technology —Radio frequency identification for item management. Part 6: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz.
3. ISO/IEC 18000-63. Information technology — Radio frequency identification for item management. Part 63: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz Type C.
4. EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols. Generation-2 UHF RFID. Specification for RFID Air Interface. Protocol for Communications at 860 MHz — 960 MHz. Version 2.0.1 Ratified.

Результаты разработки широкополосного усилителя СВЧ-диапазона с внешним смещением и повышенной энергоэффективностью

Терехин В. В.[1,2]
[1] *ООО «ИПК «Электрон-Маш»*
124482, г. Москва, г. Зеленоград, к. 313А
[2] *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
terekhinvladislav@yandex.ru

Работа посвящена созданию широкополосного СВЧ-усилителя с внешним смещением на базе микросхемы К1324УВ2. В статье приведены результаты моделирования усилителя и сравнение с параметрами трехвыводного варианта.
Ключевые слова: СВЧ-усилитель; широкополосный усилитель; внешнее смещение; КПД; транзистор Дарлингтона; термостабильность; компрессия.

Имеется целый ряд систем, в которых применение широкополосных усилителей (ШПУ) необходимо. Это системы радиоэлектронного подавления (РЭП), драйверы сверскоростных АЦП [1], сверхширокополосная локация, аппаратура тестирования на электромагнитную совместимость, специальные системы передачи данных, измерительная техника [2].

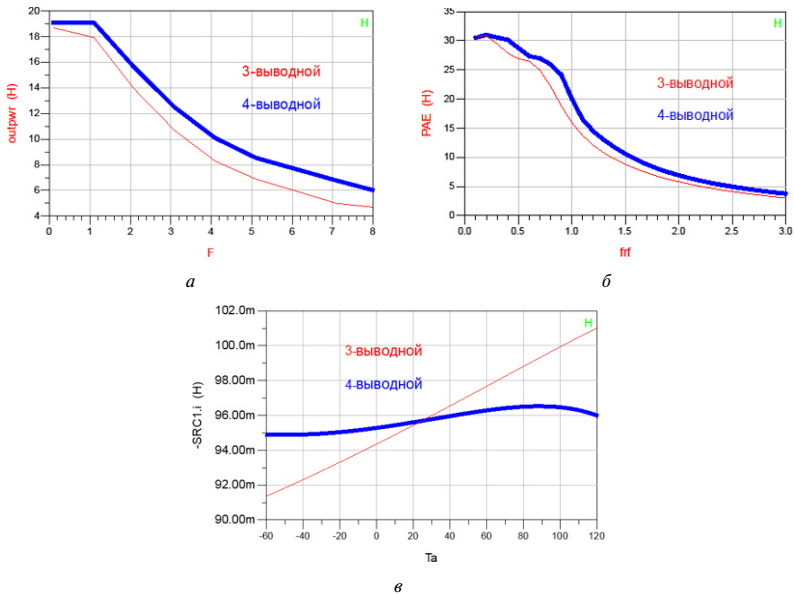
При проектировании широкополосных усилителей СВЧ-диапазона (ШПУ), выполненных на основе составного транзистора Дарлингтона, традиционно используется трехвыводная схема: вход, общий вывод для выхода и питания и земля. В такой схеме стабилизация рабочей точки часто реализуется с помощью балластного резистора, подключенного последовательно с дросселем в цепи питания. Однако этот резистор является источником значительных паразитных потерь: весь ток, потребляемый усилителем, протекает через него, и значительная часть мощности рассеивается в виде тепла. Это приводит к снижению КПД, повышению тепловыделения, а также ограничивает гибкость в выборе режимного тока, поскольку он определяется величиной падения напряжения на балластном резисторе.

В рамках работы была осуществлена 4-выводная модификация отечественного широкополосного СВЧ-усилителя К1324УВ2, в которой введен отдельный вывод для подачи смещения, независимый от цепи основного питания. Это позволяет полностью исключить балластный резистор из цепи питания. Вместо него используется резистор в цепи смещения, по которой протекает существенно меньший ток. Такое решение обеспечивает снижение паразитных потерь мощности, повышение общего коэффициента полезного действия (КПД), возможность точной и гибкой настройки режимного тока независимо от напряжения питания, улучшение термостабильности за счет возможности термокомпенсации в цепи смещения.

Разработанный усилитель реализован по схеме Дарлингтона с отрицательной обратной связью. В результате моделирования установлено, что выходная мощность при компрессии на 1 дБ у 4-выводной версии превышает аналогичный параметр 3-выводного усилителя в среднем на 2 дБм по всему рабочему диапазону частот (рис. 1*а*), КПД увеличивается на 2–5 % (рис. 1*б*) благодаря исключению

рассеивания на встроенном резисторе, наблюдается улучшение термостабильности: усилитель демонстрирует устойчивую работу при отклонениях температуры в широком диапазоне (рис. 1*в*).

Предложенная 4-выводная схема широкополосного СВЧ-усилителя обеспечивает значительные преимущества по сравнению с традиционным 3-выводным исполнением. Повышенная энергоэффективность, улучшенный тепловой режим и гибкость в управлении рабочей точкой делают ее перспективной для использования в составе современных отечественных приемо-передающих модулей радиосвязи, аппаратуры РЭП, измерительных комплексов и других СВЧ-систем.



а *б* *в*

Рис. 1. Результаты моделирования выходной мощности при компрессии 1 дБ на всем диапазоне частот (*а*), КПД от частоты (*б*) и тока потребления от температуры (*в*) 3-выводного и 4-выводного ШПУ ($U_{пит}$ = 5 В, $I_{пит}$ = 95 мА)

Литература

1. Савченко Е. М., Будяков П. С., Сурков Н. С. Драйверы сверскоростных АЦП на основе СВЧ МИС широкополосных усилителей // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2017. — № 3 (246). — С. 26–33.
2. Кищинский А. Широкополосные транзисторные усилители мощности СВЧ Диапазона — смена поколений // Электроника: НТБ, 2010. — № 2.
3. Иовдальский В. А., Ганюшкина Н. В., Панас А. И., Дудинов К. В. Новая конструкция усилителей мощности СВЧ-диапазона // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение», 2024. — № 4. — С. 41–55.

УДК 621.316.543.1

Разработка и экспериментальное исследование SPDT-переключателя диапазона DC 6 ГГц на основе КНИ-технологии

Борисов Д. В., Коколов А. А., к. т. н., Шеерман Ф. И., к. т. н.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
andrei.a.kokolov@tusur.ru

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования SPDT-переключателя с рабочим частотным диапазоном DC 6 ГГц на основе КНИ-технологии. Согласно проведенным зондовым измерениям, были получены следующие характеристики: коэффициент передачи в открытом состоянии не менее −1,8 дБ; изоляция между портами не менее 30 дБ; площадь кристалла 0,56 мм^2.
Ключевые слова: SPDT; переключатель; КНИ; интегральная микросхема; коэффициент передачи.

На сегодняшний день полупроводниковые переключательные схемы все чаще применяются в различных системах связи, радарах, средствах радиоэлектронной борьбы и иных устройствах. Данные устройства применяются для коммутации и модуляции сигналов, в реконфигурируемых схемах (для изменения параметров систем АФАР). Основные характеристики СВЧ-переключателей — коэффициент передачи в открытом состоянии, изоляция между портами, входная мощность. Существует несколько типов переключателей, используемых в СВЧ-системах: однополюсные на одно направление (SPST), однополюсные на два направления (SPDT), однополюсные на четыре направления (SP4T), двухполюсные на два направления (DPDT). В основном переключательные схемы разрабатываются на основе GaAs- и GaN-технологий. Ключи, исполненные на основе данных технологий, обладают высокими значениями граничных частот, а также обеспечивают высокие значения мощности и низкий уровень потерь. Основным недостатком является высокая стоимость производства кристаллов на основе данных технологий. Кремниевые техпроцессы позволяют снизить стоимость чипов при их массовом производстве, а также обладают высокой степенью интеграции, низким потреблением и повторяемостью характеристик. Технология «кремний на изоляторе» (КНИ) позволяет разрабатывать переключательные устройства с достаточно низкими потерями (сравнимыми с A^3B^5-техпроцессами) благодаря сниженным паразитным емкостям и потерям в подложке при незначительном увеличении стоимости относительно традиционной КМОП-технологии [1]. Основной целью настоящей работы являются разработка и экспериментальное исследование микросхемы SPDT-переключателя с рабочим частотным диапазоном DC 6 ГГц, разработанного на основе КНИ-технологии.

Принципиальная схема SPDT основана на последовательно-параллельном включении *n*-канальных МОП-транзисторов, особенностью является использование стекового включения транзисторов для повышения развязки и входной

мощности. Дополнительно был заложен ряд тестовых переключательных транзисторов в целях оценки точности моделей и характеристик отдельного элемента. После изготовления было проведено экспериментальное исследование SPDT-переключателя и его отдельных элементов при помощи зондовой станции и векторного анализатора цепей в диапазоне DC 20 ГГц. Для *n*-канального МОП-транзистора с общей шириной затвора $W_g = 3000$ мкм сопротивление в открытом состоянии составляет $R_{on} = 1{,}42$ Ом, а емкость в закрытом состоянии — $C_{off} = 0{,}9$ пФ (после деэмбеддинга). При этом потери в открытом состоянии переключательного транзистора на частоте 5 ГГц составляют не более 0,27 дБ.

По результатам экспериментального исследования интегральной схемы SPDT-переключателя были получены следующие характеристики: рабочий частотный диапазон DC 6 ГГц, коэффициент передачи в открытом состоянии не менее −1,77 дБ, отражения от входных/выходных портов не более −9,2 дБ, изоляция между портами в закрытом состоянии не менее 34,4 дБ, площадь кристалла 0,56 мм^2. Управление осуществлялось путем подачи напряжения как на затворы, так и на контакты подложки транзисторов. В соответствии с результатами, полученными при ЭМ-моделировании топологии интегральной схемы, значение входной мощности превышает 30 дБм. Для проведения экспериментального исследования входной мощности устройства планируется разработка печатной платы, монтаж кристалла в корпус и измерение характеристик с использованием внешнего усилителя мощности.

Работы выполнялась в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор FEWM-2025-0004).

Литература

1. Bahl Inder J. Control Components Using Si, GaAs, and GaN Technologies. Boston: Artech. House, 2014. 325 p.

УДК 621.396.722

Исследование характеристик СВЧ монолитной интегральной схемы приемника на основе модели топологии

Кабаев Н., Перепелица Д. Г.
АО «Завод ПРОТОН»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 10

Проведено исследование характеристик СВЧ монолитной интегральной схемы квадратурного приемника с активным удвоителем частоты, предназначенной для работы в Ка-диапазоне частот, на основе модели топологии в специализированной САПР.

Ключевые слова: квадратурный приемник; монолитная интегральная схема.

Ключевым этапом в работе радиоприемника является перенос высокочастотного сигнала в удобный для обработки низкочастотный сигнал. Для этого используется смеситель, на один вход которого приходит сигнал радиочастоты (РЧ). Он преобразуется с сигналом гетеродина, и на выходе смесителя получается сигнал промежуточной частоты (ПЧ). Промежуточная частота, как правило, является низкочастотной и уже обрабатывается на следующем этапе [1]. Квадратурный приемник отличается от обычного (синфазного) возможностью приема сигнала в комплексном представлении.

Приемник и его элементы вносят свои шумы, гармоники и интермодуляционные искажения. Предварительное исследование в САПР необходимо для расчета ожидаемых характеристик.

В настоящей работе исследованы следующие характеристики квадратурного приемника:

- зависимость коэффициента шума и потерь / усиления преобразования от мощности сигнала гетеродина;
- зависимость коэффициента шума от сигнала ПЧ;
- зависимость развязки (изоляции) сигнала гетеродина от сигнала ПЧ;
- зависимость развязки (изоляции) сигнала гетеродина от сигнала РЧ;
- зависимость развязки (изоляции) сигнала РЧ от сигнала ПЧ;
- зависимость коэффициента (усиления) преобразования в частотном диапазоне;
- частотный спектр сигналов ПЧ, РЧ и гетеродина;
- усиление преобразования и интермодуляционные искажения 3-го порядка;
- относительный уровень интермодуляционных искажений.

За основной источник информации была выбрана техническая документация на САПР [2], в которой проводилось моделирование приемника. Приемник рассчитывался с использованием технологического процесса pHEMT025D.

Произведенные расчеты позволяют сравнить квадратурный приемник с зарубежными аналогами, оценить конкурентоспособность, определить слабые стороны для дальнейшей доработки и модернизации квадратурного приемника.

Литература

1. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. Устройства СВЧ и антенны. — М.: Радиотехника, 2006.
2. Техническая документация на САПР Microwave Office. — URL: https://manualzz.com/doc/35689021/microwave-office-analog-office-2004?p=471.

УДК 544.654.2

Разработка технологии электрохимического осаждения защитного покрытия серебро — сурьма в окнах фоторезистивной маски на слой меди при изготовлении СВЧ-плат

Трофимова М. А.
АО «Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь»
623409, г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8
upkb@upkb.ru

Частично разработана технология электрохимического осаждения защитного покрытия серебро — сурьма для СВЧ-плат взамен покрытию олово — висмут в целях сокращения потерь СВЧ-сигнала на проводниковых элементах. Составлен план для дальнейшей работы по теме «Разработка технологии электрохимического осаждения защитного покрытия серебро — сурьма для СВЧ-плат».

Ключевые слова: электрохимическое осаждение; защитное покрытие серебро — урьма; дициано-аргентатный электролит; жидкостное травление меди.

При изготовлении защитных покрытий проводниковых элементов СВЧ-плат используется сплав олово — висмут. Сплав олово — висмут имеет следующие недостатки:

- искажение топологии вследствие активного разрастания сплава олово — висмут;
- рост нитевидных кристаллов — «вискеров»;
- потери СВЧ-сигнала на проводниковых элементах.

Для уменьшения вносимых потерь в линии передачи СВЧ-сигнала было принято решение заменить покрытие олово — висмут на серебро — сурьма. Покрытие из серебра обладает высокой отражающей способностью. Серебряное покрытие характеризуется хорошей электропроводностью (625 МСм/м) и химической устойчивостью. Сурьма в защитное покрытие добавляется для предотвращения потускнения серебра при его взаимодействиях с соединениями серы и для увеличения износостойкости защитного покрытия.

Защитное покрытие серебро — сурьма осаждалось из дициано-аргентатного электролита. В результате экспериментов был определен оптимальный режим электрохимического осаждения сплава серебро — сурьма толщиной 3–6 мкм при плотности тока 1,04 А/дм^2:

- сила тока 0,2 А;
- расстояние между анодом и катодом (подложкой) 14 см;
- разворот подложки по горизонтальной оси на 180° в процессе электрохимического осаждения сплава серебро — сурьма по истечении половины общего времени электрохимического осаждения;
- общее время электрохимического осаждения 7 мин 30 с — 7 мин 50 с;
- температура электролита 20–25 °С.

По данному режиму была изготовлена и передана разработчикам на анализ СВЧ-плата. В результате анализа было выявлено искажение топологии СВЧ-платы в процессе травления проводникового слоя.

Для устранения искажения топологии на проводниковых элементах СВЧ-платы, возникшего в результате жидкостного травления проводникового слоя, была запланирована отработка растворов для травления проводникового слоя на подложках со структурой хром — медь — «серебро — сурьма». Для данной работы подготовлены опытные образцы и материалы.

Для дальнейшей отработки технологии электрохимического осаждения сплава серебро — сурьма был составлен план работ, направленный на определение оптимальной плотности тока в процессе электрохимического осаждения.

После отработки технологии электрохимического осаждения защитного покрытия серебро — сурьма запланированы следующие работы:

- выполнение оценки стабильности электрохимического осаждения защитного покрытия серебро — сурьма с помощью статистических методов анализа данных;
- построение математической модели процесса электрохимического осаждения защитного покрытия серебро — сурьма с помощью факторного анализа;
- внедрение технологии электрохимического осаждения защитного покрытия серебро — сурьма в производство на постоянной основе.

Литература

1. Берсирова О.Л., Бык С.В., Кублановский В.С. Электрохимическое осаждение серебра: Монография. — Киев: МИЦ МЕДИНФОРМ, 2013. — 168 с.
2. ГОСТ 9.301-86. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования.

УДК 51-74

Разработка алгоритма фильтрации данных по концентрации компонентов электролита в гальванической ванне

Земова Ю. С.[1], Почтарь А. А.[1], Чолах С. О.[2]
[1] АО «УПКБ «Деталь»
623409, г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8
niokr@upkb.ru
[2] УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Разработан алгоритм фильтрации данных по концентрации компонентов электролита, позволяющий моделировать процессы в гальванической ванне, производить корректировку своевременно. Таким образом, обеспечивается стабильность электролита, что позволяет поддерживать стабильность технологического процесса.

Ключевые слова: статистика; радиоэлектроника; олово-висмут; гальваника; алгоритмы фильтрации; надежность.

Базовыми элементами радиоэлектронной аппаратуры являются СВЧ-модули. На их работоспособность и надежность оказывает влияние не только схемотехническое решение, а в большей части технология их изготовления.

Надежность — это свойство изделия, заключающееся в его способности выполнять определенные задачи в определенных условиях эксплуатации. Показатели надежности связаны с явлением отказа — событием, заключающимся в нарушении работоспособности изделия. Отказы в большинстве случаев обусловлены скрытыми дефектами материалов, а также нарушением технологии изготовления изделий [1].

В производстве СВЧ-модулей широкое применение имеет технология формирования электрохимических покрытий как для корпусов, так и в целях защиты проводниковых элементов. Наиболее распространенным покрытием является олово-висмут (далее по тексту — О-Ви). Данный технологический процесс наиболее сложный и чаще всего оказывает влияние на брак конечного продукта — СВЧ-модуля.

В ходе анализа возвращенных с браком изделий и литературного обзора выявлено, что наиболее часто брак возникает по причине образования вискеров (нитевидных кристаллических образований, которые вырастают в длину до 3–5 мм при толщине в несколько микрон) на покрытии О-Ви. Наличие вискеров приводит к короткому замыканию внутри электрорадиотехнической аппаратуры и, соответственно, к выходу ее из строя и к появлению дефектов на последующих операциях изготовления модулей.

Качество покрытия О-Ви обеспечивается стабильностью параметров электролита в гальванической ванне. Одним из ключевых параметров является концентрация компонентов, в частности висмута, содержание которого предотвращает аллотропный переход олова из белого в серое, позволяет сохранить способность к пайке до года, исключает рост вискеров, повышает коррозионную стойкость. В реалиях производства непрерывный контроль концентрации компонентов электролита не представляется возможным ввиду ограниченных возможностей центральной

заводской лаборатории (далее по тексту — ЦЗЛ): взятие пробы производится один раз в сутки, и в течение рабочей смены производится анализ — корректировка ванны осуществляется по результатам анализа, т. е. с опозданием в сутки.

Обеспечение и контроль стабильности показателей ванны можно осуществить инструментами и методами статистики [2], в том числе управлением с помощью инструментов фильтрации данных. Данные методы позволяют в режиме реального времени контролировать протекающие процессы и своевременно обеспечивать корректирующие действия, а также оценивать прогнозируемое поведение технологического процесса и принимать предупреждающие меры для корректировки его режимов. Разработка такой системы контроля, обнаруживающей и предупреждающей отказы, является одним из основных путей повышения надежности изделий.

В этой связи был разработан алгоритм α-β фильтра, позволяющий контролировать изменение концентраций компонентов в ванне О-Ви между аналитическими измерениями с учетом экстраполяции данных, полученных на этапе химического анализа, на текущий момент времени. В результате на выходе алгоритма формируются данные о концентрации компонентов в электролите и рекомендуемой массе для корректировки (отрицательная масса говорит о необходимости разбавления электролита путем добавления воды).

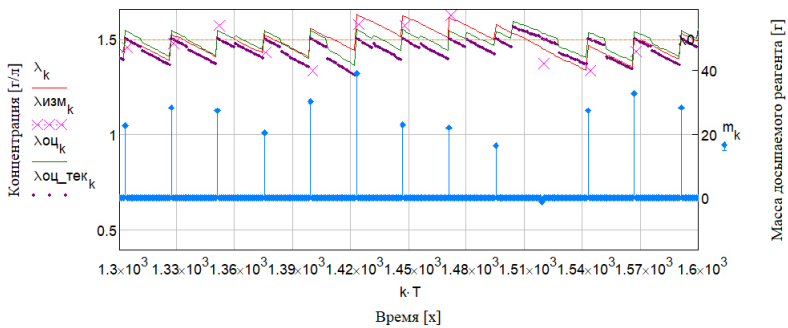


Рис. 1. Вывод вычислений фильтра: λ — истинная концентрация; λизм — концентрация, измеренная ЦЗЛ; λоц — концентрация со сдвигом во времени на 1 сутки; λоц_тек — текущая концентрация; m — масса вещества, рассчитанная фильтром для корректировки

Разработанный алгоритм фильтрации позволяет моделировать процессы в гальванической ванне и производить корректировку своевременно, результатами анализов ЦЗЛ лишь верифицировать алгоритм. Таким образом, обеспечивается постоянная стабильность электролита в гальванической ванне, что позволяет поддерживать стабильность технологического процесса в целом.

Литература

1. Тихонов В. И., Бакаев Ю. Н. Статистическая теория радиотехнических устройств. — М.: Типография ВВИА имени профессора Н. Е. Жуковского, 1965. — 462 с.
2. ГОСТ Р 7870-1-2022. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы. — Введ. 2023.03.01. — М.: Стандартинформ, 2022.

УДК 621.382

Перспективы развития малогабаритных многофункциональных МЭМС

Тимошенков С. П., Гончаров А. А., Тимошенков А. С.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
spt111@mail.ru

В работе проведен анализ характеристик инерциальных приборов и измерительных систем на основе МЭМС. Рассмотрены различные сенсоры, фотонные элементы и устройства. Разработаны навигационные системы с использованием комплексирования данных.

Ключевые слова: инерциальные МЭМС; акселерометры; микрогироскопы; элементы фотоники; навигация.

Сенсорные системы интенсивно развиваются, обеспечивая возможность совершенствования разнообразных изделий в областях телекоммуникации, робототехнике, на транспорте и т. д. К перспективным системам можно отнести инерциальные измерительные блоки на основе МЭМС для квадрокоптеров, беспилотных и высокодинамичных малогабаритных объектов. Также важна задача обеспечения непрерывной навигацией транспортных средств, в том числе и в случаях прерывания (отсутствия) сигналов от СНС.

В работе проанализированы параметры и перспективы использования микроакселерометров, датчиков угловой скорости, давления, температуры применяемых в системах ориентации и навигации подвижных объектов, а также использование многофункциональных мультисенсорных систем. Очень перспективно использование оптических устройств, обеспечивающих получение дополнительной информации от видеокамер. Оптические устройства способны выполнять широкий набор операций обработки сигналов. Разработана схема макета радиофотонного модуля, который позволит формировать информацию о объекте за счет использования радиочастотных входов. Обработка в нем ведется методом параллельных аналоговых преобразований (преобразование Фурье). Проведен анализ существующих методов выделения и обработки оптических сигналов. Предложена схема определения углового положения объекта в результате оптической обработки. Схема содержит модуляторы Маха — Цендера, осуществляющие перенос полного спектра сигналов на входе антенных элементов в оптический диапазон. Оптические сигналы подаются на фурье-линзу, на выходе которой формируется интерференционная картина, характер которой позволяет определить направление на интересующий объект. Учет скорости потока воздуха и изменение давления также является полезной информацией. При создании систем ориентации и навигации на основе МЭМС целесообразно использовать различные мультисенсорные многофункциональные системы, позволяющие существенно увеличить точность определения координат и вычислить параметры движения объекта. В работе использован системный подход к выбору конструктивных элементов, схемотехнических решений и технологических процессов изготовления инерциальных МЭМС для ориентации и навигации подвижных объектов, основанный на оценке влияния значимых факторов на параметры элементов или системы. При разработке конструкций микромеханических

сенсоров исследовано влияние кристаллографической ориентации кремниевых пластин и формируемых микромеханических элементов на качество и точность формирования трехмерных структур, получаемых методом объемного профилирования. Разработан и исследован процесс балансировки кольцевых резонаторов, предназначенный для изготовления датчиков угловой скорости с диапазоном измерения 75–1000 °/с.

Разработаны инерциальные измерительные модули на основе компонентов микромеханики, в основе которых слабосвязанная схема комплексирования данных с датчиков угловых скоростей (ДУС), акселерометров, одометров, спутниковой навигационной системы (СНС) и других систем. Проведено моделирование, лабораторные и натурные эксперименты, показавшие, что траектория навигационного решения автономной инерциальной системой на основе МЭМС, установленной на автомобиль, через 100 секунд имеет ошибку определения координат до 340 метров, учет модели движения автомобиля уменьшает ошибку до 4 метров, использование автомобильного одометра снижает ошибку до 1,5 метра. Использование комплексированных данных, коррекция информации, учет моделей движения объекта, компенсация дейфа сенсоров, калибровка позволяют существенно повысить точность разрабатываемых навигационных систем для широкого спектра возможных применений.

Литература

1. Тимошенков С. П., Тимошенков А. С., Анчутин С. А., Кочурина Е. С. Исследование влияния степени вакуумирования на добротность колебательного контура чувствительного элемента МЭМС-датчика // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2023. — Т. 28. — № 5. — С. 642–648.
2. Вавилов В. Д., Тимошенков С. П., Тимошенков А. С. Микросистемные датчики физических величин: Монография в двух частях. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. — С. 550.

Применение полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения для создания приборов нового поколения

Яшин В. С., Федоренко В. В.
ООО «СофтЭксперт»
prog@softexp-rf.ru

В работе выполнен анализ выпускаемых полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения. Рассмотрены экспериментально подтвержденные параметры структур. Рассмотрено влияние технологии изготовления структуры на передаточные дозиметрические характеристики. Рассмотрены принципы построения приборов с использованием полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения.
Ключевые слова: индивидуальная дозиметрия; pin-структура; МОП-структура; накопительный детектор; ЗЧУ (зарядочувствительный усилитель); радиационный контроль; индивидуальная дозиметрия; передаточная характеристика; калибровка.

Необходимость увеличение ресурса и надежности работы приборов, особенно в части индивидуальной дозиметрии, требует более быстрого перехода на полупроводниковые преобразователи ионизирующих излучений, особенно с развитием радиоизотопной индустрии. Важной задачей является определение дозовой нагрузки на отдельные участки тела человека.

Решение этих задач невозможно без развития технологии производства и конструкции полупроводниковых преобразователей ионизирующих излучений. Комбинация накопительных и «мгновенных» преобразователей, а также высокопроизводительные системы обработки сигналов позволяют создавать приборы, обладающие новыми свойствами.

Наиболее распространенными первичными преобразователями являются pin-диоды, МОП-структуры, дрейфовые диоды. Настоящая работа посвящена в основном pin-диодам и специальным МОП-структурам — (RADFET) детекторам. Рассмотрена перспектива применения RADFET (МОП) детекторов в серийных индивидуальных дозиметрах. Рассмотрены особенности данных структур, преимущества при встраивании данных детекторов в прибор. Рассмотрены варианты выполнения поверки приборов без уменьшения ресурса накопительных детекторов, возможности верификации характеристик прибора при многодетекторной схеме построения, алгоритмы самодиагностики метрологического тракта измерений в межповерочном интервале. Предложены концептуальные схемы построения индивидуальных дозиметров нового поколения. Рассмотрены способы самодиагностика структур и методы борьбы с ВЧ- и СВЧ-помехами, искажающими метрологические характеристики приборов.

Литература

1. Holmes-Siedle A. G. The space charge dosimeter — general principles of a new method of radiation dosimetry // Nucl. Instrum. and Methods, 1974. Vol. 121. P. 169–179.
2. Rosenfeld A. B. MOSFET dosimetry on modern radiation oncology modalities // Radiation Protection Dosimetry, 2002. Vol. 101. P. 393–398.

3. Asensio L. J., Carvajal M. A., Lopez-Villanueva J. A. et al. Evaluation of low-cost commercial MOSFET as radiation dosimeter // Sensors and Actuators, 2006. Vol. A125. P. 288–295.
4. Kwan I. S., Rosenfeld A. B., Qi Z. Y et al. Skin dosimetry with new MOSFET detectors // Radiation Measurements, 2008. Vol. 43. P. 929–932.
5. Перевертайло В.Л. Создание элементной базы для ядернофизического и радиационного приборостроения на основе кремниевой интегральной технологии // Тр. 5-й Междунар. науч.-практич. конф. «Современные информационные и электронные технологии». — Одесса, 2004. — С. 200.

УДК 681.586.773

Высокоточные чувствительные элементы на основе кварцевых камертонов

Анцев И. Г., Богословский С. В., Сапожников Г. А.
АО «НПП «Радар ммс»
197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, 37, лит. А
bogoslovsky_sv@radar-mms.com

Одним из распространенных подходов к построению датчиков является применение генераторных схем. Качественные характеристики генератора в первую очередь определяются частотозадающим элементом. Основными количественными характеристиками частотозадающего элемента при использовании в датчике являются девиация частоты при внешнем воздействии и долговременная стабильность. При измерении физических величин (температуры и давления, ускорения) с погрешностью менее 0,1 % часто используют кварцевые резонаторы. Наиболее перспективными можно считать резонаторы камертонного типа.

Ключевые слова: пьезотехника; камертон; кварцевые прецизионные датчики.

Одной из современных перспективных тенденций экономического развития является использование достижений пьезотехники для измерения физических величин для систем мониторинга и автоматизации технологических процессов. К чувствительным элементам на основе пьезотехники можно отнести кварцевые камертоны, также в качестве чувствительного элемента во многих случаях используют либо линии задержки, либо резонаторы на поверхностных акустических волнах (ПАВ) или объемных акустических волнах (ОАВ), как правило, одновходовые резонаторы [1–5].

При анализе различных вариантов построения прецизионных датчиков можно выделить существенное преимущество камертонов — значительную девиацию частоты при воздействии измеряемой величины — до 10 % от номинала. Конкурирующие технологии пьезотехники имеют значительно меньшую девиацию: ОАВ-резонаторы — до 1 %, ПАВ-резонаторы — до 0,1 %. Высокая стабильность физических свойств кварца позволяет создать устройства с погрешностью около 0,01 %.

К преимуществам датчиков на основе камертонов можно отнести:

- измерения контролируемых параметров в широком диапазоне значений;
- получение результатов измерений в ходе технологического процесса;
- малые размеры;
- отсутствие движущихся частей;
- устойчивость к коррозии;
- возможность работы в агрессивных средах с температурой до 250 °C;
- большой срок службы;
- простую технологию монтажа в разных звеньях технологической цепочки;
- отсутствие операций калибровки и обслуживания при эксплуатации;
- относительно низкие цены.

К перспективным разработкам на основе камертонных преобразователей можно отнести датчики давления для применения в интересах добычи газа на морском шельфе с метрологически подтвержденной надежностью 30 лет.

Литература

1. Пассивные беспроводные датчики и радиометки на принципах функциональной электроники / Под редакцией Анцева И. Г. — М.: Наука, 2021. — 518 с.
2. Ivan Antsev, Sergei Bogoslovsky, Alexander Shvetsov, Sergei Zhgoon, Gennadiy Sapozhnikov, Konstantin Trokhimets, Mikhail Derkach SAW Temperature Sensor on Quartz // Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, June 2015. Vol. 62. № 6. P. 1066–1075.
3. Takai T., Iwamoto H., Takamine Y., Fuyautsume T., Nakao T., Hiramoto M., Toi T., Koshino M. I. H. P. SAW Technology and its Application to Microacoustic Components (Invited) // Proc. 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 6-9 Sept. 2017. P. 1–8.
4. Гуляев Ю. В. Акустоэлектроника (исторический обзор) // Успехи физических наук, 2005. — Т. 175. — № 8. — С. 887–895.
5. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования: монография / Под ред. Ю. В. Гуляева. — М.: Радиотехника, 2012. — 576 с.

УДК 621.3.049.7

Разработка микроэлектромеханических логических вентилей

Соловьев А. А.[1], к. т. н., Певцов Е. Ф.[1], к. т. н., Колчужин В. А.[2]
[1] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
solovev_aa@mirea.ru
[2] QORVO Munich GmbH
81829, Германия, г. Мюнхен, площадь Конрада Цузе, 1

Разработаны прототипы логических микроэлектромеханических вентилей на основе гребенчатых резонаторов, выполняющие логические операции ИЛИ-НЕ, Исключающее ИЛИ, И. Предложен сквозной маршрут проектирования МЭМС и методика разработки системных моделей микрорезонаторов на языках VHDL-AMS и Verilog-A.

Ключевые слова: МЭМС; микроэлектромеханические системы; резонаторы; системные модели.

Для работы микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков ускорения и угловой скорости необходимы управляющие схемы, обеспечивающие возбуждение чувствительного элемента, обработку сигнала, калибровку и передачу данных. Схемы на традиционной КМОП-технологии имеют ограничения по масштабируемости и энергоэффективности, особенно в экстремальных условиях эксплуатации [1]. Актуальной задачей является поиск альтернативных вычислительных технологий. Перспективным направлением является разработка логики, совместимой с технологией изготовления МЭМС-датчиков.

В работе представлены результаты моделирования, разработки и экспериментального исследования прототипов логических МЭМС-вентилей на основе гребенчатых резонаторов. Маршрут конструирования МЭМС-вентилей состоит из пяти этапов [2].

1. Аналитический расчет. Разработаны модели МЭМС-резонаторов с электростатическим приводом на языке VHDL-AMS. Модели интегрированы в схемотехнический симулятор для анализа статических, частотных и динамических характеристик на системном уровне. Оценена физическая реализуемость и определены требования к параметрам устройства.
2. Создание трехмерной модели. Разработана геометрическая конструкция перепрограммируемого логического элемента на основе МЭМС-резонатора с перфорированной Н-образной инерционной массой, закрепленной на неподвижных анкерах с помощью четырех упругих П-образных подвесов с ограничителями максимального перемещения. Конструкция содержит 324 емкостные ячейки с поперечным перемещением, работающие по принципу перекрытия зазора, которые образованы с помощью гребенчатых структур с начальным смещением электродов, расположенных на инерционной массе, и симметричных неподвижных боковых электродах.
3. Моделирование на уровне схемы. Созданы компактные модели МЭМС-резонаторов на языке Verilog-A для анализа динамических характеристик логических МЭМС-вентилей с управляющей и считывающей электроникой

на системном уровне. Разработана библиотека моделей многовходовых МЭМС-вентилей для реализации функционально полного набора логических операций (И, ИЛИ-НЕ, Исключающее ИЛИ, инвертор) и проектирования цифровых схем. Библиотека интегрирована в отечественные и зарубежные современные системы проектирования интегральных схем. Результаты моделирования продемонстрировали возможность перепрограммирования выполнения логических операций во время работы.

4. Топологическое проектирование. Разработан топологический чертеж с учетом технологических норм, правил производства и с уменьшенными паразитными емкостями между электродами. Произведена коррекция фотолитографических масок для компенсации эффекта подтравливания.
5. Изготовление прототипов с использованием технологии глубокого реактивного ионного травления. Проведено экспериментальное исследование характеристик МЭМС-вентилей, анализ выхода годных, сравнение с результатами моделирования и корпусирование.

Результатом работы является кремниевая интегральная схема с Н-образными гребенчатыми многовходовыми резонаторами (рис. 1), функционирующими при атмосферном давлении в частотном диапазоне 40 и 110 кГц. Интегральные схемы помещены в отечественные металлокерамические корпуса.

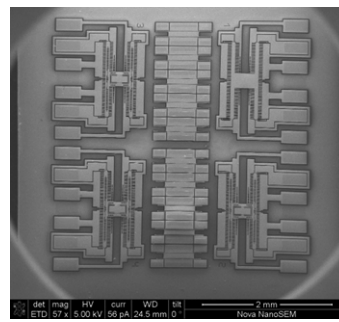


Рис. 1. Изображение интегральной схемы с Н-образными гребенчатыми резонаторами со сканирующего электронного микроскопа

Н-образная форма инерционной массы и П-образные подвесы обеспечили режим колебаний преимущественно только вдоль продольной оси и позволили увеличить частотный интервал между основной (первой) и паразитной (второй) модами колебаний. Устройства демонстрируют добротность порядка 20 при атмосферном давлении и чувствительность к изменению емкости, обусловленной движением инерционной массы, на уровне 930 пФ/мкм.

Литература

1. Fariborzi H. et al. Relays do not leak: CMOS does // Proc. 50th Annu. Design Automat. Conf. (DAC), 2013. P. 1–42.
2. Kolchuzhin V. Methods and Tools for Parametric Modeling and Simulation of Microsystems based on Finite Element Methods and Order Reduction Technologies // Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2010.

УДК 681.7.248

Конструктивно-технологическое решение для создания многослойного керамического модуля с безопасной передачей данных на основе интегрированных трансформаторов и оптических линий связи

Косевской В. А.
АО НПЦ «СпецЭлектронСистемы».
125319, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
kosevskoy@npc-ses.ru, kvasha@npc-ses.ru, aaplugin@npc-ses.ru

В докладе обсуждаются вопросы формирования магнитных, оптических межсоединений с использованием стекловолокна, интегрированного в многослойный объемный модуль на основе керамики LTCC. Модуль позволяет интегрировать следующие элементы: трансформатор, полупроводниковые кристаллы, а также оптические и электрические линии связи.
Ключевые слова: межсоединения; LTCC (низкотемпературная совместно обжигаемая керамика); многослойный керамический модуль; трансформатор; полупроводниковый кристалл.

Современные микропроцессорные системы создаются путем объединения большого числа быстродействующих интегральных схем, выполняющих различные функции (микропроцессоры, схемы памяти, схемы управления и коммутации, управления вводом-выводом и др.), в один модуль с помощью металлических проводников на печатной плате и соединения модулей посредством кросс-плат. Данные между модулями и полупроводниковыми кристаллами на печатных платах передаются электрическими сигналами. Быстродействие системы в целом зависит от быстродействия входящих в ее состав интегральных микросхем, а также от скорости обмена данными между ними. Наиболее важными параметрами межсоединений для перспективных ЭВМ высокой производительности являются пропускная способность и потребляемая мощность. В настоящее время введены в эксплуатацию несколько супер-ЭВМ, потребляемая мощность которых находится в диапазоне 2–30 МВт, а мощность, потребляемая межсоединениями, составляет почти 30 % полной мощности [1].

Одним из важных параметров является возможность передачи сигнала без передачи электрического тока. Основным методом является передача через трансформаторы и оптические каналы. Интеграция трансформаторов в плату позволяет создавать обьемную структуру связи и систему распределенных источников питания.

Интегральной характеристикой скорости передачи данных является пропускная способность, т. е. скорость передачи между двумя узлами ЭВМ. Для достижения высокой производительности вычислительных комплексов по сравнению с обычными медными соединениями более перспективными представляются межсоединения на основе оптических волноводов. Оценка достижимых скоростей передачи данных и обсуждение преимуществ и недостатков межсоединений на основе оптических волноводов представлены в работе [2]. Примеры использования оптических межсоединений приведены в работах [3, 4]. В патенте RU2350054 C2 [5]

предлагается способ межсоединений между полупроводниковыми кристаллами при помощи волоконных оптических световодов.

В традиционной схеме построения вычислительных систем центральный процессор помещается в специальный разъем (socket), который соединяется с другими узлами компьютера с помощью большого количества электрических соединений. Основная часть этих соединений предназначена для подключения к шинам данных, управления и адреса компьютерной системы. Как правило, процессор имеет большое количество (2000 и более) выводов, 60–70 % которых используется в качестве сигнальных линий. Создание и производство коммутационных плат для обеспечения такого массива коммутационных каналов является достаточно сложной задачей.

В отличие от электрических соединений, оптика позволяет передавать большие объемы информации намного быстрее по ограниченному числу каналов (например, по трем оптическим световодам), а вышеназванные потери будут отсутствовать либо сведутся к минимуму. В предлагаемой вниманию работе авторы демонстрируют возможность экспериментальной реализации конструктивно-технологического решения по созданию узла на основе многослойной керамики LTCC, в котором в единый объемный модуль интегрированы оптические и электрические каналы передачи информации. Использование в таком керамическом модуле оптических каналов связи значительно (до 45–50 %) снизит количество требуемых выводов микросхемы и, соответственно, существенно увеличит пропускную способность систем ввод-вывода и передачи данных. Такое построение микропроцессорных сборок с использованием оптических каналов и применением методов мультиплексирования потоков информации при наличии быстродействующих микросхем со встроенными элементами приемо-передатчиков оптического сигнала позволит реализовать задачу передачи больших массивов данных с высокими быстродействием и надежностью.

Литература

1. Ахманов А. С., Соколов В. И., Панченко В. Я. Высокоскоростные оптические шины передачи данных на печатных платах для микропроцессорных вычислительных систем // Успехи кибернетики, 2021. — № 2 (2). — С. 21–28. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-2-2.
2. Белкин М., Сигов А. Оптические межсоединения в интегральных схемах // Наноиндустрия, 2012. — № 1. — С. 8–14.
3. Lawson J. W., Kingston J. A. LTCC-based System-in-a-Package Advancements and Market Potential. C-MAC MicroSystems a Solectron Company. URL: http://seaceramics.com/Download/Papers/LTCC-SiP-V.3%2520Final-1.pdf.
4. Быстров Р. П., Соколов С. А., Черепенин В. А. Системы и устройства на основе радиофотоники применительно к радиолокации // Журнал радиоэлектроники, 2017. — № 6. — URL: http://jre.cplire.ru/jre/jun17/3/text.pdf.
5. Никитин В. С. Патент РФ. RU2350054 C2. Микросхема с оптоволоконными многоконтактными соединениями. 2009 г.

УДК 621.3.06

Микромеханический СВЧ-переключатель с контактом металл — металл

Уваров И. В.[1,2], д. т. н., Белозеров И. А.[1], Морозов М. О.[1,2]
[1] Отдел микротехнологий — Ярославль, ОФТИ им. К. А. Валиева Центра перспективной микроэлектроники НИЦ «Курчатовский институт» 150067, г. Ярославль, ул. Университетская, 21
[2] Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова 150003, г. Ярославль, ул. Советская, 14
i.v.uvarov@bk.ru

МЭМС-переключатели имеют широкие перспективы применения в мобильных радиолокационных комплексах и системах высокоскоростной связи. В докладе представлен последовательный электростатический ключ с резистивным контактом для диапазона частот 0–15 ГГц.
Ключевые слова: МЭМС; переключатель; электростатический актюатор; контактное сопротивление; изоляция; вносимые потери.

Последние десятилетия характеризуются интенсивным развитием СВЧ-техники. Миниатюризация, рост быстродействия и снижение энергопотребления достигаются за счет использования передовых электронных компонентов, в том числе СВЧ-переключателей. Однако рабочие характеристики традиционно применяемых ключей приближаются к своему пределу. Дальнейший прогресс могут обеспечить устройства на основе технологии МЭМС [1]. Их особенностью является сочетание малого размера и высокого быстродействия, присущих полупроводниковым ключам, с превосходными радиочастотными параметрами, свойственными электромеханическим реле. Тем не менее требуемые характеристики к настоящему времени не достигнуты. Ряд проблем связан с работой контактной группы. Актюатор микронного размера развивает малую силу прижима, не позволяющую получить низкое и стабильное контактное сопротивление. Размыкающая сила также мала, поэтому устройства зачастую выходят из строя вследствие залипания. В качестве решения этих проблем предложен миниатюрный электростатический привод с увеличенной контактной и размыкающей силой [2]. Представлен МЭМС-переключатель на его основе, предназначенный для коммутации сигналов частотой 0–15 ГГц.

Переключатель имеет последовательную конфигурацию. Подвижный электрод в форме кантилевера длиной 50 мкм располагается над разрывом сигнального проводника копланарной линии передач (рис. 1). Под кантилевером находится управляющий электрод, создающий электростатическую силу. Актюатор спроектирован по специальной методике, направленной на увеличение контактной и размыкающей сил [2]. Она включает в себя подбор высоты контактных выступов, межэлектродного зазора и толщины кантилевера, а также использование нескольких упругих элементов. Сила прижима достигает 170 мкН и с запасом превосходит необходимый порог надежности 100 мкН. Размыкающая сила упругости составляет половину силы прижима и защищает контакты от залипания. Малый по меркам МЭМС латеральный размер привода обеспечивает короткое время переключения

1 мкс, низкую емкость в разомкнутом состоянии 0,1 пФ и высокую устойчивость к механическим напряжениям.

Переключатель изготовлен по технологии поверхностной микрообработки на термически окисленной кремниевой пластине. Материалом кантилевера и линии передач служит алюминий, нанесенный магнетронным методом. Контактные выступы и коммутируемый электрод изготовлены из рутения. Контактное сопротивление составляет 5 Ом, что в несколько раз ниже по сравнению с предыдущим изделием авторов [3], благодаря увеличенной силе прижима. Параллельное соединение пяти кантилеверов снижает сопротивление до 1 Ом и обеспечивает допустимые вносимые потери менее 0,2 дБ на частотах до 1 ГГц (рис. 2). Дальнейшее снижение сопротивления до 0,5 Ом расширяет рабочий диапазон до 15 ГГц и позволяет использовать ключ в перспективных системах радиолокации и связи. Изоляция превышает требуемую величину 20 дБ на частотах до 30 ГГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 25-19-20107.

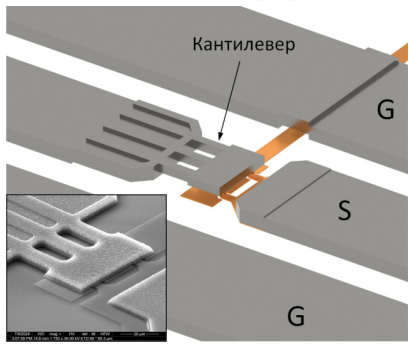


Рис. 1. МЭМС-переключатель

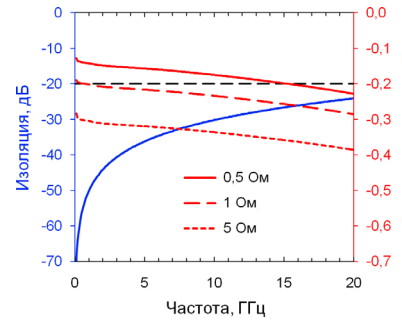


Рис. 2. СВЧ-характеристики переключателя

Литература

1. Kurmendra Agarwal S. MEMS switch realities: addressing challenges and pioneering solutions // Micromachines, 2024. Vol. 15. P. 556.
2. Uvarov I. V., Belozerov I. A. Design guideline for a cantilever-type MEMS switch with high contact force // Micro, 2024. Vol. 4. P. 1–13.
3. Уваров И. В., Абрамычев А. М. МЭМС-переключатель с контактами из платины и рутения // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-2. — С. 313–315.

УДК 681.586.672

Разработка МЭМС-сенсоров физических величин на основе тонкопленочных термопар

Чиненков М. Ю., Дюжев Н. А., Орешкин Г. И., Парамонов В. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
chinenkov@ckp-miet.ru

В работе приведены результаты исследований конструкции и технологии создания МЭМС-сенсоров: потока газов, давления газов, температуры.
Ключевые слова: МЭМС-сенсор; сенсор давления; датчик давления; сенсор температуры; датчик температуры; сенсор потока газов; датчик потока газов.

Применение микроэлектронных технологий позволяет создавать миниатюрные сенсоры на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) для анализа параметров газовых сред: скорости потока, давления, температуры. Особенностью конструкции данных сенсоров является использование термочувствительных элементов, сигнал с которых зависит от распределения температуры вблизи поверхности чувствительного элемента.

В МЭМС-сенсоре потока газов происходит смещение теплового облака, сформированного нагревательным термоэлементом в зависимости от скорости газа. Возникший градиент температуры приводит к изменению сопротивления термоэлементов и к возникновению разбаланса напряжений на мостовой схеме сенсора. Диапазон измерения скорости потока газа составляет от 0 до 300 л/мин.

В МЭМС-сенсоре давления рабочая область с чувствительным элементом отделена от внешней среды тонкой гибкой диэлектрической мембраной, чувствительной к изменению внешнего давления. Рабочая полость сенсора заполняется инертным газом с минимальной теплопроводностью (азот, аргон, ксенон и др.). При прогибе мембраны возникает градиент температуры в рабочей области чувствительного элемента и, соответственно, разбаланс напряжений на мостовой схеме сенсора. Для обеспечения высокой чувствительности датчика к изменению внешнего давления в качестве материала нагревателя и термопар в полости датчика применяется сильнолегированный поликремний. Диапазон измерения давления — 0,01–120 кПа.

МЭМС-сенсор датчика температуры представляет собой двумерную матрицу термочувствительных элементов. Каждый термочувствительный элемент содержит площадку из поглощающего ИК-излучение слоя нитрида кремния, посредством теплопередачи происходит разогрев поликремниевых термопар, что определяет эффект температурного детектирования датчика. Диапазон измерения температуры — от 25 до 45 °C, точность измерения температуры составляет 0,1 °C.

В ходе проведенных работ изготовлены экспериментальные образцы МЭМС-сенсоров, на которых были проведены исследования функциональных характеристик. Результаты исследований показали возможность создания датчиков на их основе.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ.

УДК 621.317.39.084.2

Механика ультратонких элементов МЭМС

Дюжев Н. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
djuzhev@ckp-miet.ru

В работе проведены исследования механики ультратонких элементов МЭМС. При моделировании деформации использовались нелинейные уравнения, учитывающие существенное изменение геометрической формы ультратонкого элемента с учетом несовместных деформаций и вызываемых ими внутренних напряжений.
Ключевые слова: МЭМС; диэлектрическая мембрана; МЭМС-сенсор; сенсор давления; сенсор температуры; сенсор потока газов; микрозеркало.

В настоящее время микроэлектромеханические системы (МЭМС) составляют важнейшую часть изделий современной микроэлектроники. Они являются основой сенсорных и исполнительных (актюаторных) устройств, которые являются каналом связи между реальным и электронными мирами. При этом основным, часто функциональным, элементом разнообразных датчиков давления, ускорения, расхода и исполнительных устройств (микрозеркала, микронасосы) являются мембраны. Важной особенностью этих мембран является очень малое отношение толщины к характерному размеру в плане (до нескольких тысяч), в связи с чем их можно классифицировать как ультратонкие. С этим связана специфика их математического моделирования. Действительно, классическая инженерная механика, описывающая деформацию пластин, предполагает, что максимальная величина прогиба не превосходит ее толщины, в то время как изгиб ультратонких мембран и элементов, используемых в МЭМС, при функционировании может превышать их толщину в десятки раз. Все это характеризует новизну и практическую значимость нового направления механики тонкостенных элементов — *механики ультратонких элементов МЭМС*.

В докладе представлены некоторые новые результаты, полученные в рамках этого направления. В частности, для формализации процесса деформирования развиты геометрически нелинейные уравнения, учитывающие существенное изменение геометрической формы ультратонкого элемента с учетом несовместных деформаций и вызываемых ими внутренних напряжений. Последние определяются из решения эволюционной задачи, характеризующей сценарий процесса изготовления мембраны. При моделировании динамического взаимодействия ультратонких мембран и нестационарного электромагнитного (управляющего) поля учитывались эффекты электромагнитомеханической связанности (электрострикция, магнитострикция и пр.). Для моделирования термомеханических динамических процессов, возникающих при поглощении мембраной импульсов излучения длительностью менее микросекунды, использовались полностью связанные уравнения термомеханики и гиперболических моделей теплопроводности.

На модельных решениях показано, что натяжение ультратонких элементов, вызванное несовместными деформациями и геометрически нелинейным характером их деформирования, является главным фактором, определяющим их

механические свойства. Игнорирование этих факторов приводит к ошибкам на порядок. Для верификации предложенных математических моделей развиты методы экспериментального определения формы изгиба ультратонких мембран. Сопоставление теории и эксперимента показало, что величины материальных модулей отличаются от известных значений для макроскопических объектов не более чем на 20%. На основе первопринципных расчетов дано объяснение этому отличию, которое сводится к анализу различных модификаций кристаллических решеток монокристаллических мембран и частичного упорядочивания поликристаллических структур.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» МИЭТ.

Резонатор на основе одиночного наностержня ZnO

Криштоп В. Г.[1,2], Евстафьева М. В.[1], Дудкин П. В.[2], Фахртдинов Р. Р.[1], Князев М. А.[1], Якимов Е. Е.[1], Мусабиров И. И.[3], Орлов А. П.[4], Коледов В. В.[4], фон Гратовски С. В.[4], Корепанов В. И.[1]

[1] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Институт проблем сверхпластичности металлов РАН
450001, г. Уфа, ул. Степана Халтурина, 39
[4] ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

Исследованы условия роста массивов наностержней ZnO методом газофазного химического синтеза, выращены и всесторонне охарактеризованы массивы наностержней ZnO. Изготовлены акустические резонаторы на основе одиночных наностержней ZnO, подвешенных между электродами с помощью фокусированного ионного пучка (FIB).

Ключевые слова: объемная акустическая волна (BAW); акустические резонаторы; газофазный химический синтез; полупроводниковый наностержень.

Акустоэлектронные устройства нашли применение практически во всех областях радиоэлектроники благодаря миниатюризации и улучшению характеристик за последние десятилетия. Разработка технологичных и доступных методов изготовления микрорезонаторов с высокими рабочими частотами является актуальной задачей.

Резонаторы на основе 1D-наноматериалов имеют высокий модуль Юнга при малых размерах. Для достижения высоких характеристик требуется строгий контроль условий синтеза для управления формой и соотношением сторон выращиваемых квазиодномерных структур [1]. Ориентация наностержней также существенно влияет на пьезоэлектрические свойства выращиваемого материала [2].

Одномерные монокристаллы ZnO и устройства на их основе представляют особый интерес, т. к. ZnO является одновременно и пьезоэлектриком, и широкозонным полупроводником. Теоретически это позволяет достигать более высоких частот и добротностей, чем на чисто механических 1D-структурах: например, при использовании тонких пленок ZnO продемонстрирована резонансная частота 1,5 ГГц [3]. Наностержни ZnO перспективны для использования в высокодобротных резонаторах, работающих на воздухе и при комнатной температуре. В литературе исследовались резонаторы с использованием одиночных наностержней оксида цинка [4–7]. В нашей работе описывается технология изготовления микрорезонаторов на основе 1D-наноструктур.

Реализована технология газофазного роста низкоразмерных полупроводниковых материалов и отработаны процессы формирования массивов наностержней ZnO. Используется самокаталитический метод синтеза структурированных

массивов наностержней ZnO по механизму пар — жидкость — кристалл (ПЖК) в двухзонной установке газофазного синтеза с вертикальным реактором [8].

Выращены экспериментальные образцы одномерных массивов полупроводниковых наностержней с подтвержденным качеством. Характеризация образцов проведена следующими методами: электронная микроскопия и спектроскопия, рентгеновская дифрактометрия, спектроскопия комбинационного рассеяния, катодолюминсцентная спектрометрия.

Разработаны и изготовлены акустические микрорезонаторы на одиночном наностержне ZnO, измерены их характеристики. Одиночные наностержни ZnO подвешивались между электродами **с помощью фокусированного ионного пучка (FIB)** аналогично работе [9]. Измерены амплитудно-фазовые частотные характеристики микрорезонатора на основе одиночного наностержня ZnO.

Разработанные резонаторы предназначены для высокочастотных фильтров, датчиков и микроэлектромеханических систем (МЭМС). Разработанная методика позволяет формировать микроэлектронные устройства на одиночных наностержнях ZnO, такие как высокочастотные резонаторы, перспективные для использования в акустооптике.

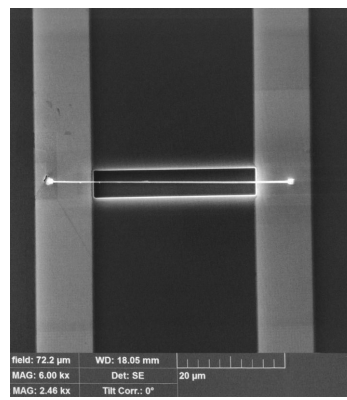


Рис. 1. Прототип микрорезонатора на основе одиночного наностержня ZnO

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, номер проекта 24-91-24002.

Литература

1. Redkin A. N., Yakimov E. E., Evstafieva M. V., Yakimov E. B. // Energies, 2021. Vol. 14. 3750. DOI: 10.3390/en14133750
2. Yang H. et al. // J. Alloys. Compd., 2024. Vol. 989. 174330. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.174330.
3. Evstafieva M. V. et al. // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № 4. P. 290–296. DOI: 10.1134/s106373972370049x
4. Zong X., Zhu R. // Sens. Actuators B Chem., 2018. Vol. 255. P. 2448–2453. DOI: 10.1016/j.snb.2017.09.037.

5. Fan Z. et al. // Appl. Phys. Lett., 2004. Vol. 85. P. 5923–5925. DOI: 10.1063/1.1836870.
6. Bai X. D. et al. // Appl. Phys. Lett., 2003. Vol. 82. P. 4806–4808. DOI: 10.1063/1.1587878.
7. Li Q. H. et al. // Appl. Phys. Lett., 2004. Vol. 85. P. 6389–6391. DOI: 10.1063/1.1840116.
8. Redkin A. N. et al. // Semiconductors, 2013. Vol. 47. P. 252–258. DOI: 10.1134/S1063782613020176.
9. Wang D. et al. // Adv. Electron. Mater., 2023. Vol. 9 (7). 2300079. DOI: 10.1002/aelm.202300079.

Сборка печатных плат: от огромных до миниатюрных. Проблемы и их решения

Савченко В. В.
HEART.ZONE LLC
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 42, стр. 1

Сборка печатных плат производится уже более 80 лет и постоянно совершенствуется. Мы хотим поделиться опытом автоматизированной сборки печатных плат на двух примерах: больших размеров материнская плата для сложных компьютеров и миниатюрный микромодуль 4×4 мм. Обе сборки используют компоненты, такие как BGA-чипы с шагом 0,35 мм и 01005-компоненты (0,4×0,2 мм), но подход к их сборке разнится. На примерах мы хотим показать, как инженеры-схемотехники, проектировщики и инженеры по сборке печатных плат должны работать вместе еще на этапе планирования для достижения высокого качества автоматизированной сборки и уменьшения стоимости производства.

Разработка двойной фотолитографии для формирования многоуровневых отверстий в MEMS-структурах

Платонов Д. Д., Юркин Н. О., Пигулевская Т. С., Иванова О. К.
ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
danil.platonov@mapperllc.ru

Разработан технологический процесс получения двухступенчатых вложенных отверстий для MEMS-структур. Проведено исследование влияния технологических параметров UV-фотолитографии на толщину остаточного фоторезиста, угол наклона стенки получаемого отверстия, а также CD отверстия.
Ключевые слова: фотолитография; MEMS-устройства; вложенные отверстия; глубина фокуса.

Двухступенчатые отверстия находят свое применение во многих MEMS-устройствах: в микрофлюидике, микродвигателях и актюаторах, а также акустических и оптических MEMS.

Создание микроструктур с вложенными (двухступенчатыми) отверстиями представляет значительный интерес для современных MEMS-устройств, но сопряжено с рядом технологических проблем. Основными технологическими ограничениями являются: точность совмещения, особенно при работе с глубокими отверстиями, контроль геометрии отверстия, а также остаточной толщиной фоторезистивной маски, необходимой для травления вложенного отверстия. Выявлено влияние энергии экспонирования, глубины фокуса и режимов задубливания фоторезиста на геометрические параметры отверстия

В ходе разработки технологического процесса было получено ступенчатое отверстие с диаметрами 2,5 и 1 мкм. Глубина отверстий составила 2,5 мкм и 200 нм соответственно. Результаты исследования могут успешно использоваться для получения отверстий в высокоаспектных структурах.

УДК 66.088

Исследование тонких пленок нитрида кремния с низкими внутренними напряжениями для изготовления МОЭМС-устройств

Иванова О. К.[1,2], Соловьев А. А.[1], Платонов Д. Д.[1],
[1] ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
olga.ivanova@mapperllc.ru

В представленном исследовании рассматривается технологический процесс получения пленок нитрида кремния (SiNx) с минимальными внутренними напряжениями, получаемых методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD). Выполнены исследования морфологии поверхности пленок SiNx, оптических и механических свойств, а также разработан оптимальный технологический процесс осаждения при температурном бюджете ≥200 °C.
Ключевые слова: тонкие пленки; нитрид кремния; PECVD; внутренние напряжения; механические свойства.

Технологические процессы формирования тонких пленок нитрида кремния (SiNx), осажденных при низкой температуре с контролируемыми внутренними напряжениями, являются ключевыми при изготовлении микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС). При формировании таких структур необходимо обеспечить совместимость с микросхем считывания и обработки сигналов, изготовленных по интегральной технологии, и функциональными слоями МОЭМС-устройств, которые ограничивают температуры обработки до диапазона 200–300 °C. Низкотемпературное плазмохимическое осаждение из газовой фазы (PECVD) пленок SiNx позволяет формировать изолирующие и механически прочные диэлектрические слои без термического повреждения чувствительных элементов (ЧЭ) МОЭМС-устройств. Кроме того, низкие внутренние напряжения критически важны для обеспечения стабильности и надежности микромеханических элементов.

В представленной работе изучается влияние рабочих параметров PECVD-осаждения на структуру и механические свойства формируемых пленок SiNx. Изменение состава газовой смеси, температуры, давления и мощности плазмы приводит к значительным изменениям скорости осаждения пленок, коэффициента преломления, а также морфологии поверхности и механических свойств. Оценка морфологии структуры и ее шероховатости проводилась с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Внутренние напряжения полученных пленок SiNx оценивались по прогибу пластин до и после процесса нанесения и рассчитывались с помощью уравнения Стоуни. Механические свойства пленки SiNx исследовались методом наноиндентации.

Результатом работы является режим низкотемпературного PECVD-осаждения пленок SiNx с низкими внутренними напряжениями и оптимальными механическими свойствами.

Литература

1. Karouta F. et al. Structural, compositional and optical properties of PECVD silicon nitride layers // Journal of Physics D: Applied Physics, 2012. Vol. 45. № 44. P. 445301.
2. Martyniuk M. et al. Dielectric thin films for MEMS-based optical sensors // Microelectronics Reliability, 2007. Vol. 47. № 4–5. P. 733–738.
3. Huang Y. C., Chang S. Y., Chang C. H. Effect of residual stresses on mechanical properties and interface adhesion strength of SiN thin films // Thin Solid Films, 2009. Vol. 517. № 17. P. 4857–4861.

УДК 534.1

Синтез нелинейных моделей пониженного порядка в задачах проектирования Н/МЭМС

Лукин А. В., Попов И. А., Пискун Н. В., Удалов П. П., Антуфьев Д. В., Астапов Я. К., Селин В. А.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
lukinalexei@yandex.ru

Представлены результаты разработки и верификации методов автоматизированного синтеза нелинейных динамических электроупругих моделей пониженного порядка (компактных, редуцированных моделей) для подвижных элементов Н/МЭМС на основе прямого конечно-элементного моделирования. Показаны возможности предложенного подхода в задачах проектирования твердотельного волнового гироскопа с кольцевым резонатором, микромеханического вибрационного гироскопа RR-типа, резонансного акселерометра и радиочастотного переключателя.

Ключевые слова: нано- и микросистемная техника; нелинейная динамика; редуцированные модели; системное моделирование.

На этапе проектирования МЭМС возникает потребность в компактных моделях, которые обладают быстродействием и достаточно точно описывают поведение проектируемого устройства. Такие модели называются моделями пониженного порядка (Reduced Order Models, ROM) [1–3]. Важную роль при моделировании МЭМС имеют нелинейные эффекты, такие как зависимость собственных частот колебаний от амплитуды, внутренние резонансы, нелинейное межмодальное взаимодействие [4]. Особенно важным последствием нелинейности при синтезе моделей пониженного порядка для континуальных упругих элементов МЭМС является существенная кинематическая связанность рабочих нижних форм колебаний конструкции с высокочастотными объемными формами колебаний [5]. Существенным является также то, что электрическая емкость является нелинейной функцией ширины межэлектродного пространства. Таким образом, при моделировании режимов работы МЭМС необходимо учитывать деформационную нелинейность и связи электрических и механических полей.

Как правило, МЭМС имеют сложную геометрию с большим количеством деталей, что затрудняет построение аналитических моделей. Метод конечных элементов позволяет создать для геометрически сложных конструкций достаточно точные модели, на основе которых можно построить модели пониженного порядка. Существует множество методов синтеза механических моделей пониженного порядка на основе конечно-элементных моделей: Stiffness Evaluation Procedure (STEP), Proper Orthogonal Decomposition, Direct Normal Form (DNF) [6]. Важным свойством методов синтеза моделей пониженного порядка является неинтрузивность, то есть возможность определения параметров модели на основе выходных данных любой программной системы конечно-элементного анализа без необходимости изменения программного кода.

В настоящем докладе предложен и апробирован неинтрузивный метод построения мультифизичных электроупругих моделей пониженного порядка для

электромеханических систем, состоящих из одного упругого тела и нескольких жестких электродов, на основе объемных конечно-элементных моделей. Построены модели пониженного порядка для твердотельного волнового гироскопа с кольцевым резонатором, микромеханического вибрационного гироскопа RR-типа, резонансного акселерометра и радиочастотного переключателя. С использованием синтезированных компактных моделей исследованы нелинейные динамические режимы работы перечисленных устройств.

Литература

1. Kolchuzhin V.A. Methods and Tools for Parametric Modeling and Simulation of Microsystems based on Finite Element Methods and Order Reduction Technologies [dissertation]. Chemnitz, 2010.
2. Bechtold T. et al. System-level modelling of MEMS. Wiley-VCH, 2013.
3. Benner P. Model Order Reduction. Vol. 1 System- and Data-Driven Methods and Algorithms. Berlin, Boston: De Gruyter, 2021.
4. Nayfeh A.H., Mook D.T. Nonlinear Oscillations. New York Chichester Brisbane [etc.]: John Wiley & Sons, 1995. 720 p.
5. Vizzaccaro A., Givois A., Longobardi P. et al. Non-Intrusive Reduced Order Modelling for the Dynamics of Geometrically Nonlinear Flat Structures Using Three-Dimensional Finite Elements // Computational Mechanics. Springer Science and Business Media LLC, 2020. Vol. 66. № 6. P. 1293–1319.
6. Touzé C., Vizzaccaro A. Nonlinear Normal Modes as Invariant Manifolds for Model Order Reduction // Model Order Reduction for Design, Analysis and Control of Nonlinear Vibratory Systems / edited by Touzé C., Frangi A. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. Vol. 614. P. 59–116.

УДК 53.06

Микронасос на основе электрохимического мембранного актюатора

Шлепаков П. С.[1], Световой В. Б.[2], д. ф.-м. н., Уваров И. В.[1], д. т. н.
[1] Отдел микротехнологий — Ярославль, ОФТИ им. К. А. Валиева Центра перспективной микроэлектроники НИЦ «Курчатовский институт» 150067, г. Ярославль, ул. Университетская, 21
p.shlepakov@bk.ru
[2] Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН 119071, г. Москва, Ленинский просп., 31/4

Микрофлюидные системы открывают новые возможности в химии, биологии и медицине, но их широкое применение ограничено отсутствием эффективных микронасосов. В докладе представлен миниатюрный электрохимический насос нового типа, сочетающий высокую точность дозировки с приемлемым расходом жидкости и совместимостью с микротехнологией.
Ключевые слова: микрофлюидика; микронасос; электролиз переменной полярности; нанопузыри; взрыв.

Появление микрофлюидных систем открыло новые возможности в анализе веществ, быстрой диагностике заболеваний и исследовании клеток. Одним из перспективных применений является адресная доставка лекарств в организм человека [1]. Модуль доставки лекарств представляет собой микронасос, перекачивающий лекарство из встроенного резервуара. Широкому распространению таких устройств препятствует отсутствие компактных и технологичных микронасосов. Миниатюризация насосов известных типов значительно ухудшает рабочие характеристики или вовсе невозможна ввиду несовместимости с технологией микроэлектроники. Недавно был разработан актюатор нового типа, использующий электролиз переменной полярности в качестве рабочего принципа [2]. Его особенностями являются высокое быстродействие, компактный размер и относительно большое перемещение мембраны с возможностью ее точного отклонения. В данной работе представлен микронасос на основе нового актюатора, исследованы и улучшены его рабочие характеристики. Насос демонстрирует сверхточную дозировку и способен перекачивать жидкость с приемлемым расходом при малом объеме. Преимущества изделия делают его применимым для использования в микрофлюидных системах различного назначения.

Насос содержит три актюатора, каждый из которых представляет собой камеру диаметром 500 мкм и высотой 16 мкм, закрытую эластичной мембраной. Над мембранами располагается канал с перекачиваемой жидкостью. Перекачка жидкости осуществляется перистальтическим способом. Для отклонения мембраны один электрод актюатора заземляют, а на второй подают серию импульсов напряжения переменной полярности частотой 500 кГц и длительностью 20 мс. В ходе электролиза в камере создаются нанопузыри водорода и кислорода, толкающие мембрану. После отключения импульсов нанопузыри исчезают в результате спонтанной реакции горения и мембрана возвращается в исходное положение. При достаточно высокой амплитуде напряжения достигается критическая концентрация нанопузырей. Они сливаются в микропузырь, который взрывается с выделением

значительной энергии. Во взрывном режиме ход мембраны возрастает на порядок, что увеличивает скорость перекачки.

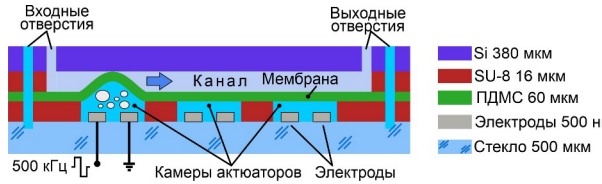


Рис. 1. Схематичное изображение микронасоса

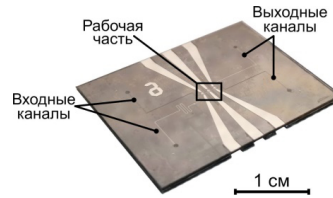


Рис. 2. Фотография чипа микронасоса

В режиме без взрывов рабочая частота насоса составляет 25 Гц. Мембрана перемещается на 5–7 мкм, поэтому дозировка составляет 0,14 нл. Во взрывном режиме частота ограничена величиной 0,1 Гц. Своевременное прерывание электролиза позволяет исключить вторичные взрывы, уменьшить количество остаточных пузырей, произведенных в результате взрыва, и повысить предельную частоту до 1 Гц. Увеличение диаметра камеры до 1 мм и высоты до 110 мкм ускоряет растворение остаточного газа и повышает частоту до 20 Гц. При этом насос должен обеспечивать расход до 24 мкл/мин, что на порядок больше по сравнению с устройствами схожих размеров. Ресурс устройства составляет более четырех часов в режиме без взрывов. Во взрывном режиме насос выдерживает более 100 000 взрывов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00292, https://rscf.ru/project/25-29-00292.

Литература

1. Pons-Faudoa F. P., Ballerini A., Sakamoto J., Grattoni A. Advanced implantable drug delivery technologies: transforming the clinical landscape of therapeutics for chronic diseases // Biomedical microdevices, 2019. Vol. 21. P. 1–22.
2. Uvarov I. V., Lokhanin M. V., Postnikov A. V., Melenev A. E., Svetovoy V. B. Electrochemical membrane microactuator with a millisecond response time // Sensors and Actuators B: Chemical, 2018. Vol. 260. P. 12–20.

УДК 66.088

Селективное травление SiO_2 к Si_3N_4 в гидрофторуглеродной плазме CHF_3 + Ar с добавлением O_2 для МОЭМС-применения

Дятлов В. Д.[1,2], Иванова О. К.[1,3], Соловьев А. А.[1], Ткаченко А. В.[1], Юркин Н. О.[1], Платонов Д. Д.[1]

[1] ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
vladimir.dyatlov@mapperllc.ru
[2] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
[3] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Проведено исследование влияния концентрации газов в смеси CHF_3+Ar с добавлением O_2 на селективное плазмохимическое травление SiO_2 к Si_3N_4. Полученные результаты позволяют выполнить оптимизацию параметров процесса травления при разработке и изготовлении многослойных ЧЭ МОЭМС на основе Si_3N_4.

Ключевые слова: МОЭМС; плазмохимическое травление.

Микрооптоэлектромеханические системы (МОЭМС) играют важную роль в разработке устройств, реализация которых невозможна с использованием традиционных оптических методов.

Селективное травление SiO_2 к Si_3N_4 представляет собой ключевой процесс, позволяющий создавать сложные многослойные структуры чувствительных элементов (ЧЭ) МОЭМС-устройств с высокой точностью, что в конечном итоге позволит создать передовые МОЭМС с улучшенными характеристиками.

Высокоселективные методы травления Si_3N_4 используют гидрофторуглеродные газы, такие как CH_2F_2, CH_3F, CHF_3, $C_3H_3F_3$, C_4H_9F, C_5HF_7, $C_3F_7OCH_3$ и $C_4H_3F_7O$ [1]. Добавка водорода используется для связывания F в смесь перфторированных углеводородов с образованием HF [2]. Также в травлении Si_3N_4 атомы водорода способствуют удалению N за счет образования летучих NHx- и HCN-соединений. В свою очередь добавление O_2 в CHF_3 приводит к изменению газовой фазы плазмы, особенно плотности H [3].

Актуальность данной темы для современных исследований обусловлена необходимостью создания сложных трехмерных структур с высокой аспектной чувствительностью.

В рамках данной работы для реализации селективного травления SiO_2 к Si_3N_4 рассматривается влияние концентрации газов в смеси гидрофторуглеродной плазмы, состоящей из CHF_3 + Ar с добавлением O_2, для реактивно-ионного травления с емкостно-связанной плазмой. В качестве подложек использовались кремниевые пластины толщиной ±460 мкм, на которые методом PECVD был нанесен слой Si_3N_4/SiO_2 толщиной ±950 нм, а затем сделана литография. В плазмохимическом травлении варьировалась концентрация O_2 и Ar при постоянном потоке CHF_3. Результаты показывают, что с ростом потока O_2 селективность SiO_2 к Si_3N_4 резко возрастает, как и угол профиля Si_3N_4. В свою очередь уменьшение Ar приводит к увеличению скорости травления обоих материалов.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для создания высокоселективного плазмохимического травления Si_3N_4 в многослойных ЧЭ МОЭМС-устройств.

Литература

1. Hsiao S. N. et al. Selective etching of SiN against SiO_2 and poly-Si films in hydrofluoroethane chemistry with a mixture of CH_2FCHF_2, O_2, and Ar // Applied Surface Science, 2021. Vol. 541. P. 148439.
2. d'Agostino R. et al. Mechanisms of etching and polymerization in radiofrequency discharges of $CF_4–H_2$, $CF_4–C_2F_4$, $C_2F_6–H_2$, $C_3F_8–H_2$ // Journal of Applied Physics, 1983. Vol. 54. № 3. P. 1284–1288.
3. Chen L. et al. Mechanism of selective Si3N4 etching over SiO_2 in hydrogen-containing fluorocarbon plasma // Microelectronic engineering, 2009. Vol. 86. № 11. P. 2354–2357.

УДК 621.9.048.7

Мелкосерийная широкономенклатурная технология изготовления керамических сенсоров и актюаторов

к. т. н. Самотаев Н. Н., к. т. н. Облов К. Ю., к. т. н. Литвинов А. В., Этрекова М. О., Образцов И. С., Цыганок Н. Д.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

В работе описано применение гибкой технологии адаптивной лазерной микрофрезеровки для мелкосерийного изготовления керамических сенсоров и актюаторов, предназначенных для тяжелых условий эксплуатации. Технология экономически адаптирована специально для ограниченного по массовости рынка ЭКБ.

Ключевые слова: МЭМС; керамика; лазер; корпус; сенсор.

Одним из факторов, сдерживающих активное применение на лабораторном уровне малыми научными группами керамических технологий в сенсорной технике, является необходимость работы с сырой керамикой (так называемой GreenTape) и ее обжиг по LTCC/HTCC-процессу. С точки зрения материаловедения более простым способом является работа с уже спеченной монолитной керамикой, обладающей подтвержденными электрофизическими свойствами. Для работы с монолитной керамикой на уровне 2,5D- и 3D-интеграции необходимы соответствующие технологические инструменты, развитию которых до настоящего времени уделялось мало внимания, так как широкий круг задач решался классическими подходами или прямой закупкой легкодоступной крупносерийной импортной продукции. В настоящее время удачно сложились следующие технологические и экономические факторы, комбинация которых привела к резкому росту интереса к мелкосерийным технологиям изготовления керамических сенсоров и актюаторов:

- изделия из керамики в микроэлектронике — это всегда объемные 3D-конструкции, т. е. априори МЭМС-технологии;
- широкономенклатурное мелкосерийное производство, причем в экономической конкуренции с себестоимостью параллельного импорта;
- замещение импортной продукции и технологии более экономически рациональными решениями по сравнению с исходными прототипами;
- сжатые сроки изготовления — ЭКБ нужна здесь и сейчас!

В ответ на вышеуказанные вызовы в НИЯУ МИФИ был разработан программно-аппаратный комплекс адаптивной лазерной микрофрезеровки монолитной керамики, позволяющий в комбинации с процессами металлизации (толстопленочная, тонкопленочная, гальваника, струйная печать) изготавливать полнофункциональные металлоокерамические изделия из Al_2O_3, AlN, ZrO_2, пьезокерамик. На разработанном программно-аппаратном комплексе в НИЯУ МИФИ были спроектированы и серийно изготовлены следующие типы датчиков газовых сенсоров в миниатюрных металлокерамических SMD-корпусах: металлооксидные резистивные, полупроводниковые емкостные, термокондуктометрические, термокаталитические, структура дизайна и технологического маршрута которых более подробно описана в публикациях [1–4]. Изготовленные сенсоры представляют из себя как полностью металлокерамические изделия, так и гибридные

конструкции, сочетающие в себе сенсорные кристаллы на основе кремниевой технологии и керамические актюаторные элементы, что свидетельствует об отличной совместимости предложенной технологии со стандартными техпроцессами, используемыми в микроэлектронной отрасли.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, государственное задание «Керамические технологии в микроэлектронике» (FSWU-2025-0009).

Литература

1. Samotaev N. et al. Thermal Conductivity Gas Sensors for High-Temperature Applications // Micromachines, 2024. Vol. 15. P. 138.
2. Samotaev N. et al. Combination of Material Processing and Characterization Methods for Miniaturization of Field-Effect Gas Sensor // Sensors, 2023. Vol. 23. P. 514.
3. Samotaev N. et al. Silicon MEMS Thermocatalytic Gas Sensor in Miniature Surface Mounted Device Form // Chemosensors, 2021. Vol. 9. P. 340.
4. Samotaev N. et al. Combination of Ceramic Laser Micromachining and Printed Technology as a Way for Rapid Prototyping Semiconductor Gas Sensors // Micromachines, 2021. Vol. 12. P. 1440.

УДК 621.3.049.772.1.002

Исследование и разработка матричного МЭМС-преобразователя для устройств машинного обоняния

Николаева А. В.[1], Поломошнов С. А.[1,3], Амеличев В. В.[1], Кривецкий В. В.[1,2]
[1] НПК «Технологический центр»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7
A.Nikolaeva@tcen.ru, S.Polomoshnov@tcen.ru
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, химический факультет
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Представлены результаты по разработке матричного МЭМС-преобразователя с тонкопленочными микронагревателями и исследованию временной стабильности микронагревателей для устройств машинного обоняния.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы; микронагреватель; газовые сенсоры; струйная микропечать; полупроводники; машинное обоняние.

Полупроводниковые газовые сенсоры применяются во многих областях: персонализированной медицине и медицинской диагностике, экологическом мониторинге, промышленной и продовольственной безопасности и др. [1]. Усложнение современных газоаналитических задач требует детектирования следовых количеств газов и летучих веществ в переменчивой воздушной среде при наличии влаги и фоновых загрязнителей, а также распознавания характерных смесей веществ — запахов. В связи с этим крайне востребованными оказываются системы типа «машинное обоняние», включающие в себя матрицу из полупроводниковых газовых сенсоров для одновременного выявления нескольких веществ в воздухе [2, 3].

Авторами изготовлен макетный образец матричного МЭМС-преобразователей размерностью 2×2 с расположенными на диэлектрических мембранах тонкопленочными микронагревателями и полупроводниковыми газочувствительными элементами (рис. 1).

Матричный преобразователь представляет собой многослойные тонкопленочные МЭМС-структуры, сформированные путем последовательного осаждения на подложку из монокристаллического кремния диэлектрических слоев диоксида кремния (SiO_2) и нитрида кремния (Si_3N_4) и последующего двухэтапного селективного удаления кремния с обратной стороны. На первом этапе — посредством сухого глубокого анизотропного плазмохимического травления (Bosch-процесса) до остаточного слоя кремния. На втором этапе для нивелирования неравномерности сухого травления удаление остаточного слоя проходило в кипящем растворе этилендиамина [4]. На поверхности мембраны в центральной области методами магнетронного и электронно-лучевого испарения сформированы тонкопленочные микронагреватели и электроды — контакты к газочувствительным элементам и микронагревателям. Металлические слои изолированы пленкой осажденного диоксида кремния, в которой сформированы контактные окна к микронагревателю и к газочувствительному элементу, формируемому в последующем методом

струйной микропечати газочувствительных материалов на основе полупроводниковых оксидов металлов.

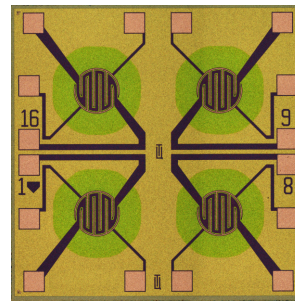


Рис. 1. Фотография макетного образца матричного МЭМС-преобразователя размерностью 2×2

Конструкция разработанного матричного МЭМС-преобразователя обеспечивает высокую однородность формируемых толстопленочных пористых газочувствительных элементов, их устойчивость к повреждениям при длительной непрерывной эксплуатации в режиме резких перепадов рабочей температуры, а следовательно, высокую воспроизводимость и стабильность рабочих сенсорных характеристик. Данные характеристики обеспечивают использование матричного МЭМС-преобразователя для одновременного качественного и количественного определения нескольких веществ в воздухе в системах машинного обоняния.

В ходе испытаний стабильности микронагревателей измерен температурный коэффициент сопротивления (ТКС) путем нагрева матричного МЭМС-преобразователя в муфельной печи. Измеренный ТКС составил 0,0025 °C^{-1}. После этого микронагреватели матричного МЭМС-преобразователя подвергались многократным циклам нагрева и охлаждения в токе чистого сухого воздуха, а также воздуха с контролируемой влажностью в диапазоне от 5 до 50 % отн. путем подачи на контакты нагревателей напряжения в диапазоне от 1 до 4 В, что соответствовало нагреву от 100 до 450 °C. Показана неизменность ТКС и абсолютного значения сопротивления микронагревателей в ходе 30 дней непрерывной работы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-19-00703-П. Работа проводилась с использованием оборудования центра коллективного пользования «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр».

Литература

1. Li Z., Yu J., Dong D., Yao G., Wei G. et al. E-nose based on a high-integrated and low-power metal oxide gas sensor array // Sensors and Actuators B: Chemical, 2023. Vol. 380. 12 p. URL: https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133289.
2. Van Duy N., Xuan Thai N., Minh Ngoc T., Thanh Le D., Manh Hung C., Tonezzer M. et al. Design and fabrication of effective gradient temperature sensor array based on bilayer SnO_2/Pt for gas classification // Sensors and Actuators B: Chemical, 2022. Vol. 351.11 p. URL:https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130979.

3. Yang Z., Liu Y., Chen D., Miao J., Chen M., Liu G., Gao G., Guo Y., Cui D., Li Q. A battery-free, wireless, flexible bandlike e-nose based on MEMS gas sensors for precisely volatile organic compounds detection // Nano Energy, 2024. Vol. 127. 9 p. URL: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109711.
4. Голишников А. А., Красюков А. Ю., Поломошнов С. А., Путря М. Г., Шевяков В. И. Основы технологии электронной компонентной базы: лабораторный практикум / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. — М.: МИЭТ, 2013. — 176 с.

УДК 535.313.2

Матричные микромеханические зеркала: результаты исследований и перспективы применения в системах адаптивной оптики

Козлов Д. В.[1], к. т. н., Смирнов И. П.[1], Мокшанов В. Н.[2], Куфтерин В. А.[2], Боголюбов И. А.[2]

[1] АО «Российские космические системы»
111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53
[2] АО «НПК «СПП»
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53

Представлены результаты разработки матричных микромеханических зеркал, функционирующих на основе сил электростатического взаимодействия. Показаны пути развития и возможности их применения в устройствах адаптивной оптики, в том числе для наземных комплексов контроля космического пространства.

Ключевые слова: МОЭМС; МЭМС; деформируемое зеркало; адаптивная оптика; жертвенная технология; телескоп; волновой фронт; электростатическая сила.

Атмосферные искажения при передаче оптической информации и несовершенство оптических элементов систем контроля существенно снижают качество и, как следствие, разрешение телескопов и других оптических приборов. Одним из способов решения данной проблемы является применение адаптивных оптических элементов в оптическом тракте. Эти элементы способны корректировать волновой фронт за счет изменения кривизны отражающей поверхности. Количество и размер активных ячеек в адаптивных системах напрямую определяют возможности коррекции и качество получаемого изображения. Микромеханические приборы, выполненные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), идеально подходят для решения данной задачи, позволяя изготовить зеркала, управляемо деформируемые с точностью до десятых долей длины волны излучения и с частотой выше 1 кГц.

В работе представлены основные результаты исследований образцов матричных электростатических микрозеркал, изготовленных по разработанной жертвенной технологии. Обладая 21 зоной управления размером 450×450 мкм, микрозеркала обеспечивают управляемый прогиб каждой зоны в диапазоне до 1,5 мкм при напряжении менее 120 В. Полученные данные позволили выявить наиболее критичные технологические процессы (формирование и удаление жертвенных слоев толщиной более 5 мкм, планаризация отражающей поверхности) и определить пути достижения показателей мировых аналогов [1, 2].

Отмечена перспективность применения микрозеркальных устройств в наземных комплексах наблюдения за космическим пространством, в лазерной связи и системах управления лазерным излучением. Сформулированы основные требования, предъявляемые к зеркальным элементам адаптивной оптики, в частности увеличение количества зон управления до 140 и управляемого прогиба каждой из них до 3,5 мкм и более.

Литература

1. Changhui Rao et al. Astronomical adaptive optics: a review // PhotoniX, 2024. Vol. 5. Article number: 16. 52 p.
2. Yuanping Song et al. A review of micromirror arrays // Precision Engineering, 2018. Vol. 51. P. 729–761.

УДК 621.382

Разработка технологии создания многоуровневых микроэлектромеханических систем

Баклыков Д. А.[1,2], Стукалова В. Е.[2], Курочкина Ю. А.[2], Пильник И. С.[2], Юдин А. И.[2], Родионов И. А.[1,2]

[1] Научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22
[2] НОЦ ФМНС, МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
dimabaklykov@bmstu.ru

В работе показано применение однослойной защитной маски с разрешением менее 2 мкм и равномерностью не хуже 3 % по 100-мм пластине для формирования многоуровневых МЭМС на базе кремния и стекла с аспектным соотношением более 15 и изотропностью 1, что перспективно также для микрофлюидики и ФИС.

Ключевые слова: МЭМС; многоуровневая структура; аспектное соотношение; изотропность; кремний; стекло; ступенчатая однослойная маска.

Развитие микроэлектромеханических систем (МЭМС) обусловлено необходимостью создания современных приборов, которые должны соответствовать строгим требованиям по доступности, функциональности, компактности и чувствительности. Области применения этих систем чрезвычайно разнообразны: от потребительских товаров до высокотехнологичных аппаратов. В ответ на растущие требования к характеристикам микроустройств происходит постоянное совершенствование их конструктивных решений [1]. Современные МЭМС характеризуются сложной архитектурой и применением разнородных материалов со специфическими свойствами. Развитие технологий происходит путем интеграции передовых методов производства из микроэлектронной промышленности и уникальных технологических процессов, разработанных для МЭМС [2]. Такое комплексное развитие направлено на повышение эффективности и расширение возможностей применения микроэлектромеханических систем в различных отраслях промышленности и науки.

Кремний (поликремний) и стекло являются основными конструкционными материалами для создания устройств МЭМС. Толщина приборного слоя для Si составляет от 5 до 50 мкм, для стекла — обычно сотни микрометров. Для создания высокочувствительных МЭМС необходимо обеспечивать высокое аспектное соотношение кремниевых каналов более 15 [3] и изотропность профиля стекла, близкую к 1 [4]. Помимо этих требований практически каждое устройство микросистемной техники имеет развитую поверхность с наличием структур на разном уровне — упоры, упругие балки, анкера — для обеспечения необходимого закона движения.

На практике для формирования разноглубинных каналов используют послойно сформированные маскирующие покрытия [5]. Каждый слой такой маски предназначен для травления на определенную глубину [6]. В данной работе за счет применения высокоточных (разрешение менее 2 мкм) и равномерных (не менее 3 % по 100-мм пластине) процессов показана возможность использования одной

защитной маски для формирования многоуровневых микроэлектромеханических систем (рис. 1). Такой подход в создании ступени в маскирующем покрытии и последующем переносе в кремний и/или стекло позволит без значительного усложнения маршрута изготовления независимо контролировать многоуровневую структуру, например толщину и высоту упругих элементов и привода.

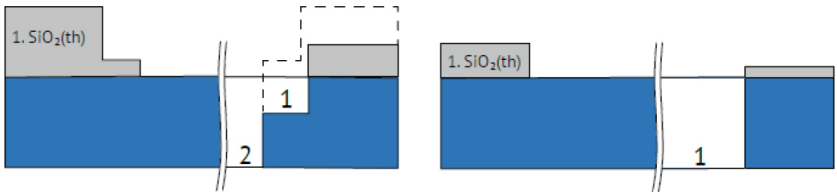


Рис. 1. Ступенчатая однослойная маска

Таким образом, в работе представлена разработка и апробация технологий создания многоуровневых устройств МЭМС на базе кремния и стекла с аспектным соотношением более 15 и изотропностью 1. Перспективы применения разработанной технологии охватывают широкий спектр областей, включая микрофлюидные системы, фотонные интегральные схемы, а также устройства, работающие на новых физических принципах. Дальнейшие исследования направлены на совершенствование процесса и расширение возможностей технологии.

Литература

1. Algamili A. S. et al. A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices // Nanoscale research letters, 2021. Vol. 16. P. 1–21.
2. Chen S. et al. Technologies and applications of silicon-based micro-optical electromechanical systems: A brief review // Journal of Semiconductors, 2022. Vol. 43. № 8. P. 081301.
3. Baklykov D. A. et al. Self-controlled cleaving method for silicon DRIE process cross-section characterization // Micromachines, 2021. Vol. 12. № 5. P. 534.
4. Konstantinova T. G. et al. Deep multilevel wet etching of fused silica glass microstructures in BOE solution // Scientific Reports, 2023. Vol. 13. № 1. P. 5228.
5. Huber R. et al. Fabrication of multilevel silicon structures by anisotropic deep silicon etching // Microelectronic engineering, 2003. Vol. 67. P. 410–416.
6. Bagolini A. et al. Fabrication of novel MEMS microgrippers by deep reactive ion etching with metal hard mask // Journal of Microelectromechanical Systems, 2017. Vol. 26. № 4. P. 926–934.

УДК 534-8+539.23

Алмазные акустоэлектронные устройства с операционными частотами СВЧ- и КВЧ-диапазонов для систем мобильной связи, радиолокации и сенсоров

Сорокин Б. П., Асафьев Н. О., Яшин Д. В., Аксененков В. В., Кравчук К. С., Голованов А. В., Лупарев Н. В.
Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
108840, г. Москва, г.о. Троицк, ул. Центральная, 7а
bpsorokin1953@yandex.ru

Разработана технология и синтезированы эффективные пьезоэлектрические пленки нитрида алюминия. Разработаны и исследованы композитные акустоэлектронные устройства на алмазе — резонаторы СВЧ- и КВЧ-диапазонов, сенсоры физико-химических воздействий, работоспособные при многократном использовании.

Ключевые слова: синтетический алмаз; нитрид алюминия-скандия; объемная акустическая волна (ОАВ); поверхностная акустическая волна (ПАВ); композитный ОАВ-резонатор; СВЧ; КВЧ; сенсор высокого давления; сенсор напыления тонких пленок; сенсор жидкости.

Начиная с 2000-х в акустоэлектронике активно развивается направление разработки композитных устройств, в том числе многообертонных резонаторов на объемных акустических волнах (далее — композитный ОАВ-резонатор), базирующихся на мультислойных пьезоэлектрических структурах, состоящих из тонкопленочного пьезоэлектрического преобразователя (например, нитрида алюминия AlN, нитрида алюминия-скандия $Al_{1-x}Sc_xN$ (ASN)), нанесенного на подложку из материала с низкими СВЧ акустическими потерями, включая синтетический алмаз.

Впервые в России разработана технология и синтезированы эффективные пьезоэлектрические пленки нитрида алюминия с коэффициентом электромеханической связи значительно выше, чем у нитрида алюминия. На основе пленки ASN получен и исследован тонкопленочный ОАВ-резонатор СВЧ-диапазона. Тонкопленочные пьезоэлектрические преобразователи предназначены для работы в составе таких акустоэлектронных компонентов, как тонкопленочные акустические резонаторы, композитные акустические резонаторы на обертонах СВЧ- и КВЧ-диапазонов, акустические резонаторы с отражательной решеткой Брэгга, сенсоры и т. п.

Впервые в мире получено рекордное возбуждение композитного ОАВ-резонатора со структурой «Al / ASN / Mo / (100) алмаз» на крайне высоких частотах (до 40 ГГц) при комнатной температуре с сохранением добротности ~11 000 [1]. Впервые в мире на частотах до 20 ГГц с помощью ПАВ-резонатора экспериментально реализовано возбуждение волн Лэмба в тонких алмазных подложках [2]. Данный тип акустических волн может быть использован как операционная мода в акустоэлектронных сенсорах. Впервые в мире разработан акустоэлектронный сенсор нанесения тонких и сверхтонких пленок металлов на основе композитного акустического резонатора на алмазной подложке с операционными частотами до 20 ГГц и толщинной чувствительностью ±0,5 нм [3]. С использованием сенсора

данного типа подробно исследованы фазовые превращения при высокотемпературном окислении молибдена в воздушной атомосфере. Впервые в мире разработана интегрированная измерительная система «Многообертонный СВЧ ОАВ-резонатор + камера высокого давления на алмазных наковальнях» и исследованы изменения акустических свойств образцов металлов и полупроводников при высоких давлениях (до 30 ГПа) [4]. Для исследования растворов и суспензий разработан и применен акустоэлектронный сенсор на алмазной подложке со структурой «Al / $Al_{0,72}Sc_{0,28}N$ / Mo / (100) алмаз» с продольной объемной акустической волной в качестве операционной моды и с частотами СВЧ-диапазона вплоть до 9 ГГц.

Сенсоры физико-химических воздействий на алмазе являются стойкими к жестким условиям окружающей среды, таким как высокие температуры, давление, абразивные и радиационные воздействия. Рабочая поверхность алмазной подложки толерантна к биологическим объектам. В отличие от МЭМС- и НЭМС-сенсоров, исследованные сенсоры сохраняют работоспособность при многократном использовании.

Литература

1. Sorokin B. P., Asafiev N. O., Kvashnin G. M., Scherbakov D. A., Terentiev S. A., Blank V. D. Toward 40 GHz excitation of diamond-based HBAR // Appl. Phys. Lett., 2021. Vol. 118. P. 083501.
2. Sorokin B. P., Yashin D. V., Asafiev N. O., Burkov S. I., Kuznetsov M. S., Luparev N. V., Golovanov A. V. Microwave surface and Lamb waves in a thin diamond plate: Experimental and theoretical investigation // Ultrasonics, 2025. Vol. 149. P. 107575.
3. Kvashnin G., Sorokin B., Asafiev N., Prokhorov V., Sotnikov A. Peculiarities of the acoustic wave propagation in diamond-based multilayer piezoelectric structures as “Me1/(Al, Sc)N/Me2/(100) Diamond/Me3” and “Me1/AlN/Me2/(100) Diamond/Me3” under metal thin film deposition // Electronics, 2022. Vol. 11. № 2. P. 176.
4. Sorokin B. P., Asafiev N. O., Ovsyanikov D. A., Kvashnin G. M., Popov M. Yu., Luparev N. V., Golovanov A. V., Blank V. D. Microwave acoustic studies of materials in diamond anvil cell under high pressure // Appl. Phys. Lett., 2022. Vol. 121. P. 194102.

УДК 621.9.048.7

Электрофизические характеристики структур металл — диэлектрик — полупроводник и их влияние на чувствительность и быстродействие газовых МДП-сенсоров

к. т. н. Самотаев Н. Н., к. т. н. Облов К. Ю., к. ф.-м. н. Литвинов А. В., к. т. н. Подлепецкий Б. И., Этрекова М. О., Володин П. О.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

В работе описано исследование газовых сенсоров на основе структуры металл — диэлектрик — полупроводник с диэлектриками Ta_2O_5 и SiO_2, полученными различными методами, и поиск корреляций между физическими свойствами МДП-структур и свойствами газовых сенсоров на их основе.

Ключевые слова: МДП-структура; вольт-фарадные характеристики; чувствительность; сенсор.

Газоаналитические устройства на основе сенсорных чувствительных элементов находят широкое применение в различных областях современной науки и промышленности. В зависимости от характера физико-химических взаимодействий, которые происходят при контакте чувствительного элемента с исследуемыми газами, есть различные типы сенсоров со своими достоинствами и недостатками. На их фоне можно выделить сенсоры на основе МДП-структур, обладающие уникальной комбинацией высокой чувствительности и селективности к широкому спектру газов — от взрывоопасного водорода до токсичных соединений типа диоксида азота (NO_2) и сероводорода (H_2S). К настоящему времени было изучено влияние различных характеристик МДП-сенсоров на их чувствительность, например границы раздела металл — диэлектрик [1], толщины слоя и типа диэлектрика [2]. Таким образом, было выяснено, что диэлектрик оказывает сильное влияние на сенсорные свойства МДП-структуры к газам. Целью данной работы являлось исследование газовых сенсоров на основе МДП-структур с диэлектриками Ta_2O_5 и SiO_2, полученными методами термического окисления и осаждения из газовой фазы: измерение ВФХ сенсоров и вычисление их электрофизических характеристик; измерение чувствительности и времен отклика и релаксации сенсоров для газов H_2, H_2S, NO_2; поиск корреляций между физическими свойствами диэлектриков МДП-структур и свойствами газовых сенсоров на их основе.

В результате исследований определены величины подвижного и неподвижного зарядов в диэлектрике, влияющие на вид и форму ВФХ. Для диэлектриков сенсоров, полученных термическим окислением кремния и осаждением из индуктивно-связанной плазмы, приведенные величины неподвижных зарядов равны 31,7 и 107,7 нКл/см^2, а подвижных — 0,51 и 6,14 нКл/см^2 соответственно. Для сенсоров с диэлектриком Ta_2O_5 величина неподвижных зарядов составила 225 нКл/см^2.

Измерены чувствительности и динамические характеристики сенсоров термической и CVD-серий по H_2, H_2S и NO_2. Выявлено, что CVD-сенсоры обладают в 1,5 раза большей чувствительностью и в два раза меньшим временем отклика к водороду, чем полученные термическим окислением кремния. По сероводороду

чувствительности оказались равны в пределах погрешности. Величина отклика термических сенсоров по диоксиду азота в два раза больше, чем для CVD-сенсоров.

Был выполнен поиск корреляций между электрофизическими параметрами МДП-структур и их чувствительностями к различным газам. CVD-сенсоры обладают большей чувствительностью к водороду по сравнению с термическими. При этом по отношению к сероводороду и диоксиду азота такие корреляции отсутствуют. Уменьшение гистерезиса при воздействии концентрации водорода на термические сенсоры говорит о возможном связывании водородом части подвижного заряда в приграничном слое диэлектрика с металлом.

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ № 24-79-10278 от 31.07.2024 г.

Литература

1. Емелин Е. В. О механизме чувствительности МДП-сенсоров и возможности их использования в качестве чувствительных элементов газоанализаторов: дис. к. ф.-м. н. 01.04.07. — Москва, 2008. — 103 с.
2. Podlepetsky B., Samotaev N., Etrekova M., Litvinov A. Structure and Technological Parameters' Effect on MISFET-Based Hydrogen Sensors' Characteristics // Sensors, 2023. Vol. 23. № 6. P. 3273. DOI: 10.3390/s23063273.

УДК 681.586.48

Двухканальный акустический датчик фазовых переходов жидкость — пар и жидкость — лед

Воронова Н. В.[1], Горнев Е. С.[1], Тельминов О. А.[1], Анисимкин В. И.[2]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
navoronova@niime.ru
[2] *ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН*
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования двухканального датчика фазовых переходов жидкость — пар и жидкость — лед, основанного на использовании соответственно поверхностных (ПАВ) и нормальных (НАВ) акустических волн. Продемонстрирована работоспособность датчика на примере жидкостей летучих соединений, тяжелой и дистиллированной воды.

Ключевые слова: акустические волны; ультразвуковой датчик; жидкость; лед; газ.

Фазовые переходы жидких веществ играют важную роль в различных областях науки и техники. Они постоянно сопровождают всевозможные природные процессы и особенно важны в задачах безопасности (например, в авиации, для автомобильных дорог и ледоколов).

В настоящей работе создан сенсор фазовых переходов жидкость — пар и жидкость — лед, объединяющий обе функции в одном образце. Сенсор состоит из кремниевой пластины (380 мкм) с пьезоэлектрическими пленками ZnO разной толщины (5,6 и 8,8 мкм) и двух пар встречно-штыревых преобразователей ВШП с разными периодами (32 и 146 мкм) (рис. 1) [1].

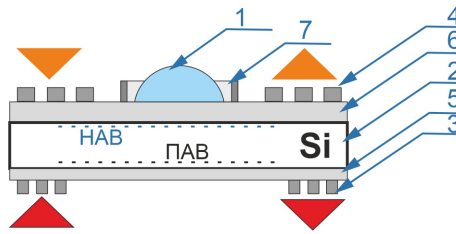


Рис. 1. Конструкция датчика: 1 — тестируемая жидкость; 2 — кремниевая пластина; 3, 4 — встречно-штыревые преобразователи ВШП с разными периодами (32 и 146 мкм); 5, 6 — пленки ZnO разной толщины (5,6 и 8,8 мкм); 7 — кювета

При регистрации фазового перехода жидкость — пар используется ВШП с периодом 32 мкм и ПАВ частотой 130 МГц. Измеряется изменение скорости (фазы) этой волны, вызванное охлаждением пластины при парообразовании (рис. 2). При регистрации фазового перехода жидкость — лед применяется вторая пара ВШП с периодом 146 мкм и НАВ частотой 52 МГц. Измеряется изменение

амплитуды НАВ (поглощение), вызванное кристаллизацией жидкостной пробы (рис. 3). Оба перехода демонстрируют зависимость акустических откликов от сорта тестируемой жидкости (рис. 2, 3).

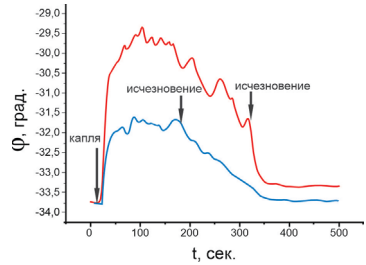
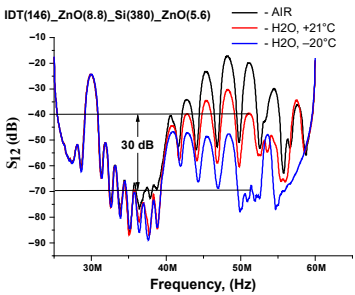
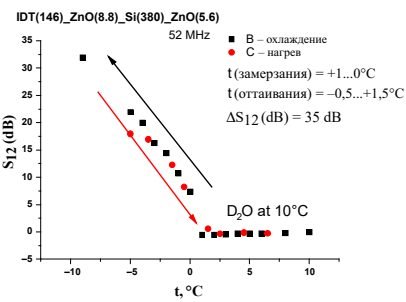


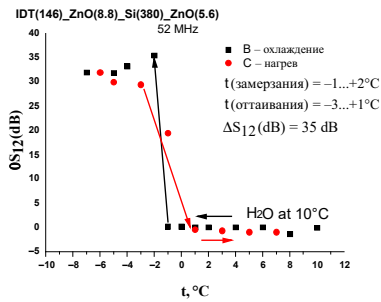
Рис. 2. Временные изменения фазы ПАВ, измеренные на частоте 130 МГц при испарении двух сортов спирта: красная линия — изопропиловый, 2 мкл; синяя линия — этиловый, 2 мкл



а



б



в

Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика (*а*) и акустические отклики на фазовый переход тяжелой воды в лед (*б*) и дистиллированной воды в лед (*в*), измеренные с помощью НАВ на частоте 52 МГц. Квадраты — охлаждение, круги — нагревание

Разработанный датчик демонстрирует высокую чувствительность к изменениям агрегатного состояния вещества в реальном масштабе времени [2]. Он пригоден для оперативной идентификации веществ и определения их соответствия заданным стандартам. Полученные результаты создают основу для разработки новых интеллектуальных сенсорных систем и мониторинга фазовых переходов в средах сложного химического состава.

Работа частично поддержана Минобрнауки РФ в рамках госзадания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (FFWZ 2025-0001).

Литература

1. Воронова Н. В., Анисимкин В. И., Горнев Е. С., Тельминов О. А., Горбачев И. А., Кузнецова И. Е. Кремниевый датчик микрокапель летучих жидкостей // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2025. — № 17 (2). — С. 201–206. DOI: 10.17725/rensit.2025.17.201
2. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: Часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. — Москва, 2017. — С. 16–47.

УДК 621.382.2/.3

Технология тонкопленочной инкапсуляции элементов МЭМС

Коломийцев А. С.[1], Ильин О. И.[1], Житяева Ю. Ю.[1], Петрова С. В.[1], Денисенко М. А.[1], Гусев Е. Ю.[1], Чебанов М. А.[2]
[1] Южный федеральный университет
347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
askolomiytsev@sfedu.ru
[2] АО «НЗПП Восток»
630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60

В работе представлены результаты исследований, направленных на разработку технологического маршрута инкапсуляции кремниевых элементов МЭМС. Сформирован перечень основных операций маршрута инкапсуляции МЭМС-резонаторов емкостного типа. Разработана конструкция кристалла МЭМС.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы; технологии МЭМС; инкапсуляция; микроэлектроника; кремний; электронная компонентная база.

Сферы применения и конкурентоспособность элементов МЭМС определяются не только высокой чувствительностью и точностью контроля выходных параметров, но и экономической эффективностью их производства. Для стабильности рабочих характеристик большинства емкостных МЭМС (резонаторов, гироскопов, акселерометров и пр.) требуется минимальное воздействие внешней среды на движущиеся элементы структур [1]. Таким образом, появляется требование обеспечения минимально возможного давления среды в корпусе [2, 3]. Одним из наиболее эффективных методов герметизации элементов МЭМС на уровне пластин является технология тонкопленочной инкапсуляции (epi-seal), которая обеспечивает монолитную герметизацию путем эпитаксиального наращивания слоев кремния [2]. По сравнению с технологией сращивания пластин такой метод позволяет снизить площадь кристалла, обеспечить высокую устойчивость МЭМС к механическим и температурным нагрузкам, а также обеспечить высокую чистоту процесса.

В ходе выполнения работы был сформирован перечень основных технологических операций маршрута инкапсуляции МЭМС-резонаторов на уровне пластины, в основе которого лежат процессы химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении, контактной фотолитографии, глубокого реактивного ионного травления и высокотемпературного отжига в атмосфере водорода. Разработан эскизный технологический маршрут инкапсуляции на уровне пластины для МЭМС-резонатора на основе структур КНИ и эпитаксиального кремния (рис. 1). Определены основные технологические и конструктивные ограничения для МЭМС-резонаторов в рамках предложенной технологии. Определены основные требования к конструкциям МЭМС-элементов и параметрам фотошаблонов, обеспечивающие применимость в рамках предложенного технологического маршрута: аспектное соотношение сторон элемента МЭМС — не менее 1:5; толщина чувствительного элемента — не менее 10 мкм; минимальное расстояние между элементами конструкции — не менее 2 мкм. Разработана конструкция лабораторного тестового кристалла МЭМС, включающая структуры резонаторов различных типов, работающих в диапазоне частот 100 кГц — 1,3 МГц. Проведено моделирование

геометрических параметров емкостных МЭМС-элементов. При постоянной составляющей напряжения до 40 В ни в одной из структур не происходит необратимых деформаций, способных привести к замыканию и/или разрушению подвижных контактов. Наибольший размер подвижных элементов структур не превышает 1000 мкм.

Отработаны технологические операции нанесения оксида кремния толщиной 1–2 мкм на пластины кремния диаметром 100 мм плазмохимическим методом. Изготовлены тестовые кремниевые структуры методом глубокого реактивного ионного травления с глубиной траншей 17–40 мкм для проведения дальнейших исследований.

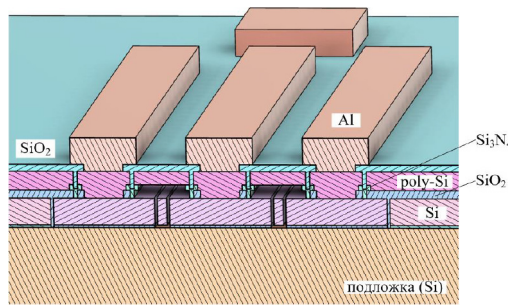


Рис. 1. Разрез эскизного рисунка топологии инкапсулированного МЭМС-элемента

Проведены исследования режимов осаждения пленок эпитаксиального выращивания кремния. Установлено, что при эпитаксиальном росте толстых пленок поликристаллического кремния формируются напряженные структуры с развитой поверхностью.

Таким образом, предложенный технологический маршрут и результаты проведенных исследований позволяют судить о возможности организации производства инкапсулированных МЭМС-элементов на предприятиях микроэлектронной отрасли РФ и последующего использования таких элементов в системах транспорта, навигации, связи и автономных беспилотных системах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-91-23005 в Южном федеральном университете.

Литература

1. Graham A. B., Messana M. W., Hartwell P. G. et al. A Method for Wafer-Scale Encapsulation of Large Lateral Deflection MEMS Devices // Journal of Microelectromechanical Systems, 2010. Vol. 19. № 1. P. 28–37.
2. Kim B., Candler R. N., Hopcroft M. et al. Frequency stability of wafer-scale film encapsulated silicon-based MEMS resonators // Sensors and Actuators A: Physical, 2007. Vol. 136. № 1. P. 125–131.
3. Wu G., Xu J., Ng E. J. et al. MEMS Resonators for Frequency Reference and Timing Applications // Journal of Microelectromechanical Systems, 2020. Vol. 29. № 5. P. 1137–1166.

УДК 621.3.049.77

Исследование особенностей взаимного расположения в пространстве пары магниторезистивных преобразователей тока

Литвиненко Э. О., Чеплаков А. А.
АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Проведено параметрическое моделирование распределения магнитного поля, индуцированного токами, протекающими по встроенным шинам пары микросхем, в зависимости от зазора между шинами. На основе полученных результатов проанализировано влияние взаимного расположения пары датчиков тока на характер их выходных сигналов. Всего рассматривалось восемь возможных конфигураций. Согласно результатам исследования были выбраны оптимальные конфигурации и предложены рекомендации по их применению.
Ключевые слова: AMR-сенсоры; магниторезистивный эффект; датчики магнитного поля; датчики тока.

Современные электронные системы требуют высокоточного контроля токов в силовых и управляющих цепях. Одним из перспективных методов бесконтактного измерения тока является использование магниторезистивных преобразователей. Однако их точность существенно зависит от большого количество параметров, включая взаимное расположение датчиков и конфигурацию токопроводящих шин, что обуславливает необходимость оптимизации их пространственного размещения. На основе микросхемы бесконтактного датчика тока с линейным аналоговым/цифровым выходом 5433XE025 производства АО «ЗНТЦ» были проведены исследования восьми возможных конфигураций и получены следующие результаты:

- установлены закономерности изменения магнитного поля в зависимости от расстояния между шинами и взаимной ориентации датчиков;
- выявлены конфигурации, обеспечивающие минимальное взаимное влияние датчиков и максимальную точность измерений.

Результаты, демонстрирующие эффективность предложенных конфигураций, получены на основе моделирования в программной среде COMSOL Multiphysics (модуль mf) и подкреплены результатами измерений на бесконтактных датчиках тока. Результаты исследования позволяют повысить точность и надежность измерений тока в современных электронных системах. Полученные данные могут быть использованы при проектировании силовых цепей, систем мониторинга и управления, где критично точное измерение токов.

УДК 538.75/621.316.849

Ресемплинговый метод прогнозирования выхода годных изделий в технологии МЭМС

Жукова С. А., к. т. н., Грабов А. Б., Суздальцев С. Ю., к. т. н.
ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИХМ»
115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а
mail@cniihm.ru

Была разработана математическая модель статистической взаимосвязи основных технологических и выходных параметров для приборов МЭМС. В данной модели с помощью ресемплинговой процедуры бутстрепа по заданным выходным параметрам были рассчитаны допустимые значения набора исходных технологически задаваемых параметров и оценивались параметры, определяющие допустимые технологические погрешности Δl_{tc}. На примере технологии АМР-датчиков магнитного поля была проведена практическая апробация модели. Выполнена процедура бутстрепирования технологических параметров ΔR_s, $\Delta\rho/\rho$, H_k, Δl_R и Δw и вычислено максимально допустимое значение Δl_{tc}. Проведена оценка частотных распределений вероятности получения выходных характеристик в партии реальных пластин и в виртуальных пластинах с параметрами, сгененерированными с помощью ресемплирования.
Ключевые слова: магниторезистивный датчик; статистический контроль процесса; ресемплинг; бутстреп; чувствительность; выход годных.

Статистические методы управления технологическим процессом, применяемые для повышения надежности и выхода годных приборов микроэлектроники, как правило, разрабатываются в парадигме «дизайна для технологичности и/или выхода годных» (англ. Design for Manufacturability — DFM, Design for Yield — DFY) и требуют больших объемов статистических выборок. Поэтому проблема повышения надежности и выхода годных очень остро стоит в технологии МЭМС с ее дизайнерской парадигмой ориентации на выходные характеристики сенсора (англ. Service Oriented Design (SOD)) [1]. В рамках парадигмы SOD был предложен метод ресемплирования, основанный на моделировании технологических погрешностей, обусловленных вариативностью параметров слоев и отклонениями формы элементов. Результаты измерений на каждом этапе подвергаются процедуре ресемплинга, суть которого состоит в том, что на *i*-этапе техпроцесса, где присутствует операция измерений, из результатов измерений реальных пластин или кристаллов формируется исходная выборка PM1...PMn размерностью *n*. Из данной выборки генерируется повторная выборка PM1...PMm размерностью $m \gg n$. Выполнение процедуры генерации повторных выборок GB производится на каждой технологической операции [2]. Данные сгенерированных выборок *i*-этапа вводятся в качестве исходных данных в модель *j*-этапа техпроцесса, где технологических измерений не предусмотрено. Таким образом, в финале техпроцесса одной-единственной реальной пластины имеются статистические данные о минимум $i \times j$ виртуальных пластин. Измерения в критических точках техпроцесса дают информацию о математическом ожидании и дисперсии исходных параметров, а процедура ресемплирования выходных параметров дает частотное распределение вероятности выходных характеристик и выхода годных датчиков даже в малых партиях [3].

Была проведена апробация метода ресемплирования на примере технологии АМР-датчиков магнитного поля. На основе математической модели АМР-датчика был построен 5-уровневый граф состояний системы, описывающий взаимосвязи технологических и выходных параметров приборов: коэффициента преобразования моста S* и величины начального разбаланса ΔUoffset. Показано, что для оценки вариации ΔU_offset требуется три исходных параметра: ΔR_s, Δl_R и Δw, а для оценки вариации чувствительности моста ΔS* необходимо четыре параметра: $\Delta\rho/\rho$, H_k, Δw, Δl, что при известных исходных параметрах с достаточной степенью точности позволяет оценить ожидаемые выходные характеристики кристаллов МР-датчиков и процент выхода годных η на пластине. Разработанная ресемплинговая модель может быть использована в том числе и для оценки допустимых технологических погрешностей Δl_{tc}.

Литература

1. Hargrove M., Wen S., Yim D., Egelhofer-Ruegger K., Nanja P., Sarkar S., Lowe B., Vincent B., Ervin J., Fried D. M. Review of virtual wafer process modeling and metrology for advanced technology development // Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, July 2023. Vol. 22. Issue 3. 031209. DOI/10.1117/1.JMM.22.3.031209.
2. Столяренко Ю. А. Контроль кристаллов интегральных схем на основе статистического моделирования методом точечных распределений: Дисс. канд. технич. наук. — Москва, 2004. — 194 с.
3. Шитиков В. К., Розенберг Г. С. Рандомизация и бутстреп. — Тольятти: Кассандра, 2013. — 314 с.

УДК 681.586.7

Цифровой микросистемный АМР-магнитометр ММ-3 для систем ориентации и навигации

Баранов А. А., Грабов А. Б., Жукова С. А., Обижаев Д. Ю., Ульянов С. А.
ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИХМ»
115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а

Представлены результаты исследования характеристик анизотропных магниторезистивных (АМР) преобразователей магнитного поля и цифровых микросистемных магнитометров на их основе.
Ключевые слова: анизотропный магниторезистивный (АМР) эффект; цифровой микросистемный магнитометр; системы ориентации, стабилизации, навигации.

В настоящее время существует потребность в разработке отечественного малогабаритного трехосевого магнитометра для систем ориентации, навигации и стабилизации. В связи с этим актуальной является задача импортозамещения микросистемных преобразователей магнитного поля, функционирующих на основе анизотропного магниторезистивного эффекта (АМР) [1, 2] в тонких пленках $Ni_{80}Fe_{20}$.

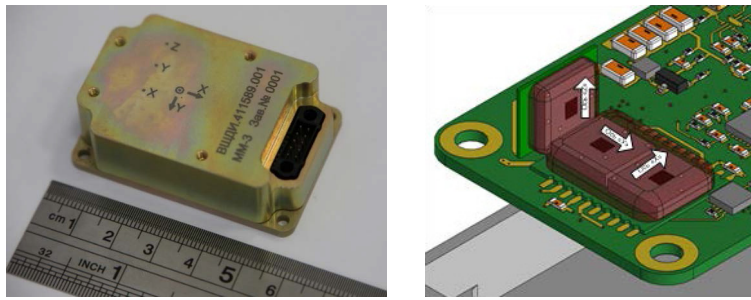
Микросистемные АМР-преобразователи магнитного поля изготавливаются с использованием технологических процессов микроэлектроники и представляют собой магниторезистивные структуры, соединенные в мостовую схему Уитстона и включающие планарную катушку подмагничивания.

Силами ФГУП «ЦНИИХМ» созданы одно- и двухосевые преобразователи магнитного поля (ПМП-1, ПМП-2), а также трехкомпонентный магнитометр ММ-3 на их основе. Преобразователи магнитного поля имеют низкие значения нелинейности (не более 0,5%) при достаточно высоком коэффициенте преобразования (2–3 мВ/В/Гс) и являются аналогами преобразователей Honeywell HMC1001 и HMC1002 (США). При этом преобразователи изготавливаются исключительно с применением материалов и комплектующих отечественного производства.

Трехкомпонентный магнитометр ММ-3 содержит комплект двух преобразователей магнитного поля (ПМП-1, ПМП-2), смонтированных на печатной плате с электронной подсистемой, размещенной в алюминиевом корпусе (рис. 1*а*). При функционировании магнитометр ММ-3 формирует цифровой выходной сигнал, зависящий от уровня внешнего магнитного поля, и имеет характеристики, представленные в табл. 1.

Во встроенном программном обеспечении реализована функция компенсации погрешности измерений магнитометра, обусловленной различием уровня чувствительности по трем осям, смещением нулевого уровня и неортогональностью расположения преобразователей. Предварительно определенные методом построения эллипсоида показаний [3, 4] калибровочные коэффициенты хранятся в энергонезависимой памяти прибора.

Преобразователи магнитного поля ПМП-1 и ПМП-2, а также магнитометр ММ-3 освоены в серийном производстве и поставляются с приемкой ОТК.



а *б*

Рис. 1. Внешний вид разработанного цифрового микросистемного магнитометра ММ-3 (*а*); схематическое изображение расположения преобразователей магнитного поля на плате электронной подсистемы магнитометра (*б*)

Таблица 1. Основные технические характеристики цифрового микросистемного магнитометра ММ-3

Наименование параметра	Значение параметра
Количество осей чувствительности	3
Диапазон измерения индукции магнитного поля (по каждой оси), не менее, нТл	±100000
Рабочий диапазон частот, Гц	0–50
Нелинейность, не более, %	0,5
Выходной интерфейс	CAN2B
Габаритные размеры, мм × мм × мм	56×36×16,3
Масса, г	35
Напряжение питания, В	8,0–12,0
Ток потребления (при напряжении питания 12 В), не более, мА	40,0
Рабочий диапазон температур, °С	−40...+85

Литература

1. Tumansky S. Handbook of Magnetic Measurements. 2011 by Taylor & Francis Group, LLC.
2. Sreevidya P.V., Jakeer Khan, Barshilia H.C., Ananda C.M., Chowdhury P. Development of two axes magnetometer for navigation applications // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018. Vol. 448. P. 298–302.
3. Renaudin V. et al. Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain // Hindawi Publishing Corporation Journal of Sensors, 2010.
4. Demoz Gebre-Egziabher, Gabriel H. Elkaim, J. David Powell, Bradford W. Parkinson. Calibration of Strapdown Magnetometers in Magnetic Field Domain // Journal of Aerospace Engineering, April 2006. 19 (2).

УДК 629.052.9

Изготовление встречно-штыревого актюатора с боковым движением методом плазмохимического травления до стоп-слоя Ti/Al

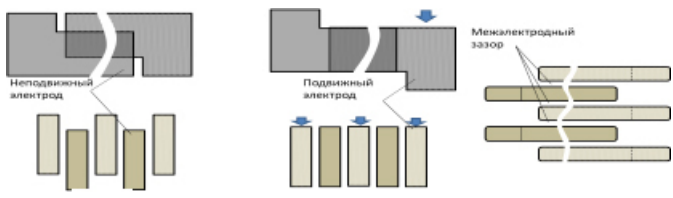
Жукова С. А., к. т. н., Обижаев Д. Ю., к. т. н., Суздальцев С. Ю., к. т. н., Чуканова Т. С., к. т. н., Ульянов С. А.
ФГУП «ЦНИИХМ»
115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16А

Предложена последовательность технологических этапов формирования микромеханического встречно-штыревого актюатора (МЭМС-актюатор) с электростатическим боковым перемещением для создания чувствительных элементов микромеханических инерциальных датчиков (акселерометров, гироскопов). Технология основана на формировании заданного профиля структур типа «кремний над полостью» (КНП) на лицевой и обратной поверхностях рабочего слоя с помощью плазмохимического травления кремния с использованием скрытых масок и металлического стоп-слоя.
Ключевые слова: встречно-штыревой актюатор; МЭМС-актюатор; КНП; глубокое анизотропное ионное травление.

Электростатический способ управления подвижными микромеханическими элементами позволяет перемещать исполнительные механизмы в прецизионных устройствах с высокими повторяемостью и дискретностью. Электростатические МЭМС-актюаторы находят широкое применение в конструкциях чувствительных элементов микромеханических инерциальных датчиков (акселерометров компенсационного типа и гироскопов). Способы изготовления МЭМС-актюаторов на основе традиционных техпроцессов микроэлектроники часто базируются на технологии КНП. По указанной технологии устройства формируют с применением методов жидкостного и плазмохимического травления на основе тонких пластин монокристаллического кремния, которые закреплены над полостями в базовых подложках-носителях. В таких устройствах можно осуществить перемещение исполнительного механизма как вдоль, так и поперек плоскости пластины. Электростатическое притягивание и/или отталкивание для КНП-структур наиболее эффективно реализуется во встречно-штыревых конструкциях [1]. Применение МЭМС-актюаторов с боковым перемещением в конструкции чувствительных элементов микромеханических гироскопов позволяет существенно снизить их нелинейность при сохранении малых габаритов. Для изготовления высокоточного МЭМС-актюатора с боковым перемещением возможно использовать конструкцию на основе встречно-штыревого механизма с чередованием высоты расположения штырей и с электростатическим боковым движением. Целью представленной работы является разработка технологии КНП на основе плазмохимического травления кремния до стоп-слоя, пригодной для изготовления встречно-штыревого актюатора с электростатическим боковым перемещением.

Встречно-штыревой механизм с чередованием высоты расположения штырей должен быть изготовлен в виде системы из подвижного и неподвижного электродов (рис. 1*а*, *б*), которые представляют собой набор штырей в виде плоскопараллельных

пластин из монокристаллического кремния. В исходном положении штыри на обоих электродах расположены с равным межэлектродным зазором, но при этом не совмещены между собой по высоте (рис. 1*а*, *в*). При приложении разности потенциалов к электродам возникает электростатическое втягивающее усилие, приводящее к смещению подвижного электрода (рис. 1*б*). Величина смещения электрода пропорциональна величине электрического поля, но не более чем исходная высота чередования штырей.



а *б* *в*

Рис. 1. Схема кремниевого электростатического привода с боковым перемещением на основе встречно-штыревого механизма с чередованием высоты расположения штырей: исходное положение штырей в виде плоскопараллельных пластин, вид сбоку (*а*); положение штырей после приложения разности потенциалов между подвижным и неподвижным электродами, вид сбоку (*б*); положение штырей до и после перемещения, вид сверху (*в*)

Движение электродов происходит перпендикулярно плоскости рабочего слоя КНП. В представленной конструкции подвижный и неподвижный электроды симметричны и взаимозаменяемы, поэтому такой МЭМС-актюатор способен создавать перемещение не только по направлению к поверхности рабочего слоя КНП, но и от нее.

Для изготовления МЭМС-актюатора разработана последовательность технологических этапов, необходимых для формирования заданного профиля структур КНП на лицевой и обратной поверхностях рабочего слоя. Технология основана на процессах плазмохимического травления кремния с использованием скрытых масок и металлического стоп-слоя. На подготовительном этапе изготавливается пара пластин по технологии КНП. Тонкий и хрупкий рабочий слой монокристаллического кремния толщиной 40–100 мкм расположен на прочной и толстой кремниевой пластине-носителе с отверстиями. Соединение пластин осуществлено методом прямого сращивания через слой SiO_2 толщиной 1–2 мкм. С внешней стороны рабочего слоя нанесена система масок из фоторезиста и SiO_2 таким образом, что над каждым неподвижным штырем находится маска из плазмостойкого фоторезиста, а над каждым подвижным штырем — маска из фоторезиста с подслоем из SiO_2 (рис. 2*а*). Причем на внутренней стороне пластины под каждым подвижным штырем изготовлена система полостей в кремнии глубиной в 1/3 от толщины рабочего слоя (см. рис. 2*а*, нижняя полость). Глубина этих полостей определяет исходную высоту чередования штырей. На втором этапе на внутреннюю поверхность рабочего слоя, в том числе и на поверхности нижних полостей, наносится металлический стоп-слой из Ti/Al толщиной 50/1500 нм методом магнетронного распыления (рис. 2*б*). На третьем этапе проводится первое глубокое анизотропное ионное травление с наружной стороны через маску из фоторезиста (рис. 2*в*) на глубину в 2/3

от толщины рабочего слоя. В процессе травления формируются верхние штыри, которые расположены с внешней стороны рабочего слоя на подвижном электроде. На четвертом этапе в кислородной плазме удаляется фоторезистивная маска (рис. 2*г*) и оголяется скрытая маска из SiO_2. На пятом этапе проводится глубокое анизотропное ионное травление с наружной стороны через скрытую маску. Это приводит к дальнейшему углублению уже сформированных канавок до прохождения полной толщины рабочего слоя и к одновременному уменьшению высоты расположения нижних штырей (на неподвижном электроде), причем без изменения профиля верхних штырей (рис. 2*д*). В течение второго этапа травления маска уже отсутствует над каждым из неподвижных штырей, поэтому их высота уменьшается на 1/3 от толщины рабочего слоя. Наличие стоп-слоя положительно сказывается на профиле канавок травления за счет блокирования появления сквозных отверстий в рабочем слое как в финальной части первого глубокого анизотропного ионного, так и в течение всего второго. Это устраняет утечки охлаждающего гелия из-под пластины и улучшает теплоотвод от травимой структуры. Кроме того, стоп-слой устраняет эрозию поверхности кремния на обратной стороне нижних и верхних штырей. На заключительном, шестом этапе удаляется маска из SiO_2 и стоп-слой из Ti/Al методами плазмохимической и жидкостной обработки (рис. 2*е*).

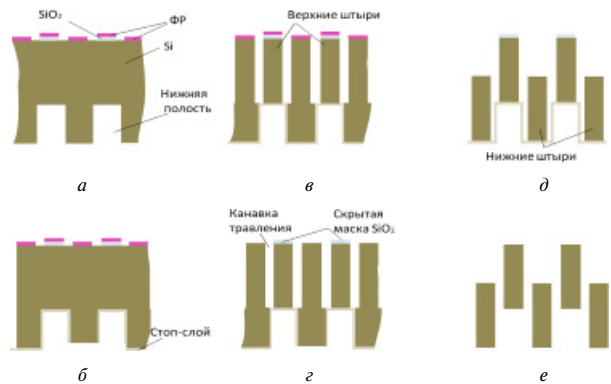


Рис. 2. Последовательность технологических этапов формирования профиля структур КНП на лицевой и обратной поверхностях рабочего слоя для изготовления встречно-штыревого актюатора с электростатическим боковым перемещением

Таким образом, указанная технология позволяет проводить процессы изготовления МЭМС-актюаторов с боковым движением, обеспечивающих возможность формирования чувствительных элементов микромеханических инерциальных датчиков.

Литература

1. Мухуров Н. И., Ефремов Г. И. Электромеханические микроустройства / под ред. И. С. Александрович. — Минск: Белорусская наука, 2012. — 258 с. ISBN 978-985-08-1419-7.

УДК 544.653

Электрохимическое конструирование гибких сенсоров на основе диоксида марганца для бесферментного определения глюкозы

Филимоненков И. С.[1], к. х. н., Мохова А. И.[1], Урванов С. А.[1], к. х. н., Куржумбаев Д. Ж.[1,2]

[1] НИЦ «Курчатовский институт» — ТИСНУМ
108840, г. Москва, Троицк, ул. Центральная, 7а
filimonenkov@tisnum.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Изготовлены гибкие сенсорные электроды на основе электроосажденного диоксида марганца. Исследовано влияние параметров электроосаждения на физико-химические и электрохимические характеристики полученных сенсоров в реакции бесферментного окисления глюкозы в нейтральной среде.

Ключевые слова: бесферментное окисление глюкозы; диоксид марганца; электроосаждение; непрерывный мониторинг глюкозы; сахарный диабет.

К 2025 году число взрослых пациентов с сахарным диабетом достигло 589 миллионов во всем мире [1]. Пациенты с диабетом страдают от повышенного уровня глюкозы в крови, который требуется регулярно контролировать при помощи глюкометров или малоинвазивных систем непрерывного мониторинга глюкозы, основанных на электрохимическом методе определения глюкозы с использованием ферментативных электродов. Несмотря на высокую активность и селективность таких электродов в реакции окисления глюкозы, их главным недостатком остается недостаточно высокая стабильность искусственно иммобилизированного фермента, поэтому в литературе активно ведется разработка бесферментной альтернативы. Недавно показано, что диоксид марганца является перспективным катализатором для количественного определения глюкозы в физиологических условиях [2]. В данной работе исследуется связь между условиями электрохимического конструирования гибких сенсоров на основе MnO_2 и их физико-химическими и электрохимическими характеристиками в глюкозной реакции.

Гибкие сенсорные электроды на основе MnO_2 изготавливали и тестировали в термостатируемой трехэлектродной ячейке. Вспомогательным электродом и электродом сравнения служили платиновая проволока и насыщенный каломельный электрод соответственно. Потенциостатическое электроосаждение пленок MnO_2 на рабочие электроды из гибкой графитовой фольги производства ООО «Силур» (толщина 150 мкм) проводили из водных растворов $MnSO_4$ разной температуры (15–50 °C) и концентрации (0,01–1 М) при различных приложенных потенциалах (от +0,786 до +1,545 В) до пропускания фиксированного заряда (458 мКл/см^2). Образование гидратированного MnO_2 на приготовленных электродах подтверждали методом энергодисперсионной спектроскопии. Загрузка $MnO_2{\cdot}xH_2O$, оцененная по приросту массы электродов, составила около 0,3–0,4 мг/см^2. Методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) подтверждена ячеистая структура поверхности

MnO_2 (размер ячеек от 15 до 100 нм), а также обнаружено существенное влияние концентрации электролита осаждения и приложенного потенциала на морфологию поверхности образуемого оксидного покрытия.

Бесферментное окисление глюкозы на изготовленных электродах проводили в фосфатном буферном растворе с pH 7,40 ± 0,02 (8 г/л NaCl, 0,2 г/л KCl, 1,44 г/л Na_2HPO_4, 0,24 г/л KH_2PO_4), содержащем 7 мМ глюкозы. Обнаружено, что ток окисления глюкозы слабо зависит от температуры электролита осаждения, заметно увеличивается при снижении потенциала осаждения и существенно возрастает при уменьшении концентрации $MnSO_4$. Сопоставление результатов с данными РЭМ позволяет сделать вывод о том, что рост активности сенсора связан с увеличением размеров ячеек MnO_2 в структуре катализатора, обеспечивающим большую доступную поверхность для диффузии в поры и последующего окисления молекул глюкозы.

Амперометрическое определение глюкозы с использованием наиболее активного сенсорного электрода проводили при потенциалах от +0,75 до +0,85 В при 25 и 37 °C в фосфатном буферном растворе, содержащем от 1 до 30 мМ глюкозы. Получены линейные зависимости тока сенсора от квадратного корня из концентрации глюкозы во всем диапазоне содержаний. Величины чувствительности электрода составили 42 и 81 мкА/(см^2 мМ^{0,5}) при 25 и 37 °C соответственно. Показана долгосрочная стабильность сигнала сенсора и подтверждена хорошая селективность в окислении глюкозы по отношению к ряду веществ-интерферентов, встречающихся в реальной крови (фруктоза, галактоза, ксилоза, рибоза, мочевина, молочная и аскорбиновая кислоты, ацетон, парацетамол).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-00184.

Литература

1. International Diabetes Federation. IDF Diabetes Atlas. 11th edn. Brussels, Belgium, 2025. 125 p.
2. Filimonenkov I. S., Mokhova A. I., Urvanov S. A. et al. α-MnO_2 with a cryptomelane structure for the non-enzymatic glucose electrooxidation in a neutral medium // Electrochimica Acta, 2024. Vol. 508. Article № 145267.

УДК 53.083.98

Технологические проблемы изготовления массива термочувствительных элементов по МЭМС-технологии с критическим минимальным размером менее 300 нм

Мелехин М. А., Платонов Д. Д., Ткаченко А. В., Юркин Н. О.
ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
maksim.melekhin@mapperllc.ru

В данной работе представлены результаты решения основных технологических проблем, возникших при отработке маршрута изготовления массива термочувствительных элементов на кремниевой пластине с интегральной микросхемой считывателей.

Ключевые слова: МЭМС; единичный термочувствительный элемент; массив термочувствительных элементов.

Изготавливаемый ООО «Маппер» массив термочувствительных элементов (МТЭ) по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе оксида ванадия (VO_x) на кремниевой пластине с интегральной микросхемой считывателей конструктивно имеет зазор менее 1,0 мкм между единичными термочувствительными элементами (ЕТЭ).

Основные технологические проблемы, решаемые при изготовлении конструкции ЕТЭ:

- формирование упругих элементов подвеса (ламелей);
- формирование контакта между теплопроводящими ламелями и контактом к интегральной микросхеме считывателей;
- вскрытие контактной площадки к проводящему слою.

В результате решения обозначенных проблем и отработки технологического маршрута изготовления МТЭ на кремниевой пластине с интегральной микросхемой считывателей был получен образец с требуемыми техническими характеристиками.

УДК 538.975

Исследование технологии травления жертвенных слоев в МЭМС-структурах микроболометрических матричных детекторов

Бетрозов С. Б., Сильницкая О. А., Шилейко Н. А., Соколов К. В.
АО «ОКБ «Астрон»
140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1
bsb@astrohn.ru, info@astrohn.ru

В работе рассматриваются технологические аспекты плазмохимического травления жертвенных слоев в МЭМС-структурах микроболометрических матричных детекторов. Исследовано влияние применяемого оборудования и параметров технологического процесса на скорость, равномерность и селективность травления жертвенных слоев, а также устойчивость капсулирующих слоев МЭМС-структуры к процессу травления.
Ключевые слова: плазмохимическое травление (ПХТ); жертвенный слой; микро-электромеханическая система (МЭМС); микроболометрический детектор; фотоприемное устройство (ФПУ).

В процессе развития МЭМС-технологии для формирования неохлаждаемых матричных микроболометрических детекторов в качестве жертвенных слоев использовался целый ряд различных материалов [1–3]. В настоящее время наиболее активно используемым зарубежными производителями жертвенным материалом является полиимид, в частности полиимид PI2610 [4]. В нашей стране ведутся перспективные исследования по замене жертвенного слоя из полиимида на α-кремний.

Одной из критических операций технологии изготовления матричных микроболометрических детекторов является процесс травления жертвенного слоя. При этом решающее значение имеет как выбор материала жертвенного слоя, так и оптимизация технологии его травления.

В работе описан процесс травления жертвенного слоя на основе полиимида и α-кремния для единичных образцов, и его изменения при групповом процессе травления. Толщина жертвенного слоя составляет около 2,5 мкм, шаг элементов образцов 12 и 17 мкм. Исследования проводились на кристаллах, в металлокерамических корпусах — данное условие позволяет минимизировать риск повреждения чувствительной области микроболометрической матрицы в процессе сборки, так как корпус детектора служит дополнительной защитой для матрицы на последующих этапах сборки.

Для исследований использовались установки плазмохимической обработки материалов в атмосфере O_2 и газовой смеси $Ar + SF_6$. Изучено влияние параметров обработки (давление в камере, расход газов, мощность ВЧ-генератора установки ПХТ) на скорость, равномерность и селективность травления жертвенных слоев. Подобраны оптимальные режимы ПХТ для единичного и группового процессов травления, при которых достигается равномерное удаление жертвенного слоя по всей площади микроболометрической матрицы и отсутствуют критические перегревы конструкции элемента, вызывающие нарушения его геометрии.

Литература

1. Фетисов Е. А., Хафизов Р. З., Белин А. М., Рудаков Г. А., Золотарев В. И., Федирко В. А., Рыгалин Д. Б. Инфракрасные фоточувствительные элементы на основе МЭМС, V Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем». Москва, Россия, 2012. Сборник трудов. — С. 658–661.
2. Rygalin D. B., Fetisov E. A., Khafizov R. Z., Zolotarev V. I., Reshetnikov I. A., Kirilenko E. P., Rudakov G. A., Lapshin R. V. Promising integral matrix detectors of thermal radiation with optical reading // Russian Microelectronics, 2014. Vol. 43. № 7. P. 516–518.
3. Evsikov I. D., Demin G. D., Djuzhev N. A., Fetisov E. A., Khafizov R. Z. TCAD Simulation of Sacrificial Layer Etching in Sensitive Element of IR Microbolometer Array Based on SOI Structure // Сборник трудов XI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем — 2022» (МЭС-2022). Россия, Москва, март—ноябрь 2022. ИППМ РАН, Выпуск IV. — С. 228–232.
4. Chen Y., Mao H., Tan Q., Xue C., Ou W., Liu J., Chen D. Fabrication of polyimide sacrificial layers with inclined sidewalls based on reactive ion etching, AIP Advances 4, 2014. P. 031328-1–031328-7.

УДК 535.015

Особенности МЭМС-технологии формирования субволновых метаповерхностей для ультракомпактной оптики инфракрасного диапазона

Жукова С. А., к. т. н., Шашкин И. В.
ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИХМ»
115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а
szh17@ya.ru

Исследованы варианты технологических решений по проектированию субволновых метаповерхностей планарных оптических элементов из кремния для инфракрасных объективов малогабаритных камер длинноволнового диапазона. Проведен сравнительный анализ конструктивных особенностей и оптических характеристик, полученных в результате реализации каждого из вариантов решений. Приведено краткое описание этапов численного моделирования структур метаповерхностей и представлены результаты изготовления тестовых образцов, полученных с использованием технологических процессов, применяемых при производстве микроэлектромеханических (МЭМС) изделий.
Ключевые слова: метаповерхности; планарная оптика; МЭМС; тепловизионная техника.

Субволновая дифракционная оптика, известная как метаоптика, продемонстрировала потенциал для существенной миниатюризации систем визуализации. Использование метаоптических систем (оптических элементов, представляющих собой планарные структуры со сформированными на их поверхности регулярными топологическими неровностями (метаатомами)) позволяет в несколько раз снизить массу и стоимость объективов современных электронно-оптических систем, что особенно важно при создании аппаратуры визуализации инфракрасного диапазона, где приходится использовать дорогостоящие массивные линзы из монокристаллического германия [1–2]. Однако большинство метаоптических систем визуализации имеет сильные хроматические аберрации, что ограничивает их применимость [3]. Бурное развитие методов проектирования планарной оптики во всем мире движется по множеству направлений, включающих полномасштабное численное моделирование оптических систем на основе FDTD (finite difference time domain), RCWA (rigorous coupled wave analysis) и других численных методов, в том числе с привлечением методов машинного обучения. При этом классические инструменты оптического проектирования на основе трассировки лучей также продолжают применяться на определенных участках расчета оптических систем. Сложность проектирования заключается в том, что выбор конфигураций метаатомов и координат их размещения на поверхности планарного элемента существенно усложняется с увеличением площади метаповерхности. Габариты и форма отдельного метаатома могут существенно видоизменяться в зависимости от его местоположения, не говоря уже об отличиях субволнового поведения отдельных метаатомов в зависимости от равномерности решетки, частью которой они являются.

В данном исследовании проведен анализ двух различных подходов к проектированию инфракрасных оптических систем с планарными элементами,

существенно снижающих хроматическую аберрацию. Проводится сравнение оптических характеристик метаповерхностей от характеристик традиционных преломляющих линз и металинз с гиперболическим профилем, а также сравнивается сложность их цифрового моделирования и влияние вычислительных ресурсов и величины апертуры на время работы программного обеспечения до момента окончательного формирования метаструктур.

Описаны требования к уровню технологического процесса изготовления метаповерхностей с использованием оборудования для травления кремниевых структур, традиционно предназначенного для производства серийной МЭМС-продукции.

На протяжении всего процесса проектирования осуществляется фиксация получаемых оптических характеристик разрабатываемых оптических систем в целях ослабления осевых аберраций для последующего их сравнения с экспериментальными данными.

Литература

1. Meem M. et al. Broadband lightweight flat lenses for long-wave infrared imaging // Proc. Natl Acad. Sci., 2019. USA 116. P. 21375–21378.
2. Lin H.-I. et al. Wide field-of-view, large-area long-wave infrared silicon metalenses // arXiv preprint, 2023. arXiv:2307.12974.
3. Presutti F., Monticone F. Focusing on bandwidth: achromatic metalens limits // 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2020. P. 1–2.

УДК 53.083.98

Автоматизированный подход к выявлению и устранению микродефектов кремниевых пластин при производстве МЭМС

Мелехина П. И.[1], Герасимов Д. Л.[1], Иванова О. К.[1,2]
[1] ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
polina.melekhina@mapperllc.ru

Разработана методика, объединяющая автоматизированную оптическую инспекцию и лазерную абляцию для выявления и устранения микродефектов на кремниевых пластинах. Подход позволяет увеличить выход годной продукции и повысить эффективность в серийном МЭМС-производстве ООО «Маппер».

Ключевые слова: МЭМС; микродефекты; дефектоскопия; автоматическая оптическая инспекция; лазерная абляция.

Особую сложность при серийном производстве чувствительных элементов (ЧЭ) микроэлектромеханических (МЭМС) устройств представляет анализ допустимости дефектов. Например, в конструкциях ЧЭ МЭМС-устройств существуют «запрещенные зоны», в которых даже незначительный по высоте дефект (например, свыше 2 мкм) может привести к полной утрате требуемой функциональности. В то же время в других областях допустимы отклонения по высоте до 10 мкм, не влияющие на требуемую функциональность и выходные характеристики изготавливаемого ЧЭ МЭМС-устройства. В связи с этим крайне актуальной задачей при серийном производстве ЧЭ МЭМС-устройств является не только обнаружение дефектов, но и оценка формы, координат и их влияния в контексте конкретного конструктивного элемента.

Предлагаемая методика сочетает автоматизированную оптическую инспекцию (АОИ) с использованием программного обеспечения Axalit и прецизионную лазерную абляцию. В рамках АОИ применяется автоматизированная система детектирования дефектов (АСДД), обеспечивающая построение детализированных изображений поверхности пластины, сегментацию, выделение контуров и классификацию по восьми параметрам, включая форму, площадь, яркость, цветность и эквивалентный диаметр. Обработка ведется с использованием обучаемой нейросетевой модели, что обеспечивает высокую точность при большом объеме обрабатываемых данных.

На следующем этапе производится построение дефект-карты, по которой формируется стратегия удаления. Только критичные дефекты в функциональных зонах направляются на обработку: с помощью лазерного излучения осуществляется локальное испарение дефектных структур. Обработка ведется с точностью до 5 мкм и глубиной до 10 мкм, без затрагивания окружающих участков чипа. Результаты проводимой лазерной абляции анализируются с помощью получаемых изображений 3D-профиля, на которых видно, что после воздействия лазера дефекты либо полностью устранены, либо доведены до допустимого уровня, соответствующего техническому регламенту изделия. Данная методика была апробирована

на серийном производстве ЧЭ МЭМС-устройств ООО «Маппер» и показала, что в среднем до 77 % дефектных чипов можно перевести в категорию годных, при этом из общего количества выявленных дефектов только часть требует вмешательства — остальные остаются в пределах допуска. Это позволяет существенно сократить объем брака, снизить производственные издержки и минимизировать влияние человеческого фактора в процессе контроля качества ЧЭ МЭМС-устройств.

Литература

1. Заблоцкая Е. Ю., Род И. А., Таренкин А. И., Казачков А. О., Шамирян Д. Г. Автоматизированная инспекция дефектов литографии как метод контроля качества МЭМС-элементов // Нано- и микросистемная техника, 2017. — № 10. — С. 605–613.
2. ООО «АКСАЛИТ Софт» Нейронная сеть в программном обеспечении AXALIT. URL: https://axalit.ru/articles/neyronnaya-set-v-programmnomobespechenii-axalit (дата обращения: 20.05.2025).

УДК 621.382

Разработка технологического процесса сращивания пластин из боросиликатного стекла

Бикаев Р. И., Антонов Е. О., Фролова А. О.
ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
rafael.bikaev@mapperllc.ru

Разработан технологический процесс качественного прямого сращивания пластин из боросиликатного стекла. Представлено описание технологического процесса активации поверхности перед сращиванием. Выполнен подбор температурного режима сращивания пластин.
Ключевые слова: сращивание боросиликатного стекла; прямое сращивание пластин; активация поверхности стекла при сращивании; бондирование.

Сращивание (бондинг) пластин из боросиликатного стекла является основой в производстве микрофлюидных устройств, в которых используется манипуляция малыми объемами жидкости в микроскопических каналах для таких областей применения, как биохимия, молекулярная биология, клеточная биология и т. д. Между двумя сращиваемыми пластинами формируются микроскопические каналы, в связи с чем достижение требуемого качества при сращивании пластин является основной задачей.

Основным критерием достижения качественного прямого сращивания пластин из боросиликатного стекла является отсутствие пустот между сращиваемыми пластинами. В ООО «Маппер» для того, чтобы исключить образование пустот, разработан технологический процесс, включающий в себя активацию поверхности для формирования химических связей, необходимых для сращивания пластин из боросиликатного стекла. Кроме того, осуществлен подбор температурных режимов как для процесса предварительного, так и высокотемпературного сращивания.

Литература

1. Knechtel R., Wiemer M., Fromel J. Wafer level encapsulation of microsystems using glass frit bonding // Microsyst. Technol., 2006. Vol. 12. № 5. P. 468–472.
2. Berthold A., Nicola L., Sarro P. M., Vellekoop M. J. Glass-to-glass anodic bonding with standard IC technology thin films as intermediate layers // Sensors and Actuators A: Physical, 2000. Vol. 82. Issues 1–3. P. 224–228.

УДК 621.38

Оптимизация процессов проекционной фотолитографии при внеосевом режиме засветки освещения в UV-фотолитографии для изготовления МОЭМС-устройств

Пигулевская Т. С., Платонов Д. Д., Юркин Н. О.
ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
tatyana.pigulevskaya@mapperllc.ru

Рассматривается применение режима кольцевого внеосевого освещения в проекционной UV-фотолитографии для повышения глубины фокуса. Приведен обзор влияния параметров σ_{in} и σ_{out} на стабильность формирования критических размеров. Предложен план эксперимента на проекционном литографе ASML PAS 5500D. Полученные результаты могут быть использованы для повышения равномерности и воспроизводимости литографических процессов.
Ключевые слова: МОМЭС; фотолитография; внеосевое освещение; режим кольцевого освещения; глубина фокуса.

Одной из задач литографии при производстве чувствительных элементов (ЧЭ) микрооптоэлектромеханических (МОЭМС) устройств является обеспечение стабильности критических размеров (critical dimensions — CD) по всей площади пластины. Для повышения глубины фокуса (depth of field — DOF) и устойчивости процесса предлагается использовать кольцевой режим внеосевого освещения (annular off-axis illumination), позволяющий точечно настраивать углы падения света с помощью параметров внутреннего и внешнего радиуса кольца интенсивности σ_{in} и σ_{out} соответственно [1].

В работе рассматривается влияние параметров σ_{in} и σ_{out} на DOF в условиях UV-проекционной литографии. Предложена методика экспериментального исследования с использованием проекционного литографа ASML PAS 5500D, обладающего необходимыми возможностями регулировки числовой апертуры и режима освещения. Целью является подбор конфигурации, обеспечивающей максимальную глубину фокуса при сохранении CD в пределах 300 нм.

Результаты планируется применить при оптимизации технологических процессов фотолитографии на стадиях разработки и серийного производства ЧЭ МОЭМС-устройств.

Литература

1. Mack C. A. Field Guide to Optical Lithography. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2006.

Автономный модуль регистрации гидроакустической обстановки на основе электрохимического гидрофона

Зайцев Д. Л.[1], Гордеев Я. А.[1], Дудкин П. В.[1], Криштоп В. Г.[1,2], Горина Е. В.[1], Горемыкин И. А.[1], Янченко С. Г.[1], Горчаков И. В.[1], Рожников Д. Ю.[1]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
zaitcev.dl@mipt.ru
[2] Институт проблем технологии микроэлектроники РАН
142432, г. Черноголовка, ул.Академика Осипьяна, 6
krishtop@iptm.ru

Разработан и испытан в реальных условиях эксплуатации автономный гидроакустический модуль (буй) на основе электрохимического гидрофона, предназначенный для гидроакустического мониторинга и освещения подводной обстановки и позволяющий автоматически обнаруживать, локализовывать, сопровождать и классифицировать движущиеся объекты в зоне мониторинга, в том числе в режиме реального времени.

Ключевые слова: гидрофон; электрохимические преобразователи параметров движения; гидроакустический мониторинг.

Разработан автономный модуль (буй) для гидроакустического мониторинга и освещения подводной обстановки, позволяющий автоматически обнаруживать, локализовывать, сопровождать и классифицировать движущиеся объекты в зоне мониторинга. Модуль представляет собой комплекс программно-аппаратных средств, в состав которого входят электрохимический гидрофон и автономные системы для считывания сигнала, его обработки и передачи результатов, а также алгоритм автоматической обработки сигнала.

Электрохимический гидрофон [1–5] обеспечивает регистрацию сигналов с высокой чувствительностью в целевой части спектра, в т. ч. в субгерцевом и инфразвуковом диапазонах, где он превосходит все известные датчики. Также преимуществом электрохимического гидрофона является выход по напряжению, т. е. для подключения электрохимического гидрофона к регистратору не нужен чувствительный преобразователь заряда.

Разработанный алгоритм обработки гидроакустического сигнала обеспечивает автоматическое выявление событий в потоке данных, регистрируемых молекулярно-электронным гидрофоном, в том числе в режиме реального времени. Реализовано автоматическое выявление спектральных сигнатур и автоматическая классификация объектов, а также обнаружение движения объектов методами спектральной корреляции, автоматическое составление сигнатур обнаруженных объектов, при этом используется информация как о частотных, так и о временных характеристиках поступающего на вход сигнала [6].

Проведены натурные испытания прототипа автономного буя в реальных условиях эксплуатации, включающие регистрацию движения объектов с известными спектральными сигнатурами, а также автоматическое обнаружение движущихся объектов с помощью корреляционного анализа спектральных компонент

обрабатываемого сигнала, составление их сигнатуры, локализация и дальнейшее сопровождение.

Целесообразно применение разработанного модуля в рубежных системах охраны акватории; решаемые задачи — автоматическое обнаружение и локализация пловца или малого плавсредства как в надводном, так и в подводном режиме движения, регистрация работы двигательных установок или рулей управления.

В перспективе возможна интеграция обработчика гидроакустических сигналов в нейросетевую модель локализации объектов, для этого потребуется разработка новых алгоритмов объединения информации из разных каналов, адаптация архитектуры нейросети, обучение модели и ее первичная валидация.

Литература

1. Зайцев Д. Л. и др. Молекулярно-электронный гидрофон для решения задач низкочастотного исследования шумов мирового океана // Доклады Академии наук, 2018. — Т. 483. — № 6. — С. 666–669.
2. Zaitsev D. L. et al. Frequency response and self-noise of the met hydrophone // Journal of sensors and sensor systems, 2018. Vol. 7. № 2. P. 443–452. URL: https://doi.org/10.5194/jsss-7-443-2018.
3. Криштоп В. Г. и др. Применение сверхнизкочастотных электрохимических гидрофонов в инфразвуковой гидролокации // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Гидроакустические системы обнаружения объектов». Сборник статей I Всероссийской научно-технической конференции. Анапа, 2021. — С. 16–22.
4. Криштоп Т. В. и др. Высокоточный гидрофон на основе планарного электрохимического преобразователя // Международный форум «Микроэлектроника-2018», 4-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов, 2018. — С. 470–471.
5. Krishtop T. V. et al. High-sensitive ultra-low frequency hydrophone // Proceedings of SPIE, 2019. Vol. 11022. ICMNE-2018, 1102210. URL: https://doi.org/10.1117/12.2522033.
6. Гордеев Я. А. и др. Программное обеспечение первичной обработки гидроакустических сигналов методом STA/LTA-анализа отдельных частотных компонент и последующего синтеза полученных данных: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025610647 от 13.01.2025.

УДК 66.08

Исследование синтеза стабилизированного терморезистивного слоя для применения в МОЭМС-устройствах

Данила А. В.[1], Иванова О. К.[1,2], Юркин Н. О.[1], Платонов Д. Д.[1]
[1] ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
andrey.danila@mapperllc.ru
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Проведено исследование синтеза терморезистивного слоя, полученного магнетронным напылением в реактивной среде кислорода, а также исследование температурной стабилизации терморезистивного слоя без осаждения защитного слоя в печи группового отжига для формирования стабильного терморезистивного слоя с требуемыми характеристиками.
Ключевые слова: МОЭМС; терморезистивный слой.

Переходы металл — изолятор (Metal-insulator transitions — MIT) в сильнокоррелированной электронной системе являются одними из самых интригующих явлений в физике конденсированных сред [1]. По сути, полностью обратимый фазовый переход завораживает интеллектуальным переключением в электропроводности, оптическими свойствами в ближнем ИК-диапазоне, а также магнитными свойствами, которые очень привлекательны для интеллектуальных устройств, таких как датчики температуры и энергоэффективные интеллектуальные окна. С точки зрения использования для датчиков температуры микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС) в ближнем ИК-диапазоне негативным является любой резкий переход полупроводник — металл (semiconductor-metal transition — SMT), или MIT. Кроме того, основную проблему составляет прямое применение его на практике из-за существенного отсутствия доступных методологий синтеза стабильного слоя, поскольку существующие маршруты и процессы промышленного производства приборов в дальнейшем требуют длительных высокотемпературных обработок на уровне пластины в районе 300–320 °C.

В рамках данной работы было проведено исследование синтеза терморезистивного слоя методом магнетронного распыления металлической мишени в реактивной среде кислорода с последующей термостабилизацией электрофизических свойств путем многократного длительного отжига в вакуумной печи группового отжига пластин.

Было подготовлено несколько типов образцов пластин с одинаковыми режимами осаждения каждого слоя. Толщина образцов варьировалась для понимания механизмов, возникающих в терморезистивном слое после длительных низкотемпературных отжигов, для эмуляции дальнейших сопоставимых по условиям процессов обработки пластины. В качестве начальных условий были воссозданы условия активации геттерного слоя при вакуумном корпусировании посредством сращивания пластин, т. е. температура 320 °C при длительном воздействии не менее 1 часа. Исследования промежуточного состояния структуры «околобамбуковая структура» показали аномальное поведение сопротивления, так как после первого отжига сопротивление увеличилось, а при последующих отжигах начало падать

вплоть до стабильного состояния (без изменения сопротивления) после семи отжигов и находилось в пределах исходных значений после осаждения.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для создания чувствительного элемента МОЭМС-устройств.

Литература

1. Booth J. M., Casey P. S. Anisotropic Structure Deformation in the VO_2 Metal-Insulator Transition // Physical Review Letters, 2009. Vol. 103. № 086402. P. 1–4.

УДК 661.665.12

Тенденции развития оборудования для промышленного выращивания монокристаллов карбида кремния методом сублимации

Бородин А. В.[1,2], Бородин В. А.[1,2], Юдин М. В.[1,2], Смирнов К. Н.[1]
[1] АО «ЭЗАН»
142232, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 9
bor@ezan.ac.ru
[2] ИФТТ РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2

Представлен анализ мирового рынка промышленных установок для выращивания монокристаллов SiC в период 2024–2032 гг. Рассматриваются конструктивные особенности и технические характеристики индукционных и резистивных установок ведущих мировых производителей. Приведены конструкция и характеристики опытной установки индукционного нагрева АО «ЭЗАН» для получения монокристаллов SiC диаметром 150 мм.
Ключевые слова: монокристаллы SiC; установки выращивания; технологии выращивания; индукционный и резистивный типы нагрева; тепловой узел.

Метод сублимации (метод ЛЭТИ или PVT) является основным методом получения монокристаллов карбида кремния для электронной промышленности. За последние 20 лет передовыми технологическими странами освоено коммерческое производство монокристаллов SiC для получения эпитаксиальных пластин (epi ready) диаметром 100, 150 и 200 мм. В 2025 году впервые представлены опытные образцы пластин 300 мм. В 2024 году мировой рынок печей для выращивания монокристаллов SiC превысил $1 млрд, а к 2032 году будет более $1,8 млрд. При этом в 2025 году объем рынка печей для кристаллов диаметром 150 мм составит $0,758 млрд, а печей для кристаллов 200 мм — $0,169 млрд, к 2032 году объемы мирового рынка для этих печей будут составлять соответственно $1,3 и $0,261 млрд [1]. Согласно прогнозу [2], к 2027 году мировой рынок подложек n-SiC достигнет 1,6 миллионов штук, из них подложки диаметром 150 мм будут составлять около 80 %, а подложки диаметром 200 мм — 10 %. Однако эти прогнозы по подложкам диаметром 200 мм и печам для производства кристаллов 200 мм представляются заниженными, так как в настоящее время десятки компаний уже производят кристаллы диаметром 200 мм, а также оборудование для их выращивания.

Кристаллы диаметром 150 мм успешно производятся с использованием установок с индукционным нагревом. Анализ конструкции и основных технических характеристик печей индукционного нагрева для роста кристаллов 150 мм ведущих мировых производителей, таких как PVA TePla (Германия), Nisshin Giken (Япония), Harbin KY Semiconductor (Китай), Jiangsu Xintlang Technology (Китай), TeKSiC (Швеция), GT Advanced Technology (США), Linton Crystal Technologies (США), Aymont Technology (США), CVD Equipment Corporation (США), показал, что установки имеют кварцевый реактор с внутренним размером 400–450 мм, длиной 800–1050 мм, боковым водяным охлаждением, опускаемую платформу (под) с тепловым узлом для обеспечения удобства эксплуатации. Максимальная температура

нагрева — 2300–2500 °C. Перемещаемый по вертикали индуктор в рабочем режиме — 0,1–0,5 мм/ч. Генератор индукционного нагрева имеет установочную мощность 40–60 кВт и частоту 3–12 кГц. Потребляемая мощность — 10–15 кВт. Применяется вакуумная откачка с использованием турбомолекулярного насоса. Имеются газовые системы для подачи газов: Ar, N_2, H_2, и автоматическая регулировка давления в диапазоне 0,5–1000 Торр. С модификацией теплового узла установки позволяют синтезировать шихту SiC. На некоторых установках появилась дополнительная опция для получения SiC методом TSSG. Установки индукционного нагрева также применяются для получения кристаллов диаметром 200 мм, однако все больше компаний для производства кристаллов большого диаметра предпочитают применение установок резистивного нагрева с боковым нагревателем и дополнительным независимым нагревательным элементов в зоне затравочного кристалла.

В отличие от этих конструкций, ведущая китайская компания TanKeBlue успешно использует установку, в которой индуктор располагается внутри нержавеющей вакуумной камеры, а размещение и выемка теплового узла осуществляется при открытой верхней крышке камеры. Конструкция и характеристики резистивных печей также анализируются в данной работе.

С учетом результатов изучения оборудования зарубежных производителей АО «ЭЗАН» разработаны и изготовлены опытные установки индукционного нагрева «НИКА-SiC-6М» для выращивания монокристаллов SiC диаметром 150 мм. Завершается подготовка производственных мощностей для серийного изготовления оборудования.

Работа выполняется в рамках соглашения № 020-11-2023-1603 с Минпромторгом России.

Литература

1. Report. SiC crystal growth furnaces, Verified Market Research, 2025.
2. SiC Substrate Demand by Year, 2023 Techcet Report.

УДК 621.382/.3

Анализ конструктивных решений оптико-механического оборудования ОАО «Планар» для работы с SIC-пластинами

Плебанович В. И., Аваков С. М.
ОАО «Планар»
220033, Республика Беларусь, г. Минск, Партизанский просп., 2
Vpleba@planar.by, ASM@planar.by

Проведен анализ перспектив использования оптико-механических установок ОАО «Планар» для работы с подложками из SIC. Показано, что текущее оборудование и перспективные разработки ОАО «Планар» позволяют организовать обработку подложек из SiC.
Ключевые слова: подложка SiC; степпер; установка контроля; оптико-механическое оборудование.

В последнее время при разработке новых силовых полупроводниковых изделий микроэлектроники обращается внимание на широкозонные полупроводники. В научно-технической литературе [1] все больше появляется статей, посвященных таким разработкам. Наиболее перспективными являются изделия, изготовленные в слоях широкозонных полупроводников GaN и SiC. Отличительными особенностями таких полупроводников относительно кремния являются высокая подвижность носителей, высокое напряжение пробоя, высокая температура рабочей точки и более низкое термическое сопротивление подложки. Все эти свойства позволяют создавать силовые приборы с улучшенными параметрами по быстродействию, работающими при более высоких напряжениях, токах и при более высоких рабочих температурах. Это в свою очередь позволяет разрабатывать и осваивать изделия меньших размеров при тех же параметрах с применением технологии субмикронных норм. И если раньше для изготовления изделия было достаточно технологических возможностей, которые предоставлялись установками контактной печати, то на данном этапе уже требуется применение проекционной литографии.

Отличительной особенностью установок проекционной печати (степпер) является то, что весь процесс загрузки пластин, ориентации, выравнивания, фокусировки, совмещения, экспонирования и выгрузки пластину в кассету проводится автоматически. Все узлы и датчики этих установок оптимизированы для работы с кремниевыми пластинами, которые составляют более 95% всех подложек, используемых в микроэлектронике.

Если сравнить кремниевую и карбидокремниевую пластины, то они отличаются по своим оптическим свойствам. Кремниевые пластины непрозрачны, а карбидокремниевые пластины полупрозрачны, цвет пластин зависит от политипа и степени легирования, табл. 1 [2].

К сожалению, в доступной литературе отсутствует информация о спектрах пропускания и отражения SiC-подложек. Поэтому нами были взяты две пластины SiC диаметром 100 мм на одном из предприятий и для этих пластин были сняты спектры пропускания и отражения на спектрофотометре Photon RT.

Таблица 1. Органолептические свойства SiC

Цвет	Политип	Примесь
Желтый	3C-SiC	—
Желто-зеленый	3C-SiC	N
Бесцветный	**4H-SiC**	**—**
Светло-коричневый	**4H-SiC**	**N (низкая концентрация)**
Бесцветный	**6H-SiC**	**—**
Голубой	**6H-SiC**	**Al**
Пурпурный	**6H-SiC**	**Al (высокая концентрация)**
Зеленый	**6H-SiC**	**N**
Желто-оранжевый	8H-SiC	N
Пурпурный	24R-SiC	N
Красный	27R-SiC	N

Как правило, на фотолитографии пластины используются с нанесенным фоторезистом, поэтому для анализа работы оптических датчиков оборудования мы использовали спектры поглощения фоторезистов, взятые из информационных материалов фирм-производителей. Особенностью рассматриваемых фоторезистов является то, что уровень поглощения для длин волн более 460 нм приблизительно равен нулю.

На примере степпера ЭМ-5784, выпускаемого в ОАО «Планар», рассмотрим, какие оптические датчики принимают участие в работе установки и как на их работу повлияет изменение характеристик отражения и пропускания подложки.

Все оптические датчики, которые работают с подложкой, а это датчик контроля нахождения пластины в кассете, датчик ориентации пластины, датчик фокусировки и датчик совмещения, работают на длине волны более 460 нм, что позволяет сделать вывод о том, что наличие фоторезиста на подложке слабо влияет на изменение параметров подложки и работоспособность датчиков всецело зависит от оптических свойств самой подложки.

Датчики, которые работают на отражение (совмещение и фокусировку) будут иметь сигналы от подложки SiC, практически идентичные сигналам от подложки Si, т. к. спектры отражения для данных подложек в данном диапазоне спектра практически совпадают.

Сигналы датчиков, работающие на пропускание, будут более зависимы от уровня настройки, но снижения сигнала на 75 % достаточно, чтобы гарантированно определить порог срабатывания.

Особое внимание стоит обратить на то, что часть энергии в процессе экспонирования будет проходить через подложку SiC и, следовательно, будет отражаться от столика, на котором расположена подложка. В ОАО «Планар» для изготовления столиков, на которых размещаются пластины, используется ситалл (специальный сплав стекла с нулевым коэффициентом термического расширения). Из графика видно, что только 5 % энергии экспонирования может быть отражено от столика.

В случае если столик изготовлен из хорошо отражающего материала (сталь, алюминий), отраженный свет приведет к обратной засветке фоторезиста, что значительно «уменьшит» окно процесса или сделает невозможным получение годной продукции.

Выводы

Системы загрузки пластин, реализованные в прецизионных оптико-механических установках производства ОАО «Планар», позволяют беспроблемно загружать / ориентировать / выгружать пластины SIC, что подтверждается практическими результатами работы с прозрачными подложками на некоторых предприятиях Российской Федерации.

Системы совмещения существующих установок и разработанные для новых установок (работающие на двух длинах волн) позволяют с высокой точностью проводить совмещение пластин в технологическом процессе.

Для stepper (scanner) требуется обратить внимание на конструкцию столика для пластин: его конструкция должна исключать отражение экспонирующего излучения.

Литература

1. SiC: микроэлектроника — это не только кремний. — URL: https://habr.com/ru/articles/478506.
2. Патент Российской Федерации на изобретение № 2156330 от 27.08.1996 // Драгоценные камни из карбида кремния.

Отечественная система автоматизации технологического процесса установки эпитаксии карбида кремния на подложках диаметром до 150 мм методом химического газофазного осаждения (CVD)

Барков В. Н.
АО «ЭЗАН»
142232, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 9

В докладе представлены отечественные программно-технические средства для создания автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), примененные в установки эпитаксии карбида кремния на подложках диаметром до 150 мм методом химического газофазного осаждения (CVD) (шифр «Гурзуф»). Установка состоит из связанных между собой функциональных узлов:

- кварцевая реакционная камера водяного охлаждения с фланцами из нержавеющей стали;
- тепловой узел индукционного нагрева и ростовая ячейка, обеспечивающая вращение подложек;
- роботизированный модуль загрузки-выгрузки подложек;
- вакуумная система и система подачи технологических газов;
- система для газоподготовки и подачи кремнийсодержащей компоненты на основе смеси «трихлорсилан — водород» (TCS-H2);
- система индукционного нагрева;
- термостатированный объем для хранения ТМА;
- система двухконтурного водяного охлаждения с водоподготовкой.

Все вышеперечисленные узлы будут автоматизированы с использованием контроллеров серии «КАТРЕН» и программного информационно-управляющего комплекса SCADA система «Соната». Контроллеры «КАТРЕН» образуют резервированную сетевую архитектуру, работающую под управлением SCADA системы «Соната». Контроллеры построены на базе отечественных микроконтроллеров компании АО «ПКК Миландр» и микропроцессора СКИФ компании АО НПЦ «ЭЛВИС». В докладе приведены характеристики процессорных модулей и модулей ввода-вывода контроллера «КАТРЕН». Описана архитектура АСУ ТП автоматизируемой установки «Гурзуф». Приведены примеры видеокадров интерфейса АСУ ТП установки, разработанные инструментальными средствами SCADA системы «Соната».

УДК 66.074.5.081.3

Очистители газов в точке использования как фактор повышения выхода годных в микроэлектронике

Сажнев С. В., к. т. н., Попенко В. Ф., к. х. н.
ООО «Элточприбор»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10
info@eltochpribor.ru

Разработан финишный очиститель технологических газов. Подобраны режимы регенерации и кондиционирования очистителей. Выбран состав сорбционно-каталитической среды. Определены основные параметры финишных очистителей для технологического оборудования в газовых процессах микроэлектроники.

Ключевые слова: финишный очиститель; инженерия инфраструктуры высокочистых газов; технологическое оборудование для газовых процессов; температурный режим; регенерация; сорбционно-каталитическая среда.

При проектировании, запуске и эксплуатации современного микроэлектронного производства особое место уделяется инженерии инфраструктуры обеспечения его высокочистыми технологическими газами.

Для линий подачи газов предусмотрены системы очистки технологических газов и финишные очистители непосредственно на входе в технологическое оборудование. Особое значение имеет чистота газов непосредственно в точке потребления, что требует развития финишных очистителей с требуемыми параметрами очистки, в особенности от кислородсодержащих и углеродных примесей, микрочастиц. Наличие кислородсодержащих и углеродных примесей выше уровня 1 ppb может существенно влиять как на выход годных на каждой отдельной технологической операции, так и на сквозной выход годных. Кроме этого, наличие примесей выше допустимого уровня может приводить и к образованию скрытых дефектов, которые проявляются уже на стадии эксплуатации готовых приборов. В настоящее время как финишные очистители, так и системы очистки в магистральных линиях подачи технологического азота на ведущих предприятиях микроэлектроники представлены зарубежными фирмами (в частности Entegris Inc., США). Отечественное производство финишных очистителей азота, которые требуют по регламенту периодической замены, полностью отсутствует. Это создает существенные трудности и риски как на действующих производствах, так и на вновь проектируемых. Высокие требования наноэлектронных технологий как на основе кремния, так и на основе A^3B^5-материалов диктуют необходимость развития данного направления в области очистки газов в кратчайшие сроки. При этом одним из экономически целесообразных решений являются разработка и внедрение технологии регенерируемых очистителей.

В настоящее время предъявляются следующие требования к чистоте магистральных газов (N_2, O_2, Ar, He, H_2): содержание микропримесей H_2O, O_2, CO_2, CO и углеводородов менее 1 ppbv каждого, количество частиц критического размера менее 0,1 част/л [1]. Такие высокие требования к чистоте технологических газов обусловлены тем, что пластины с кристаллами проходят обработку по большому комплексу физико-термических процессов, таких как эпитаксия, оксидирование

кремния, ионная имплантация, допирование легирующих примесей, нанесение и плазменное травление слоев диэлектриков и металлов, термообработка, и по другим процессам, чувствительным к чистоте технологических сред.

Большинство методов очистки газов основываются на принципах физической адсорбции и перевода трудносорбируемых микропримесей посредством каталитических реакций в легкоадсорбируемые примеси. По сравнению с хемосорбцией, физическая адсорбция использует более слабые силы (комбинацию сил Ван-дер-Ваальса и электростатических сил), что приводит к более низким температурам и легкой регенерации адсорбента, поскольку не создаются ковалентные связи. Адсорбированный CO_2 имеет более низкий химический потенциал, чем CO_2, который присутствовал в газовой смеси во время захвата. Физическая адсорбция происходит на поверхностях очень быстро, и, вместо того чтобы регулироваться собственной скоростью поверхностного процесса, ее кинетика в основном определяется массо- или теплопередачей. Отношение площади поверхности к объему адсорбента должно быть высоким, поскольку адсорбция является поверхностным явлением [3]. Для исследования адсорбентов и процессов очистки инертных газов разработан экспериментальный стенд с системами контроля подачи азота, температурных режимов регенерации адсорбента и измерения влажности азота, определены температурные режимы для процессов регенерации адсорбентов, проведены испытания по регенерации адсорбента в соответствии с разработанным регламентом, разработана конструкторская документация на определенный тип финишного очистителя. Испытания финишного очистителя на заключительном этапе монтажа и сдачи высокочистых газовых линий показали существенное снижения сроков обдувки линий от примесей влаги.

Литература

1. Евдокимов В. Л., Ранчин С. О. Требования к чистоте технологических сред в производстве кристаллов интегральной наноэлектроники // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — Вып. 1 (161). — С. 59–71.
2. Хамхоев Б. М. Торшхоева З. С., Иналова З. И., Шалухаева Р. А., Мархиева А. Я., Оздоева Е. В. Методы очистки и контроля качества газов, применяемых в технологических процессах микроэлектроники // Рефлексия, 2020. — № 5. — С. 11–16.
3. Wilson E. F. et al. A Review on the Use of Natural Gas Purification Processes to Enhance Natural Gas Utilization // Int. J. Oil, Gas Coal Eng., 2022. Vol. 11. P. 17–27.

УДК 621.315.592

Реализация разработки производственно-ориентированного отечественного эпитаксиального и планарного оборудования для материалов A^3B^5

Алексеев А. Н., Гердт А. Д., Новиков С. А., Петров С. И., Литвинов М. А.
АО «Научное и технологическое оборудование»
194156, г. Санкт-Петербург, просп. Энгельса, 27, лит. АД, офис 205
petrov@semiteq.ru

Показан текущий уровень разработок эпитаксиального и планарного оборудования для СВЧ-микроэлектроники, оптоэлектроники и радиофотоники. Представлены результаты перспективных разработок и производства опытных образцов оборудования для выращивания широкого спектра приборных гетероструктур на основе нитридов, арсенидов и антимонидов третьей группы, а также КРТ. Показаны результаты разработки производственно-ориентированного оборудования для плазмохимического травления и осаждения, а также электронно-лучевого и магнетронного напыления. Представлены результаты по локализации производства критически важных ключевых узлов для решения поставленных задач.

Ключевые слова: эпитаксия; A^3B^5; МЛЭ; МОГФЭ; плазмохимия; электронно-лучевое напыление.

На российском рынке сегодня существует потребность в установках молекулярно-лучевой и МОС-гидридной эпитаксии для получения гетероструктур на основе материалов A^3B^5 на подложках диаметром 100–150 мм. Применительно к молекулярно-лучевой эпитаксии необходимы установки для выращивания гетероструктур с увеличенным объемом источников и в ряде случаев с роботизированной загрузкой. Данные установки должны обеспечить стабильность ростовых параметров, которая критически важна для целого ряда перспективных приборов оптоэлектроники и микроэлектроники. Среди них можно выделить задачи по созданию мощных и малошумящих СВЧ-транзисторов на основе GaAs и GaN и оптоэлектронных приборов, таких как вертикально излучающие полупроводниковые лазеры (VCSEL), квантово-каскадные лазеры (QCL), однофотонные излучатели для квантовых компьютеров на основе гетероструктур с квантовыми точками. Также данное оборудование востребовано для получения инфракрасных фотоприемников на основе арсенидов и антимонидов третьей группы, а также соединений кадмий — ртуть — теллур (КРТ). Кроме того, для решения указанных задач необходима разработка установок МОС-гидридной эпитаксии гетероструктур на основе материалов A^3B^5, в том числе с групповой загрузкой пластин. Также существует необходимость разработки установок плазмохимического травления и осаждения, электронно-лучевого напыления и магнетронного распыления, близких функциональных аналогов зарубежного оборудования для реализации уже используемых технологических маршрутов для производства ЭКБ на ключевых российских предприятиях. В частности, требуются разработка и производство критически важных ключевых узлов, таких как источники индуктивно-связанной и емкостной плазмы

для установок плазмохимии, а также источников электронно-лучевого напыления для физического осаждения.

В докладе представлены результаты разработки универсальной платформы установок МЛЭ с увеличенной вместимостью источников и автоматизированной загрузкой образцов для выращивания гетероструктур на основе сложных полупроводников. Наиболее близким аналогом, отвечающим данным требованиям, является установка Riber 412, однако данная установка в серийном исполнении не обеспечивает возможность работы с подложками диаметром 150 мм. Такие установки востребованы для выращивания гетероструктур на основе GaAs и GaN на ряде российских и белорусских предприятий. Кроме того, в настоящее время данная платформа используется для разработки установок молекулярно-лучевой эпитаксии антимонидов третьей группы, включая разработку вентильного источника сурьмы и источника атомарного водорода, а также эпитаксии соединений на основе КРТ. Также в докладе представлены результаты разработки, осуществленной совместно с ведущими организациями отрасли, установок МОГФЭ для выращивания гетероструктур на основе GaN и GaAs —, функциональных аналогов установок Aixtron.

Кроме того, представлены результаты разработки оборудования для планарной обработки пластин, используемых на ключевых российских и белорусских предприятиях. В частности, представлены результаты разработки серии установок плазмохимического травления и осаждения — функциональных аналогов зарубежных установок Corial. Данные установки позволяют обрабатывать образцы диаметром 100–150 мм с использованием цилиндрического источника индуктивно-связанной плазмы, а также емкостной плазмы с возможностью подачи ВЧ-смещения на стол-электрод либо на диск-душ. Также представлены результаты разработки установок электронно-лучевого напыления и магнетронного распыления — функциональных аналогов зарубежных установок Evatec. Данные установки позволяют проводить напыление на групповые партии пластин диаметром 100–150 мм. Такие размеры подложек наиболее востребованы в отечественной СВЧ-микроэлектронике, оптоэлектронике и радиофотонике на основе материалов A^3B^5 в ближайшей перспективе. При этом предусмотрена возможность увеличения диаметра обрабатываемых пластин до 200 мм. Важно отметить, что на многих предприятиях радиоэлектронной промышленности в разработанных технологических маршрутах, обеспечивающих выпуск электронной компонентной базы, используются установки импортного производства. Для максимально быстрого переноса технологических маршрутов на новые технологические линейки, построенные на оборудовании отечественного производства, необходимыа разработка и дальнейшее серийное производство именного близких функциональных аналогов импортного оборудования. Кроме того, необходимо отметить, что в рамках разработки данных установок должны быть изготовлены и испытаны ключевые функциональные узлы, такие как источники плазмы, источники электронно-лучевого напыления, включая источники питания и управления, источники магнетронного напыления со сканированием мишени и ряд других. Рассматриваются вопросы проектирования и технологичности изготовления ключевых функциональных узлов оборудования. Данные разработки обеспечат российских и белорусских разработчиков и производителей полупроводниковых приборов средствами производства мирового уровня. Продемонстрированы результаты использования серийно выпускаемого отечественного оборудования в производственных циклах отечественных предприятий — производителей ЭКБ.

УДК 67.05

Особенности конструкции полировальной головы, используемой в оборудовании для химико-механической планаризации слоев диэлектрика и металла

Плотников Д. С.[1], Гурьянов Т. В.[1], проф. Бокова Е. С.[2]
[1] АО «Нанотроника»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10, пом. 571
d.plotnikov@nanotronica.ru, t.guryanov@nanotronica.ru
[2] Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина
119071, г. Москва, ул. Малая Калужская, 1

Рассматриваются особенности конструкции полировальной головы, применяемой в оборудовании химико-механической планаризации (ХМП). Описаны основные модули установки ХМП, традиционная конструкция полировальной головы и ее недостатки, а также преимущества современной многозонной головы.
Ключевые слова: полировальная голова; химико-механическая планаризация; удерживающее кольцо; многозонная голова; STI; WIWNU.

На сегодняшний день химико-механическая планаризация (ХМП) является одним из важнейших технологических процессов производства современных интегральных схем. Этот метод позволяет обеспечить необходимую планарность слоев диэлектриков и металлов и применяется в щелевой изоляции (англ. STI — Shallow trench isolation) и многослойной металлизации. С усложнением интегральных схем и уменьшением топологических норм требования к процессам ХМП значительно повышаются, что в свою очередь приводит к совершенствованию оборудования и применению новых материалов [1].

Разработка установки ХМП проводится специалистами в кооперации АО «Микрон» и АО «Нанотроника».

В состав типовой установки ХМП входит несколько функциональных модулей:

- полировальный модуль (полировальный стол и полировальная голова);
- модуль загрузки-выгрузки
- модуль транспортировки пластин;
- модуль отмывки пластин (щеточная очистка);
- модули контроля толщины слоя (опциональный).

Ключевым узлом полировального модуля технологического оборудования является полировальная голова, которая напрямую влияет на достижение предъявляемых требований. Полировальная голова традиционной конструкции (рис. 1) обычно содержит жесткий держатель с наклеенной на него упругой пленкой, через которую пластина прижимается к полировальному материалу, по периферии пластины расположено жестко зафиксированное удерживающее кольцо. Для перемещения пластины при загрузке и выгрузке используется вакуум. Вследствие жесткой основы отсутствует возможность регулировки распределения прижимного усилия по пластине, что приводит к разности скорости съема материала с обрабатываемой пластины от центра к краю, также возникает краевой эффект у края пластины из-за деформации полировального материала, что ухудшает равномерность процесса

ХМП и увеличивает показатель неравномерности удаленного слоя по пластине (англ. WIWNU — Within-Wafer Non-Uniformity). Кроме того, такие головы быстрее изнашивают удерживающее кольцо и требуют периодической настройки этого кольца для поддержания стабильных параметров процесса [2].

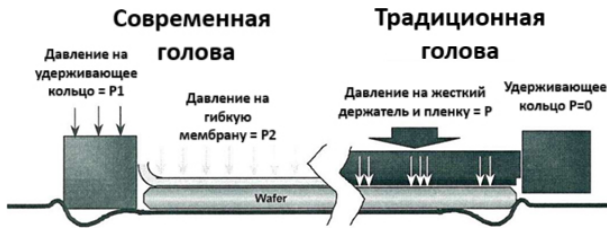


Рис. 1. Сравнение современной и традиционной полировальной головы

В современном оборудовании используются многозонные полировальные головы с гибкой мембраной. В такой конструкции жесткий несущий диск заменен эластичной мембраной (рис. 1), которая равномерно распределяет давление по всей пластине. Давление в мембранном узле создается пневматически и может независимо регулироваться по зонам. Обычно реализованы три зоны давления: на мембрану (основная зона), на удерживающее кольцо (внешняя зона) и на центральную внутреннюю камеру. Мембрана обеспечивает основной прижим, а отдельная камера создает давление на удерживающее кольцо. Дополнительная внутренняя камера служит для вакуумного захвата пластины при ее перемещении, а также позволяет управлять давлением на краю обрабатываемой пластины. Таким образом, многозонная голова с мембраной позволяет гибко распределять давление по пластине, адаптируясь к ее топографии и практически полностью устраняя краевой эффект. Специальная конструкция удерживающего кольца в значительной степени компенсирует деформацию подушки по краю пластины, предотвращая выскальзывание пластины и улучшая равномерность обработки ее кромки [3].

Литература

1. Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Химико-механическое полирование. Часть 1. Основные закономерности: обзор // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2011.
2. US Patent 6,540,594 B2. Carrier head with a flexible membrane for a chemical mechanical polishing apparatus, 2003.
3. Yuzhuo Li. Microelectronic applications of chemical mechanical planarization. Wiley Interscience, 2008.

УДК 681.121.84

Развитие линейки отечественных регуляторов расхода реагентов для повышения стабильности работы технологического оборудования

Бирюков М. Г.[1], к. т. н., Щуренкова С. А.[1], к. т. н., Пугачёв Д. Ю.[1], Сажнев С. В.[2], к. т. н., Князев В. И.[2], к. ф.-м. н.

[1] АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10
info@niitm.ru
[2] ООО «Элточприбор»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10
gas@eltochpribor.ru

Для подачи TEOS в технологическое оборудование полупроводникового производства разработан и исследован цифровой регулятор расхода жидкости (РРЖ) в миллилитровом диапазоне расходов реагентов. Описана конструкция РРЖ и методика испытаний. Исследована долговременная стабильность регулирования РРЖ.

Ключевые слова: регулятор расхода жидкости; TEOS; миллилитровый диапазон расходов; долговременная стабильность регулирования.

Работа посвящена созданию отечественного электронного регулятора расхода жидкости для подачи TEOS в технологическое оборудование полупроводникового производства в миллилитровом диапазоне расходов. Для решения поставленной задачи была использована конструкция, включающая в себя измеритель расхода среды на основе датчика дифференциального давления и электромагнитный клапан для регулирования потока. Управление клапаном происходит электрической схемой, включающей микроконтроллер. Созданный РРЖ имеет как аналоговое, так и цифровое управление. Цифровое управление осуществляется по протоколу MODBUS RTU.

Для увеличения точности измерений расхода жидкости была разработана методика испытаний с применением инверсионной коммутации потока жидкости после РРЖ в два канала: измерительный и дренажный. Коммутирующими элементами являлись электромагнитные клапаны, управляемые компьютерной программой. Это позволяет достигать высокой точности отсчета интервалов времени при весовых измерениях потока жидкости.

Показана важность долговременной стабильности характеристик РРЖ в технологических процессах. Экспериментально установлено, что при 8-часовой непрерывной работе РРЖ с диапазоном 3 г/мин воды на протяжении одного месяца испытаний приведенная погрешность регулирования не превысила 1,5%. Проведены эксперименты на дистиллированной воде и этиловом спирте. По данным измерений, диапазон регулирования РРЖ для спирта оказался в 1,8 раза меньше, чем для воды.

Литература

1. Сажнев С. В., Князев В. И. Прецизионная подача газов в вакуумный реактор технологического оборудования с термокоррекцией внешней среды // Вакуумная наука и техника. Материалы XXVII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, Крым. — Москва, 2020. — С. 123–128.
2. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. — 4-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. — 701 с.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. Теоретическая физика: т. VI. — 3-е изд., перераб. — М.: Наука, 1986. — 736 с.
4. Сажнев С. В., Князев В. И. Прецизионная подача жидких реагентов в технологическое оборудование на основе регулятора расхода жидкости // Наноиндустрия, 2025. — Т. 18. — № 2. — С. 110 — 113.

УДК 621.382:621.793.162:621.03:621.315.592

Горизонтальные МОС-гидридные реакторы. Развитие концепции и кооперации

Лундин В. В.[1], Заварин Е. Е.[1], Николаев А. Е.[2], Сахаров А. В.[2], Цацульников А. Ф.[2], Смирновский А. А.[3], Базаревский Д. С.[3], Бирюков М. Г.[4], Пугачев Д. Ю.[4], Алексеев А. Н.[5], Петров С. И.[5], Слипченко С. О.[6], Пихтин Н. А.[6]

[1] ООО «Монолюм»
194214, г. Санкт-Петербург, Костромской просп. 62
[2] НТЦ микроэлектроники РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
[3] ООО «Софт-Импакт»
194044, г. Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 64
[4] АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10
[5] АО «НТО»
194156, г. Санкт-Петербург, просп. Энгельса, 27, лит. АД
[6] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Разработано и подготовлено к серийному производству семейство установок для МОС-гидридной эпитаксии III-N-гетероструктур с компактными горизонтальными реакторами различного размера для подложек диаметром от 100 до 200 мм. Разрабатываются аналогичные установки для классических III-V-материалов.

Ключевые слова: нитриды III группы; МОС-гидридная эпитаксия; эпитаксиальное оборудование.

Развитие МОС-гидридной эпитаксии неразрывно связано с улучшением оборудования. Однако лидеры отрасли развивали только большие реакторы, оптимизированные для массовых типов эпиструктур. Современные реакторы слишком велики для НИОКР и специального производства, а их конструкция не оптимальна для выращивания многих типов приборных структур.

Это общемировая проблема выращивания всех III-V-материалов. Для III-N она обострилась к концу 2000-х, современные на тот момент реакторы были узко оптимизированы для синих светодиодов. Поэтому мы создали установку Dragon-125 с горизонтальным реактором для подложек диаметром 100 мм универсального предназначения для НИОКР и опытного производства актуальных III-N-структур [1].

Последующее развитие проводилось в трех направлениях: доработка конструкции и увеличение размера подложки для III-N, разработка установок для других материалов и расширение круга участников работ.

Следующей после Dragon-125 была установка Dragon-175 аналогичного дизайна и предназначения, с увеличенным до 150 мм диаметром подложки. В процессе создания этих установок сформировалась ядро из трех организаций: НТЦ микроэлектроники РАН, ООО «Софт-Импакт» и ООО «Монолюм», освоивших разработку, изготовление единичных экземпляров, их запуск, разработку базовых

и приборных технологий. Однако серийное производство оборудования не входит в их область компетенций. Следующая МОС-гидридная установка с горизонтальным реактором, оптимизированная для роста (Al,Ga)N на Si-подложках до 200 мм, предназначенная для серийного производства, была создана вышеуказанными организациями совместно с АО НИИТМ (в серии «Эпифаз-200» [2]). Установка имеет сходную с предыдущими моделями концепцию, но в конструкции реактора есть существенные изменения.

Также в целях организации производства оборудования для МОС-гидридной эпитаксии сложился альянс вышеуказанной тройки организаций с АО НТО. В рамках кооперации конструкция установки Dragon-175 изменена для использования более доступной элементной базы и подготовлена к промышленному производству. В данный момент первая установка близка к поставке.

На установках Dragon, помимо III-N, было освоено также осаждение Si_3N_4 (часть процесса эпитаксии HEMT) [3], графена (единый процесс осаждения графена с последующим ростом III-N LED-структуры) [4] и Si (из SiH_4). Полученные результаты совместно с данными компьютерного моделирования показали, что созданная концепция реактора универсальна и может быть адаптирована для выращивания различных материалов. На основе установок для III-N начата разработка решений для эпитаксии классических III-V. Как носитель технологий и первый конечный пользователь, к работам присоединился ФТИ им. А. Ф. Иоффе. В настоящее время разрабатывается установка с горизонтальным реактором для эпитаксии III-As с зоной однородного осаждения диаметром 150–160 мм (головной исполнитель — АО НТО). Параллельно в рамках другого проекта разрабатываются конструктивные решения для МОС-гидридной эпитаксии соединений III-P (головной исполнитель — ФТИ им. А. Ф. Иоффе).

Разработки, для которых осуществляется предпроектный анализ технических решений, — установки для эпитаксии Si/SiGe (совместно с АО НИИТМ) и Ga_2O_3 (проводятся исследования эпитаксии в лабораторном реакторе).

Таким образом, нами планомерно развивается унифицированное семейство отечественных установок для МОГФЭ различных материалов.

Литература

1. Лундин В. В.и др. Реакторы для МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия: настоящее и будущее // Научное приборостроение, 2017. — Т. 27. — № 1. — С. 5–9.
2. Бирюков М. Г. и др. Оборудование МОС-гидридной эпитаксии нитрида галлия на подложках кремния диаметром до 200 мм для производства транзисторных гетероструктур // Научное приборостроение, 2025. — Т. 35.
3. Lundin W. V. et al. Study of silicon nitride deposition in III-N MOVPE reactors // J. Cryst. Growth, 2020. 551, 125906.
4. Lundin W. V. et al. Growth of III-N / graphene heterostructures in single vapor phase epitaxial process // J. Cryst. Growth, 2018. 504. P. 1–6.

УДК 621.382

Разработка установки электронно-лучевой литографии

Шаталин А. А.
АО «НПП «ЭСТО»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 1

Описывается устройство разрабатываемой установки электронно-лучевой литографии с минимальными размерами элемента 150 нм. Указаны основные технические характеристики.
Ключевые слова: электронно-лучевая литография.

Актуальность разработки установки электронно-лучевой литографии связана с отсутствием в России собственного специального технологического оборудования для реализации процессов литографии, которые являются движущей силой нано- и микроэлектроники, определяющей информационную безопасность страны и прогресс во всех отраслях науки и техники.

На сегодняшний день наше предприятие в рамках СЧ ОКР «Разработка установки электронно-лучевой литографии с проектными нормами 150 нм» занимается разработкой системы, имеющей средние технические характеристики по сравнению с мировыми аналогами. Минимальный размер элемента в резисте — 150 нм. Такая установка сформирует реальный практический опыт разработки и изготовления данного класса оборудования.

Установка состоит из основного прибора и периферийных устройств. В периферии находятся системы питания и управления, откачные средства, термостаты. В основном приборе — электронно-оптическая система и вакуумная механизированная платформа.

В состав вакуумной механизированной платформы входят вакуумная камера, шлюз, вакуумная система, манипулятор, стол координатный, интерферометр, лазер, привод стола координатного и откачные средства. Электронно-оптическая система размещается на крышке вакуумной камеры. Система состоит из излучателя с катодом, элементов электронной оптики и диафрагм. В состав элементов электронной оптики входят магнитные линзы, магнитные отклоняющие системы, стигматоры, электростатические отклоняющие системы.

Технические характеристики разрабатываемой установки электронно-лучевой литографии представлены в таблице.

Таблица 1. Технические характеристики разрабатываемой установки электронно-лучевой литографии

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Ускоряющее напряжение	20 кВ
2	Максимальная плотность тока в плоскости обрабатываемого объекта	3 А/см^2
3	Материал катода источника электронов	LaB_6
4	Максимальный размер рабочего поля	3,2×3,2 мм

№ п/п	Характеристика	Значение
5	Максимальный размер рабочего подполя	200×200 мкм
6	Размер электронного луча регулируемого формата	a≤0,2 мкм b≤6,3 мкм
7	Шаг регулировки формата электронного луча	0,1 мкм
8	Метод сканирования электронным лучом	Векторный
9	Полезный диапазон перемещения стола прецизионного	162×162 мм
10	Точность позиционирования стола прецизионного	не более 5 мкм
11	Разрешение лазерной интерферометрической системы измерения перемещений стола прецизионного	0,02 мкм
12	Максимальная скорость перемещения стола прецизионного	20 мм/с
13	Стратегия экспонирования	Шаговая мультипликация структур
14	Габариты обрабатываемых фотошаблонных заготовок	127×127×2,24 мм (5009) 152×152×6,35 мм (6025)
15	Способ загрузки фотошаблонных заготовок	Загрузка магазина в шлюзовую камеру, автоматическая перегрузка объектодержателей из магазина в рабочую камеру и обратно
16	Поддерживаемые форматы файлов	GDSII, DXF, OASIS

УДК 621.315.592

Анализ современных кластерных установок азиатского рынка для проведения технологических операций с тонкими пленками на полупроводниковых пластинах

Соболев А. М.
АО «Контракт Холдинг»
127006, г. Москва, ул. Долгоруковская, 34, стр. 2
a.sobolev@exnovo.ru

Проанализировано кластерное оборудование для осаждения, напыления и травления тонких пленок на пластинах из кремния, карбида кремния и нитрида галлия (GaN:Si). Выявлены ключевые технические и технологические параметры специального технологического оборудования (СТО).

Ключевые слова: кристальное производство; тонкие пленки; плазмохимическое осаждение; напыление металлических слоев; плазмохимическое травление.

Одним из ключевых вопросов при комплектации или модернизации кристального производства является поиск специального технологического оборудования (СТО), которое бы удовлетворяло основным техническим и технологическим параметрам.

При создании кластерных систем осаждения, напыления и травления должны учитываться следующие аспекты.

- СТО должно конфигурироваться под задачи производственной линии. Например, соответствовать требуемой производительности участка.
- Программное обеспечение может дорабатываться производителем по запросу заказчика. Данной возможности, например, лишены восстановленные установки западного производства.
- Должен быть сформирован и предоставлен весь необходимый для запуска и гарантийного обслуживания перечень запасных частей и принадлежностей (ЗИП).

В структуру типового кластерного оборудования будут входить следующие элементы оснастки и вспомогательное оборудование.

1. Модуль загрузки-выгрузки и перемещения пластин: вакуумный кассетный лифт (VCE), SMIF-загрузчик или EFEM-модуль.
2. Модули предварительной обработки пластин перед или после проведения технологических операций: ориентация, дегазация, очистка, охлаждение.
3. Вакуумный трансферный модуль для перемещения пластин внутри установки.
4. Камеры для проведения технологических операций.
5. Газовые шкафы и линии.
6. Системы для обеспечения вакуума.
7. Блоки питания и генераторы плазмы.
8. Чиллер с охлаждающей жидкостью.
9. Скруббер для утилизации химически опасных газов.
10. Оптический контроль (OES) параметров пленок.

К основным техническим параметрам кластерных СТО можно отнести:

- геометрию технологических камер;
- мощность генераторов плазмы;
- расход технологического газа и точность его поддержания;
- предельный вакуум и скорость откачки модулей СТО;
- тип прижима подложкодержателя, его температуру и т. д.

Технические аспекты кластерных СТО оказывают существенное влияние на процессы осаждения, напыления и травления. Например, в плазменных реакторах можно выделить две доминирующие составляющие, оказывающие существенное влияние на процессы обработки поверхности: транспортную и химическую. На транспорт частиц оказывают влияние такие параметры, как геометрия камеры, давление в реакторе, температура газа. Химическая составляющая, в свою очередь, определяется как кинетикой реакций в плазме, так и кинетикой поверхностных реакций, зависящих от давления, температуры газа и поверхности (подложки), числа активных центров на поверхности материала, энергий электронов, ионов и химически активных частиц (свободные атомы, молекулы и радикалы).

Важно отметить, что транспортная и химическая составляющие определяют целый ряд технологических параметров, таких как:

1) скорость осаждения, напыления и травления,
2) равномерность ряда параметров как по пластине, так и от пластины к пластине. К ним можно отнести толщины слоев, поверхностное сопротивление, глубину травления,
3) селективность, анизотропия, конформность,
4) привносимая дефектность и т. д.

Процесс плазмохимического осаждения зависит от целого множества параметров, определяющих скорость, качество и свойства получаемых пленок. К основным критериям можно отнести мощность ВЧ-реактора (плотность плазмы и скорость осаждения), частоту и тип разряда (плотность плазмы, равномерность осаждения), состав газов и их расход (химический и стехиометрический состав пленок, скорость осаждения), температуру подложки (подвижность адсорбированных частиц, плотность пленки и ее структуру), рабочее давление в реакторе (скорость осаждения и длину свободного пробега).

Параметры, влияющие на процесс плазмохимического травления, будут схожи с критериями процесса плазмохимического осаждения. Отметим некоторые особенности на примере реактивного ионного травления диэлектрических пленок в плазме смеси тетрафторметана с аргоном и кислородом. Основными характеристиками процесса в таком случае являются плотность потока атомов фтора (обеспечивающих процесс травления), суммарная плотность потока радикалов CF и CF_2 (как основных полимеробразующих частиц), плотность потока атомов кислорода (обеспечивающих травление фторуглеродной полимерной пленки) и параметр, характеризующий эффективность ионной бомбардировки поверхности (физическое распыление фторуглеродной полимерной пленки и десорбция труднолетучих продуктов реакций).

Анализ процесса магнетронного распыления также позволяет выделить некоторые ключевые параметры, влияющие на скорость и качество нанесенных пленок. К таким критериям можно отнести мощность разряда, конфигурацию магнитов, размер и геометрию мишеней, расстояние от мишени до подложки. Влияние

температуры подложки, давления, расхода газов (при получении барьерных слоев) аналогично процессам осаждения и травления.

Таким образом, процесс подбора кластерного СТО для модернизации кристального производства должен учитывать проработку как технических, так и технологических параметров установки. Технические аспекты СТО тесно связаны с технологическими характеристиками, которые, в свою очередь, позволят достичь требуемых параметров изготавливаемых устройств.

УДК 621.3.049.77(075)

Разработка отечественного оборудования ионной имплантации для полупроводникового производства: текущий статус

Авдиенко А. А., Аверьянов Е. В., Азаров А. А., Бирюков М. Г., Кузьмич К. В., Мамедов Н. В., Третьяков Е. В., Шпаков А. Н.
АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10
info@niitm.ru

Развитие ионной имплантации напрямую связано с эволюцией технологии КМОП-СБИС и требует регулярного (каждые 5-6 лет) обновления производственного оборудования [1]. С учетом приоритетной задачи технологического суверенитета разработка современной отечественной элементной базы, в частности имплантационного комплекса, приобрела стратегическое значение. Отечественные установки 1980-х годов утратили свою актуальность и не соответствуют современным требованиям по параметрам энергий, токов, стабильности пучка и производительности [2]. В рамках государственной программы Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности» с 2023 года реализуется проект по созданию отечественных ионных имплантеров, покрывающих диапазоны энергий от 0,2 до 1000 кэВ. На текущем этапе представлены архитектурные и технические решения, проведено детальное моделирование траектории ионного пучка с применением различных программных пакетов, начата сборка экспериментальных систем и узлов среднетокового имплантера ТМ-200Т.

Ключевые слова: ионная имплантация; имплантер; КМОП; СБИС; ИМС.

Ионная имплантация остается основополагающим этапом при производстве СБИС на КМОП-структурах, обеспечивая точное и управляемое внедрение легирующих элементов [1]. Это критично как для кремниевых схем, так и для гетероструктур на основе A^3B^5, A^2B^6 и SiC. При переходе к нанометровым уровням технологий (УТ) количество имплантационных операций может достигать 40–50, включая корректирующие и компенсирующие имплантации [2].

В 2023 году при государственной поддержке со стороны Министерства промышленности и торговли РФ начата реализация проекта по созданию двух типов установок ионной имплантации — среднетоковой (ТМ-200Т) и высокоэнергетической (ТМ-200 В) с энергиями от 0,2 до 270 кэВ и от 10 до 1000 кэВ для однозарядных ионов соответственно. Одной из приоритетных задач проекта является локализация производства на территории РФ. В настоящее время проект реализуется в кооперации ведущих российских научных и промышленных организаций:

- АО «НИИМЭ» — разработка базовых технологий ионного легирования, разработка и изготовление тестовых структур и проведение технологических испытаний;
- АО НИИТМ — техническая интеграция проекта, разработка и изготовление технологического модуля имплантеров;
- ИЯФ СО РАН — разработка и изготовление среднетокового и высокоэнергетического ионных инжекторов;

- ФГАОУ ВО НИ ТПУ — разработка и изготовление системы компенсации пространственного заряда ионного пучка.

Оба типа имплантеров ТМ-200Т и ТМ-200 В строятся на модульной архитектуре с максимальной унификацией конструктивных решений в части транспортно-технологической системы. Например, среднетоковый имплантер ТМ-200Т включает в себя два функциональных блока:

- ионный инжектор, состоящий из следующих компонентов: источник ионов, магнитный сепаратор, квадрупольные линзы, электростатический сканер, магнитный параллелизатор и ускоряющий зазор;
- технологический модуль, состоящий из следующих компонентов: SMIF-загрузчик, шлюзовые и транспортная камеры, процессная камера с 4-координатным роботизированным манипулятором, обеспечивающим углы наклона кремниевой пластины на ±60° и вращение на 360°, что гарантирует равномерность легирования и стабильность параметров. В состав оснащения процессной камеры также входят компенсатор поверхностного заряда пластины на основе СВЧ-разряда и система непрерывного мониторинга ионного пучка в процессе легирования.

Исходными данными для проектирования систем и узлов ионно-оптического тракта были результаты моделирования динамики ионного пучка с использованием различных программных пакетов. Проведены как предварительные концептуальные, так и финальные расчеты на основе 3D-моделей. При проведении расчетов также было уделено внимание учету следующих вторичных процессов: взаимодействие с остаточным газом, пространственный заряд, эмиссия электронов и снижение рентгеновского фона. Результаты моделирования подтвердили теоретическую возможность получения требуемого профиля пучка на мишени (≤30×30 мм) с высокой однородностью.

Ожидается, что предлагаемые конструкторские решения будут обеспечивать минимальное распыление примесных элементов ионным пучком в процессе легирования, пониженный уровень привносимой дефектности и требуемый уровень однородности легирования.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: Техносфера, 2011. — 800 с.
2. Авдиенко А. А. Физико-технические принципы построения и применения высокоэнергетичных ионных имплантеров: дисс. — Москва, 2004.

УДК 621.389

Статус разработки ионных ускорителей для среднетокового и высокоэнергетического имплантеров

Старостенко А. А.[1], Авдиенко А. А.[2], Вахрушев Р. В.[1], Девятайкина Т. А.[1], Докутович В. А.[1], Драничников А. Н.[1], Константинов С. Г.[1], Краснов А. А.[1], Кремнев Н. С.[1], Лопаткин И. А.[1], Орешонок В. В.[1], Павлюченко В. А.[1], Рыбицкая Т. В.[1], Рябченко К. К.[1], Семенов Е. П.[1], Сеньков Д. В.[1], Скляров В. Ф.[1], Сорокин А. В.[1], Стешов А. Г.[1], Субаев Е. А.[1], Тягнирядно Л. О.[1], Усов П. В.[1], Цыганов А. С.[1], Чуркин И. Н.[1], Шиянков С. В.[1]

[1] Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
[2] АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10

В докладе представлено текущее состояние расчетов, проектирования, конструирования и производства ионных ускорителей для среднетокового и высокоэнергетического имплантеров. Отдельно будут рассмотрены эксперименты с ионным источником (типа Бернаса), для которого был создан специальный испытательный стенд.

УДК 621.9.047.4/539.23

Испытания технологических модулей кластерных комплексов плазмохимического травления и осаждения для пластин диаметром 300/200 мм

Ерицян Г. С., к. т. н. Щуренкова С. А.
АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10
geritsyan@niitm.ru

Проведены приемочные испытания разработанных технологических модулей плазмохимического травления и осаждения для кремниевых пластин диаметром 300/200 мм. Продемонстрированы основные результаты серии экспериментов в целях достижения требуемых технологических параметров, определения рабочих диапазонов ключевых параметров технологического процесса и создания базовых технологических процессов.

Ключевые слова: плазмохимическое травление; химическое осаждение из газовой фазы; специальное технологическое оборудование; CVD; RIE; FOUP; вакуумное оборудование; импортозамещение; оборудование кластерного типа.

Конструкция установок позволяет обрабатывать пластины диаметром 300 мм, при этом имеется возможность быстрой переналадки для работы с пластинами диаметром 200 мм. Разработанное оборудование и базовые технологические процессы применимы на разных стадиях производства интегральных микросхем — BEOL и FEOL с уровнем топологии 65 нм. Важно отметить возможность применения установок в технологиях 45 и 28 нм. При использовании конфигурации оборудования для пластин диаметром 200 мм возможно применение и с большими проектными нормами — 90, 130 и 180 нм. Таким образом, разработанное оборудование может быть использовано как для модернизации существующих производств, так и для наполнения новых.

Рис. 1. Схематичное изображение кластерного комплекса

Оба кластерных комплекса включают до четырех технологических модулей, которые присоединены к транспортной системе с вакуумной и атмосферной частями. На рис. 1 представлено схематичное изображение установки.

Разработаны следующие процессы травления:

1) травление алюминиевой металлизации со скоростью от 0,8 мкм/мин;
2) травление пленок нитрида титана;
3) травление поликремниевых затворов со скоростью от 0,3 мкм/мин с высокой селективностью к оксиду кремния (более 100:1);
4) травление кремниевых канавок для мелкощелевой изоляции (STI);
5) травление контактных окон с аспектным отношением не менее 1:3 со скоростью от 0,15 мкм/мин;
6) антикоррозийная обработка в парах воды;
7) снятие фоторезистивной маски со скоростью от 2,0 мкм/мин и удаление полимерных слоев.

В рамках проводимых работ была создана оптическая система определения окончания процесса травления на основе спектрометра. Она позволила реализовать наиболее точный способ проведения технологической операции и внедрить стадию «перетрава» с низкой скоростью травления для достижения наилучших результатов.

Разработаны следующие процессы осаждения:

1) осаждение SiO_2 из моносилана (две частоты генератора);
2) осаждение SiO_2 из моносилана с низкой скоростью (одна частота генератора);
3) осаждение SiO_2 из тетраэтоксисилана (две частоты генератора);
4) осаждение SiO_2 из тетраэтоксисилана с низкой скоростью (одна частота генератора);
5) осаждение пассивации SiN (одна частота генератора);
6) осаждение стопорного слоя SiN (две частоты генератора);
7) субатмосферное заполнение отверстий SiO_2 с высоким аспектным отношением (HARP).

Для чистоты проводимых процессов каждый реактор осаждения оснащен удаленным источником плазмы в целях эффективной очистки камер и внутрикамерной оснастки от продуктов осаждения.

УДК 621.382.132

Разработка технологического модуля установки высокотемпературной активации примеси для обработки пластин при температуре до 2000 °С ООО «САВТЭК»

Зюбер Д. И.
ООО «САВТЭК»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4922, 4, стр. 2
info@savtech.ru

Разработан модуль термической обработки пластин. Уникальность установки состоит в том, что для высокотемпературного нагрева до 2000 °С применяется графитовый реактор с вертикальной загрузкой кассеты. Приведены результаты моделирования нагрева реактора и температуры основных его узлов.

Ключевые слова: обработка пластин; графитовый реактор; моделирование; распределение температуры.

Модуль установки разрабатывается в рамках реализации составной части опытно-конструкторской работы совместно с АО «НИИТМ». Необходимость данной разработки обусловлена растущей потребностью производства и обработки пластин диаметром 150 мм. Особенность разрабатываемого модуля — уникальное исполнение реактора и нагревательной системы, которое позволяет проводить технологические процессы при температуре 900–2000 °С.

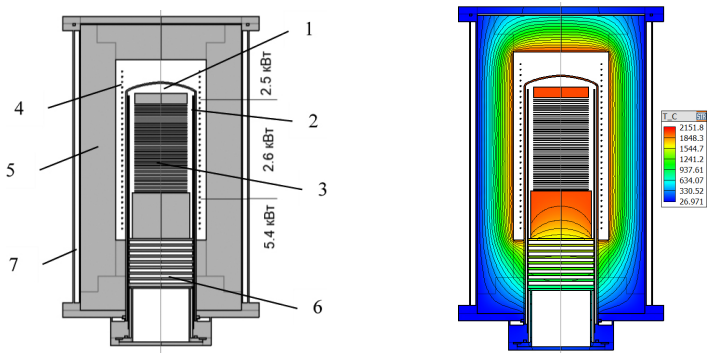
Установка представляет собой вертикальную высокотемпературную печь для термической обработки пластин в вакууме, водороде или инертной среде. Для изготовления трубчатого реактора используется графитовый материал, способный выдержать высокую температуру технологического процесса без внесения дополнительных примесей в обрабатываемые пластины. Графитовый реактор обладает рядом преимуществ:

- термостойкостью при работе при температуре 2000 °С,
- высокой механической прочностью,
- стабильностью многократных процессов нагрева до экстремальных температур,
- химической инертностью по отношению к полупроводниковым материалам, что исключает их загрязнение,
- низким коэффициентом теплового расширения, что уменьшает деформацию в процессе нагрева,
- простой обработкой материала при изготовлении.

На рис. 1 показана схема вакуумной установки.

Вакуумная область 1 находится внутри цилиндрического графитового реактора 2. Размещение кассеты с пластинами 3 внутри реактора исключает перенос посторонних примесей на пластины от нагревателя и окружающих поверхностей, нагретых до высокой температуры. Проволочный вольфрамовый нагреватель 4, расположенный снаружи графитового реактора, состоит из трех секций, имеющих различную мощность питания. Для теплоизоляции реактора применяются керамический теплоизолятор 5 и тепловые экраны 6 [1, 2]. Корпус установки 7, выполненный из нержавеющей стали, имеет двойные стенки, между которыми проходит

поток охлаждающей воды. Обрабатываемые пластины диаметром до 150 мм в количестве 50 штук размещаются в кассете загрузчика.



а *б*

Рис. 1. Высокотемпературный модуль: *а*) схема вакуумной установки, *б*) распределение температуры в области нагретого реактора, 1 — вакуумная камера, 2 — графитовый реактор, 3 — обрабатываемые пластины, 4 — нагреватель, 5 — керамический теплоизолятор, 6 — тепловые экраны, 7 — водяное охлаждение

Компьютерное моделирование процесса высокотемпературного нагрева реактора показало, что при мощности нагрева 10,5 кВт температура стенок вакуумной камеры будет небольшой — 32 °С. Температура вакуумных уплотнений верхнего фланца составляет 40 °С. Температура уплотнений нижнего фланца не превышает 91–96 °С за счет их водяного охлаждения по дополнительным каналам. В центре загрузочной кассеты пластины нагреты равномерно по всей площади. Максимальный разброс температур в кассете от первой до последней пластины может изменяться при перераспределении мощностей питания секций нагревателя.

Данная разработка позволит проводить следующие процессы на пластинах диаметром до 150 мм:

- отжиг пластин карбида кремния SiC,
- активация легирующих примесей в пластинах нитрида галлия GaN,
- отжиг зародышевых слоев нитрида алюминия AlN в вакууме и при атмосферном давлении с подачей рабочих газов Ar, N_2, H_2, He, SiH_4, C_3H_8, C_2H_4.

Литература

1. Мельников С. Г. Лучистый теплообмен в высокотемпературных вакуумных печах с экранной тепловой изоляцией // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение, 2015. — № 4 (44). — С. 196–203.
2. Мармер Э. Н. Высокотемпературные вакуумные технологии и электропечи для термообработки и спекания // Альтернативная энергетика и экология, 2009. — № 5 (73). — С. 27–61.

УДК 621.315.592

Расширение библиотеки базовых технологических процессов, реализуемых на отечественном технологическом оборудовании для производства ЭКБ

Новиков С. А., Петров С. И., к. ф.-м. н., Алексеев А. Н., к. ф.-м. н., Гердт А. Д., Литвинов М. А.
АО «Научное и технологическое оборудование»
194156, г. Санкт-Петербург, просп. Энгельса, 27, лит. АД, офис 205
novikov@semiteq.ru

Представлены результаты разработанных технологических процессов плазмохимического травления и осаждения, быстрого термического отжига и прецизионного окисления, полученные на специальном технологическом оборудовании, разработанном и произведенном АО «НТО».
Ключевые слова: специальное технологическое оборудование; материалы A^3B^5; плазмохимическое травление; плазмохимическое осаждение; быстрый термический отжиг; прецизионное окисление.

Современные технологии микро- и наноэлектроники требуют высокой точности, воспроизводимости и гибкости производственных процессов. Для обеспечения конкурентоспособности оборудования и расширения его функциональных возможностей «АО «НТО» проводит обширную работу по расширению библиотеки базовых технологических процессов, включая методы плазмохимического травления, быстрого термического отжига и прецизионного окисления полупроводниковых материалов A^3B^5.

Ключевым аспектом данной работы, помимо оптимизации параметров технологических процессов, стала модернизация конструктивных элементов оборудования, направленная на повышение эффективности, стабильности и универсальности технологических режимов. В ходе исследований были оптимизированы функциональные узлы технологического оборудования.

В установке плазмохимического травления была оптимизирована конструкция стола-электрода, что позволило улучшить теплопередачу и однородность температуры по всей площади обрабатываемой пластины. Внедрение керамических фиксаторов позволило повысить однородность травления и уменьшить краевые зоны. Разработка и изготовление системы лазерной интерферометрии позволили проводить *in situ* диагностику в процессах плазмохимического травления и осаждения для отслеживания скорости, а также определения стоп-слоев при травлении сложных многослойных структур. Интеграция сигнала лазерного интерферометра в систему автоматизации позволила применять многострочные рецепты, использующие сигналы интерферометра, для реализации технологических режимов с *in situ* контролем.

В установке плазмохимического осаждения оптимизация конструкции стола-электрода позволила увеличить эффективность нагрева пластин для плазмохимического осаждения. Интегрирование термопары непосредственно в область нагревательного элемента позволило точнее управлять температурой образца и уменьшить инерционность нагрева. Оптимизация конструкции опорного

элемента керамических пинов в механизме загрузки позволила проводить процессы на более высоких температурах.

В установке быстрого термического отжига внедрение адаптивных ПИД-алгоритмов, а также подбор коэффициентов для разных температурных диапазонов позволили уменьшить инерционность отклика нагрева, оптимизировать время выхода на температурную полку, а также снизить максимальное отклонение температуры на полке.

В установке прецизионного окисления материалов A^3B^5 оптимизация конструкции нагреваемого стола, а также применение графитовых элементов позволили улучшить однородность нагрева и достигнуть отклонения температуры по пластине не более ±1,5 °C.

Представленные результаты позволили повысить точность процессов (толщина оксидов, глубина травления, однородность нагрева), увеличить производительность, расширить номенклатуру обрабатываемых материалов, а также снизить эксплуатационные затраты.

Перечисленные модернизированные узлы уже применяются у ряда заказчиков.

В том числе благодаря проведенной модернизации были достигнуты следующие технологические результаты, пополнившие библиотеку базовых технологических процессов: плазмохимическое травление мезы, диэлектриков (SiO_2, Si_3N_4 и др.), InP, Si с высоким аспектным соотношением, InAs для фотоприемных матриц, многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs, GaAs/InGaAs и InGaAs/AlGaAs, брэгговских зеркал Ta_2O_5/SiO_2; глубокое травление GaAs для формирования металлизации с обратной стороны GaAs-транзисторов; глубокое травление SiC для формирования металлизации с обратной стороны GaN-транзисторов; глубокое травление Si с прямыми или наклонными стенками и высокоселективное травление SiO_2/Si; плазмохимическое осаждение диэлектриков в режимах ICP-PECVD и PECVD; вжигание омических контактов к гетероструктурам на основе GaAs и GaN для мощных полевых транзисторов; прецизионное окисление функциональных слоев материалов A^3B^5.

Расширение библиотеки базовых технологических процессов позволит предложить заказчикам готовые оптимизированные технологические решения для производства современных электронных и оптоэлектронных устройств.

УДК 621.382.002

Магнетронные распылительные системы со сканирующими магнитными полями: современное состояние и перспективы внедрения в отечественное оборудование

Черкунов В. И.[1,2], Трактирщиков В. С.[1,2], Ширяев М. Е.[3], Конохов К. А.[1]
[1] АО «НПП «ЭСТО»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 1
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] ООО «Эстика»
124498, г. Москва, г Зеленоград, к. 237, кв. 95
chvi.esto@ya.ru

Магнетронные распылительные системы со сканирующими магнитными полями — это перспективное направление развития технологий нанесения тонких пленок для микроэлектронного производства. Представлены результаты разработки и исследования параметров сканирования магнитного поля на качество получаемых покрытий и эффективность выработки мишени.
Ключевые слова: магнетронное распыление; сканирующие магнитные системы; микроэлектроника; тонкие пленки; вакуумные технологии.

Значительным вкладом в развитие теории магнетронных систем стала фундаментальная работа Б. С. Данилина и В. К. Сырчина, опубликованная в 1982 году [1]. В этом исследовании были заложены основы понимания принципов функционирования магнетронных систем, включая инновационные на тот момент концепции распылительных систем со сканирующими магнитными полями.

Теоретическая база процессов физического распыления была существенно расширена благодаря фундаментальным исследованиям П. Зигмунда [2], представившего комплексный анализ механизмов и теории физического распыления, что заложило основу для глубокого понимания данных процессов.

Существенный прорыв в изучении данной тематики произошел спустя четверть века, когда увидела свет монография [3], обобщившая актуальные на тот момент научные достижения в области проектирования и эксплуатации магнетронных установок.

В современной индустрии производства микроэлектроники технологическое оборудование для формирования тонкопленочных покрытий базируется на разнообразных конфигурациях магнетронных распылительных систем. Мировой парк оборудования представлен широким спектром технических решений, включающих базовые планарные системы, усовершенствованные комплексы с вращающимися катодными узлами, высокотехнологичные установки со сканирующими магнитными полями.

Отечественная производственная база преимущественно ориентирована на использование классических магнетронных распылительных систем, характеризующихся наличием плоских стационарных катодных элементов, применением статических магнитных систем.

Особого внимания заслуживают инновационные разработки, представленные магнетронными распылительными системами с функцией непосредственного сканирования. Данные технологические решения, описанные в [4], требуют детального математического моделирования (см. [5, 6]) и демонстрируют высокую эффективность при обработке крупногабаритных подложек диаметром от 300 мм и более.

Для обработки подложек большого диаметра необходимы магнетронные распылительные системы со сканирующим магнитным полем, обеспечивающие высокую равномерность толщины и состава наносимых пленок при сохранении высокой скорости осаждения. Это особенно важно в условиях серийного производства микроэлектронных изделий.

Специалистами отдела вакуумного напылительного оборудования АО «НПП «ЭСТО» выполнены исследования по анализу и разработке магнетронной распылительной системы со сканированием магнитного поля для мишеней диаметром 150 мм. В рамках работы проведено моделирование магнитной системы, а также экспериментальные испытания.

В дальнейшем планируется разработка магнетронных систем увеличенного диаметра для обработки подложек 150 и 200 мм. Интеграция таких магнетронов в шлюзовые установки (например, серии ЭСТОХОРС) позволит создать оборудование для нанесения тонкопленочных покрытий на пластины диаметром 200 мм, соответствующее требованиям технологических процессов с топологическими нормами до 90 нм.

Литература

1. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. — М.: Радио и связь, 1982. — 72 с.
2. Sigmund P. Mechanisms and theory of physical sputtering by particle impact // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1987. Vol. 27. P. 1–20.
3. Кузьмичёв А. И. Магнетронные распылительные системы. — Киев: Аверс, 2008.
4. Пат. 2490368C1 (RU). Белецкий В. Е. ООО «ЭСТО-Вакуум». Устройство для нанесения многослойных покрытий на изделия. — Заявл. 21.03.2012; опубл. 20.08.2013. — 8 с.
5. Черкунов В. И. Моделирование неравномерности магнетронного напыления пленок при взаимном перемещении подложки и магнетрона // Вакуумная техника и технологии — 2024: Труды 31-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 25–27 июня 2024 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2024. — С. 360–365. EDN SIIXDH.
6. Черкунов В. И. Оптимизация неравномерности магнетронного напыления пленок алюминия и оксида алюминия при взаимном перемещении подложки и магнетрона // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2025. — Т. 18. — № 1. — С. 14–21. DOI: 10.32603/2071-8985-2025-18-1-14-21. EDN ATGFRG.

О синергии разработки мощных IGBT-транзисторов, диодов и тестеров FORMULA® TXI для метрологического обеспечения функциональных испытаний новейших полупроводниковых приборов

Постников А. С.
ООО «ФОРМ»
119530, г. Москва, Очаковское ш., 34

В условиях стратегического развития отечественной полупроводниковой отрасли, особенно мощных IGBT-транзисторов и диодов, критически важным становится метрологическое обеспечение их функциональных испытаний.

Компания «ФОРМ» представляет модульную тестовую систему FORMULA® TXI нового поколения, специально разработанную для высокоточного контроля современных и перспективных силовых приборов в широком диапазоне параметров.

Синергия между разработкой новейших полупроводниковых компонентов и возможностями FORMULA® TXI позволяет существенно ускорить вывод продуктов на рынок и гарантировать их надежность. Это обеспечивает необходимую технологическую базу для развития электронного машиностроения в рамках реализации программы до 2030 года, укрепляя конкурентоспособность российских предприятий.

УДК 531.728

Разработка установки измерения рассовмещения технологических слоев на кремниевых пластинах диаметром 200 мм

Андрианов С. Л., Василевкин Е. В., Горовой К. В., Дон А. К., Михайлова И. В., Сухорослова Ю. В.
АО «Нанотроника»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, просп. Панфиловский, 10, пом. 571
a.don@nanotronica.ru

Представлены результаты по разработке установки измерения рассовмещения технологических слоев для 90-нм процесса производства интегральных схем. Приведено краткое описание установки и проанализированы технические решения для основных узлов.

Ключевые слова: рассовмещение слоев; интегральные схемы; производство чипов.

На сегодняшний день в России передовой используемой технологией производства интегральных микросхем является 90-нм процесс [1]. Одним из наиболее важных и технологически сложных этапов кристального производства является процесс литографии. Экспонирование каждого последующего технологического слоя микросхемы требует точного контроля совмещения по специальным меткам. Результаты контроля используются для корректировки параметров литографических установок. В настоящее время измерение величины рассовмещения слоев в РФ осуществляется только на импортных установках, что создает риски из-за возможных срывов поставок комплектующих и недоступности сервисного обслуживания. Для снижения зависимости от монополистов рынка контрольно-измерительного оборудования в АО «Нанотроника» ведется разработка собственной установки измерения рассовмещения слоев.

Установка измерения рассовмещения технологических слоев состоит из трех основных модулей: технологический модуль, модуль загрузки-выгрузки пластин, модуль системы управления и электропитания. В состав технологического модуля входят оптический узел и узел прецизионного позиционирования.

Проанализированы варианты реализации оптического узла. Первый вариант — с помощью интерферометрической схемы, совмещенной с цифровой камерой. Второй вариант — с помощью одной цифровой камеры с высокой скоростью съемки. Первый вариант позволяет четко определить границы измерений, то есть однозначно определить положение камеры для наилучшей съемки двух рассматриваемых слоев. Поэтому вариант реализации оптического узла с интерферометрической схемой выбран в качестве основного. Второй вариант требует более сложного программного обеспечения и больших вычислительных мощностей и может быть реализован как дополнительный.

Рассмотрены варианты реализации узла прецизионного позиционирования. Первый вариант — использование рельсовых направляющих, второй — применение аэростатических подшипников. Первый вариант наиболее распространен и хорошо зарекомендовал себя в аналогичных установках. Второй вариант позволяет

добиться существенного повышения точности позиционирования, что может быть использовано не только для реализации текущей задачи, но и станет заделом для будущих установок под более современные проектные нормы. Кроме того, используемая компонентная база для реализации схемы с аэростатическими подшипниками является более доступной на территории РФ.

Для обеспечения требуемой точности измерений установка должна быть оснащена системой виброизоляции. Рассмотрены две системы виброизоляции: пассивная и активная. Пассивная система виброизоляции обеспечивает быстрое и экономичное решение по защите от вибраций, но имеет увеличенное времена стабилизации. Активная система виброизоляции является более сложным решением. Она позволяет сократить время выхода на измерение и, соответственно, увеличить производительность установки. При проектировании подобных установок в зависимости от уровня реализации допустимы оба варианта. Для достижения максимальной производительности на уровне лучших мировых аналогов было принято решение о реализации установки с активной системой виброизоляции.

Проделанная работа позволяет с уверенностью заявить о готовности к дальнейшей детальной разработке установки измерения рассовмещения технологических слоев для 90-нм процесса производства интегральных схем со следующими основными параметрами:

- диаметр пластин до 200 мм;
- определяемое рассовмещение слоев друг относительно друга от 2 нм;
- производительность до 75 пластин в час.

Данные работы выполнялись в сотрудничестве со специалистами АО «Микрон», в результате чего получено подтверждение возможности замены импортного оборудования на аналогичную разрабатываемую АО «Нанотроника» установку. Отдельные модули установки могут быть доработаны и использованы в различных инспекционных и измерительных установках для производства микроэлектроники.

Литература

1. Микрон тестирует первый российский фоторезист для 90 нм производства [Электронный ресурс]. — URL: https://mikron.ru/company/press-center/news/9053 (дата обращения: 07.07.2025).

Состояние и перспективы разработки оборудования для зондового контроля кристаллов на пластине

Малышев Р.А., Семенищев Е.А.
ООО «Совтест АТЕ»
305014, г. Курск, ул. К. Маркса, 135/6

В ходе выполнения ОКР разработан комплект оборудования, предназначенный для контроля параметров микросхем на пластине. Описан состав комплекта оборудования, его технические характеристики, реализация систем технического зрения в зондовых установках. Указаны дальнейшие планы.
Ключевые слова: зондовый контроль; измерение параметров; кинематическая схема; техническое зрение; нейронные сети.

Автоматическая зондовая установка совместно с контрольно-измерительным оборудованием предназначена для тестирования в автоматическом режиме электрических параметров интегральных схем и полупроводниковых приборов на полупроводниковых пластинах.

Ключевые функциональные характеристики: поддержка пластин до 300 мм, (с различными исполнениями держателей пластин от 75 мм); погрешность позиционирования ±1,5 мкм; обеспечение электрического соединения между контактными площадками кристаллов на пластине и измерительными каналами внешнего контрольно-измерительного оборудования или иного оборудования, подключенного к установке посредством бескабельной стыковки; обеспечение загрузки-выгрузки пластин в стандартные кассеты на 25 позиций для пластин; обеспечение работы с пластинами толщиной от 150 до 1000 мкм (стандартные пластины) и толщиной от 50 до 300 мкм (опциональное исполнение держателя пластин); обеспечение температурных испытаний на пластине от −60 до +155 °С.

Система перемещений X и Y представляет собой совокупность мехатронных узлов, обеспечивающих позиционирование тестируемых пластин. Ход осей должен обеспечивать подвод пластины под верхний камерный узел, находящийся около задней стенки установки, а также к сервисному окну, находящемуся с фронтальной стороны. Также система перемещения X и Y должна обеспечивать подвод держателя полупроводниковых пластин на правый край установки для автоматической загрузки и выгрузки полупроводниковых пластин.

Ввиду высоких требований по точности и дискретности перемещения осей применены линейные серводвигатели и линейные энкодеры в качестве датчиков линейных перемещений. В качестве опор используются аэростатические подшипники, производство которых локализовано на территории РФ.

Система технического зрения установки зондового контроля организована с применением распределенных расчетов на основе программных модулей с параллельными вычислениями. Структура системы машинного зрения установки состоит из блока предварительной обработки потоковых мультиканальных данных; блока формирования базовых функций; блока формирования базы признаков; блока искусственного интеллекта и автоматизации; блок связи, калибровки и управления. Иерархическая структура обращения к блокам, а также возможность формирования параллельных вычислительных задач позволяет осуществлять

операции с потоковыми данными сразу нескольких камер, расположенных на установке. Программная реализация модуля предварительной обработки данных содержит подмодули: фильтрации, основанной на применении многокритериальной целевой функции [1]; устранения импульсного шума; автоматизированной цветокоррекции и баланса интенсивности на основе альфа-контрастирования [2]; адаптивной бинаризации, применяемой для обнаружения края пластины; адаптивной коррекции цветовых гистограмм для патчей узлов кристаллов на пластине [3].

Программные подмодули блока искусственного интеллекта и автоматизации построены с применением комплексной взвешенной функции, оперирующей данными, формируемыми нейронной сетью, корреляционным коэффициентом и максимальным приближением вектора дескриптора. Поиск символов или кодовой последовательности, нанесенной на пластину, осуществлен на основе сверточной нейронной сети прямого распространения, настроенной для распознавания образов. Организация нейронной сети поиска соответствий, сходимости патчей, адаптации в управлении установкой и других блоков построена на основе связных сверточных нейронных сетей, обучение проводилось на основании сформированной базы с подкреплением [4]. Программные подмодули блока связи, калибровки и управления осуществляют преобразование и сжатие данных между блоками, кодирование и многоуровневое комплексирование; модуль адаптивной калибровки позволяет организовать связь между всеми блоками установки и общую привязку отдельных элементов и пластин к координатам установки; формирование управляющих воздействий основано на внесении дополнений к регистрам команд.

Литература

1. Semenishchev E. et al. Image denoising using a combined criterion // Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications, 2016. SPIE, 2016. Vol. 9869. P. 96–102.
2. Voronin V. et al. Quaternion-based local and global color image enhancement algorithm // Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications 2019. SPIE, 2019. Vol. 10993. P. 13–20.
3. Gapon N. et al. Multimodal image inpainting for an autonomous robot navigation application // Multimodal Sensing and Artificial Intelligence: Technologies and Applications II. SPIE, 2021. Vol. 11785. P. 196–203.
4. Voronin V. et al. Action recognition for the robotics and manufacturing automation using 3-D binary micro-block difference // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021. Vol. 117. P. 2319–2330.

УДК 53.088.4

Актуальные вопросы вакуумных измерений в электронном машиностроении

к. т. н. Тетерук Р. А., к. т. н. Чернышенко А. А.
ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 19

Проведен анализ состояния вакуумных измерений в Российской Федерации, в частности в области электронного машиностроения, сделаны выводы о необходимости разработки линейки отечественного измерительного оборудования для обеспечения технологического суверенитета в области электронного машиностроения.

Ключевые слова: вакуум; измерения; метрология; абсолютное давление.

Вакуумные измерения являются неотъемлемой частью практически всех современных технологических процессов и высокотехнологичных производств. Атомная, космическая, химическая, фармацевтическая отрасли, металлургия — вот только часть отраслей промышленности, в которых измерения вакуума являются неотъемлемой частью технологий. В том числе разработка и производство оборудования для электронной промышленности также невозможны без точных измерений низких абсолютных давлений. Анализ количества первичных поверок за последние годы также показывает, что потребность в вакуумных измерениях неуклонно растет. Так, на момент 2024 года количество первичных поверок вакуумметров выросло по сравнению с 2010 годом в 16 раз.

В то же время по результатам анализа ФГИС «Аршин» необходимо отметить, что на настоящий момент из 65 утвержденных типов вакуумметров только 14 вакуумметров являются отечественными, при этом 12 были разработаны и испытаны еще до 2009 года, преимущественно в Советском Союзе. А из 51 утвержденного типа иностранных вакуумметров на настоящий момент в Российскую Федерацию поставляются около 10 типов, при этом прямая поставка из-за рубежа высокоточных вакуумметров была ограничена после 2014 года, а после 2022 года полностью прекращена. Таким образом, можно сделать вывод, что благодаря технологическому развитию, с одной стороны, потребность в высокоточных измерениях вакуума растет, а с другой стороны, потребители в Российской Федерации потеряли доступ к зарубежным технологиям измерений вакуума.

В электронном машиностроении вакуумные измерения являются неотъемлемой частью технологии производства, в связи с чем в оборудовании электронного машиностроения применяются различные высокоточные вакуумметры, в том числе наиболее известные вакуумметры Baratron компании MKS Instruments. Однако необходимо отметить, что заявленные производителем метрологические характеристики этих вакуумметров не во всех диапазонах соответствуют реальным. Так, при заявленной относительной погрешности в 0,05 % реальная погрешность в силу эффекта температурной транспирации может достигать 4,5 %, а в некоторых случаях и 10 %.

Таким образом, проблема вакуумных измерений в электронном машиностроении является крайне актуальной. Для решения этой проблемы ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» ведет работы в следующих направлениях:

- разработка линейки мембранно-емкостных вакуумметров для диапазона давлений от 0,01 до 10^5 Па;
- разработка линейки высокоточных ионизационных вакуумметров для диапазона давлений от 10^{-8} до 10^{-1} Па;
- разработка широкодиапазонных вакуумметров;
- разработка и производство оборудования для поверки и калибровки всех видов средств измерений абсолютного давления.

Дорожная карта развития модульного ATE FORMULA® RXI на основе российского стандарта тестеростроения RXI

Бахвалов П. А.
ООО «ФОРМ»
119530, г. Москва, Очаковское ш., 34

- Необходимость импортозамещения и технологического суверенитета в сфере контрольно-измерительного оборудования (ATE).
- Повышение эффективности и гибкости функциональных испытаний ЭКБ за счет внедрения модульных автоматизированных тестовых систем (ATE).
- Стандарт RXI как основа для создания конкурентоспособного отечественного модульного ATE, совместимого с лучшими мировыми практиками.
- Дорожная карта развития модульного ATE Formula RXI.

Проектирование специальных инженерных сетей для специального технологического оборудования, применяемого для кристального производства

Ткешелашвили Г. Д.
ООО «АДМ СпецРТ»
115054, г. Москва, ул. Дубининская, 57, стр. 1, офис 404
gtkeshelashvili@sstex.

Собраны и показаны основные принципы и проектные решения, используемые при проектировании специальных инженерных комплектов для снабжения кристального производства, включая опыт применения международных норм SEMI, Fit-Up и HookUp СТО.
Ключевые слова: Fit-Up; HookUp; СТО; SEMI; проектирование; кристальное производство.

На сегодняшний день при проектировании кристальных производств типа FAB существует достаточно большой разрыв в требованиях международных стандартов и российских норм. Особенно это касается специальных инженерных систем, таких как системы подачи специальных электронных газов, системы подачи специальных химических реактивов, а также деионизованной воды. Помимо этого, опыт российских проектных команд в построении микроэлектронного производства достаточно мал.

В данном докладе сформированы основные принципы, проектные решения и нормы, которыми должны пользоваться как проектировщики при выполнении проектно-изыскательских работ, так и заказчики построения современного кристального производства, такие как:

- критичные требования к специальным средам и методы их достижения;
- проблемы при проектировании и строительстве специальных инженерных сетей;
- основные принципы и нормы при проектировании кристального производства в условиях дифицита информации;
- принципы и требования при проведении HookUp СТО.

Инспекция проводников распайки кристалла на подложке

Вертопрахов В. В.
АО «Нанотроника»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, просп. Панфиловский, 10, пом. 571
v.vertoprakhov@nanotronica.ru

Введение

Распайка проводников — ключевой процесс соединения кристалла с подложкой. Дефекты распайки проводов — скрытая угроза надежности микросхем, приводящая к отказам уже в устройстве. Традиционный 2D-контроль не выявляет объемные дефекты, такие как, например высота петли, изгибы или сближения проводов, оставляя риски незамеченными.

Автоматизированная установка «Стриж» предназначена для 3D-инспекции проводников после распайки проводов перед корпусированием. Суть технологии 3D-инспекции, применяемой в данной установке, — комплексный контроль геометрии и целостности каждого провода между кристаллом и подложкой, а также получение 3D-модели проводов на основе анализа множества изображений с разной фокусировкой.

Ключевые контролируемые параметры и типы выявляемых дефектов

Геометрия соединений:

а) измерение диаметра и высоты бола, что является гарантией надежного контакта с кристаллом;

б) измерение высоты и профиля петли проволоки.

Целостность и положение провода:

а) детектирование обрыва проволоки — критический дефект, полностью нарушающий соединение;

б) контроль позиции соединений на кристалле и подложке;

в) выявление аномальных прогибов проволоки, ведущих к коротким замыканиям.

Взаимное расположение проводов:

а) измерение наименьшего расстояния между соседними проводами во всех направлениях;

б) детектирование опасного сближения проводов, грозящего коротким замыканием в процессе корпусирования.

Длина провода:

а) контроль соответствия заданной длине для каждого соединения.

Процесс инспекции проводов состоит из следующих этапов:

а) регистрация серии изображений области с проводами при различных фокусировках;

б) построение карты высот (3D-модель): вычисление Z-координаты (высоты) для каждой точки XY с последующим созданием точной 3D-карты поверхности проводов;

в) трассировка проводов: автоматическое выделение и отслеживание пути каждого провода на 3D-карте от кристалла до подложки;

г) анализ параметров и дефектов: для каждого протрассированного провода вычисляются все заданные параметры (высота петли, длина, размеры бола, расстояния до соседних проводов) и производится сравнение с допусками для выявления дефектов.

Преимущества метода 3D-инспекции проводов

1. Обнаружение 3D-дефектов (сближения, изгибы, высота петли), недоступных 2D-системам.
2. Автоматический контроль каждого провода на кристалле.
3. Устранение субъективности ручного контроля, стабильные высокоточные измерения.
4. Раннее выявление дефектов до корпусирования, минимизирующее потери и гарантирующее надежность конечного изделия.
5. Снижение уровня брака на критическом этапе сборки.

Заключение

Установка «Стриж» обеспечивает автоматическую 3D-инспекцию проводников распайки кристалла на подложке перед корпусированием. Обеспечивается измерение высоты каждой проволоки относительно кристалла и подложки, величину изгиба проволоки, расстояния до соседних проводов, параметры бола и пр.

Применение установки «Стриж» позволит отладить технологический процесс распайки кристаллов и, в конечном счете,- улучшить качество выпускаемых микросхем.

УДК 67.05

Разработка растрового электронного микроскопа для анализа дефектов

Гордиенко А. М.[1,2], Заноско А. И.[1]
[1] АО «Нанотроника»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, просп. Панфиловский, 10, пом. 571
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
a.gordienko@nanotronica.ru, a.zanosko@nanotronica.ru

В России отсутствует производство оборудования электронно-лучевой инспекции для полупроводниковых производств. Для обеспечения технологического суверенитета ведется разработка отечественного растрового электронного микроскопа с возможностью проведения энергодисперсионного рентгеновского анализа.

Ключевые слова: растровый электронный микроскоп; анализ дефектов.

В современных условиях промышленного производства интегральных схем ключевым этапом обеспечения качества является анализ дефектов, выявленных на ранних стадиях контроля. Для этого широко применяются растровые электронные микроскопы с энергодисперсионным рентгеновским анализом, позволяющие не только визуализировать дефекты, но и определять химический состав элементов в дефектных областях.

При взаимодействии первичного электронного пучка с материалом образца из поверхностных слоев выбиваются вторичные электроны, которые улавливаются детекторами и формируют изображение с высоким разрешением. Это позволяет получить детальную картину структуры дефекта, что невозможно при использовании только оптических методов контроля.

Для анализа дефектов на пластинах диаметром 200 мм и технологиях 180–90 нм растровый электронный микроскоп должен обладать рядом важных конструктивных особенностей:

- автоматизированная работа со SMIF-контейнерами;
- высокоточный вакуумный столик с высокой точностью позиционирования;
- работа с картами дефектов, полученными на оптических установках поиска дефектов;
- возможность автоматической классификации дефектов;
- низкий уровень привносимой дефектности и загрязнения.

Согласно отчетам компании Applied Materials [1, 2], электронно-лучевая инспекция демонстрирует более высокие темпы роста по сравнению с оптической. На рынке оборудования для метрологии и инспекции лидируют следующие игроки: Applied Materials (около 50 %), Hitachi (более 25 %), ASML (около 15 %), KLA (6 %) и другие (1–2 %). На сегодняшний день в России отсутствует производство оборудования электронно-лучевой инспекции, пригодного для использования в полупроводниковом производстве. В условиях санкционных ограничений и стремления к технологическому суверенитету критически важна разработка отечественных технологий.

Цель разработки — создать систему (табл. 1), полностью закрывающую потребности российских производителей полупроводников [3] и формирующую технологическую базу для дальнейшего развития электронно-лучевых технологий, включая литографические системы.

Такое сочетание параметров обеспечивает высокую детализацию, возможность быстрого обзора и эффективную классификацию дефектов, что соответствует требованиям современных промышленных процессов.

Таблица 1. Ключевые технические параметры разрабатываемого РЭМ

Наименование параметра	Значение параметра
Источник электронов	Катод Шоттки
Диаметр пластин	200 мм
Разрешение	Не менее 3 нм (при <1 кэВ)
Максимальный ток электронного зонда	Не менее 800 пА
Максимальное ускоряющее напряжение	Не более 15 кВ
Энергодисперсионный спектрометр	Наличие
Максимальный размер поля сканирования	Не менее 100×100 мкм^2
Минимальный размер цифрового изображения	Не менее 480×480 пикселей
Автофокусировка	Наличие
Точность позиционирования вакуумного стола по осям X и Y	≤1 мкм
Скорость просмотра дефектов	До 800 дефектов/час
Производительность (при 50 дефектах на пластине)	До 10 пластин/час
Тип распознаваемых файлов дефектов	KLARF

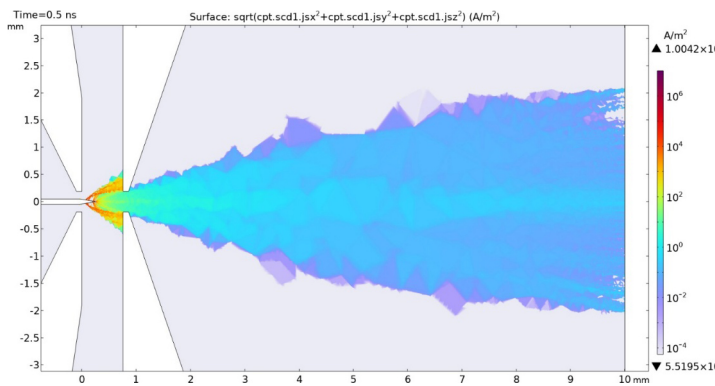


Рис. 1. Моделирование формы острия катода

При моделировании электронно-оптической системы использовались CAE-пакеты: COMSOL Multiphysics, «ФОКУС» и Electron Optical Design. На рис. 1 представлен пример моделирования для оценки угла расходимости пучка и распределения тока в продольном сечении.

Разработка отечественного растрового электронного микроскопа с энергодисперсионным анализом является стратегически важной задачей для российской микроэлектроники. Данная разработка направлена на создание конкурентоспособного оборудования, позволяющегообеспечить технологический суверенитет и повысить качество полупроводниковой продукции в России.

Литература

1. eBeam Technology and Product Launch // Applied Materials, 2022. December 14.
2. Wafer Fab Equipment Market Briefing // Applied Materials, 2024. May 2.
3. Semiconductor Market Update Russia // SEMI, November, 2012.

УДК 621.373.826; 004.932

Применение машинного зрения в лазерных системах для задач микроэлектронной промышленности

Афонюшкин А. А.
ООО «Лазерный центр»
195253, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Тухачевского, 22

В работе представлены практические решения и подходы к применению машинного зрения для задач визуального контроля, высокоточного распознавания объектов при лазерной обработке и автоматической калибровки лазерных установок, применяемых в микроэлектронике

Ключевые слова: машинное зрение; техническое зрение; визуальный контроль.

В современном производстве микроэлектроники непрерывно увеличивается спрос на высокоточный визуальный контроль процессов оператором и/или автоматизацию технологических процессов [1]. Машинное зрение позволяет решать задачи, связанные с позиционированием, калибровкой и инспекцией изделий на микроуровне [2]. В докладе представлен опыт компании ООО «Лазерный центр» по интеграции машинного зрения в линейку лазерных установок для микроэлектроники MicroSet и системы подгонки пленочных резисторов. Описаны различные способы установки промышленных камер, включая использование сканаторных систем и механизированных осей для сшивки изображений и исправления перспективных искажений.

Особое внимание уделено практическим задачам: распознаванию реперных точек с точностью до нескольких микрон, автофокусировке и поиску рабочего расстояния, а также чтению и верификации микроразмерных DPM-кодов как на поверхности, так и внутри изделия. Подчеркивается использование как традиционных алгоритмов поиска по шаблонам и контурам, так и нейросетевых методов глубокого обучения под задачи заказчиков.

Перспективы развития подтверждаются мировой практикой [3]: интеллектуальное отслеживание процесса обработки, автоматическая оценка качества изображения и адаптация подсветки. Внедрение таких решений позволяет повысить стабильность качества лазерной обработки, снизить долю брака и расширить функционал лазерных установок для производства микроэлектроники нового поколения.

Литература

1. Jain R., Kumar S. // International Journal of Optical and Digital Systems, 2021. 3, 4. P. 45–60.
2. Можаев Р. К., Иванов С. П., Петров А. И. // Бит. Информационные технологии, 2023. — 30, 4. — С. 45–55.
3. Singh A., Patel R., Zhao Y. // Journal of Engineering Research and Reports, 2025. 25, 3. P. 55–72.

УДК 621.315.592.2

Исследование процесса выращивания монокристаллов бета-оксида галлия β-Ga_2O_3 из расплава для приборов силовой электроники

Бородин А. В.[1,2], Бородин В. А.[1,2], Юдин М. В.[1], Мошаров Т. А.[2], Ушницкий Я. И.[1]
[1] ИФТТ РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2
y.ushnytsky@issp.ac.ru
[2] АО «ЭЗАН»
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 9
bor@ezan.ac.ru

Разработана установка для выращивания монокристаллов бета-оксида галлия методами Чохральского и Степанова. Получены образцы монокристаллов бета-оксида галлия. Проведены исследования состава, полиморфа и электрофизических характеристик выращенных монокристаллов.
Ключевые слова: бета-оксид галлия (β-Ga_2O_3); монокристалл; технология роста кристаллов.

Благодаря уникальному сочетанию электрофизических свойств бета-оксид галлия (β-Ga_2O_3) рассматривается как перспективный материал для силовой электроники и возможная альтернатива в ряде приложений карбиду кремния (SiC) и нитриду галлия (GaN). На основе β-Ga_2O_3 созданы МОП-транзисторы, диоды Шоттки с более высоким напряжением пробоя по сравнению с приборами на основе привычных полупроводниковых материалов. Кроме того, β-Ga_2O_3 подходит для производства ультрафиолетовых светодиодов, высокотемпературных датчиков газов и солнечно «слепых» датчиков [1, 2]. В отличие от GaN и SiC, кристаллы β-Ga_2O_3 могут быть выращены из расплава, что при должном развитии технологий выращивания и обработки этого материала позволит снизить себестоимость производства как подложек оксида галлия, так и приборов на его основе по сравнению с приборами на карбиде кремния [3, 4].

АО «ЭЗАН» разработало установки для выращивания монокристаллов оксида галлия методами Чохральского и Степанова. В настоящее время на данном оборудовании проводится ОКР по получению монокристаллов методами Чохральского и Степанова.

Процесс получения тестовых кристаллов включал следующие стадии:

- таблетирование, отжиг и наплавление исходного сырья Ga_2O_3 (99,999 %) в иридиевый тигель;
- получение прессованием и отжигом заготовок для поликристаллических затравочных кристаллов;
- выращивание кристалла β-Ga_2O_3 на поликристаллическую затравку методом Чохральского;
- ориентирование монокристаллической части выращенного блочного кристалла и вырезание из крупных блоков монокристаллических затравок;

- выращивание кристалла β-Ga_2O_3 на монокристаллическую затравку методом Чохральского;
- выращивание кристалла β-Ga_2O_3 на монокристаллическую затравку методом Степанова.

Плавающая на поверхности расплава пленка регулярно появляется при выращивании β-Ga_2O_3 в иридиевом тигле, ее наличие затрудняет затравливание, а следовательно, и весь процесс роста. Идентификация плавающей пленки, подавление ее возникновения или удаление имеет решающее значение для выращивания высококачественных монокристаллов бета-оксида галлия. В работе проведены рентгеновские исследования состава плавающей на поверхности расплава пленки и осаждающихся на стенках ростовой камеры частиц.

Расплав оксида галлия при рабочих температурах (1780 °C) разлагается с выделением металлического галлия, который в результате реакций с иридиевым тиглем приводит к образованию эвтектики GaIr. Разложение эвтектики GaIr приводит к появлению иридиевой пленки на поверхности расплава, препятствующей процессу затравливания.

В процессе работы определено, что создание рабочей атмосферы следующего состава: 90 об. % Ar + 10 об. % O_2, препятствует образованию чистого металлического галлия в расплаве и, как следствие, образованию иридиевой пленки. Данный способ получения рабочей атмосферы позволяет упростить процесс затравливания и выращивать кристаллы более высокого структурного совершенства.

Получены образцы монокристаллов бета-оксида галлия. Проведены исследования состава, полиморфа и электрофизических свойств выращенных монокристаллов.

Работа выполняется в рамках соглашения № 020-11-2021-1165 с Минпромторгом России.

Литература

1. Sharma R. et al. Diffusion of dopants and impurities in β-Ga_2O_3 // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. American Vacuum Society AVS, 2021. Vol. 39. № 6. P. 060801.
2. Ueda N. et al. Anisotropy of electrical and optical properties in β-Ga_2O_3 single crystals // Appl Phys Lett. American Institute of PhysicsAIP, 1998. Vol. 71. № 7. P. 933.
3. Reese S. et al. How Much Will Gallium Oxide Power Electronics Cost? // Joule 3, 2019. P. 899.
4. Karen N. Heinselman, Drew Haven, Andriy Zakutayev, and Samantha B. Reese. Projected Cost of Gallium Oxide Wafers from Edge-Defined Film-Fed Crystal // Growth Cryst. Growth Des. 2022, 22, P. 4854–4863.

УДК 621.382.3

Развитие технологического оборудования для DUV- и EUV-фотолитографии в ходе производственных процессов микроэлектронной промышленности

Закшевский Р. В.
АО «Завод ПРОТОН»
124527, г. Зеленоград, г. Москва, Солнечная аллея, 10
info@aoproton.ru

Проведен сравнительный анализ двух ключевых технологий фотолитографии, применяемых в производстве интегральных микросхем, — DUV- и EUV-литографии. Рассмотрены физические основы процессов, типы излучения, доступные на рынке решения, а также особенности технологической реализации и требования к оборудованию. Представленный анализ демонстрирует, что выбор между этими технологиями определяется компромиссом между стоимостью и технологическими возможностями.
Ключевые слова: фотолитография; EUV; DUV; интегральные схемы; разрешающая способность; степпер; множественное экспонирование.

На сегодняшний день производство интегральных микросхем является одной из важных отраслей промышленности. Одним из ключевых этапов технологического процесса является фотолитография.

Фотолитография — это метод получения определенного рисунка на поверхности кремниевой пластины, который широко используется в производстве интегральных микросхем. Суть процесса заключается в нанесении тонкого фоточувствительного полимерного материала (фоторезиста) на обрабатываемую поверхность пластины, после чего следует засвечивание фоторезиста через фотошаблон [1].

Основными для производства интегральных микросхем являются EUV- и DUV-литография.

DUV-литография (литография в глубоком ультрафиолете) — это технология производства, которая использует коротковолновое ультрафиолетовое излучение с длиной волны 193 нм и разрешающей способностью 48 нм. Для создания меньших структур используется технология множественного экспонирования. Она подразумевает применение нескольких фотошаблонов для проецирования рисунка на подложку.

С развитием микроэлектроники и уменьшением технологических норм производители использовали все больше фотошаблонов для создания меньших структур, что привело к увеличению количества барака. Эти факторы привели к потолку развития DUV-литографии и необходимости создания новых технологий производства.

EUV-литография (литография в экстремальном ультрафиолете) — технология производства, основной особенностью которой является использование сверхкороткого (экстремального) спектра ультрафиолетового излучения с длиной волны 13,5 нм. За счет этого удается достичь разрешающей способности 3,5 нм.

Процесс EUV-литографии на современных производствах требует крупногабаритных и дорогих установок пошаговой литографии, которые принято называть степперами. Они формируют структуры интегральных микросхем при помощи 13,5-нм излучения [2].

На рынке представлено множество компаний, которые занимаются производством степперов для DUV-литографии, при этом производством степперов для EUV-литографии занимается лишь голландская компания ASML. В результате анализа было получено, что оборудование для DUV-литографии имеет более низкую стоимость и доступность, но меньшую разрешающую способность по сравнению со степперами EUV-литографии, которые в свою очередь отличаются сложностью внедрения и высокой стоимостью. Глубокая ультрафиолетовая фотолитография является более дешевым способом производства интегральных микросхем и благодаря технологии множественного экспонирования позволяет сократить разницу в разрешающей способности.

Литература

1. Машкина Е. С., Бормонтов Е. Н. Литографические процессы в технологии твердотельной электроники: Учебно-методическое пособие для вузов; Федеральное агентство по образованию, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный университет». — Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2013. — 104 с.: ил., табл.; 21 см. — Библиогр.: с. 104.
2. Макушин М., Мартынов В. EUV-литография на пороге. Технологические и экономические аспекты освоения в производстве // Производственные технологии, 2018. — Т. 176. — № 5. — С. 108–116. DOI: 10.22184/1992-4178.2018.176.5.108.116.

Практический опыт производства технологического оборудования для предприятий микроэлектроники

Фролов Г. Ю.
ООО «ТБС»
105064, г. Москва, Нижний Сусальный пер., 5, стр. 4

Локализация производства сталкивается с комплексом взаимосвязанных проблем, которые требуют взвешенного подхода. Основная трудность заключается в сохраняющейся зависимости от импортных компонентов, особенно в электронной промышленности, где многие критически важные элементы пока не имеют отечественных аналогов или отечественные аналоги недоступны в закупке. Это создает уязвимости в производственных цепочках и требует работы по расширению собственной базы отечественных поставщиков.

Не менее сложной задачей становится организация соответствующих производственных условий. Чистые помещения, отвечающие современным стандартам, требуют значительных инвестиций и специальных знаний. Для многих небольших предприятий это становится серьезным барьером, поскольку готовые решения часто не учитывают их специфические потребности и требуют значительных материальных вложений.

Ключевым фактором успешной локализации является индивидуальный подход к каждому проекту. Универсальные решения редко бывают эффективными — необходимо глубокое понимание технологических процессов заказчика и способность адаптировать оборудование под конкретные задачи. Это требует не только технической экспертизы, но и гибкости в принятии решений.

Перспективы локализации во многом зависят от выбора правильной стратегии развития. Модульные решения позволяют постепенно наращивать мощности, избегая резких капитальных затрат. Технологическая подготовка становится важнейшим этапом, определяющим успех всего проекта. В конечном счете эффективная локализация — это поиск разумного баланса между текущими возможностями и долгосрочными целями развития производства.

УДК 621.382:621.791

Технологические решения для прецизионного монтажа кристаллов в условиях ограниченного доступа к западному оборудованию

Богословский В. А.
Коммерческий директор
ООО «Евроинтех»
140011, г. Люберцы, ул. Юбилейная, 26, пом. 016
bog@eurointech.ru

В условиях сложной геополитической обстановки и санкций против РФ многие предприятия микроэлектронной индустрии сталкиваются с проблемами поставок оборудования для НИОКР и выполнения госзаказов. Особенно это касается высокоточного оборудования для монтажа кристаллов и сборки микроэлектронных приборов, которое ранее поставлялось из ЕС, США и Японии.

Ключевые слова: микроэлектроника; высокоточный монтаж; импортозамещение; флип-чип; термокомпрессия; ультразвуковая сварка; эвтектика; оптоэлектроника; сборка лазеров.

Компания ООО «Евроинтех» предлагает установку **Ultrahighprecision-hx10A** (рис. 1), разработанную совместно с китайской Shenzhen Hongxinweizu Technology Co., Ltd. Это универсальная модульная платформа с точностью до ±0,5 мкм, поддерживающая различные технологии монтажа: флип-чип, термокомпрессию, ультразвук, эвтектическую пайку и дозирование клея.

Рис. 1. Установка Ultrahighprecision-hx10A

Преимущества HX10A:

- высокая модульность (8+ опциональных модулей);
- быстрая переналадка для малых партий и НИОКР;
- полная поддержка российскими специалистами.

В сегменте высокоточного монтажа кристаллов (до ±0,5 мкм) основными аналогами HX10A являются (табл. 1):

- Tresky TS300 (Швейцария) — эталонная система для флип-чип, точность ±0,5 мкм;
- Finetech Lambda2 (Германия) — прецизионный монтажник с поддержкой термокомпрессии;
- SET FC150 (Франция) — специализированная установка для ультразвукового соединения.

Таблица 1. Сравнение с аналогами

Параметр	HX10A	Tresky TS300	Finetech Lambda2	SET FC150
Точность	±0,5 мкм	±0,5 мкм	±0,75 мкм	±1,0 мкм
Температура	До 500 °C	До 450 °C	До 400 °C	До 300 °C
Усилие прижима	0,05–4000 Н	0,1–3000 Н	0,1–2000 Н	0,05–1000 Н
Технологии	Все основные	Термокомпрессия, эвтектика	Термокомпрессия, ультразвук	Ультразвук
Модульность	Высокая	Средняя	Средняя	Низкая

Современные высокоавтоматизированные сборочные системы имеют существенные недостатки: высокую стоимость, сложное обслуживание, зависимость от иностранных специалистов и низкую гибкость при смене номенклатуры продукции. Установка Ultrahighprecision-hx10A от ООО «Евроинтех» решает эти проблемы, предлагая:

1) оптимальное решение для малых серий и НИОКР;
2) высокую гибкость и простоту переналадки;
3) полную технологическую поддержку российскими специалистами;
4) возможность адаптации под нестандартные задачи;
5) локализованное обслуживание и модернизацию.

Заключение

Установка HX10A оптимальна для российских предприятий, сочетая точность, гибкость и локализованную поддержку, что делает ее ключевым решением в условиях санкций. Компания ООО «Евроинтех» выступает не только как дистрибьютор китайского оборудования, но и как технологический партнер, способный разрабатывать индивидуальные решения для российских предприятий.

Литература

1. Shenzhen Hongxinweizu Technology Co., Ltd. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.hongxinwz.com.
2. Finetech GmbH & Co. KG [Электронный ресурс]. — https://finetech.de.
3. Dr. Tresky AG [Электронный ресурс]. — https://www.tresky.com.
4. SET Corporation SA [Электронный ресурс]. — https://set-sas.fr.

УДК 621.923

Современные подходы к одностороннему утонению кремниевых пластин с сохранением прецизионных структур

Якухина А. В.
Генеральный директор
ООО «ИТЦ «Затвор»
117105, г. Москва, Варшавское ш., 1А, пом. 33 К/6
ceo@etc-zatvor.com

Анализ современных методов утонения кремниевых пластин с сохранением прецизионных структур. Рассмотрены технологические решения и их экономическая эффективность для микро- и силовой электроники [1, 2].

Ключевые слова: утонение кремниевых пластин; механическое шлифование; химико-механическая полировка (CMP); микроэлектроника; силовая электроника; промышленное оборудование.

Актуальность технологии

Растущие требования к миниатюризации электронных компонентов и повышению их энергоэффективности обуславливают необходимость утонения кремниевых пластин до 20–100 мкм. Особенно востребованы эти технологии в:

- производстве гибких электронных устройств, медицинских датчиков и гибких дисплеев (требование по толщине пластин 30–50 мкм);
- изготовлении силовых полупроводниковых приборов (IGBT, MOSFET) (требование по толщине пластин 60–100 мкм для улучшения теплоотвода);
- разработке компонентов для IoT и 3D-интеграции (требование по толщине пластин 20–40 мкм).

Рынок утонения пластин к 2025 году достигнет $1,2 млрд (рост 7–9 % в год) [1].

Методы утонения

1. Механическое шлифование — наиболее экономичный метод для серийного производства:

- толщина 20–200 мкм;
- точность ±2,5 мкм;
- стоимость 20–50 $/пластина.

2. Химико-механическая полировка (CMP)

Используется для финишной обработки:

- толщина 10–150 мкм;
- точность ±1 мкм;
- стоимость 80–200 $/пластина;
- недостатки — высокая стоимость, низкая скорость обработки.

3. Технология Smart-Cut

Альтернативный метод для ультратонких пластин:

- толщина 5–50 мкм;
- точность ±0,5 мкм;
- стоимость 150–300 $/пластина;
- применение — специализированные продукты (фотоника, MEMS).

Производственные решения

Для промышленного утонения кремниевых пластин предлагаются следующие решения.

1. Полуавтоматические установки для пластин 100–150 мм:

- точность обработки ±3 мкм;
- прецизионный шпиндель мощностью 8,5 кВт;
- вакуумные керамические столики с точностью позиционирования ±0,5 мм;
- производительность 15–20 пластин/час;
- стоимость обработки 20–30 $/пластина;
- возможность обработки пластин с готовыми структурами;
- оптимальность для опытных производств и мелких серий.

2. Автоматизированные линии для пластин 150–200 мм:

- точность ±2 мкм;
- двухшпиндельная конструкция (4,8 кВт на шпиндель);
- производительность до 50 пластин/час;
- роботизированная система загрузки-выгрузки;
- многоступенчатый контроль качества;
- интеграция в существующие техпроцессы;
- снижение себестоимости на 30–40 %.

3. Промышленные комплексы для пластин 300 мм:

- полностью автоматизированный цикл;
- трехшпиндельная система для полного цикла обработки;
- толщина до 30 мкм с TTV <1,5 мкм;
- интеграция с SMIF-системами;
- совместимость со стандартами Industry 4.0.

Перспективные направления

1. Гибридные технологии: комбинация механического шлифования и лазерной обработки для уменьшения дефектности.

2. Использование AI: алгоритмы машинного обучения для оптимизации режимов резания.

3. Экологичные решения: переход на сухое шлифование и рециркуляцию охлаждающих жидкостей.

Заключение

Современные методы утонения обеспечивают баланс точности, производительности и экономичности. ООО «ИТЦ «Затвор» предлагает комплексные решения — от подбора оборудования до поставки и интеграции в производственные процессы. Мы готовы поставить любую из рассмотренных систем с сопутствующим оснащением, обеспечивая полный цикл внедрения для ваших задач.

Литература

1. Marks M. R., Hassan Z. Characterization Methods for Ultrathin Wafer // IEEE Trans. on Components, 2014. Vol. 4. № 12. P. 2042–2057.
2. Smith J. Trends in Wafer Thinning Technologies // IEEE Trans. on Semicon. Manufact., 2023. Vol. 36. № 2. P. 45–52.

УДК 538.911, 539.23

Исследование подложек $ScAlMgO_4$ для эпитаксиального роста GaN и ZnO

Загоскин М. О.
ООО «ОСТЕК-ЭК»
121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2

В статье рассматривается исследование $ScAlMgO_4$ как перспективной гетероподложки для эпитаксии GaN и ZnO. Описаны структурные и функциональные свойства материала, методы его получения и применения в эпитаксиальном росте полупроводниковых пленок.

Ключевые слова: $ScAlMgO_4$; самоотделяющаяся подложка; согласование решетки; рост кристаллов; эпитаксия; обзор.

В XXI веке полупроводниковые материалы третьего поколения с широкой запрещенной зоной, такие как нитрид галлия (GaN) и оксид цинка (ZnO), являются значительным подспорьем для развития полупроводниковой промышленности. Из-за значительного рассогласования кристаллических решеток и теплового рассогласования между гетероподложкой и эпитаксиальным слоем внутри прибора при росте на подложках типа SiC, сапфира и т.д. образуется большое количество дефектов. Поэтому поиск новой подложки стал очень важен для развития устройств на основе GaN и ZnO.

$ScAlMgO_4$ (скандат алюминия-магния, SCAM) — это многокомпонентный оксид с температурой плавления 2173 K. Обладает малым рассогласованием кристаллической решетки с решеткой GaN в направлении [1000] (примерно на 1,4 %) и с решеткой ZnO (рассогласование в направлении [1000] 0,09 %). Коэффициент теплового расширения (КТР) SCAM вдоль оси *a* при низких температурах составляет $6{,}2 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} (при 200 и 250 K), что близко к КТР GaN ($5{,}59 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}) и ZnO ($4{,}31 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}). Все это делает SCAM оптимальным материалом подложки для их высококачественной эпитаксии [1].

Кристалл SCAM имеет гексагональную сингонию, состоит из соединенных друг с другом октаэдров [ScO_6] и тригональных бипирамид [$AlMgO_5$]. SCAM обладает сверхрешеткой со слоистой структурой, образованной чередующимися слоями скаполитового (111) типа $ScO_{1,5}$ и вюрцитового (0001) типа $AlMgO_{2,5}$, соединенными ионами O^{2-}, поэтому кристаллографическая плоскость (0001) вдоль оси *c* обладает сильной спайностью, что объясняет возможность самоотделения подложки SCAM от эпитаксиального слоя.

С помощью метода Чохральского возможно получать слитки диаметром до 4 дюймов (~101 мм). Однако в зоне около их оси наблюдается скопление образованных в процессе роста дислокаций, которые впоследствии из-за большого согласования периодов решеток могут уходить в эпитаксиальный слой, что необходимо учитывать при росте пленок.

Один из методов роста GaN на подложке SCAM подразумевает выращивание методом металлоорганической эпитаксии из паровой фазы (MOVPE) слоя толщиной 2 мкм в качестве шаблона. Затем гидридной эпитаксией из паровой фазы (HVPE) выращивают слой GaN. При охлаждении после роста HVPE пленка GaN самостоятельно отделяется от подложки SCAM вдоль плоскости ее ориентации.

Затем подложку SCAM перпендикулярно направлению *c* откалывают лезвием на расстоянии 160 мкм от поверхности первичного отделения и вновь получают epi-ready атомарно-гладкую поверхность, что показано на рис. 1.

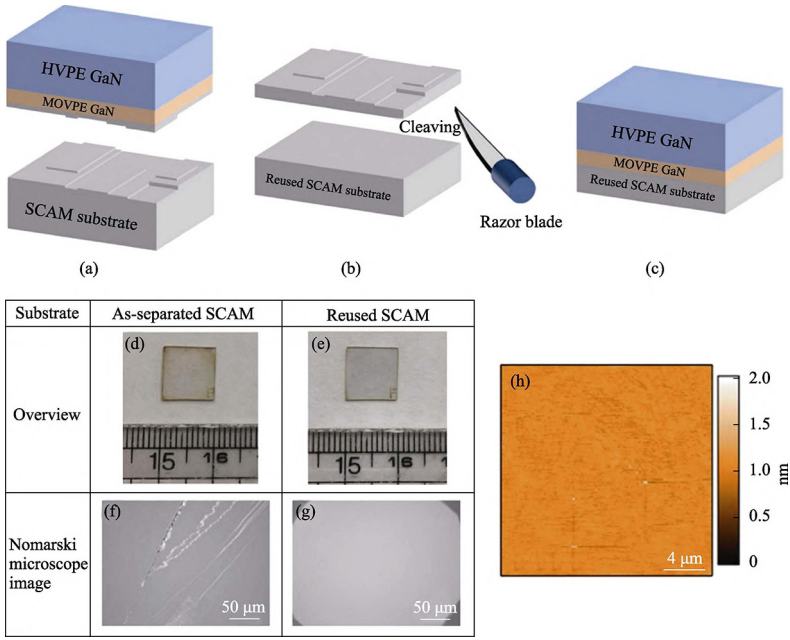


Рис. 1. Повторное использование подложки SCAM: *a*) отделение слоя GaN от SCAM при охлаждении после роста методами MOVPE и HVPE; *b*) откалывание поверхности подложки SCAM лезвием бритвы; *c*) пленка GaN на повторно используемой подложке SCAM; *d*, *f*) фотографии и изображения микроскопии Номарского поверхности SCAM после отделения; *e*, *g*) фотографии и изображения микроскопии Номарского подложек SCAM с обработанной лезвием бритвы поверхностью; *h*) изображения АСМ подложек SCAM, обработанных бритвой

Однако высокая температура процесса вызывает диффузию атомов Mg, что указывает на необходимость использования низкотемпературных методов роста, таких как метод импульсного лазерного осаждения при абляции мишени (PLD), с помощью которого также могут быть получены пленки GaN с высоким качеством структуры. Помимо этого, с помощью отжига подложки SCAM в среде водорода или на воздухе можно управлять полярностью эпитаксиального слоя и получать GaN с Ga- или N-полярностью соответственно.

SCAM также подходит и для эпитаксии на нем ZnO. В этом случае реакция гетероподложки с эпитаксиальной пленкой отсутствует, что позволяет получать качественные монокристаллические слои ZnO посредством методов PLD, молекулярно-лучевой эпитаксии с лазерной абляцией (Laser-MBE) или с плазменной активацией (PA-MBE) и химическим осаждением на подложку из раствора (CSD).

Литература

1. Zhang C., Tang H., Li X., Wang Q., Luo P. et al. Research Progress of $ScAlMgO_4$ Crystal: a Novel GaN and ZnO Substrate // Journal of Inorganic Materials, 2023. Vol. 38 (3). P. 228.

УДК 621.315.592

Оптимизация теплового поля в установке выращивания монокристаллов карбида кремния большого диаметра

Белых А. И.
ООО «ОСТЕК-ЭК»
121467, г. Москва, ул. Молдавская, 5, стр. 2

Исследованы тепловые поля в установке для выращивания монокристаллов SiC диаметром 200 мм методом физического газофазного переноса (PVT). Компьютерное моделирование позволило оптимизировать конструкцию нагревателей и теплоизоляции, обеспечив стабильные температурные градиенты и равномерный рост кристаллов при динамическом изменении толщины кристалла и расходовании шихты.
Ключевые слова: карбид кремния (SiC); физический газофазный перенос; моделирование температурных полей; температурные градиенты.

Исследование посвящено оптимизации тепловых полей в установке для выращивания монокристаллов карбида кремния (SiC) диаметром 200 мм методом физического газофазного переноса (PVT). Основное внимание уделено анализу влияния конструкции нагревательных элементов, системы теплоотвода и теплоизоляции на распределение температуры в реакторе.

Численное моделирование, выполненное с использованием специализированного программного обеспечения, позволило проанализировать ключевые параметры системы. Установлено, что традиционная схема с центральным теплоотводящим отверстием приводит к значительным радиальным градиентам температуры (до 1,5 К/см), что негативно влияет на качество кристаллов. В качестве альтернативы предложена модифицированная конструкция с кольцевым расположением теплоотводящих элементов, которая обеспечила снижение радиального градиента до 0,25–0,28 К/см. Одновременно удалось сохранить высокий продольный градиент между шихтой и кристаллом (14,2 К/см), что критически важно для стабильности процесса роста.

Особый интерес представляют результаты исследования динамики тепловых процессов при изменении толщины кристалла и расходовании шихты. Показано, что увеличение толщины кристалла на 20–30 мм не приводит к существенному нарушению равномерности нагрева, хотя и вызывает некоторый рост абсолютных температурных значений. Также выявлено, что повышение пористости шихты в процессе ее расходования способствует снижению максимального перепада температур с 90 до 40 К. Эти данные имеют важное значение для проектирования промышленных установок.

Оптимизированная система демонстрирует значительный потенциал для промышленного применения. Полученные результаты свидетельствуют о возможности воспроизводимого роста высококачественных кристаллов большого диаметра, что может способствовать снижению себестоимости производства SiC-подложек. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка методов динамического управления мощностью нагревателей для точного контроля тепловых режимов в процессе роста кристаллов.

Литература

1. Jiazheng Lu, Hui Zhang, Lili Zheng, Yuan Ma, Depeng Song. Design and Thermal Optimization of Resistive Heating Systems for Bulk Silicon Carbide Crystal Growth // Journal of Synthetic Crystals, 2022. Vol. 51. № 3.

УДК 661.665.12

Разработка отечественного оборудования и технологии выращивания монокристаллов SiC диаметром 150 мм

Бородин А. В.[1,2], Бородин В. А.[1,2], Юдин М. В.[1,2], Смирнов К. Н.[2], Мошаров Т. А.[2], Оганесян В. А.[1,2]
[1] ИФТТ РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2
v.oganesyan@issp.ac.ru
[2] АО «ЭЗАН»
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, 9
bor@ezan.ac.ru

Разработана установка «Ника-SiC-6M» для выращивания монокристаллов SiC диаметром 150 мм. Описаны технологические преимущества установки. Проведены исследования характеристик выращенных на установке монокристаллов SiC диаметром 150 мм.
Ключевые слова: карбид кремния (SiC); монокристаллы SiC; установки выращивания; индукционный нагрев; технология роста кристаллов.

Благодаря уникальному сочетанию электрофизических характеристик карбид кремния (SiC) широко применяется в силовой электронике для производства приборов (диоды Шоттки, MOSFET, IGBT) с существенно более высокими характеристиками по сравнению с приборами на основе монокристаллов кремния [1].

Монокристаллы SiC получают методом ЛЭТИ (PVT), в основе которого лежит конденсация пересыщенного пара шихты SiC на монокристалл-затравку SiC [2].

На АО «ЭЗАН» разработаны и изготовлены опытные установки индукционного нагрева «Ника-SiC-6M» (рис. 1) для выращивания монокристаллов SiC диаметром 150 мм, на которых проводятся разработка технологии выращивания монокристаллов SiC и освоение серийного получения монокристаллов SiC.

Созданная установка индукционного нагрева «НИКА-SiC-6M» обладает высоким уровнем автоматизации технологического процесса и рядом технологических преимуществ, а именно:

- автоматизированной системой сухой вакуумной откачки, состоящей из спирального и турбомолекулярного насосов, обеспечивающих вакуум до 10^{-5} Торр;
- автоматизированной системой поддержания динамического вакуума в диапазоне от 0,1 до 750 Торр;
- системой вертикального перемещения индуктора, обеспечивающей оптимальное распределение температуры в тепловом узле и равномерный выход паров из источника в процессе выращивания монокристалла;
- системой пирометрического измерения температуры в верхней и нижней точках теплового узла, обеспечивающей непрерывный мониторинг температурного градиента между монокристаллом-затравкой и источником паров;
- системой вертикального перемещения нижнего пода реактора для быстрой и безопасной загрузки-выгрузки теплового узла и при необходимости кварцевого реактора;

- возможностью работы в протоке рабочих газов Ar, N_2 или их смеси в заданном соотношении, которое поддерживается в автоматическом режиме;
- форвакуумным баллоном, поддерживающим рабочее давление в реакторе до 0,1 Торр без использования вакуумных насосов, что увеличивает ресурс работы вакуумных насосов и упрощает поддержку необходимого давления.

На установке «Ника-SiC-6M» выращены монокристаллы SiC диаметром 156 мм, из которых подготовлены пластины диаметром 150 мм и толщиной 0,35–0,8 мм (рис. 2).

На пластинах проведены исследования структурного совершенства и электрофизических характеристик полученных кристаллов.

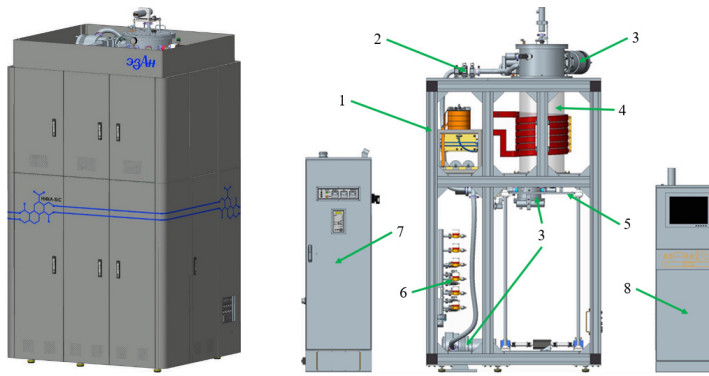


Рис. 1. Установка «Ника-SiC-6M»: слева — внешний вид модуля ростового установки; справа — общий вид установки (обшивки не показаны):
1 — модуль ростовой, 2 — система напуска газов, 3 — вакуумная система, 4 — рабочий реактор, 5 — подвижный под, 6 — система водяного охлаждения, 7 — транзисторный преобразователь частоты, 8 — стойка управления

Рис. 2. Монокристалл SiC (слева) и пластина, вырезанная из монокристалла SiC (справа)

Работа выполняется в рамках соглашения № 020-11-2023-1603 с Минпромторгом России.

Литература

1. Афанасьев А. В., Ильин В. А., Лебедев А. О. и др. Карбид кремния — наноразмерный алмазоподобный широкозонный полупроводниковый материал и приборы на его основе // Биотехносфера, 2011. — № 1–2 (13–14). — С. 11–19.
2. Tairov Y. M., Tsvetkov V. F. Investigation of growth processes of ingots of silicon carbide single crystals // Journal Crystal Growth, 1978. Vol. 43 (2). P. 209–212.

Установка «УМКА» для автоматического монтажа полупроводниковых кристаллов

Лисов В. С., Малышев Р. А., Семенищев Е. А.
ООО «Совтест АТЕ»
305014, г. Курск, ул. К. Маркса, 135/6

В докладе представлены результаты разработки специалистами ООО «Совтест АТЕ» установки для автоматического монтажа полупроводниковых кристаллов в целях реализации государственной программы «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности». Описаны детали разработки механических и цифровых компонентов. Представлены основные технические характеристики, разработанные модули и планы по дальнейшей разработке.
Ключевые слова: монтаж кристаллов; кинематическая схема; техническое зрение; флип-чип; эвтектика; СвК; Die Stacking; машинное зрение; нейронные сети; автоматизированная обработка.

Введение

Монтаж кристаллов на подложку является ключевой операцией в технологическом маршруте корпусирования МЭ. Специфика российского производства (с одной стороны, многономенклатурность и малая серия, а с другой — сложность изделий) накладывает требования к техническим характеристикам и возможностям автомата по точности, универсальности, возможности монтажа нескольких типов кристаллов на одну подложку, поддержке большинства существующих процессов монтажа в МЭ (СвК, флип-чип, эвтектика, вертикальная сборка и пр.).

Система перемещений установки

В результате ОКР в разработанной установке применена портальная схема с аэростатическими опорами по осям XY. Приводы осей XY реализованы на линейных серводвигателях с обратной связью, привод по оси X сдвоенный. Аэростатические подшипники — современное решение, основанное на отечественных разработках, с отличными показателями точности и производительности и высокими эксплуатационными характеристиками. Применение данного решения позволяет рассматривать его как платформу для дальнейших разработок.

Специальные технологические узлы

Основной технологический узел установки — монтажная головка. Она закреплена на каретке оси Z, обеспечивает захват и установку кристалла, вращение по оси Theta и контроль усилия монтажа. На головке смонтированы: дозатор для нанесения материалов, видеокамера и система подогрева инструмента.

Компоновка рабочей зоны установки разработана с учетом требований универсальности и применимости большинства процессов. В установке обеспечены: подача кристаллов одновременно из нескольких различных носителей (в том числе с 300-мм пластины), автоматическая смена инструментов, размещение подложек.

Система управления

Разработанная система управления установкой представляет собой программно-аппаратный комплекс с интегрированной системой технического зрения.

Управление различными подсистемами установки осуществляется на основе шинной архитектуры и протокола Ethetnet. Адаптивность обеспечивается техническим зрением и ПО со специально разработанными алгоритмами обработки видеоизображений.

Программное обеспечение

Программное обеспечение имеет модульную структуру и включает:

- модуль захвата входных данных. Основным назначением блока выступает первичная обработка видеопотока в целях уменьшения действия шумовой компоненты. Операция выполняется с использованием многокритериальной целевой функции [1], адаптивной гамма-коррекции с использованием альфа-смешивания, анизотропных локально-полиномиальных градиентов с переменным порядком [2], устранения отражений и сбойных пикселей на основе блока замещения [3], интеллектуальных функций, осуществляющих операции отслеживания пользовательских действий и слежение за пользователем [4];
- модуль формирования базовых функций для определение статистических параметров подложки или кристалла, их классификации, определения графических и физических параметров: границ, центра, угла поворота, относительных координат. Формирование блока построено на применении комбинированных критериев, включая нейронные сети, корреляционный и дескрипторный анализ и комплексную мультиспектральную обработку;
- модуль поиска уникальных точек для обучения и распознавания;
- модуль формирования базы признаков и обучения нейронной сети для распознавания и поиска объектов по базе данных.

Литература

1. Semenishchev E. et al. Image denoising using a combined criterion // Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications 2016. SPIE, 2016. Vol. 9869. P. 96–102.
2. Voronin V. et al. Quaternion-based local and global color image enhancement algorithm // Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications 2019. SPIE, 2019. Vol. 10993. P. 13–20.
3. Gapon N. et al. Multimodal image inpainting for an autonomous robot navigation application // Multimodal Sensing and Artificial Intelligence: Technologies and Applications II. SPIE, 2021. Vol. 11785. P. 196–203.
4. Voronin V. et al. Action recognition for the robotics and manufacturing automation using 3-D binary micro-block difference // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021. Vol. 117. P. 2319–2330.

УДК 544.032.65, 621.373.8

Оборудование для лазерной обработки в микроэлектронике

Васильев О. С., к. т. н.
ООО «Лазерный Центр»
195253, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Тухачевского, 22

В работе представлено разработанное компанией ООО «Лазерный Центр» оборудование для обработки материалов микроэлектронной промышленности. Описаны технологии лазерной обработки материалов на примере некоторых процессов, таких как резка, скрайбирование, деметаллизация, формирование поверхностной микроструктуры, перфорация и т. д.
Ключевые слова: лазеры; лазерные системы; технология обработки; материалы микроэлектронной промышленности.

На сегодняшний день лазеры и лазерные системы все больше укрепляются в производственных процессах многих современных предприятий. Это связано с их уникальными характеристиками, такими как субмикронный размер пятна лазерного излучения, бесконтактность, отсутствие расходных материалов, мультифункциональность, и другими преимуществами, часто недостижимыми традиционными механическими и химическими методами обработки. Индустрия микро- и наноэлектроники также предъявляет свои требования к обработке материалов. Одно из них заключается в принципиальной возможности работы со специализированными материалами, например арсенидом галия, нитридом бора, кристаллическим кремнием, различного рода керамиками, в том числе LTTC, поликором и ситаллом, а также металлами, сплавами и другими материалами. Еще одно требование заключается в типе обработки материала: резка, перфорация, скрайбирование, деметаллизация, формирование поверхностной топологии, сварка и т. д. И последнее принципиальное требование относится к точности и стабильности обработки, учитывающей геометрические характеристики изготавливаемых компонентов. Компания ООО «Лазерный Центр» имеет многолетний опыт работы с материалами микро- и нано- электроники, на основе которого ведутся разработки уникальных лазерных систем и технологий, о которых пойдет речь в данном докладе.

Литература

1. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие. — М.: МГТУ им. Баумана, 2006. — 664 с.
2. Либенсон М. Н., Яковлев Е. Б., Шандыбина Г. Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Лазерный нагрев и разрушение материалов: Учебное пособие / под общ. ред. В. П. Вейко. — СПб: НИУ ИТМО, 2014. — 181 с.
3. Вейко В. П. Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлектронике. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. — 141 с.

УДК 621.382

Исследования однородности температуры подложки в установке вакуумно-плазменного травления

Горностаев П. А.
АО «НПП «ЭСТО»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, просп. Георгиевский, 5, стр. 1

Проведены экспериментальные исследования однородности температуры подложки в установке вакуумно-плазменного травления, закрепленной на подложкодержателе с электростатическим прижимом, при различных параметрах плазменной обработки. Проведен анализ различных механизмов теплообмена в системе плазма — подложка — подложкодержатель.
Ключевые слова: вакуумно-плазменное травление; подложкодержатель с электростатическим прижимом; равномерность температуры подложки.

Процессы вакуумно-плазменного травления (ВПТ) широко используются в производстве изделий микро- и наноэлектроники, микро- и наномеханических устройств [1–6]. Данные процессы применяются для финишной очистки поверхности подложек, планаризации их поверхности, удаления резиста, изготовления тонких неорганических масок, формирования элементов интегральных микросхем (ИМС) [7].

При производстве ИМС оборудование ВПТ подразделяют в зависимости от видов материалов, подлежащих травлению: травление кремния, травление металлов и травление диэлектриков. Травление кремния и металла требует оборудования с низкой энергией ионов, поскольку ковалентная связь в данных материалах относительно слабая. Для травления диэлектриков требуется оборудование с высокой энергией ионов из-за прочной ковалентной связи данных материалов. Вследствие применения новых материалов в структурах ИМС приведенная выше классификация расширяется.

Количество процессов ВПТ во всем производственном цикле ИМС демонстрирует тенденцию к росту. Таким образом, оборудование для ВПТ составляет все большую долю от общих затрат на оборудование производственной линии. Среднее количество технологических операций и процессов ВПТ при изготовлении ИМС для различных уровней технологии приведено в табл. 1 [8, 9].

Таблица 1. Среднее количество технологических операций и процессов ВПТ при изготовлении ИМС для различных уровней технологии

Уровень технологии	65 нм	45 нм	32 нм	20 нм	14 нм	10 нм	7 нм
Среднее количество процессов ВПТ	20	30	40	55	65	110	150
Среднее количество технологических операций	680	710	740	1000	1100	1300	1500

С развитием полупроводниковых технологий требования к технологическим процессам определяют необходимость значительного повышения разрешающей способности ВПТ (например, ширина линий логических устройств уже

составляет 3 нм) [8]. Появляются новые структуры (например, NAND, FinFET, GAAFET, MBCFET, MOSFET), новые материалы (например, материалы с высокими и низкими показателями диэлектрической проницаемости (high-k, low-k, ultralow-k)) и новые технологии (например, процессы Dual Damascene и multiple patterning) [8, 10, 11].

Таким образом, требования к процессам ВПТ сосредоточены на следующих аспектах: более точный контроль параметров травления; более высокая селективность травления; оптимизация технологии травления структур с высоким аспектным соотношением; сведение к минимуму повреждений устройств, вызванных плазмой. Переход к нанометровым размерам требует создания принципиально новых технологических методов и оборудования, обладающих высокой разрешающей способностью. В этой связи задачи исследования и оптимизации процессов ВПТ важны и актуальны для развития полупроводниковых технологий.

Литература

1. Осипов А. А. Разработка технологии высокоскоростного глубокого плазмохимического травления монокристаллического кварца, карбида кремния и ниобата лития при малой мощности. — 2019.
2. Амиров И. И. Плазменные процессы формирования высокоаспектных структур для микро- и наномеханических устройств: Дисс. — Физико-технический институт РАН (ФТИАН), 2010.
3. Зотович А. И. Деградация нанопористых диэлектриков в высокочастотной плазме и методы ее снижения. — 2018.
4. Данилкин Е. В. Исследование и оптимизация процесса реактивного ионного травления деплот в кремнии для формирования мелкой сеточной изоляции: Дисс. — Московский государственный институт электронной техники, 2008.
5. Коняев И. В. Кинетика и механизмы плазмохимического травления танталата лития: Дисс. — Воронежский государственный технический университет. — 2019.
6. Спешилова А. Б. Разработка технологии формирования пленок фоторезиста прецизионной толщины с минимальной шероховатостью поверхности методом плазмохимического травления. — 2019.
7. Нанотехнологии в электронике. Выпуск 2 / Под редакцией члена-корреспондента РАН Ю. А. Чаплыгина. — М.: Техносфера, 2013. — 688 с.
8. Pu Y. Plasma Etch Equipment / Wang Y., Chi M. H., Lou J. J. C., Chen C. Z. (eds) Handbook of Integrated Circuit Industry. Springer, Singapore, 2024.
9. Киреев В. Ю. Введение в микроэлектронику и нанотехнологии. — 2008.
10. Орлов А. А. и др. Диэлектрический барьер в субтрактивном процессе формирования системы металлизации меди. — 2022.
11. Хорин И. А. Технологии электронных компонентов: Учебник. — Саратов: ИПР Медиа, 2018. — 278 с.

УДК 621.382

Разработка электронно-оптической системы для установки электронно-лучевой литографии

Кубраков Р. В.
АО «НПП «ЭСТО»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 1

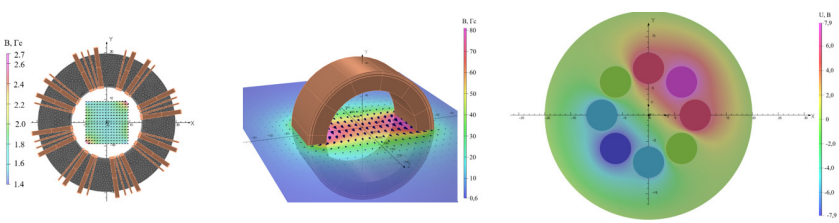
Описано устройство электронно-оптической системы для установки электронно-лучевой литографии. Показаны ключевые электронные компоненты системы. Представлены результаты моделирования вышеуказанных компонентов.
Ключевые слова: электронно-лучевая литография.

Актуальность разработки установки электронно-лучевой литографии связана с отсутствием в России собственного специального технологического оборудования для реализации процессов литографии. Электронно-оптическая система (или колонна) является ключевым элементов такой установки.

На сегодняшний день наше предприятие в рамках СЧ ОКР «Разработка установки электронно-лучевой литографии с проектными нормами 150 нм» занимается разработкой системы, имеющей средние технические характеристики по сравнению с мировыми аналогами. Минимальный размер элемента в резисте — 150 нм. Такая установка сформирует реальный практический опыт разработки и изготовления данного класса оборудования.

Электронно-оптическая система установки выполнена по блочному принципу, среди них: блок излучателя с катодом из гексаборида лантана, блоки диафрагм, блоки с электронными компонентами. В блоке излучателя располагается катод из гексаборида лантана, нагреваемый тепловым ударом косвенным методом, и магниторазрядный насос оригинальной конструкции. В блоках электронной оптики располагаются фокусирующие магнитные линзы, магнитные и электростатические отклоняющие системы, сегментированные магнитные линзы и стигматоры. Блоки диафрагм размещены между остальными блоками и служат для ограничения и придания формы пучку, а также для контроля его параметров.

Было проведено моделирование всех электронных компонентов по отдельности. Результаты моделирования некоторых компонентов показаны на рис. 1.



а *б* *в*

Рис. 1. Результаты моделирования: направление течения тока и магнитная индукция в магнитной отклоняющей системе AS1A (*а*); распределение магнитной индукции в фокусирующей линзе Li1 (*б*); распределение напряжения электрического поля в электростатической отклоняющей системе AS4M (*в*)

УДК 621.385.833

Совмещение оптического и электронного изображения в РЭМ и электронных литографах

Казьмирук В. В., Курганов И. Г.
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
micro71@gmail.com

Разработана концепция совмещения электронных изображений в РЭМ или электронных литографах (ЭЛ) с оптическими. Минимально достижимая погрешность совмещения сопоставима с минимальным диаметром электронного пучка.

Ключевые слова: РЭМ; ЭЛ; маркерные знаки; совмещение литографических слоев.

При проведении измерений с помощью РЭМ, а также при электронной литографии структур необходимо согласовать четыре системы координат: положение столика объектов, положение пластины, положение чертежа (дизайна), положение электронного пучка.

Первые три процедуры выполняются с применением оптических методов и не затрагивают непосредственно ЭОС РЭМ. Поэтому мы будем считать, что эти процедуры выполнены и выбранный фрагмент размещен в нужной позиции. В качестве примера будем считать, что выбранный фрагмент представляет собой участок 200×200 мкм^2, в углах которого размещены маркерные знаки размером приблизительно 25×25 мкм^2. Эта структура выполняется оптическими методами на оборудовании ASML, Nikon (до 45 нм) и может считаться эталонной.

Задача состоит в максимально точном совмещении РЭМ-изображения с этой структурой.

Особенностью РЭМ-изображения является то, что оно не является оптическим, а строится по определенным правилам. Электронный пучок разворачивается по образцу из точки качания (pivot), расположенной приблизительно в оптическом центре объективной линзы. Такое изображение весьма сходно с изображениями аэрофотосъемки, например, в низколетящих БПЛА и относится к классу центрально-проективных.

По умолчанию предполагается, что центр РЭМ-изображения совпадает с центром оптического. Однако при наклоне оси объектива, возникающего по технологическим причинам (несоосность полюсных наконечников, наклон корпуса линзы и т.д.), этот центр и все изображение смещаются на расстояние $\Delta = f\alpha$, где f — фокусное расстояние линзы, α — угол наклона оси относительно вертикали. Например, при наклоне оси на типичный угол сходимости электронного пучка $\alpha = 5$ мрад и фокусе 20 мм смещение изображения составит 100 мкм, то есть половину поля сканирования. Для компенсации данного эффекта в нашей ЭОС предусмотрен корректор наклона.

Далее производятся измерение, калибровка и коррекция следующих параметров отклоняющей системы (ОС): разворот растра, дисторсии, неортогональность

развертки, коррекция увеличения в зависимости от рабочего отрезка и ускоряющего напряжения, коррекция сферичности поля фокусировки.

Точность указанных выше процедур может быть существенно повышена при использовании специальных маркерных знаков на основе кодов Баркера [1].

Литература

1. Демко А. И. О корреляционных и спектральных характеристиках кодов Баркера. — URL: https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-2-2.

УДК 621.373.826

Лазерные системы с ультракороткими импульсами и перспективы технологий в микрообработке

к. т. н. Жданова Е. Ю., к. т. н. Васильев О. С., к. т. н. Горный С. Г.
ООО «Лазерный Центр»
195067, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Тухачевского, 22, лит. А, оф. 231
ivan.grey.90@mail.ru

В настоящей статье рассматривается роль лазерных систем в изготовлении компонентов микроэлектроники. Обозреваются вопросы применения лазерных систем с ультракороткими импульсами в процессах обработки материалов, а также обозначаются преимущества их использования в электронной промышленности России.
Ключевые слова: лазер; лазерная система; лазерное излучение; лазерная обработка; микрообработка.

В современной электронной промышленности обработка материалов играет ключевую роль при производстве микроэлектронных компонентов. В производстве микроэлектроники лазерные системы наносекундной длительности импульсов позволяют производить такие технологические операции, как прошивка отверстий, прецизионная резка, скрайбирование, безмасковая литография, подгонка резисторов и др. [1].

Однако развитие технологий не стоит на месте, и современные требования к качеству обработки материалов выдвигают новые вызовы. В этом контексте особый интерес представляют лазерные системы с ультракороткими импульсами пикосекундной и фемтосекундной длительности.

Различия лазерных систем в длительности импульса определяют принципиально разные механизмы взаимодействия излучения с веществом. При наносекундной абляции материала происходит его постепенный нагрев, что может приводить к его микронному термическому повреждению и изменению физико-химических свойств. Поэтому обработка микроэлектронных компонентов на наносекундном лазере требует деликатного воздействия и порой последующих чистящих операций с применением химии, ультразвука и др.

Пикосекундное воздействие позволяет минимизировать тепловые эффекты, обеспечивая более точное удаление материала без значительного повреждения окружающих областей. Становится возможным исключение образования внутренних напряжений, грата, окислительных процессов в прилежащих областях.

Фемтосекундное воздействие характеризуется практически мгновенным разрушением межатомных связей без существенного теплового влияния. Данная обработка, представляющая собой «холодную» абляцию, имеет зону термического воздействия на материал только в пределах сфокусированного пятна излучения. Воздействие на материал фемтосекундным лазером позволяет избегать дефектов, вызванных передачей избыточной теплоты. Так, например, возможной становится обработка легковозгораемых материалов.

Импульсные лазеры обрабатывают широкий спектр материалов, используемых в производстве микроэлектронных компонентов. Уже сейчас лазерные системы с наносекундным диапазоном серии «МикроСЕТ» работают

с полупроводниковыми материалами, такими как кремний, германий, арсенид галлия, нитрид галлия и др. [2]. Обрабатываются диэлектрические материалы: сапфир, стекло, кварц, керамики. Проводятся технологические операции с композитами, металлами, сплавами и их оксидами [3]. При переходе на обработку ультракороткими импульсами спектр материалов увеличивается. Данное направление активно изучается за рубежом, имеет огромный потенциал для развития отечественных технологий и может стать важным шагом в укреплении технологического суверенитета страны в этой отрасли [4].

Принимая во внимание возможности лазерной обработки материалов ультракороткими импульсами, компания ООО «Лазерный Центр» проводит научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по производству лазерных систем с источниками на пико- и фемтосекундных длительностях. Проводится прикладное сравнение результатов взаимодействия излучения разных длин волн с различными материалами и микроэлектронными компонентами. Вследствие этого определяется наиболее оптимальная комплектация оборудования, направленная на решение конкретных технологических задач.

По опыту исследований лазерных систем с ультракороткими импульсами отмечается ряд положительных трендов в области обработки микроэлектроники. Использование лазеров с ультракороткими импульсами обеспечивает универсальность обработки различных материалов, точность позиционирования до микронного уровня, минимальные термические нагрузки на материал, отсутствие механического контакта с обрабатываемым образцом, а значит, полное отсутствие расходных материалов и химических реагентов.

В реалиях развития микроэлектроники применение лазерных технологий с ультракороткими импульсами открывает новые перспективы для создания более совершенных и надежных электронных компонентов.

Литература

1. Горный С. Г., Юдин К. В., Юревич В. И. Новые технологические решения лазерной обработки материалов электронной техники // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14, № S7 (107). — С. 587–588.
2. Горный С., Юдин К., Юревич В. Универсальная система лазерной обработки материалов электронной техники МикроСЕТ // Компоненты и технологии, 2016. — № 7 (180). — С. 132–135.
3. Васильев О. С. Применение лазерных систем в вопросах обработки материалов микроэлектронной промышленности // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 896–897.
4. Zhenyuan Lin, Minghui Hong. Femtosecond Laser Precision Engineering: From Micron, Submicron, to Nanoscale // Ultrafast Science, 2021 (3).

УДК 621.319.5

Модернизация систем управления термодиффузионных каналов DFS-250

Корнеева М. А.[1], Трактирщиков В. С.[1,2], Цуканов В. В.[1]
[1] *АО «НПП «ЭСТО»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5/1
m.a.volkova@nppesto.ru
[2] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В докладе представлены результаты модернизации систем управления термодиффузионных каналов. В процессе выполнения задач были разработаны программное обеспечение, системы питания и управления, а также произведены монтажные и пусконаладочные работы. Достигнуты требуемые технологические показатели, в числе которых поддержание температуры в диапазоне 600–1100 °C с точностью ±0,5 °C.
Ключевые слова: термодиффузионный канал; система питания и управления; модернизация.

Строительство современной фабрики по производству чипов обходится в несколько миллиардов долларов. Модернизация устаревшего оборудования позволяет обеспечивать требуемые технологические параметры с меньшими вложениями. Экономия осуществляется не только за счет использования имеющихся составных частей, но и за счет использования имеющейся инфраструктуры предприятия [1].

Компанией АО «НПП «ЭСТО» была проведена модернизация систем управления стоек термодиффузионных каналов [2]. Каждая стойка состоит из четырех каналов. Для каждой стойки предусмотрена общая панель оператора и транспортер, распределяющий пластины между каналами. Каждый канал имеет ряд собственных систем:

- система подготовки и подачи рабочих газов в реактор;
- система нагрева и контроля температуры в реакторе;
- система загрузки и выгрузки пластин в реактор;
- система питания и управления каналом.

Такая конфигурация установки позволяет обеспечить централизованный подвод инфраструктуры, сохраняя автономность работы каждого канала.

Система подготовки и подачи рабочих газов обеспечивает подачу в реактор смеси рабочих газов с заданными составом и расходом.

Система нагрева и контроля температуры осуществляет двухкаскадное ПИД-регулирование по пяти зонам с использованием тринадцати датчиков температуры.

Система загрузки и выгрузки пластин представляет из себя механизм, имеющий три оси движения с обратной связью.

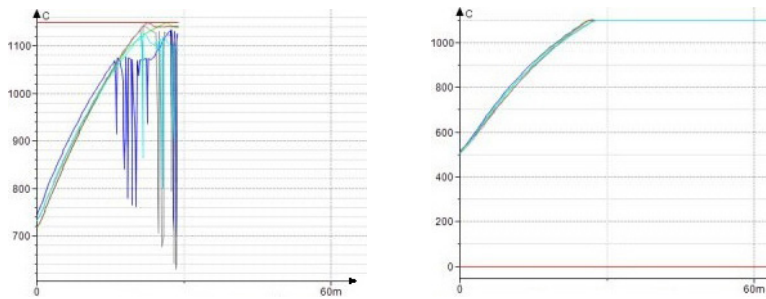
Система питания и управления осуществляет электрические связи между элементами, управление оборудованием, сбор данных и реализацию загруженных рецептов.

Следует отметить, что в процессе пусконаладки АО «НПП «ЭСТО» столкнулось со значительными скачками показаний температуры в реакторе при достижении определенного порогового значения, при том что требуемая точность регулирования составляет ±0,5 °C (рис. 1*а*).

Положительного результата удалось добиться применением двух мер устранения помех, среди которых (рис. 1*б*):

1) замена температурного модуля Inovance GL20-4TC на модуль ICP DAS M-7018-16;
2) фильтрация сигнала каждого температурного датчика с применением танталовых конденсаторов.

После замены измерителей температуры и установки фильтров удалось достигнуть точности регулирования в ±0,3 °C (рис. 2).



а *б*

Рис. 1. График зависимости температуры от времени по пяти зонам нагрева: до пусконаладки (*а*); после пусконаладки (*б*)

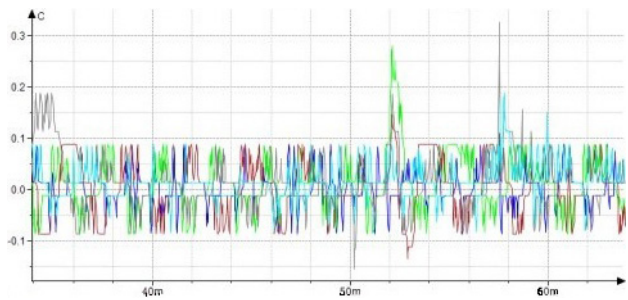


Рис. 2. График зависимости точности регулирования от времени по пяти зонам нагрева

В результате модернизации систем управления термодиффузионных каналов достигнуты требуемые технологические параметры. Современная аппаратно-программная часть позволяет обеспечивать качественную эксплуатацию и поддержку оборудования.

Литература

1. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. John Wiley & Sons, Inc., 2007. 763 p.
2. URL: https://nppesto.ru.

УДК 62.93

Столы для удержания полупроводниковых пластин

Корячко В. В.[1,2], Челапкин Д. Г.[1]
[1] АО «НПП «ЭСТО»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5/1
v.v.korychko@nppesto.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

На сегодняшний день технология плазмохимии практически не имеет аналогов в микроэлектронной промышленности. Для эффективного охлаждения и фиксации полупроводниковых пластин принято использовать подложкодержатели различных типов. В данной статье рассмотрим подложкодержатели, разрабатывающиеся и уже производимые нашей компанией АО « НПП «ЭСТО». Из основных типов подложкодержателей можно выделить столы с гравитационным и электростатическим прижимом, нагреваемые и криогенные столы.

Ключевые слова: плазмохимия; изделие для удержания подложек; механический прижим; электростатическое прижимное устройство; полиамидные столы.

На сегодняшний день технология плазмохимической обработки материалов, включая так называемую плазмохимию, занимает ключевое место в развитии микро- и наноэлектронной промышленности. Эта технология обеспечивает высокоточное травление и модификацию поверхности полупроводниковых пластин с минимальным повреждением структуры. Однако эффективное применение подобных методов обработки невозможно без надежной системы фиксации и охлаждения обрабатываемых подложек. Именно по этой причине особое значение приобретают подложкодержатели — технологические элементы, обеспечивающие удержание, охлаждение или нагрев полупроводниковых пластин в ходе производственного цикла.

В настоящее время подложкодержатели широко применяются в вакуумных и плазменных установках для микросборки и изготовления СБИС, MEMS-структур и иных компонентов наноэлектроники. Они обеспечивают необходимую стабильность и повторяемость процессов, точную фиксацию пластин, минимизируют механические и термические искажения, а также активно участвуют в теплообмене. Их выбор определяется типом технологической операции, требуемой температурой подложки, типом фиксации и конструктивными особенностями установки.

В данной статье мы подробно рассмотрим подложкодержатели, разрабатывающиеся и уже производимые нашей компанией — АО «Научно-производственное предприятие «ЭСТО». На протяжении многих лет наше предприятие разрабатывает и внедряет в производство широкий спектр технологического оборудования, включая высокоточные узлы и системы для микроэлектронной промышленности. Мы специализируемся на производстве прецизионных подложкодержателей, ориентированных на различные условия эксплуатации, включая работу в условиях агрессивных плазменных сред, высоких и криогенных температур, а также при необходимости применения электрических и магнитных полей.

Из существующих типов подложкодержателей, применяемых в современной практике, можно выделить следующие основные категории.

1. Столы с гравитационным прижимом

Данный тип держателей основан на использовании груза для удержания подложки на поверхности. Он отличается простотой конструкции и минимальными затратами на обслуживание.

2. Столы с электростатическим прижимом

Электростатический держатель (Electrostatic Chuck, ESC) позволяет надежно фиксировать подложку за счет приложения высоковольтного напряжения к диэлектрическому слою, создающему притягивающее электростатическое поле. Такой способ фиксации эффективен в вакууме и обеспечивает высокую плоскостность прилегания, а также улучшает теплопередачу. В зависимости от конструкции могут использоваться моно- или биполярные схемы зажима.

3. Нагреваемые столы

Они оснащены встроенными нагревательными элементами, позволяющими точно регулировать температуру подложки в процессе обработки. Применяются в процессах, где требуется температурный контроль: например, при плазмохимическом осаждении.

4. Криогенные столы

Эти устройства используются в случаях, когда необходимо интенсивное охлаждение подложки, например, для снижения скорости химических реакций, устранения термических напряжений или защиты термочувствительных слоев. Данные подложкодержатели особенно полезны для травления кремния.

Все перечисленные типы подложкодержателей могут быть адаптированы под различный диаметр пластин — от 2 до 12 дюймов, а также изготовлены с учетом специфики конкретного технологического оборудования заказчика. Мы также разрабатываем модификации с каналами подачи газа, встроенными термопарами и датчиками давления, а также интерфейсами для подключения к управляющим системам.

Таким образом, подложкодержатели, производимые АО «НПП «ЭСТО», представляют собой высокотехнологичные компоненты, соответствующие самым жестким требованиям современной микроэлектронной индустрии. Их применение позволяет значительно повысить стабильность технологических процессов, снизить брак и обеспечить повторяемость результатов, что особенно важно при массовом производстве СБИС и других компонентов наноуровня.

Литература

1. Asano K., Hatakeyama F., Yatsuzuka K. Fundamental study of an electrostatic chuck for silicon wafer handling // IEEE Transactions on Industry Applications, 2002. Т. 38. № 3. P. 840–845.
2. Sun Y., Cheng J., Lu Y., Hou Y., Ji L. Design space of electrostatic chuck in etching chamber // Journal of Semiconductors, 2015. Vol. 36. № 8. P. 084004.
3. Комаров Ф. Ф., Константинов С. В. Ионная и фотонная обработка материалов. — 2022.
4. Автаева С. В. Плазменные технологии в микроэлектронике. — 2000.

Об унификации требований к АТЕ на основе отечественного проприетарного стандарта тестеростроения FormRXI

Турлаев Е. В.
ООО «ФОРМ»
119530, г. Москва, Очаковское ш., 34

В докладе будут рассмотрены следующие аспекты.

1. Значение унификации для повышения качества и надежности АТЕ.
2. Современные вызовы и потребности в области тестирования электронных компонентов и систем.
3. История разработки и основные положения стандарта FormRXI.
4. Структура и ключевые особенности стандарта FormRXI.
5. Преимущества внедрения стандарта в отечественную промышленность.
6. Преимущества унификации требований на основе FormRXI.
7. Ключевые требования к АТЕ по стандарту FormRXI.
8. Перспективы развития.

УДК 004. 056

Перспективы использования нейроморфных вычислений для обработки слабоструктурированной информации

Мещеряков Р. В.
[1] Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
117997, г. Москва. ул. Профсоюзная, 65
ann3leo@gmail.com
[2] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34

Разработан комплексный подход к созданию систем потоковой обработки слабоструктурированной информации с использованием нейроморфных вычислений. Предлагается учитывать функции сложности и прогнозируемой достоверности для повышения эффективности системы обработки информации.
Ключевые слова: информация; слабоструктурированная информация; нейроморфные вычисления; архитектура; сложность; искусственный интеллект.

В настоящее время активно развиваются технологии обработки информации с использованием технологий искусственного интеллекта, включая искусственные нейронные сети и большие языковые модели. Вместе с тем остаются открытыми как вопросы комплексирования источников информации (модальностей), так и оценка надежности и достоверности получаемых результатов [1]. Перспективным представляется использование аналитических моделей, которые основаны на правилах и аналитических моделях с современными технологиями, основанными на обучении [2].

Предлагается на первом этапе в системах обработки информации проводить классификацию собственно данных и затем проводить выбор методов обработки информации. Очевидная простота выбора сопряжена с необходимостью, во-первых, учитывать многообразие входных данных и их качество, а также множество методов обработки информации. На сегодняшний день преобладают подходы, цель которых — «научить» (или «доучить»») искусственную нейронную сеть на множестве входных данных и применять во всех случаях, когда это возможно. Возникает вычислительный конфликт, когда ресурсы используются нерационально, кроме того, получаемая информация не может быть в полной степени интерпретирована.

Таким образом, цель первого этапа обработки информации — классифицировать данные и отнести их к определенным классам методов обработки информации, в том числе и нейросетевой. Это позволит с высокой степенью надежности применять методы, предназначенные именно для указанного класса. Кроме того, такая классификация позволит выбирать соответствующие вычислительные архитектуры. Применительно к слабоструктурированной информации предлагается использовать нейроморфные вычисления, апробированные на существующих данных.

Базовыми элементами таких методов обработки информации должны быть функции сложности и прогнозируемой достоверности. Сложность (вычислительная сложность) позволит выбирать соответствующие вычислительные методы и архитектуры под класс задач и его требования (необходимость работы в режиме

реального времени, работа в телекоммуникационном потоке, требования по энергопотреблению, по памяти и пр.). Прогнозируемая достоверность является одной из важнейших характеристик получаемого результата — потребитель информации должен иметь представление, насколько точный результат он получает, возможны ли ошибки, их класс.

Таким образом, перспективным представляется такое использование нейроморфных вычислений, которое позволит для слабоструктурированной информации проводить предварительный отбор методов вычислений, а также выбор соответствующих вычислительных архитектур. В настоящее время проводится отработка методов обработки для телекоммуникационных потоков с речевой и визуальной информацией, которая обладает признаками слабой структуризации.

Исследование частично поддержано грантом Российского научного фонда № 24-11-00340, https://rscf.ru/project/24-11-00340, «Исследование и разработка методов обработки слабоструктурированной информации на естественных языках в условиях сильных шумов для решения задач безопасности».

Литература

1. Мещеряков Р. В., Мельников С. Ю., Пересыпкин В. А., Хорев А. А. Перспективные направления применения технологий искусственного интеллекта при защите информации // Вопросы кибербезопасности, 2024. — № 4 (62). — С. 2–12.
2. Мещеряков Р. В. Проблемы обработки слабоструктурированной речевой информации в условиях акустических шумов // Акустический журнал, 2024. — Т. 70. — № S5. — С. 73.

Микроэлектронные нейроинтерфейсы: от моделирования к нейрозамещению

Казанцев В. Б.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского 603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

Разработка мозгоподобных систем и устройств представляет собой один из ключевых трендов развития современной науки и, в частности, микроэлектроники. В то время как «классический» искусственный интеллект (ИИ), основанный на формальных моделях нейронных сетей, продемонстрировал впечатляющие возможности в решении сложных логически определенных задач (например, в медицине и автоматизации), когнитивные способности мозга по-прежнему остаются недостижимыми для современных систем ИИ. В этом контексте разработка биологорелевантных нейросетевых (нейроморфных) систем и их использование в качестве нейрозамещающих систем является перспективным направлением.

Нейрозамещающие системы представляют собой симбиоз живой нервной ткани и искусственных нейроморфных сетей, направленный на достижение адаптивных результатов. В отличие от традиционных мозг-машинных нейроинтерфейсов, нейрогибридные решения предполагают непосредственный (инвазивный) контакт нервной клетки и регистрирующего/стимулирующего устройства. Ключевым компонентом «машинной» части такого интерфейса является вычислитель, построенный на основе биологорелевантной (спайковой) нейросети с пластичными синаптическими связями.

В технологическом плане особый интерес представляет реализация таких сетей на основе нейроморфных процессоров с использованием мемристивных элементов, имитирующих нейронные синапсы. Мемристивные устройства позволяют создавать масштабируемые энергоэффективные и компактные системы, что крайне важно для имплантируемых нейроинтерфейсов. Дальнейший прогресс в разработке новых материалов и архитектур мемристивных элементов позволит значительно повысить производительность и надежность нейроморфных систем.

Перспективные применения таких устройств включают:

- (i) высокоразрешающий мониторинг активности мозга: мемристивные сенсоры могут обеспечить беспрецедентное разрешение и чувствительность при регистрации нейронной активности;
- (ii) адаптивная стимуляция нервной системы: нейроморфные процессоры могут обеспечивать точную и адресную стимуляцию центральной и периферической нервной системы для задач протезирования, реабилитации, замещения или расширения когнитивных возможностей;
- (iii) обучение искусственных нейроморфных устройств: нейроинтерфейсы могут быть использованы для обучения искусственных нейроморфных систем, где живой мозг выступает в качестве «учителя».

Примером интереса к этой области является разработка имплантируемого чипа компанией Neuralink Илона Маска.

В докладе будет представлен обзор современных достижений в области нейрозамещающих систем и технологий нейроморфного моделирования с особым

акцентом на микроэлектронные аспекты, включая авторские разработки в мультимасштабных математических и вычислительных моделях нейроморфных систем, использование мемристивных устройств для имитации пластичности и нейроинтерфейсов, а также перспективные проекты по созданию нейрозамещающих технологий на основе обучения нейроморфных сетей для задач протезирования и нейрореабилитации.

УДК 621.38-022.532

Мемристорные микросхемы для технологий искусственного и гибридного интеллекта

Михайлов А. Н.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
mian@nifti.unn.ru

Обсуждаются результаты реализации цикла прикладных исследований, направленных на разработку сквозной отечественной технологии микросхем энергонезависимой резистивной памяти Resistive Random Access Memory (RRAM) на основе эффекта резистивного переключения в металлооксидных наноструктурах и примеры ее применения в технологиях искусственного и гибридного интеллекта.

Ключевые слова: мемристор; RRAM; искусственный интеллект; гибридный интеллект.

Мемристоры и мемристивные системы представляют собой один из вариантов развития энергоэффективного аппаратного обеспечения для технологий искусственного и гибридного интеллекта. В этом контексте основным элементом памяти является простая тонкопленочная конструкция «металл — оксид — металл», которая демонстрирует эффект резистивного переключения. Ячейки памяти RRAM изготавливаются с помощью коммерческого оборудования и интегрируются с управляющими схемами на основе КМОП. В данном докладе рассматривается развитие этой технологии в России через призму научных результатов консорциума Национального центра физики и математики, а также обсуждаются перспективы перехода к опытно-конструкторским работам, направленным на создание опытных образцов микросхем памяти RRAM и ускорителей нейроморфных вычислений на их основе.

На данный момент достигнут существенный прогресс в ходе реализации единого технологического подхода к КМОП-интеграции мемристивных наноструктур, который обеспечивает разнообразие как материалов, так и лабораторных технологий на основе отечественного процесса КМОП с технологическими нормами 0,35 мкм. Разработаны научно-технологические решения для изготовления элементов и ячеек энергонезависимой резистивной памяти RRAM, основанных на мемристивных наноструктурах с высоким выходом и высокой радиационной стойкостью. Эти решения стали основой для создания базовой технологии функциональных блоков и тестовых микросхем RRAM, использующих приборный слой FEOL (front-end-of-line), который изготавливается в промышленных условиях, и мемристивные структуры, создаваемые в лабораторных условиях на слоях металлизации BEOL (back-end-of-line). Реализация технологии RRAM позволит выпускать широкий ассортимент продуктов, от микросхем специальной устойчивой памяти до нейрочипов, нейроинтерфейсов и нейропротезов для медицинских нужд.

Технологическое освоение и производство микросхем RRAM создаст возможности для импортозамещения в области энергонезависимой памяти для специализированных приложений и позволит организовать серийное производство специализированного аппаратного обеспечения, базирующегося на архитектуре

и принципах работы биологического мозга. Это станет важным вкладом в развитие технологий искусственного интеллекта и формирование гибридного интеллекта, основанного на симбиозе искусственных и биологических нейронных сетей.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах». Мемристивные устройства изготовлены с использованием инфраструктуры Лаборатории мемристорной наноэлектроники (гос. задание № FSWR-2025-0006) и учебного дизайн-центра электроники ННГУ.

УДК 681.5.015+004.333

Разработка программного обеспечения для многомасштабного моделирования работы элементов энергонезависимой памяти на основе технологий ReRAM, FeRAM, MRAM

Абгарян К. К.
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
kabgaryan@frccsc.ru

Разработка программных средств позволяет в кратчайшие сроки решать задачи опережающего развития по созданию новых материалов и микроэлектронных устройств, существенно уменьшая объем, время и стоимость проводимых исследований. В работе представлен основной функционал российского программного обеспечения для многомасштабного моделирования элементов энергонезависимой памяти на основе технологий ReRAM, FeRAM и MRAM.
Ключевые слова: многомасштабное моделирование; программное обеспечение; элементы энергонезависимой памяти ReRAM; FeRAM; MRAM.

Новые материалы и нанотехнологии являются «сквозными» технологиями, которые определяют развитие в различных областях человеческой деятельности — от энергетики и высокопроизводительной вычислительной техники до медицины. В настоящее время происходит переход к новым типам материалов с «настраиваемыми» свойствами и объединение производств отдельных материалов и устройств, создаваемых на их основе. Рост спроса на высокотехнологичные и традиционные товары с новыми потребительскими характеристиками ставит новые задачи при разработке материалов и требует использования новых технологий и вычислительных средств.

Одним из трендов технологического развития является рост спроса на высокопроизводительную вычислительную технику, работающую на новых физических принципах, энергонезависимую память, в том числе на базе мемристоров, и новую портативную электронику на основе углеродных наноматериалов. Ожидаемые эффекты — повышение функциональности, эффективности, качества и стабильности высокопроизводительной вычислительной техники и, как следствие, повышение конкурентоспособности продукции российских предприятий на мировом рынке.

Разработка программных средств позволяет в кратчайшие сроки решать задачи опережающего развития по созданию новых материалов и устройств, существенно уменьшая объем, время и стоимость проводимых работ. Развитие микроэлектроники неразрывно связано с созданием средств автоматизированного проектирования электронных устройств. Сегодня индустрия средств автоматизированного проектирования электроники (Electronic Design Automation — EDA) является важнейшей составной частью электронной промышленности.

Разрабатываемое российское программное обеспечение (ПО «СоВа») построено по принципу специализированного многоуровневого ПО для многомасштабного моделирования работы трех видов энергонезависимой памяти на технологиях ReRAM, FeRAM, MRAM. Уровни ПО дифференцированы по временному

и пространственному масштабу задач, начиная с атомарного и молекулярного уровня с переходом на уровень веществ, тел, структур с границами раздела, электрических и электрофизических характеристик приборных структур. Для решений задач многомасштабного моделирования на каждом уровне в ПО «СоВа» подгружаются соответствующие вычислительные модули. Имеется возможность выбора блока расчетов и типа расчета.

В рамках теоретического блока выполняются детализированные многомасштабные расчеты начиная с атомно-кристаллического уровня (на базе квантово-механического моделирования), согласно трем различным схемам реализации программного обеспечения по элементам ReRAM, FeRAM или MRAM соответственно.

В рамках полуэмпирического блока выполняются экономичные с точки зрения вычислительных затрат расчеты с применением специально разработанных компактных моделей для моделирования функционирования элементов ReRAM, FeRAM или MRAM.

Архитектура ПО «СоВа» предусматривает использование ряда оригинальных отечественных модулей, а также модулей в составе зарубежных специализированных ПО, выведенных из единой среды проектирования. В состав специализированного ПО «СоВа» в качестве составляющих компонент входят отечественные модули (собственные разработки):

- вычислительные модули для наноуровневого моделирования;
- модули редуцирования физико-математических моделей в компактные модели, в том числе модули, в которых реализованы гибридные интервальные модели, на базе упрощенных физико-математических моделей и моделей анализа данных (по элементам памяти соответственно), позволяющие получать интервальные оценки интересующих величин;
- набор расчетных модулей, реализующих численные методы с возможностью;
- симуляции процессов;
- другие.

Для ускорения работы модулей во всех подпрограммах, где это возможно, выполнялось распараллеливание вычислений с помощью OpenMP. Программное обеспечение развернуто на вычислительных ресурсах ЦКП «Информатика» ФИЦ ИУ РАН.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-01012).

Литература

1. Абгарян К. К. Многомасштабное моделирование в задачах структурного материаловедения. — М.: МАКС ПРЕСС, 2017. — 284 с.
2. Абгарян К. К., Ревизников Д. Л., Журавлев А. А., Морозов А. Ю., Гаврилов Е. С. Многомасштабное моделирование нейроморфных систем. — М.: МАКС ПРЕСС, 2022. — 128 с. DOI: 10.29003/m3139.978-5-317-06886-8.
3. Abgaryan K. K., Morozov A. Y., Reviznikov D. L. Hybrid Approach for Modeling Memristive Elements // Physica Status Solidi (B) Basic Research, 2024. DOI: 10.1002/pssb.202400058.

УДК 004.383.8.032.26

Мемристивная ЭКБ для аналоговых вычислений в памяти: оптимизация рабочих параметров устройств на этапе КМОП-интеграции и прототипирования ИС

Андреева Н. В., Мазинг Д. С., Рындин Е. А., Петров М. О.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
nvandr@gmail.com

Исследовано влияние особенностей конструктивно-технологического базиса на электрофизические характеристики многоуровневых мемристивных композиций. Разработаны методы минимизации погрешности выполнения операций матрично-векторного умножения и увеличения допустимых размеров массивов мемристорных матриц.

Ключевые слова: аналоговые вычисления в памяти; многоуровневые мемристивные структуры; энергоэффективность.

Мемристивная ЭКБ (электронно-компонентная база) позволяет осуществить переход к вычислительным архитектурам, ориентированным на память, потребность в которых обусловлена быстрой эволюцией алгоритмов ИИ, требующих экспоненциального роста производительности и энергоэффективности вычислительных ресурсов.

На сегодняшний день резистивная память на основе тонких металлооксидных пленок рассматривается в качестве наиболее перспективного кандидата на роль мемристивной ЭКБ для реализации аналоговых вычислений в памяти, привлекая такими потенциально достижимыми преимуществами, как:

- простота интеграции в BEOL-процесс КМОП-технологии;
- масштабируемость, совместимая с современным КМОП-процессом;
- скорость чтения/записи;
- энергоэффективность;
- возможность аппаратной реализации режимов инференса и обучения.

Факторы, сдерживающие активное внедрение резистивной памяти в вычислительные архитектуры, во многом определяются особенностями КМОП-интеграции мемристивных элементов в аппаратную часть, которые оказывают значительное влияние на скорость доступа к ячейкам памяти, энергопотребление, а в ряде случае вносят стохастичность в процессы чтения/записи, что существенно влияет на точность аналоговых вычислений в памяти.

В работе проведено исследование влияния способа интеграции на электрофизические характеристики и резистивное переключение мемристивных устройств в конденсаторной структуре (наиболее часто применяющейся в научных исследованиях), копланарной линии (обеспечивающий интеграцию при проектировании СВЧ-устройств) и BEOL-интегрированных по технологическому маршруту, включающему в себя шесть операций литографии, с применением молекулярного наслаивания и магнетронного напыления. Показано, что вклад токов утечки, несмотря на их малые значения, приводит к увеличению напряжений формовки, а также

изменению характера нелинейной части квазистатических вольт-амперных характеристик мемристивных структур, что существенно меняет динамику сходимости режима обучения аппаратно реализованных нейросетевых архитектур.

Исследована динамика резистивной перестройки мемристивных устройств в импульсном режиме при наносекундных длительностях импульсов записи для мемристивных устройств разной площади. Показано, что длительность переходного процесса переключения резистивного состояния по порогу может достигать менее 500 пс. При этом наблюдается тенденция к снижению времени переключения с увеличением амплитуды прикладываемого импульса. Резистивное переключение в высокоомное состояние происходит в результате плавного аналогового процесса. Характер импульсного переключения исследуемых структур коррелирует с видом квазистатических вольт-амперных характеристик.

В соответствии с результатами анализа зависимостей погрешности выполнения операций матрично-векторного умножения мемристивными кроссбар-массивами от параметров мемристоров и соединительных линий разработаны методы минимизации погрешности и увеличения допустимых размеров мемристорных матриц.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2025-005.

УДК 004.383.8.032.26

КМОП-ReRAM-логика для вычислений в памяти

Рындин Е. А., Мазинг Д. С., Дудкин А. П., Хамитов К. А., Андреева Н. В.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
nvandr@gmail.com, rynenator@gmail.com

Разработан метод построения функциональных блоков для реализации вычислений в памяти на основе комбинации логических КМОП-элементов и мемристивных (ReRAM) структур. Приведены схемы и результаты моделирования КМОП-ReRAM-элементов.

Ключевые слова: мемристоры; логические КМОП-ReRAM-элементы; вычисления в памяти.

Эффективным подходом к решению проблемы «бутылочного горлышка» вычислительных систем с архитектурой фон Неймана является реализация «вычислений в памяти» с использованием мемристоров, совмещающих функции вычисления и хранения данных при высокой плотности интеграции. Причем мемристивные структуры используются не только для реализации вычислений в памяти в тайловых архитектурах ускорителей искусственного интеллекта общего назначения, но и как основа логических элементов вычислительных устройств.

Существует несколько подходов к реализации мемристорной логики: IMPLY, CRS, MAGIC, MRL и др. [1]. IMPLY, CRS и MAGIC сохраняют логические состояния в форме сопротивлений мемристивных элементов, обеспечивая энергоэффективность и возможность интеграции в кроссбар-массивы, но требуя при этом дополнительной схемной обвязки для совместимости с КМОП-блоками и выполняя каждую вычислительную операцию за несколько тактов, что повышает энергопотребление и существенно снижает производительность.

В MRL-логике состояния представляются уровнями напряжений, что позволяет выполнять логические операции за один такт, обеспечивая высокую производительность и совместимость с КМОП-блоками без согласующих схем. Однако MRL-элементы не сохраняют выходных состояний [1].

В данной работе предложен метод построения КМОП-ReRAM-логики, совмещающий достоинства существующих видов мемристивных элементов и обеспечивающий повышение производительности и энергоэффективности вычислений, выполняя логические операции за один такт с энергонезависимым сохранением текущих состояний в мемристорах.

Схема функционального КМОП-ReRAM-блока, передаточная характеристика и временные диаграммы переключения состояний экспериментальных мемристивных структур приведены на рис. 1.

Требуемая функция выполняется логическим КМОП-ReRAM-блоком (MRL или КМОП). Выходной сигнал блока поступает на вход КМОП-драйвера, временные диаграммы которого приведены на рис. 2.

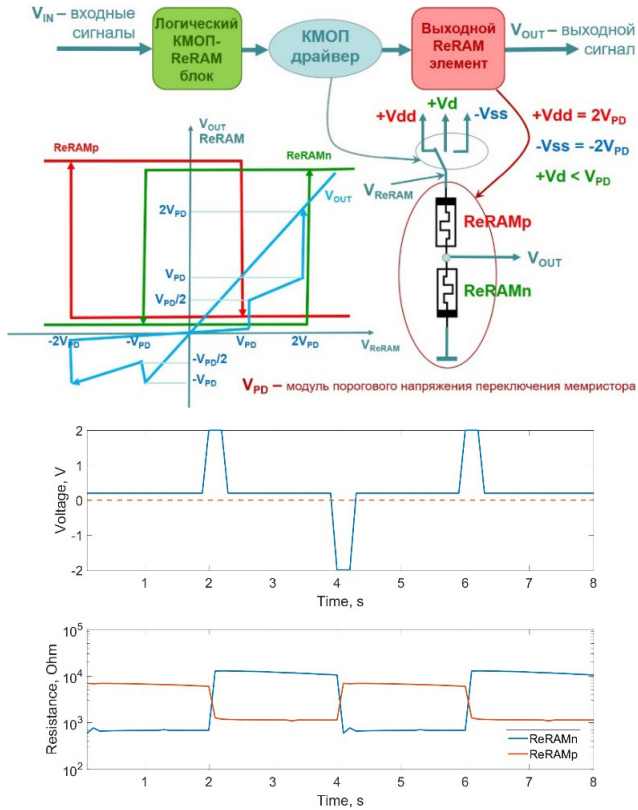


Рис. 1. Схема функционального КМОП-ReRAM-блока, передаточная характеристика и временные диаграммы переключения состояний экспериментальных мемристивных структур

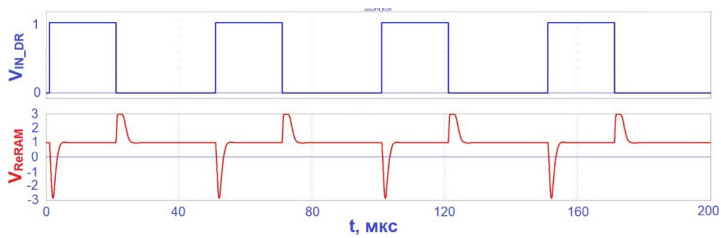


Рис. 2. Результаты схемотехнического моделирования КМОП-драйвера (V_{IN_DR}, V_{ReRAM} — входное и выходное напряжения драйвера соответственно)

Драйвер импульсно подключает цепь V_{ReRAM} ReRAM-элемента по фронту сигнала к полюсу питания +Vdd, по срезу сигнала — к полюсу –Vss, а в любом из стационарных состояний — к источнику питания +Vd логического КМОП-ReRAM-блока. Для напряжений питания выполняются соотношения $+Vdd = 2V_{PD}$; $–Vss = –2V_{PD}$; $+Vd < V_{PD}$, где V_{PD} — модуль напряжения переключения мемристоров. Длительность импульсов, формируемых драйвером, определяется временем переключения состояний мемристоров.

Поскольку мемристоры выходного ReRAM-элемента включены встречно-последовательно, при $V_{ReRAM} = +Vdd$ (по фронту сигнала) верхний по схеме мемристор переключится в низкоомное состояние R_{ON}, а нижний — в высокоомное R_{OFF}, в результате чего по окончании фронта (при $V_{ReRAM} = +Vd$) на выходе V_{OUT} установится уровень логической единицы. Напротив, при $V_{ReRAM} = –Vss$ (по срезу сигнала) верхний мемристор переключится в состояние R_{OFF}, а нижний — в R_{ON}, в результате чего на выходе V_{OUT} установится логический ноль.

Реализация вычислений в памяти с использованием предложенных КМОП-ReRAM-элементов позволяет выполнять конвейерную обработку данных без традиционных КМОП D-триггеров и тактового сигнала, обеспечивая повышение производительности при значительном снижении энергопотребления и площади, занимаемой на чипе. При этом текущие состояния всех КМОП-ReRAM-элементов будут сохраняться как в процессе вычислений, так и после отключения питания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, государственное задание в области научной деятельности FSEE-2025-0005.

Литература

1. Kvatinsky Sh., Wald N., Satat G., Kolodny A., Weiser U.C., Friedman E.G. MRL — Memristor Ratioed Logic // IEEE. 2012. 978-1-4673-0289-0/12/$31.00.

УДК 004.032.26

Предиктивная аналитика отказов на основе технологий искусственного интеллекта в беспилотных авиационных системах

Кагадей В. А., Петров Е. К., Шашев Д. В., Колоев М. И., Полынцев Е. С., Зиятдинов Р. М., Вязовская А. С., Лембей А. С., Аксенов А. А., Подзорова И. В., Падей С. А., Кодорова И. Ю., Мищенко Л. С., Бондарчук А. С., Винокуров К. А.
АО «НПП «Радар ммс», ОП НПК Томское
634040, г. Томск, ул. Высоцкого Владимира, 28, стр. 3
kagadey_va@radar-mms.com

Представлено описание программно-аппаратного комплекса предиктивной аналитики отказов ответственных узлов механической и энергетической систем беспилотного воздушного судна, который использует технологии искусственного интеллекта и предназначен для осуществления предиктивного технического обслуживания и ремонта судна.
Ключевые слова: предиктивная аналитика отказов; искусственная нейронная сеть; беспилотные авиационные системы.

Средние и тяжелые беспилотные воздушные суда (БВС) со взлетной массой свыше 100 и 500 кг перспективны для мониторинга объектов и территорий, оказания широкого спектра услуг, включая транспортировку грузов и перевозку людей. В процессе эксплуатации таких беспилотных авиационных систем (БАС) неизбежно возникает необходимость их технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), что традиционно осуществляется либо по регламенту, либо как оперативная реакция на свершившееся событие, то есть по факту износа или поломки. В связи с тем что средние и тяжелые БВС обладают рядом особенностей, а именно:

- высокой сложностью и наличием большого количества ответственных узлов, когда отказ хотя бы одного из них приводит к аварийной остановке всей системы в целом,
- высоким уровнем экономических потерь от внезапной аварии, а также
- достаточно высокими расходами на традиционное техническое обслуживание,

стало понятно, что для ТО и Р таких БАС требуются принципиально новые подходы и решения. Перспективным подходом является предиктивное техническое обслуживание БАС [1]. Предиктивное обслуживание — это парадигма ТО и Р, которая использует данные о состоянии оборудования (например, показания датчиков промышленного Интернета вещей) и с помощью предиктивной аналитики отказов (ПАО) на основе технологий искусственного интеллекта (ИИ) позволяет обнаруживать долговременные деградационные тренды в данных и оценивать остаточный ресурс оборудования [2]. Это дает возможность предсказывать момент отказа и проводить обслуживание в тот момент времени, когда достигается максимально возможный износ каждого ответственного узла, но еще незначителен риск его отказа, а также оптимизировать процедуры обслуживания и материально-технического снабжения.

В работе представлено описание программно-аппаратного комплекса (ПАК) ПАО ответственных узлов механической и энергетической систем БВС вертолетного типа, который на основе расширенных данных о состоянии оборудования с использованием технологий ИИ позволяет обнаруживать зарождающиеся дефекты, следить за их развитием и рассчитывать время, которое пройдет до момента отказа того или иного узла оборудования.

ПАК ПАО БВС состоит из ПАК механической и энергетической систем, включающих в свой состав аппаратный модуль сбора натурных данных с механической или энергетической систем БВС, а также программный модуль предиктивной аналитики отказов ответственных узлов механической или энергетической систем БВС. Аппаратные модули предназначены для сбора, обработки и хранения натурных данных, содержащих информацию о закономерностях изменения во времени физических величин, характеризующих долговременную деградацию узлов БВС. Программные модули предназначены для анализа натурных данных, получаемых с аппаратного модуля, а именно для построения кривых изменения индекса техничного состояния (абстрактной величины, описывающей техническое состояние БВС или его узла), а также оценки остаточного ресурса того или иного ответственного узла.

ПАК ПАО БВС предназначен для осуществления предиктивного обслуживания БВС. Он позволяет отказаться от традиционных концепций реактивных (по случаю поломки) и плановых (по регламенту) ремонтов летательного аппарата и перейти к реализации концепции предупредительных ремонтов (по требованию), что дает возможность полностью использовать ресурс узлов БВС и предотвращать его аварии.

Литература

1. Dibsdale C. E. Aerospace Predictive Maintenance: Fundamental Concepts // SAE International, Warrendale, Pennsylvania, USA, 2020. 127 p.
2. Murtaza A. A., Saher A., Zafar M. H., Moosavi S. K. R., Aftab M. F., Sanfilippo F. Paradigm shift for predictive maintenance and condition monitoring from Industry 4.0 to Industry 5.0: A systematic review, challenges and case study // Results in Engineering, 2024. Vol. 24. P. 102935.

УДК 004.387

Оптические нейронные сети

к. ф.-м. н. Сайгин М. Ю., к. ф.-м. н. Страупе С. С.
Центр квантовых технологий Сбера
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32

Доклад посвящен архитектурам оптических нейронных сетей. Рассмотрены нейронные сети, основанные на программируемой линейной и нелинейной оптике.

Ключевые слова: аналоговые вычислители; нейронные сети; программируемая интегральная фотоника.

Использование аналоговых систем для выполнения вычислений является перспективным направлением, цель которого — повышение энергоэффективности и скорости вычислителей. На сегодняшний день одним из основных применений аналоговых систем в вычислениях являются нейронные сети. В докладе будет рассказано о современном уровне развития оптических нейронных сетей. Будут рассмотрены архитектуры нейросетей, в которых обучение осуществляется с помощью программируемой линейной оптики, а также нейросети, в которых обучение проводится за счет перепрограммирования нелинейностей.

Литература

1. Clements W. R., Humphreys P. C., Metcalf B. J., Kolthammer S., Walmsley I. A. Optimal design for universal multiport interferometers // Optica, 2016. Vol. 3. № 12. P. 1460–1465.
2. Chernykh E. A., Saygin M. Yu., Struchalin G. I., Kulik S. P., Straupe S. S. Quantum optical neural networks with programmable nonlinearities // arxiv.2410.07868, 2024.
3. Liu Z. et al. KAN: Kolmogorov-Arnold networks // arxiv.2404.19756, 2024.

УДК 004.3:621.3.049.77

Возможности разработки и отечественного производства элементов нейроморфных систем центром нанофабрикации компании «Росатом Квантовые технологии»

Салынский Н. А., Лачинов А. А.
ООО «СП «Квант»
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», ул. Нобеля, 1
nasalynsky@rosatom.ru, aalachinov@rosatom.ru

Выполнен анализ нейроморфных интегральных схем с точки зрения состава и функциональных особенностей. Рассмотрены основные операции по проектированию и изготовлению микроэлектронных изделий с выделением возможностей центра нанофабрикации. Приведены типовые характеристики изготавливаемых элементов нейроморфных систем.

Ключевые слова: нейроморфные системы; проектирование и изготовление интегральных схем.

Современные системы искусственного интеллекта широко используют многомерные нейроморфные архитектуры построения вычислительных компонентов, основанные на формальной модели нейрона и позволяющие более эффективно обрабатывать большие массивы данных за счет высокой вычислительной мощности и возможности машинного обучения таких систем уже в процессе их функционирования.

В классических вычислительных устройствах, основанных на архитектуре Джона фон Неймана, ограничением скорости обработки информации является скорость обмена данными между блоками памяти и вычислительной логикой. Проблема заключается в разнице частот работы процессорного ядра (примерно до 5 ГГц) с регистрами на основе относительно дорогой и обладающей малым объемом статической памяти SRAM с применением КМОП-транзисторов [1] и блоком оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) на основе динамической памяти DRAM с применением конденсаторов, частота работы которой на порядок меньше частоты работы процессорного ядра.

Устранение данной проблемы ведется по двум направлениям. Во-первых, развивается память на новых физических принципах, в частности энергонезависимая магниторезистивная память STT MRAM со скоростью доступа, сопоставимой со скоростью SRAM. Во-вторых, развиваются решения с совмещением процессорных ядер и памяти в одном устройстве, в частности, на основе ячеек резистивной памяти ReRAM. Возможность контролировать множественные логические состояния ячейки ReRAM (мемристора) может использоваться для хранения синаптических весов и одновременного матрично-векторного умножения (прямые вычисления в памяти), что позволяет придавать элементы нейроморфной структуры архитектуре интегральной схемы и производить вычислительные операции с высокой скоростью и минимальным энергопотреблением.

Производство интегральных схем по технологии КМОП на кремниевых пластинах, в частности нейроморфных компонентов на базе технологии ReRAM,

происходит в два этапа. На первом этапе (Front end of line, FEOL) на кремниевой пластине формируется приборный слой, состоящий из транзисторов. На втором этапе (Back end of line, BEOL) изготавливаются слои металлизации для соединения транзисторов в схему, а также дополнительные элементы, в том числе ячейки ReRAM, датчики и пассивные компоненты: емкости, резисторы, индуктивности. Резистивные структуры, лежащие в основе ячеек памяти ReRAM, имеют собственную специфику построения из-за применения нетипичных для классического медно-алюминиевого BEOL материалов и процессов и требуют специального технологического оборудования для их формирования.

В работе рассмотрены технологические возможности разработки и отечественного производства элементов ReRAM на базе промышленной линии BEOL на пластинах 300 мм и на полупромышленной линии на пластинах 200 мм. В частности, процессы изготовления отдельных резистивных структур с использованием методов физического и гальванического осаждения, проекционной фотолитографии, плазмохимического, ионного и жидкостного травления.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологий и микроэлектроника. — М.: Техносфера, 2020. — 434 с.

УДК 537.9

Мемристорные и селекторные свойства структур конденсаторного типа нанокомпозит — диэлектрик при добавлении туннельно-прозрачных диэлектрических прослоек

Ситников А. В.[1,2], д. ф.-м. н., Шакуров А. Р.[1], Бабкина И. В.[1], Никонов А. Е.[1], к. ф.-м. н. Рыльков В. В.[3], д. ф.-м. н.

[1] Воронежский государственный технический университет
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
Sitnikov04@mail.ru
[2] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Получены новые мемристорные структуры конденсаторного типа нанокомпозит — диэлектрик при добавлении туннельно-прозрачных диэлектрических прослоек Ta_2O_5, Nb_2O_5 и a-Si. Исследован комплекс мемристивных и селекторных свойств структур металл — нанокомпозит — диэлектрик 1 — диэлектрик 2 — металл.

Ключевые слова: мемристор; нанокомпозит; ReRam; резистивное переключение.

Для практического применения мемристивные функциональные элементы должны быть объединены в большие массивы в конфигурации перекрестной матрицы (кроссбар-структуры). Это позволяет достичь максимально возможной эффективности использования пространства и плотности хранения данных. Однако наличие скрытого тока является серьезной проблемой в таких конфигурациях. В настоящее время разрабатываются два подхода, решающие данную проблему. Наиболее распространенным способом является объединение мемристоров с МОП-транзисторами (1T1R). Другой путь — это использование элемента селектора, последовательно включенного с мемристивным элементом (1S1R). Наиболее интересны в плане практического применения самокорректирующиеся устройства (Self-Rectifying) RS, когда функция нелинейности мемристора определяется его внутренним устройством (CRS). В настоящее время популярны два вида таких устройств — на основе проводящего оксида с модулированной вакансией (VMCO) и с туннельным барьером.

В работе исследованы мемристивные и селекторные свойства структур металл — нанокомпозит — диэлектрик 1 — диэлектрик 2 — металл (М/НК/Д1/Д2/М): $Cu/(CoFeB)_x(SiO_2)_{100-x}/LiNbO_3$/Д2/Cr/Cu/Cr/ситалл, $Cu/(CoFeB)_x(SiO_2)_{100-x}/ZrO_2(Y)$/Д2/Cr/Cu/Cr/ситалл, $Cu/(CoFeB)_x(SiO_2)_{100-x}/HfO_2(B)$/Д2/Cr/Cu/Cr/ситалл, $Cu/(CoFe)_x(SiO_2)_{100-x}/ZrO_2(Y)$/Д2/Cr/Cu/Cr/ситалл, $Cu/(Co)_x(SiO_2)_{100-x}/ZrYO_2$/Д2/Cr/Cu/Cr/ситалл, где в качестве туннельно-прозрачной диэлектрической прослойки Д2 использовались Ta_2O_5, Nb_2O_5 и a-Si. Образцы получены методом ионно-лучевого распыления с использованием теневых масок.

Выявлено, что во всех исследуемых структурах наблюдается многофиламентное биполярное резистивное переключение, обусловленное использованием НК как одного из контактных электродов. Отношение Roff/Ron в зависимости

от элементного состава и концентрации металлической фазы НК достигает значений более 100 единиц. Все структуры проявляют пластичность (имеют возможность принимать множество резистивных состояний в диапазоне значений от Ron до Roff). Обнаружено существенное влияние элементного состава НК, Д1 и Д2 на временную стабильность резистивных состояний и количество устойчивых циклов резистивных переключений. Так, установлено, что наличие прослойки Ta_2O_5 в структуре $Cu/(CoFeB)_x(SiO_2)_{100-x}/ZrO_2(Y)/Cr/Cu/Cr$/ситалл позволяет существенно (с ≈2500 до <10000) увеличить количество устойчивых циклов резистивного переключения. Наличие туннельно-прозрачных прослоек Ta_2O_5, Nb_2O_5 в мемристивных структурах М/НК/Д1/Д2/М существенно увеличивает нелинейность U(I) исследуемых образцов при переключении их в низкоомное состояние. Так, отношение I(U)/I(U/2) может достигать величины 10^2. Основным ограничивающем фактором более высоких значений данного отношения являются значительные токи утечки через туннельный барьер, связанные с технологическими и структурными особенностями исследуемых структур.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 25-29-00215.

Гибридные квантово-классические нейросети для классификации медицинских изображений

Рафиков А. С., Лаптева Т. В., Бастракова М. В., Иванченко М. В.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
ivanchenko@unn.ru

Прогресс в развитии аппаратного обеспечения квантовых вычислений обусловливает актуальность разработки квантовых алгоритмов для различных приложений. Большое внимание уделяется квантовому машинному обучению [1], в первую очередь построению гибридных нейронных сетей (сочетающих как классические, так и квантовые алгоритмы), которые потенциально могут повысить эффективность задач распознавания и классификации [2]. Например, предполагается, что этот подход может оказаться эффективным при интерпретации цифровых медицинских изображений как в связи с высокой трудоемкостью задачи распознавания изображений, так и в связи с требуемой высокой точностью нейросетевых решений в медицинских приложениях [3, 4].

В настоящей работе изучена возможность использования гибридной нейронной сети для решения задачи бинарной классификации изображений МРТ и проведен сравнительный анализ производительности гибридной квантовой сети и ее классического аналога. Рассматривается гибридная (квантово-классическая) нейронная сеть, которая содержит квантовую схему как отдельный модуль. Количество кубитов в квантовом слое взято равным двум в соответствии с количеством классов в задаче классификации. Классическая часть включала в себя три сверточных слоя, три линейных полносвязных слоя и последний линейный слой для сокращения сети до количества классов. Использованный набор данных включал три тысячи МРТ-изображений головного мозга [5]. Он был разделен на два класса по 1500 изображений. Чтобы обучить и подтвердить точность модели, данные далее были разделены на три части: тренировочную (70 %), тестовую (15 %) и валидационную (15 %). Для разработки моделей машинного обучения использовалась библиотека PyTorch [6]. Для моделирования работы квантового компьютера использовалась библиотека PennyLane [7].

В процессе численного исследования гибридной сети были выполнены эксперименты для подбора оптимальных параметров квантового слоя при заданном числе кубитов, а именно: *n_layers = 10* — глубина или количество переплетающихся слоев; *n_base_chain = 2* — количество повторений изначальной цепочки. Точность задачи классификации характеризовалась нами метрикой *f1-score,* которая считается минимальной и достаточной для определения точности классификации, так как учитывает особенности распределения классов. Для устойчивости к возможным колебаниям метрики расчеты были усреднены по десяти реализациям работы сети для каждой модели. Полученные результаты не только доказали успешность использования гибридных квантово-классических сетей в задачах бинарной классификации изображений, но и показали выигрыш ~3,5 % в точности классификации.

Литература

1. Gujju Y., Matsuo A., Raymond R. Phys. Rev. Applied, 2024, Vol. 21. P. 06700.
2. Akhmed S. H. // Modeling and Data analysis, 2023. Vol. 13. P. 96.
3. Kotei E., Thirunavukarasu P. // Healthcare, 2022. Vol. 10. P. 2335.
4. Khmelnytskyi A., Stirenko S., Gordienko Y. // Manoharan S., Tugui A., Baig Z. (eds) Proceedings of 4th International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy. ICAIS 2024. Information Systems Engineering and Management. Vol. 3. Springer, Cham.
5. Dataset. Br35H:: BrainTumorDetection 2020. URL: https://www.kaggle.com/datasets/ahmedhamada0/brain-tumor-detection.
6. URL: https://quantum-ods.github.io/qmlcourse/book/qnn/ru/qnn.html.
7. URL: https://pennylane.ai.

УДК 538.93

Транзисторы с электролитическим затвором для нейроморфных вычислений: роль аномальной диффузии ионов

Сибатов Р. Т., Савицкий А. И., Кицюк Е. П., Рязанов Р. М., Шаман Ю. П., Сыса А. В., Переверзева С. Ю., Лебедев Е. А., Шаманаев А. А., Светухин В. В.
НПК «Технологический центр»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

Транзисторы с электролитическим затвором (ТЭЗ) перспективны для нейроморфных систем благодаря аналоговой настройке проводимости, низкому энергопотреблению и эффекту памяти, обусловленному аномальной диффузией ионов. В работе развивается модель субдиффузии ионов в электролитическом затворе на основе дробного псевдодифференциального уравнения, позволяющая рассчитать временные отклики тока в канале ТЭЗ. Модель применяется к синаптическому элементу и резервуарному вычислителю с несколькими затворами, управляющими запаздывающей нелинейной динамикой канального тока. Результаты модели подтверждаются экспериментальными данными.

Ключевые слова: резервуарные вычисления; транзистор с электролитическим затвором; аномальная диффузия.

Транзисторы с электролитическим затвором (ТЭЗ) являются перспективным элементом нейроморфных систем благодаря высокой энергоэффективности, низкому рабочему напряжению, аналоговой перестройке проводимости канала и высокой плотности интеграции [1]. ТЭЗ воспроизводят синаптические функции за счет электрохимической модуляции проводимости канала [2] и позволяют реализовывать принципы резервуарных вычислений [3]. Их ключевое преимущество проявляется при обработке временных рядов и пространственно-временных паттернов [3], где традиционные вычислительные методы демонстрируют низкую эффективность.

В нашей работе [4] исследован ТЭЗ на основе сетки углеродных нанотрубок (УНТ) и гелиевого электролита, реализующий пороговый интегратор с дробной динамикой релаксации. Основным достоинством разработанной системы является ее способность к эффективной обработке сигналов с масштабно-инвариантной временной структурой. В исследуемых системах экспериментально обнаружена аномальная диффузия ионов [4, 5], которая проявляется в нарушении классического закона Фика.

В данной работе развивается модель аномально-диффузионного транспорта (АДТ) ионов в электролитическом затворе и канале ТЭЗ на основе уравнения субдиффузии с дробной производной по времени. Базовое уравнение подробно обсуждалось в нашей работе [5], а теоретические оценки на его основе применялись для описания кинетики планарных микросуперконденсаторов с массивами УНТ. В отличие от нормальной диффузии, для которой среднеквадратичное смещение частиц линейно зависит от времени, АДТ характеризуется степенной зависимостью [6]. Это обусловлено немарковским характером движения зарядов, при

котором динамика зарядов существенно зависит от предыстории (эффект памяти) [5]. Такое поведение позволяет реализовать долговременную синаптическую пластичность и обеспечивает гибкое управление потенциацией и депрессией. Обобщенная модель позволяет рассчитать временные отклики тока в канале, учитывающие АДТ при вертикальном внедрении ионов, пространственное распределение концентрации ионов в канале и электролите, а также влияние емкости на модуляцию проводимости канала при АДТ.

Резервуарные вычисления на основе ТЭЗ могут быть реализованы с помощью нескольких затворов, управляющих запаздывающей нелинейной динамикой тока в канале [3]. АДТ влияет на рекуррентные свойства вычислительной среды. Субдиффузия ионов в электролитическом затворе способствует стабилизации динамики ТЭЗ и улучшает распознавание сложных временных зависимостей с масштабно-инвариантными свойствами. Регулирование порядка субдиффузии обеспечивает гибкую настройку вычислительных свойств системы, что перспективно для разработки архитектур с адаптивной обработкой информации.

Работа выполнена в рамках гос. задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект FNRM-2025-0010).

Литература

1. Ling H. et al. Electrolyte-gated transistors for synaptic electronics, neuromorphic computing, and adaptable biointerfacing // Applied Physics Reviews, 2020. Vol. 7. № 1.
2. Yang J. T. et al. Artificial synapses emulated by an electrolyte-gated tungsten-oxide transistor // Advanced Materials, 2018. Vol. 30. № 34. P. 1801548.
3. Liu X. et al. Near-sensor reservoir computing for gait recognition via a multi-gate electrolyte-gated transistor // Advanced Science, 2023. Vol. 10. № 15. P. 2300471.
4. Sibatov R. T. et al. Intermittent spike train processing through fractional leaky integrate-and-fire neuromorphic unit // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2025. Vol. 35. № 5.
5. Kitsyuk E. P., Sibatov R. T., Svetukhin V. V. Memory effect and fractional differential dynamics in planar microsupercapacitors based on multiwalled carbon nanotube arrays // Energies, 2020. Vol. 13. № 1. P. 213.
6. Bisquert J., Compte A. Theory of the electrochemical impedance of anomalous diffusion // Journal of Electroanalytical Chemistry, 2001. Vol. 499. № 1. P. 112–120.

УДК 681.51

Теоретический и экспериментальный анализ управления роботом-собакой

Горобцов А. С.[1,2], Данилевич В. М.[1], Зубко М. В.[1], Титов Л. В.[1], Судовиков Е. И.[1], Климов К. В.[3], Капытов Д. В.[3], Данилов В. А.[3], Рогачев А. А.[3]
[1] Волгоградский государственный технический университет
400005, г. Волгоград, просп. Ленина, 28
vm@vstu.ru
[2] Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН
101000, г. Москва, М. Харитоньевский пер., 4
info@imash.ru
[3] НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова
119192, г. Москва, Мичуринский просп., 1
kostic@kostic.ru

Рассмотрен метод управления движением робота-собаки на основе обобщенной задачи динамического уравновешивания. Представлен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных параметров управляемого движения. Предложены модификации кинематической схемы робота-собаки для реализации широкого класса режимов движения

Ключевые слова: машинное обучение; управление; шагающие роботы.

Управление многомерными нелинейными системами является актуальной областью исследований. К таким системам можно отнести шагающих роботов, например роботов-собак. Роботы-собаки привлекают значительное внимание исследователей, поскольку устойчивость движения для таких роботов обеспечивается значительно проще, чем, например, устойчивость двуногих роботов-андроидов. Можно выделить два подхода к синтезу управления такими роботами — методы машинного обучения и метод обратной задачи. В подходе на основе машинного обучения используется, как правило, т.н. обучение с подкреплением, в котором управляющие силы (моменты) в приводах интерполируются реккурентной нейронной сетью, параметры которой определяются в процессе обучения. Для обучения используется модель динамики движения робота как системы твердых тел. Решается прямая задача динамики. С помощью таких подходов получено управление роботом-собакой для некоторых режимов движения по ровной и неровной поверхности. В существующих работах нет анализа робастности полученных алгоритмов управления. Обучение с подкреплением для задач оптимального управления многомерными системами требует значительных вычислительных затрат, исчисляемых десятками часов на мощных вычислительных кластерах. Все это делает актуальной разработку альтернативных методов управления, работающих в реальном режиме времени. Такие методы могут быть разработаны на основе метода обратной задачи, который здесь рассматривается.

Выполнен теоретический и экспериментальный анализ управления роботом-собакой на основе метода обратной задачи и обобщенной задачи динамического уравновешивания [1, 2]. Результаты, полученные на основе метода обратной задачи, сопоставимы с известными результатами, основанными на нейросетевых алгоритмах. Общий недостаток всех существующих методов управления в этой

области — невозможность реализации медленных движений, что значительно затрудняет планирование перемещения с помощью средств технического зрения и ведет к избыточным энергетическим затратам в приводах.

С точки зрения метода обобщенной задачи динамического уравновешивания [2] кинематическая схема роботов-собак с тремя приводами в каждой ноге не обеспечивает произвольное управляемое движение корпуса по шести координатам. Требуется введение дополнительных управляемых степеней свободы. Это соответствует данным биологических прототипов, в которых имеет место значительное количество избыточных степеней свободы. Рассмотрено два варианта увеличения числа степеней свободы конструкции робота. Первый способ заключается в добавлении дополнительных тел к корпусу робота, что соответствует хвосту биологических прототипов. Расчеты управляемого движения в этом случае показали возможность реализации произвольного движения корпуса с выполнением заданных величин трехмерных реакций в стопах при любых типах походок. Однако перемещения звеньев хвоста в этом случае могут достигать значений, трудно технически реализуемых. Такая постановка управления требует дополнительной оптимизации. При втором способе в ступню робота добавляется дополнительное управляемое звено — палец с вертикальной управляемой реакцией в опоре. Такой способ обладает меньшими потенциальными возможностями по сравнению с первым. В этом случае реализуется устойчивое движение только при парных походках, когда одновременно в контакте находятся две диагонально расположенные ноги. Представлен анализ возможности реализации произвольных режимов движения шагающих роботов, ноги которых содержат три управляемые степени свободы, за счет совместного перемещения роботами единого груза. Минимальное количество роботов при этом 2, максимальное не ограничено. Такой способ применим к любому типу шагающих роботов, в том числе и к существующим роботам-собакам.

Представленный метод управления шагающими роботами не требует высоких вычислительных затрат по сравнению с различными модификациями метода Монте-Карло, лежащими в основе методов обучения с подкреплением. Метод может быть применен для управления антропоморфными и зооморфными роботами и другими многомерными нелинейными системами. Метод дает возможность целенаправленно модифицировать кинематические схемы шагающих роботов для получения движений заданного класса. Метод позволяет также повышать кинематические характеристики движения шагающих роботов за счет группового движения. Для группового движения могут использоваться существующие шагающие роботы, например роботы-собаки.

Литература

1. Горобцов А. С. Синтез параметров управляемого движения многозвенных механических систем произвольной структуры методом обратной задачи // Мехатроника, автоматизация, управление, 2004. — № 6. — С. 43–50. 2 с. обл.
2. Gorobtsov A., Sychev O., Orlova Yu., Smirnov E., Grigoreva O., Bochkin A., Andreeva M. Optimal Greedy Control in Reinforcement Learning // Sensors, 2022. P. 14–21.

УДК 621.382

Фотомемристорные сенсорные структуры для энергоэффективной и быстрой обработки визуальной информации

Панин Г. Н.
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
panin@iptm.ru

Энергонезависимые мемристивные состояния в слоевых низкоразмерных структурах могут контролироваться в широком оптическом диапазоне, что позволяет создать интеллектуальные широкополосные фотомемристоры. Многофункциональный фотомемристорный сенсор со встроенной нейронной сетью обеспечивает энергоэффективное детектирование, обработку и запоминание визуальной информации подобно биологическим системам. Это открывает возможность разработки технологии искусственного нейроморфного автономного зрения для широкого диапазона длин волн.

Ключевые слова: нейроморфные сенсоры; фотомемристор; классификация и распознавание образов; низкоразмерные материалы; фотоиндуцированные фазовые переходы; широкополосное зрение.

Введение

Появление низкоразмерных (LD) материалов семейства графена открывает уникальные возможности для создания интеллектуальных фотомемристорных сенсоров, чувствительных в широком спектральном диапазоне ультрафиолетового (УФ), инфракрасного (ИК) и терагерцевого излучения. Энергонезависимые резистивные состояния в мемристорных структурах, изготовленных на основе двумерных (2D) кристаллов, квазиодномерных (1D) структур и квазинульмерных (0D) квантовых точек, могут контролироваться светом, электрическим или магнитным полем благодаря поляризации и перестройке атомов углерода в sp^2-sp^3-гибридизации, а также при фотоиндуцированных фазовых переходах [1–7]. Мемристоры на основе графена / оксида графена, полученные локальным восстановлением оксида графена с помощью облучения электронным пучком, демонстрируют нелинейное поведение и хорошо контролируемые мемристивные состояния при низких напряжениях смещения [8]. LD-материалы обладают уникальными структурными и оптоэлектронными свойствами, необходимыми для разработки энергоэффективных и быстрых мемристорных устройств для биоподобных наноинформационных технологий [9–12].

Интеллектуальные фотосенсоры на основе слоевых LD-материалов

В целях изготовления фотомемристорных структур для нейроморфной обработки данных были использованы слоевые ван-дер-ваальсовые LD-материалы, такие как 2D-графен, оксид графена, диаман, халькогениды переходных металлов и 0D квантовые точки. Показано, что эти низкоразмерные материалы могут быть применены для получения изображений в широком оптическом диапазоне с обработкой информации в самом сенсоре. Интеллектуальные фотосенсоры из слоевых

LD-материалов демонстрируют фотомемристивное переключение, быстрый фотоотклик и высокую фоточувствительность. Фотомемристорные сенсоры на основе 2D-халькогенидов с графеновыми электродами, благодаря хорошо контролируемым процессам локального окисления и восстановления, демонстрируют стабильное динамическое поведение, необходимое для нейроморфных вычислений непосредственно в сенсоре, что снижает энергетические и временные затраты, связанные с обработкой данных [7]. Нейроморфные вычисления в фотосенсоре на основе фотомемристорной сети позволяют создать компактную автономную и энергоэффективную систему обнаружения, хранения и распознавания визуальной информации в реальном времени для решения задач в беспилотном транспорте, персонализированной медицине и других приложениях.

Заключение

Интеллектуальные фотосенсоры со встроенной нейронной сетью на основе фотомемристоров, изготовленных из слоевых LD-материалов, перспективны для создания энергоэффективного быстрого автономного нейроморфного зрения. Детектирование и распознавание объектов в многофункциональном фотомемристорном сенсоре подобны обнаружению и обработке визуальной информации в биологической зрительной нейронной сети с возможностью интеллектуального самоконтроля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-49-00159) и государственного задания № 075-00295-25-00.

Литература

1. Panin G. N., Kapitanova O. O., Lee S. W. et al. Resistive Switching in Al/Graphene Oxide/Al Structure // Jpn. J. Appl. Phys., 2011. Vol. 50. P. 070110.
2. Panin G. N. et al. Resistance Switching Induced by an Electric Field in ZnO:Li, Fe Nanowires // AIP Proc., 2007. Vol. 893. P. 743–744.
3. Kapitanova O. O., Panin G. N., Cho H. D. et al. Formation of self-assembled nanoscale graphene/graphene oxide photomemristive heterojunctions using photo catalytic oxidation // Nanotechnology, 2017. Vol. 28. P. 204005.
4. Wang W., Panin G., Fu X. et al. MoS_2 memristor with photoresistive switching // Sci Rep., 2016. Vol. 6. P. 31224.
5. Emelin E. V. et al. Resistive Switching in Bigraphene/Diamane Nanostructures Formed on a $La_3Ga_5SiO_{14}$ Substrate Using Electron Beam Irradiation // Nanomaterials, 2023. Vol. 13. P. 2978.
6. Fu X. et al. Molybdenum Disulfide Nanosheet/Quantum Dot Dynamic Memristive Structure Driven by Photoinduced Phase Transition // Small, 2019. Vol. 15. P. 1903809.
7. Fu X., Li T., Cai B. et al. Graphene/$MoS_{2-x}O_x$/graphene photomemristor with tunable non-volatile responsiveities for neuromorphic vision processing // Light Sci Appl., 2023. Vol. 12. P. 39.
8. Kapitanova O. O. et al. Direct patterning of reduced graphene oxide/graphene oxide memristive heterostructures by electron-beam irradiation // Journal of Materials Science & Technology, 2020. Vol. 38. P. 237–243.
9. Fu Xiao et al. Tunable UV-visible absorption of SnS_2 layered quantum dots produced by liquid phase exfoliation // Nanoscale, 2017. Vol. 9. № 5. P. 1820–1826.

10. Kovaleva N. N. et al. Efficient green emission from edge states in graphene perforated by nitrogen plasma Treatment // 2D Materials, 2019. Vol. 6. P. 045021.
11. Panin G. N. Optoelectronic dynamic memristor systems based on two-dimensional crystals // Chaos, Solitons & Fractals, 2021. Vol. 142. P. 110523.
12. Panin G. N. Low-Dimensional Layered Light-Sensitive Memristive Structures for Energy-Efficient Machine Vision // Electronics, 2022. Vol. 11. № 4. P. 619.

УДК 004.9+004.4

Аппаратно-программные комплексы для демонстрации функций памяти и нейроморфных вычислений на базе КМОП-интегрированных кроссбар-массивов мемристивных устройств

Щаников С.А.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского 603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

В докладе представлены архитектуры и характеристики аппаратно-программных комплексов и пользовательского программного обеспечения для исследования и демонстрации функций памяти и нейроморфных вычислений на базе КМОП-интегрированных кроссбар-массивов мемристивных устройств.
Ключевые слова: искусственный интеллект; мемристивные устройства; нейроморфные вычисления; нейронные сети; нейропроцессор.

Искусственные нейронные сети (ИНС) успешно применяются для решения широкого круга задач, включая обработку естественного языка, компьютерное зрение и классификацию объектов. Их эффективность продолжает расти, что обусловлено не только совершенствованием теоретических основ — разработкой новых архитектур и методов обучения, но и увеличением числа параметров в моделях. Однако это приводит к значительному росту энергозатрат и требований к вычислительным ресурсам. Традиционные вычислительные системы, основанные на архитектуре Джона фон Неймана, демонстрируют низкую энергоэффективность и высокие задержки при выполнении ИНС. Основная причина заключается в том, что значительная часть процессорного времени уходит на доступ к памяти и загрузку весовых коэффициентов модели, а не на непосредственные вычисления [1].

Одним из возможных решений сложившейся проблемы является переход от архитектуры Джона фон Неймана к архитектурам, основанным на вычислениях в памяти, в которых одно и то же устройство осуществляет хранение и обработку информации [1]. Как показывают результаты обзоров, мемристивные устройства являются наиболее перспективными кандидатами на роль аппаратных синапсов [2] в системах вычислений в памяти. Объединение мемристивных устройств в кроссбар-массивы (массивы мемристивных устройств, в которых они располагаются на пересечении входных и выходных шин) позволяет выполнять операцию матричного умножения (одну из наиболее частых и энергозатратных операция в ИНС) за один такт благодаря законам Ома и Кирхгофа [3]. Кроме того, мемристивные устройства могут имитировать биологическую синаптическую пластичность [4].

В данном докладе будут рассмотрены архитектуры и характеристики аппаратно-программных комплексов и пользовательского программного обеспечения для исследования и демонстрации функций памяти и нейроморфных вычислений на базе КМОП-интегрированных кроссбар-массивов мемристивных устройств.

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Н-466-99_2025-2027). Мемристивные устройства изготовлены с использованием инфраструктуры лаборатории мемристорной наноэлектроники (гос. задание № FSWR-2025-0006), учебного дизайн-центра электроники и центра коллективного пользования — научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского. Также в докладе рассмотрены аппаратные реализации различных архитектур ИНС на базе кроссбар-массивов 32×8 1T1R, выполняемые в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект 9.1 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах»).

Литература

1. Huang X. et al. In-memory computing to break the memory wall // Chinese Physics B, 2020. Vol. 29. № 7. P. 078504.
2. Mikhaylov A. N. et al. Neuromorphic computing based on CMOS-integrated memristive arrays: current state and perspectives // Supercomputing Frontiers and Innovations, 2023. Vol. 10. № 2. P. 77–103.
3. Aguirre F. et al. Hardware implementation of memristor-based artificial neural networks // Nature communications, 2024. Vol. 15. № 1. P. 1974.
4. Surazhevsky I. A. et al. Noise-assisted persistence and recovery of memory state in a memristive spiking neuromorphic network // Chaos, solitons & fractals, 2021. Vol. 146. P. 110890.

УДК 621.38-022.532

Разработка и исследование устройств нанопьезотроники для нейроморфных систем

Ильина М. В.[1], д. ф.-м. н., Соболева О. И.[2], Рудык Н. Н.[2], к. т. н., Ильин О. И.[2], к. т. н.

[1] Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е
mailina@sfedu.ru
[2] Южный федеральный университет,
научно-исследовательская лаборатория технологии функциональных наноматериалов
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е

Представлены результаты исследований макетов наногенераторов и сенсора деформации на основе легированных азотом углеродных нанотрубок, демонстрирующих чувствительность к нано- и микродеформациям и выходную мощность до 56,84 мкВт/см^2, что открывает возможность их интеграции в нейроморфные системы.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; легирование азотом; пьезоэлектрический эффект; сенсоры; наногенераторы.

В настоящее время активно развиваются исследования, направленные на разработку нейроморфных систем в целях повышения энергоэффективности работы электронных устройств [1, 2]. При этом особое внимание уделяется идее по обеспечению автономной работы таких устройств за счет преобразования энергии внешней окружающей среды в целях их миниатюризации и интеграции в нейроморфные системы [3]. Данное направление выделено в отдельную область исследований по созданию автономных сенсоров деформации, элементов памяти и наногенераторов на основе пьезоэлектрических наноструктур — нанопьезотронику [4]. В настоящий момент нами разработаны физико-технологические основы создания таких устройств на основе легированных азотом углеродных нанотрубок (N-УНТ), изготовлены и исследованы макеты пьезоэлектрических наногенераторов (ПЭНГ) и сенсора деформации, чувствительного к микро- и наноразмерным деформациям и вибрациям [5, 6].

В данной работе продемонстрированы результаты исследований выходных параметров макетов ПЭНГ на основе N-УНТ (концентрация азота 12%, из которых 2,9% приходилось на азот пиррольного типа) с верхним профилированным и перфорированным электродами. Показано, что макет ПЭНГ с верхним перфорированным электродом превосходит макет ПЭНГ с профилированным электродом как по генерируемой мощности (12,63 и 56,84 мкВт/см^2 соответственно), так и по стабильности работы. Так, при постоянном механическом воздействии макет с верхним перфорированным электродом сохраняет свою работоспособность на протяжении четырех суток без тенденции к деградации (выходное напряжение 0,55 В при воздействии внешних колебаний частотой 15 Гц и амплитудой ±50 мкм), в то время как макет с верхним профилированным электродом демонстрирует постепенное снижение выходного напряжения через 3 часа. При этом показана высокая

чувствительность макета ПЭНГ с верхним профилированным электродом к внешним механическим воздействиям, вызванным движениями пальцев человека, что позволяет использовать его как макет высокочувствительного сенсора деформации. Кроме того, установлено, что формирование исходной деформации в N-УНТ обеспечивает генерацию поверхностного потенциала на их вершинах до 300 мВ, достаточного для генерации тока около 35 нА в течение 60 часов без дополнительного внешнего воздействия, что демонстрирует возможность N-УНТ не только преобразовывать механические деформации в электрическую энергию, но и накапливать заряд по аналогии с конденсатором. Полученные результаты открывают широкие перспективы использования ПЭНГ и сенсоров деформации на основе N-УНТ для их дальнейшей интеграции в нейроморфные системы и интеллектуальную платформу для Интернета вещей.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 25-79-10302 в ЮФУ.

Литература

1. Cao Y., Fu H., Fan X. et al. Advanced design of high-performance artificial neuromorphic electronics // Materials Today, 2024. Vol. 80. P. 648–680.
2. Ramesh R., Salahuddin S., Datta S. et al. Roadmap on low-power electronics // APL Mater., 2024. Vol. 12. P. 099201.
3. Wang Z. L., Song J. Nanogenerators: An emerging technology towards nanoenergy // Science, 2006. Vol. 312. P. 242.
4. Wang Z. L. Nanopiezotronics // Adv. Mater., 2007. Vol. 19. P. 889–892.
5. Il'ina M. V. et al. Study of the piezoelectric properties of nitrogen-doped carbon nanotubes for the development of energy-efficient nanogenerators // Nanobiotechnology Reports, 2023. Vol. 18. № 6. P. 858–864.
6. Il'ina M. V. et al. Development of a nitrogen-doped carbon nanotube nanogenerator for mechanical energy harvesting // Carbon Letters, 2025. DOI: 10.1007/s42823-025-00924-4.

УДК 621.3.049.77

Прозрачные мемристивные структуры для нейроморфных систем машинного зрения

Саенко А. В., к. т. н., Козюменко К. А., к. т. н., Шиховцов И. А., к. т. н., Смирнов В. А.[1], к. т. н.
Научно-исследовательская лаборатория «Нейроэлектроника и мемристивные наноматериалы» Южного федерального университета
347922, г. Таганрог Ростовской области, ул. Шевченко, 2
vasmirnov@sfedu.ru

Показана возможность создания методом магнетронного распыления кроссбар-массива из 16 мемристорных структур ITO/ZnO/ITO на стеклянной подложке с размером 2×2 мкм каждая для применения в нейроморфных системах машинного зрения. Получено, что при мощности магнетронного осаждения пленок ZnO, равной 75 Вт, мемристорные структуры проявляют стабильное резистивное переключение 20000 циклов между высокоомным и низкоомным состояниями.

Ключевые слова: наноматериалы; магнетронное распыление; мемристорная кроссбар-структура; резистивное переключение; нейроморфные системы.

Мемристорные структуры являются перспективными устройствами энергонезависимой резистивной памяти, обладающими рядом преимуществ, включая высокое быстродействие, долговременное хранение информации, низкое энергопотребление и многоуровневое поведение. Основной особенностью мемристоров является изменение сопротивления под действием приложенного напряжения, что позволяет имитировать работу синапсов в биологических нейронных сетях [1]. Особый интерес представляют оптоэлектронные мемристоры, которые могут применяться в нейроморфных системах искусственного машинного зрения, где важны оптическая прозрачность для интеграции в сенсоры и дисплеи, фоточувствительность для прямого реагирования на световое воздействие и синаптическое поведение для обучения и адаптации в реальном времени [2]. Таким образом, мемристорные структуры не только являются перспективной энергонезависимой памятью, но и открывают путь к созданию принципиально новых оптоэлектронных и нейроморфных систем, сочетающих высокую производительность с низким энергопотреблением.

Для создания нейроморфных систем машинного зрения на основе оптоэлектронных мемристоров необходимы оптически прозрачные оксидные материалы с резистивным переключением (оксид цинка, ZnO) и прозрачные электроды (оксид индия-олова, ITO) [1, 2]. Проведено исследование влияния мощности высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления на структурные и электрофизические свойства пленок ZnO. Полученные пленки ZnO имеют *n*-тип проводимости и относительно высокое удельное сопротивление, которое составляет порядка 10^3–10^4 Ом·см. Концентрация носителей заряда в пленках ZnO изменяется от $8{,}1 \cdot 10^{12}$ до $2{,}7 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$ при увеличении мощности распыления от 25 до 100 Вт, что можно связать с кристалличностью пленок ZnO, в частности размером зерен, а также рассеянием на границах зерен и дефектах [3]. Показано, что при мощности распыления 75 Вт пленка ZnO имеет однородную зернистую морфологию поверхности

со средним размером зерен 28,6 нм и относительно низкую шероховатость поверхности порядка 6,3 нм, а также наибольшую концентрацию носителей заряда, которая определяется кислородными вакансиями, что необходимо для стабильного резистивного переключения мемристорных структур.

Для применения нанокристаллических пленок ZnO в нейроморфных системах машинного зрения был разработан и изготовлен кроссбар из 16 ITO/ZnO/ITO мемристорных структур с латеральным размером 2×2 мкм. Анализ измеренных вольтамперных характеристик показал, что изготовленные мемристорные структуры проявляют стабильное резистивное переключение. Ток в состоянии высокого сопротивления (HRS) составляет около 15 мкА при напряжении 0,4 В, а в состоянии низкого сопротивления (LRS) — 32 мкА. Аналогичные результаты были получены для остальных мемристорных структур кроссбар-массива. Испытание на выносливость показало, что за 20000 циклов переключения мемристорные структуры переключаются между $LRS = 16{,}7 \pm 1{,}9$ кОм и $HRS = 33{,}7 \pm 1{,}6$ кОм для одного устройства, а также между $LRS = 13{,}8 \pm 1{,}4$ кОм и $HRS = 34{,}8 \pm 2{,}6$ кОм для всех устройств, в то время как отношение сопротивлений HRS/LRS составляет 2,1 и 2,5 соответственно. Данное различие может быть объяснено влиянием поверхностного рельефа при одной и той же шероховатости и толщине пленки ZnO на эффект резистивного переключения, что приводит к флуктуациям концентрации и профиля распределения дефектов в объеме пленки ZnO для каждой мемристорной структуры ITO/ZnO/ITO. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления элементов систем машинного зрения на основе нейроморфных мемристорных структур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00809, https://rscf.ru/project/25-19-00809, в Южном федеральном университете.

Литература

1. Saransh Shrivastava, Hans Juliano, Phan Ai Linh Uong, Tseung-Yuen Tseng. Recent developments on neuromorphic optoelectronic memristors based on metal oxide semiconductors: A review // APL Electronic Devices, 2025. Vol. 1. P. 021506.
2. Pereira M. E., Martins R., Fortunato E., Barquinha P., Kiazadeh A. Recent progress in optoelectronic memristors for neuromorphic and in-memory computation // Neuromorphic Computing and Engineering, 2023. Vol. 3. P. 022002.
3. Saenko A. V., Tominov R. V., Jityaev I. L., Vakulov Z. E., Avilov V. I., Polupanov N. V., Smirnov V. A. Transparent Zinc Oxide Memristor Structures: Magnetron Sputtering of Thin Films, Resistive Switching Investigation, and Crossbar Array Fabrication // Nanomaterials, 2024. Vol. 14. P. 1901.

УДК 621.38-022.532

Синаптическая пластичность мемристивных структур на основе нанокристаллических пленок ZnO для нейроморфных систем ИИ

Томинов Р. В., Вакулов З. Е., Варганов В. И., Попова А. И., Смирнов В. А.
Научно-исследовательская лаборатория «Нейроэлектроника и мемристивные наноматериалы», Южный федеральный университет
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
tominov@sfedu.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований синаптической пластичности в мемристивных структурах на основе нанокристаллических пленок ZnO для нейроморфных систем искусственного интеллекта.
Ключевые слова: наноэлектроника; нейроморфные системы; искусственный интеллект; синаптическая пластичность; ReRAM; многоуровневое резистивное переключение; нанокристаллические пленки оксида цинка; импульсное лазерное осаждение.

В настоящее время наблюдается стремительный рост использования искусственного интеллекта во всех сферах жизнедеятельности, включая здравоохранение, образование, безопасность и т. д. [1]. Однако такие системы реализуются в виде программного кода на компьютерах фон Неймана [2]. Производительность этих алгоритмов ограничена физическим разделением вычислительного устройства и памяти. Одним из возможных решений является разработка и создание вычислительных устройств, основанных архитектуре биологического мозга (нейроморфные системы). Однако изготовление нейроморфных систем на сегодняшний день затруднено из-за ряда проблем, связанных с отсутствием систематических режимов исследования синаптической пластичности в мемристивных структурах на основе нанокристаллических пленок ZnO, изготовленных методом импульсного лазерного осаждения.

Анализ полученных экспериментальных результатов исследования многоуровневого резистивного переключения мемристорной структуры TiN/ZnO/Ti показал, что при увеличении амплитуды импульса напряжения U_{SET} от 0,9 до 1,7 В при длительности импульса $t_{SET} = 6$ мс наблюдается пять резистивных состояний: $R1 = (1,8 \pm 0,4) \cdot 10^8$ Ом, $R2 = (2,7 \pm 0,5) \cdot 10^7$ Ом, $R3 = (6,4 \pm 0,8) \cdot 10^6$ Ом, $R4 = (0,5 \pm 0,1) \cdot 10^6$ Ом, $R5 = (1,5 \pm 0,3) \cdot 10^5$ Ом. При этом отношение сопротивлений высокоомного состояния к низкоомному HRS/LRS составило 1212 ± 47. Полученный результат можно объяснить уменьшением длины разрушенного участка канала проводимости в пленке оксида цинка.

Полученные результаты могут быть использованы в целях изготовления мемристивных структур на основе нанокристаллических пленок ZnO для нейроморфных систем искусственного интеллекта.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10272, https://rscf.ru/project/23-79-10272, в Южном федеральном университете.

Литература

1. Томинов Р. В., Вакулов З. Е., Авилов В. И., Шиховцов И. А., Смирнов В. А. Исследование влияния материала контактов и толщины пленок на резистивное переключение в не требующих формовки нанокристаллических пленках ZnO для нейроморфных устройств на основе мемристорных структур // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8-2. — С. 509–515.
2. Смирнов В. А., Авилов В. И., Томинов Р. В., Федотов А. А., Агеев О. А., Валов И. Мемристорные структуры на основе электрохимического оксида титана для ReRam и нейроморфных применений // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7. — С. 664.

УДК 539.216.2

Особенности получения и исследования пленок $BaTiO_3$ для нейроморфных применений

Вакулов З. Е., Томинов Р. В., Родригес Д. С. Х., Смирнов В. А.
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения,
Южный федеральный университет
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
zvakulov@sfedu.ru

В работе представлены результаты междисциплинарных экспериментальных исследований, направленных на разработку и создание технологических основ изготовления in sensing вычислительных систем на основе мемристивных кроссбаров для робототехнических комплексов, искусственного интеллекта и нейропроцессорной архитектуры нового поколения.

Ключевые слова: импульсное лазерное осаждение; нанокристаллические пленки; in-sensing вычислительные системы; искусственный интеллект.

На сегодняшний день одними из наиболее перспективных направлений исследований являются разработки в области нейротехнологий и нейроэлектроники, направленные на использование и развитие природного потенциала мозга, а также эффективную интеграцию биологических нейронных сетей мозга с информационными системами на небиологической основе как на уровне «аппаратного» обеспечения, так и на уровне взаимодействия с внешними устройствами [1]. Исследования нейроморфных систем остаются актуальными как в теоретическом, так и в прикладном аспектах, в частности с точки зрения разработки биоподобных вычислителей, предназначенных для решения сложных задач обработки многомерной информации в робототехнике [2]. За последние десятилетия сложность и разнообразие современных робототехнических комплексов значительно возросли, что связано с ростом производительности вычислительных систем, развитием искусственного интеллекта и созданием прогрессивных технологий в данной области. Однако, несмотря на значительный прогресс и публикационную активность по тематикам, посвященным нейроморфной электронике, на сегодняшний день все еще отсутствуют комплексные теоретические и экспериментальные исследования, посвященные разработке и созданию макетов in sensor вычислительных систем искусственного интеллекта, что препятствует созданию элементной базы для самообучающихся адаптивных нейроморфных систем, а также энергонезависимых устройств хранения и обработки информации с низким энергопотреблением и высокой степенью интеграции. Таким образом, целью работы является исследование закономерностей влияния температуры подложки при импульсном лазерном осаждении на структуру и состав пленок $BaTiO_3$.

Рентгенодифракционные измерения образцов с пленками $BaTiO_3$ проводились с использованием дифрактометра D2 Phaser (Bruker AXS, Germany), Cu-Kα после фильтрации излучения медного анода с помощью Ni Kβ-фильтра, линейного полупроводникового детектора рентгеновского излучения LYNXEYE (Bruker AXS). В образце, полученном при температуре подложки 300 °C, большинство рефлексов отнесено к оксидам титана TiO_2 и Ti_9O_7. Также с большой долей вероятности некоторые рефлексы могут быть отнесены к тетрагональной модификации $BaTiO_3$.

В образце, полученном при температуре подложки при 600 °C, $BaTiO_3$-фаза присутствует в меньшем количестве. Кроме того, присутствуют рефлексы TiO_2 и Ti_9O_7, хотя их интенсивность существенно ниже, отражая уменьшенное содержание этих фаз. Большинство рефлексов в пленке, полученной при температуре подложки 600 °C, относятся к фазам $Ba_4Ti_{30}O_{13}$ и Ti_4O_7. Следует отметить, что присутствуют также эффекты преимущественной ориентации, в результате которых интенсивности некоторых рефлексов повышаются. При этом результаты EDX-исследований указывают на присутствие бария, титана и кислорода во всех пленках $BaTiO_3$, полученных в диапазоне температур от 300 до 600 °C. При этом пленки, полученные при температуре подложки 600 °C, являются более стехиометрическими по сравнению с пленками, полученными при низких температурах.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке принципов создания элементной базы нейроморфных систем для робототехнических комплексов, искусственного интеллекта и нейропроцессорной архитектуры нового поколения. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-10295, https://rscf.ru/project/25-79-10295, в Южном федеральном университете.

Литература

1. Tominov R. V., Vakulov Z. E., Rodriguez D. S. J., Ugryumov I. S., Smirnov V. A. The study of synaptic plasticity in the ZnO memristor elements for neuromorphic AI // Journal of Advanced Dielectrics, 2025. P. 2540003-1–2540003-5.
2. Mikhaylov A. N., Gryaznov E. G., Koryazhkina M. N., Bordanov I. A., Shchanikov S. A. et al. Neuromorphic computing based on CMOS-integrated memristive arrays: current state and perspectives // Supercomputing Frontiers and Innovations, 2023. Vol. 10. № 2. P. 77–103.

УДК 538.9

Фоточувствительные мемристоры парилен-PbTe для приложений в нейроморфной сенсорике

Емельянов А. В., Трофимов А. Д., Мацукатова А. Н., Несмелов А. А., Демин В. А.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
emelyanov_av@nrcki.ru

Изучены резистивные переключения (РП) и основные мемристивные характеристики структур Cu/парилен-PbTe/ITO/стекло. Предложен механизм РП, в том числе с учетом оптического возбуждения. Продемонстрирована возможность использования мемристоров для распознавания графических образов.
Ключевые слова: мемристор; нанокомпозит; парилен; фоточувствительные переключения.

В настоящее время нейроморфные вычислительные системы (НВС) на основе мемристоров считаются перспективными для аппаратной реализации эффективных нейронных сетей в целях решения задач искусственного интеллекта [1]. Большинство мемристоров по принципам своей работы похожи на биологические синапсы и нейроны, поэтому мемристоры могут эффективно их эмулировать [2]. Недавно на некоторых мемристивных устройствах была продемонстрирована еще одна перспективная возможность — управление РП при помощи света [3]. Фоточувствительное РП обеспечивает дополнительную степень свободы для применения мемристоров в НВС, например, в нейроморфных системах компьютерного зрения, способных объединять оптическое восприятие (сенсорика) и обработку информации (классификация).

Учитывая стремление к биоподобным механизмам и устройствам, органические и гибридные мемристоры продолжают привлекать внимание. Фоточувствительные органические мемристоры предлагают все преимущества органических мемристоров, управляемых напряжением, но также наследуют их недостатки. Текущие достижения в исследованиях фоточувствительных органических мемристоров могут способствовать их эффективному применению в ближайшем будущем. В этой связи мемристоры на основе парилена (поли-*n*-ксилилен, ППК) представляют несомненный интерес, т. к. они обладают удовлетворительными мемристивными характеристиками, могут быть реализованы в кроссбар-архитектуре, в том числе на гибких подложках, а также изменять свое резистивное состояние по биоподобным правилам [4]. Кроме того, их мемристивные характеристики могут быть улучшены при внедрении графеновых барьерных слоев [5] и наночастиц Ag [6] или MoO_x [7]. В данной работе представлены результаты изучения влияния внедрения наночастиц PbTe в матрицу парилена на их мемристивные характеристики, в том числе при оптическом возбуждении, а также показана возможность их использования для построения НВС, способной к обучению распознаванию образов.

Синтез нанокомпозитов на основе парилен- PbTe проводился с помощью метода газофазной полимеризации на поверхности подложки [8]. В качестве подложки использовалось стекло с нанесенным оксидом индия олова (ITO) в качестве нижнего электрода. Верхние электроды из меди осаждались методом магнетронного

распыления через теневую маску. Мемристивные характеристики (выносливость, надежность, отношение R_{off}/R_{on}, пластичность, энергия переключения) измерены на аналитической зондовой станции Cascade Microtech PM5 при помощи двухканального источника-измерителя Keithley 2636B и генератора Keysight 81150A.

В работе показано, что внедрение PbTe в матрицу парилена приводит к заметному улучшению надежности этих устройств по сравнению с другими мемристорами на основе парилена. Изучен разброс основных характеристик от цикла к циклу и от устройства к устройству. Легко настраиваемая пластичность по кривым STDP и потенциации/депрессии подтверждает потенциал мемристоров ППК-PbTe в нейроморфных приложениях. Показано, что введение наночастиц PbTe приводит к более сложному динамическому резистивному переключению, управляемому как электрическими, так и световыми импульсами. Показана возможность использования данных мемристоров в НВС для решения задачи классификации рукописных цифр из базы данных MNIST.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-19-00200).

Литература

1. Wan W., Kubendran R., Schaefer C. et al. // Nature, 2022. 608, 504.
2. Ryabova M. A., Matsukatova A. N., Emelyanov A. V. et al. // Nanoscale, 2024. Vol. 16. P. 20628.
3. Fu X., Li T., Cai B. et al. // Light Sci. Appl., 2023. Vol. 12. P. 39.
4. Park J., Kim T.-H., Kwon O. et al. // Nano Energy, 2022. Vol. 104. P. 107886.
5. Chen Q., Lin M., Wang Z. et al. // Adv. Electron. Mater., 2019. Vol. 5. P. 1800852.
6. Matsukatova A. N., Vdovichenko A. Y., Patsaev T. D. et al. // Nano Res., 2023. Vol. 16. P. 3207.
7. Minnekhanov A., Matsukatova A., Trofimov A. et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces, 2023. Vol. 15. P. 54996.
8. Trofimov A. D., Emelyanov A. V., Matsukatova A. N. et al. // Nanoscale, 2025. Vol. 17. P. 8484.

УДК 004.896

Симуляция процесса фотолитографии в конвейере OPC обработки топологического слоя для фотошаблона

Фёдоров И. Ю.[1,2], Тагиев Э. Р.[1,2], Метельников А. А.[1]
[1] ПАО «Сбербанк»,
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
IYuFedorov@sberbank.ru, Tagiev.E.R@sberbank.ru, AAMetelnikov@sberbank.ru
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
i.fedorov@misis.ru, tagiev.e.r@misis.ru

Обсуждается структура конвейера обработки топологического слоя микросхемы, реализующего многооконный математический алгоритм формирования элементов OPC (optical proximity correction) в целях повышения разрешения технологического процесса литографии на имеющемся технологическом оборудовании. В рамках предложенного конвейера рассматриваются симуляции процесса литографии с применением компактной физической модели, а также вопросы ее калибровки в виде решения задачи оптимизации. Анализируется накопленный опыт применения данного конвейера оптимизации на оборудовании с источниками 365 и 404 нм.

Ключевые слова: OPC; симулятор; вычислительная литография.

В условиях быстрого развития полупроводниковых технологий особую актуальность получает задача расширения функциональных возможностей существующего литографического оборудования. Это позволяет пошагово перейти к более низким топологическим нормам. В этом случае критические элементы топологического слоя оптимизируются алгоритмами формирования элементов OPC, предлагая тем самым качественное улучшение, которое также может быть использовано в других технологических процессах.

В данной работе предлагается к рассмотрению конвейер обработки критических элементов топологического слоя микросхемы в формате GDSII и их многооконная оптимизация с элементами OPC, внедренная в платформу ИИ-трансформации и апробированная на ряде российских полупроводниковых предприятий. Конвейер оптимизации включает в себя анализ входного топологического слоя, его декомпозицию на уникальные топологии (острова), формирование окон для симуляции и оптимизацию топологии в них с последующей сшивкой полученных результатов. Конвейер схематически продемонстрирован на рис. 1. Оптимизация выполнена с использованием алгоритма ILT Deform [1], дополненного разработанным настраиваемым компактным физическим симулятором (цифровым двойником литографического оборудования).

Калибровка симулятора требовала автоматической сегментации и сопоставления структур фреймов расчетной фоторезистивной маски и полученного снимка с растрового электронного микроскопа (РЭМ) и включала этап калибровки (настройки) оптических параметров и модели резиста безградиентным способом. Результаты калибровки подтверждены экспериментально на литографическом оборудовании с длиной волны 365 и 404 нм в широком диапазоне доз и фокусов. Погрешность предсказания положения контура фоторезистивной маски составила

от 10 до 30 нм (не более одного пикселя РЭМ-снимка). Применение данного симулятора в конвейере обработки топологического слоя позволило отработать алгоритм оптимизации ILTDeform и подтвердить экспериментально возможность уменьшения критического размера до 600 нм (на оборудовании с источником 404 нм) и до 250 нм (на оборудовании с источником 365 нм).

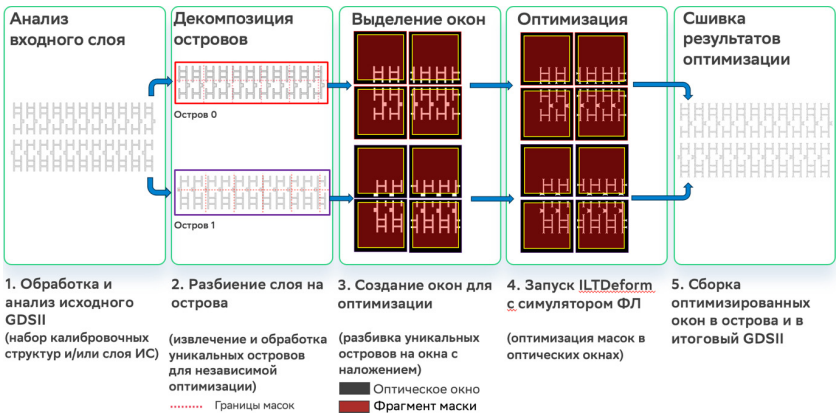


Рис. 1. Схематическая иллюстрация конвейера обработки топологического слоя микросхемы

Полученные результаты сформировали технологический задел, в рамках которого отработаны компоненты модуля калибровки и оптимизации для внедрения на полупроводниковом производстве в виде перспективных компонентов САПР. При этом собрано большое количество уникальных и аннотированных данных для последующего обучения и внедрения ИИ-моделей симуляции и оптимизации, необходимых для перспективного перехода на еще более низкие топологические нормы.

Литература

1. Гаранжа В. А., Капорин И. Е., Щепетов Д. С., Кудрявцева Л. Н., Белокрыс-Федотов А. И., Седунов С. М., Фёдоров И. Ю., Ступников В. В., Чепурин Е. Ф., Федонин М. П. Алгоритмы оптимизации фотошаблона для коррекции эффекта оптической близости на фотолитографе // ВАНТ, 2025. — Вып. 2. — С. 34–56.

УДК 004.383.8.032.26

Кодирующее и декодирующее устройства на основе мемристорно-диодного кроссбара и КМОП-логики для импульсных нейросетей

Бусыгин А. Н., Удовиченко С. Ю., Ибрагим А. Х. А.
Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
a.n.busygin@utmn.ru

Предложены электрические схемы цифровых кодирующего и декодирующего устройств для преобразования информации из двоичного представления в последовательность спайков и обратно. Работоспособность разработанных устройств подтверждена численным моделированием процессов преобразования информации.

Ключевые слова: нейроморфная электроника; импульсные нейросети; импульсное кодирование информации; вычисления в памяти; кодирующее устройство; декодирующее устройство; мемристорные массивы.

Использование устройств с импульсными нейросетями (например, спайковых нейропроцессоров [1]) для обработки информации предполагает их совместное использование с цифровой двоичной электроникой. Поэтому актуальной задачей является разработка алгоритмов и электрических схем, обеспечивающих такое совмещение. Использованные в работе принципы преобразования информации в последовательность спайков опираются на принципы кодирования, выделенные биологами в живых нейронных сетях.

Разработаны полностью цифровые кодирующее (рис. 1*а*) и декодирующее (рис. 1*б*) устройства с использованием мемристорно-диодных массивов. Новым подходом является использование программируемой логической матрицы [2], которая представляет собой набор логических вентилей «И» с отключаемыми входами. Контроль состояний отдельных мемристоров в мемристорно-диодном кроссбар-массиве логической матрицы осуществляется разработанными в [2] периферийными драйверами проводников кроссбар-массива.

Электрическая схема кодирования (рис. 1) выполняет преобразование двоичных чисел в частоту и/или задержки спайков одного или нескольких виртуальных нейронов. Применение мемристорно-диодного кроссбар-массива позволяет задавать произвольный вид преобразования и менять его при необходимости в отличие от схем с LIF-нейронами и мемристорными осцилляторами. В отличие от работы [3], схема формирования задержек является полностью цифровой. Вместо набора отдельных линий задержек на основе RC-цепочек использован мемристорно-диодный кроссбар-массив и цифровой счетчик. Работоспособность разработанной схемы подтверждена численным моделированием процесса кодирования двух четырехразрядных двоичных чисел одновременно в задержки и среднюю частоту двумя популяциями из трех нейронов. Величина задержек спайков при моделировании совпадает с ожидаемым распределением задержек, описываемым гауссовой функцией.

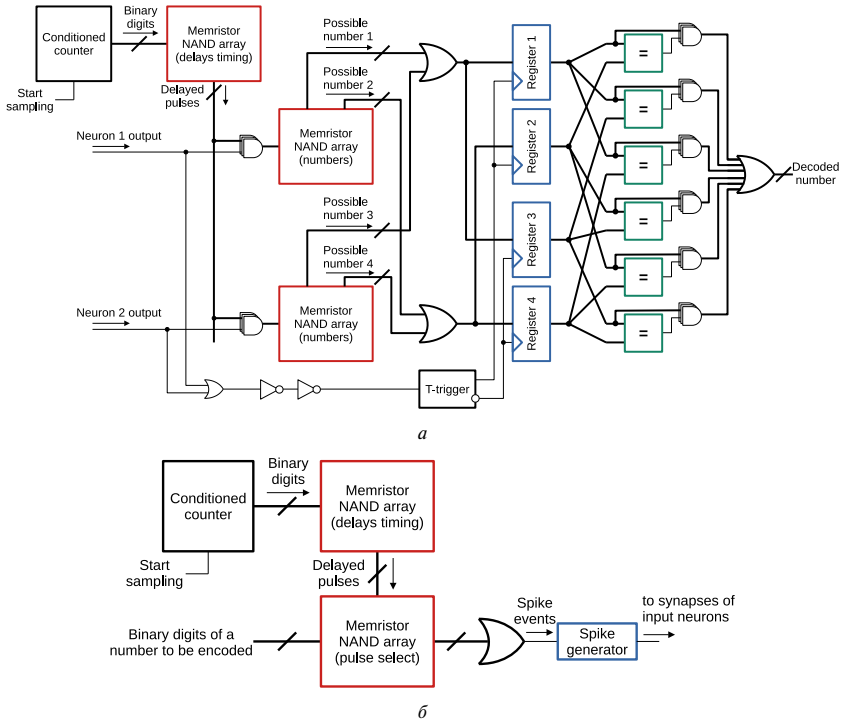


Рис. 1. Разработанные схемы: кодирующее устройство (*а*); декодирующее устройство (*б*)

Разработанное декодирующее устройство предлагается использовать для сжатия информации о последовательности спайков групп нейронов выходного слоя импульсной нейросети. Схема декодирующего устройства является полностью цифровой. Применение мемристорно-диодного кроссбар-массива позволяет задавать произвольную функцию обратного преобразования задержек спайков в числа. Работоспособность декодирующего устройства проверена моделированием процесса декодирования импульсов от популяции из трех нейронов, предварительно закодированными кодирующим устройством. В ходе моделирования декодирующее устройство успешно восстанавливало закодированное во входные спайки двоичное число.

Применение цифровой схемотехники и мемристорно-диодного кроссбар-массива в схемах кодирующего и декодирующего устройств потенциально уменьшает энергопотребление, дает большую интеграцию элементов и, соответственно, меньшую занимаемую площадь на кристалле.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00171, https://rscf.ru/project/24-21-00171.

Литература

1. Pisarev A. D., Busygin A. N., Udovichenko S. Yu., Maevsky O. V. A biomorphic neuroprocessor based on a composite memristor-diode crossbar // Microelectronics Journal, 2020. Vol. 102. Article 104827. URL: https://doi.org/10.1016/j.mejo.2020.104827.
2. Busygin A. N., Udovichenko S. Yu., Pisarev A. D., Ebrahim A. H. A., Gubin A. A. A logic device based on memristor-diode crossbar and CMOS periphery as spike router for hardware neural network // Integration, the VLSI Journal, 2024. Vol. 97. Article 102203. URL: https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2024.102203.
3. Busygin A. N., Ebrahim A. H., Pisarev A. D., Udovichenko S. Yu. Input Device for a Biomorphic Neuroprocessor Based on a Memristor-Diode Crossbar for the Pulse Coding of Information // Nanobiotechnology Reports, 2021. Vol. 16. № 6. P. 798–803. URL: https://doi.org/10.1134/S2635167621060069.

УДК 004.896

Проектирование сверхбольших интегральных схем с использованием больших языковых моделей

Колонин А. Г.
Новосибирский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1
anton.kolonin@yandex.ru

Показаны варианты использования больших языковых моделей для проектирования сверхбольших интегральных схем, включая генерацию кода Verilog/VHDL и тестов по спецификациям, а также верификацию кода. Представлены результаты базовой апробации с использованием набора больших языковых моделей, предложены вычислительные архитектуры ансамблированной конкурентной генерации и верификации с арбитражом, указаны возможные риски и проблемы, требующие решения.
Ключевые слова: LLM; БЯМ; VLSI; СБИС; Verilog; VHDL; большая языковая модель; проектирование сверхбольших интегральных схем.

На сегодняшний день важнейшим этапом проектирования сверхбольших интегральных схем (СБИС, very large scale integration, VLSI) является логическое проектирование, когда на основе текстовых спецификаций создается программное описание логики на языках Verilog или VHDL. Также на этом этапе может осуществляться дополнительная верификация полученных кодов со сверкой их на предмет соответствия исходным исходным спецификациям и отсутствия не предусмотренной спецификациями логики, что особо важно для обеспечения «доверенности» создаваемой аппаратной базы. Кроме того, на основе спецификаций могут создаваться тесты для программного тестирования верифицируемого кода СБИС. Как показано в работах [1, 2, 3], на этих этапах могут быть использованы современные большие языковые модели (БЯМ, или large language models, LLM).

Мы исследовали принципиальную применимость для задач генерации и верификации кода Verilog ряда БЯМ/LLM, как доступных на зарубежном облачном развертывании (ChatCPT и Grok), так и развернутых локально (Llama и Qwen2) на доступном штатном оборудовании — MSI Raider GE77HX 12UGS notebook with 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12800HX 2,00 GHz, 32.0 GB RAM, 23.9 GB GPU NVIDIA GeForce RTX 3070 Ti Laptop GPU; 2) MacBook Pro with 2,9 GHz 6-Core Intel Core i9, Radeon Pro 560X 4GB Intel UHD Graphics 630 1536 MB, 32 GB 2400 MHz DDR4. При экспериментах всегда одна модель использовалась для генерации кода Verilog по спецификации, а другая — для его верификации как такового и затем относительно исходной спецификации. Эксперимент показал принципиальную возможность решения обеих поставленных задач в обоих (облачном и локальном) вариантах развертывания.

Возможность использования различных моделей позволяет рассматривать возможность реализации вычислительных архитектур «доверенного» проектирования СБИС на основе ансаблированной конкурентной генерации и верификации с арбитражом, когда целевой код генерируется различными моделями на основе одной и той же спецификации, а затем альтернативные варианты генерации верифицируются другими различными моделями с арбитражом делаемых выводов.

Кроме того, имеющиеся публикации [1, 2,3] указывают на возможность обучения собственных БЯМ/LLM для решения указанных задач на основе как публичных, так и собственных закрытых данных.

В качестве проблем, требующих решения, мы указываем необходимость изучения вопроса о возможности минимизации «галлюцинаций», проработки возможности компактизации и структуризации результатов верификации для оперативного анализа, возможности формализации и автоматизации самого этого анализа, ответственности за принятие решений на основе автоматической верификации, а также технические и методические возможности дообучения моделей на собственных данных.

Литература

1. Liu Shang, Fang Wenji, Lu Yao, Wang Jing, Zhang Qijun, Zhang Hongce, Xie Zhiyao. RTLCoder: Fully Open-Source and Efficient LLM-Assisted RTL Code Generation Technique // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2024, IEEE.
2. Liu Shang, Fang Wenji, Lu Yao, Zhang Qijun, Zhang Hongce, Xie Zhiyao. RTLCoder: Outperforming GPT-3.5 in Design RTL Generation with Our Open-Source Dataset and Lightweight Solution // 2024 IEEE International Workshop on LLM-Aided Design, 2024, IEEE.
3. Liu Shang, Lu Yao, Fang Wenji, Li Mengming, Xie Zhiyao. OpenLLM-RTL: Open Dataset and Benchmark for LLM-Aided Design RTL Generation // 2024 IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design (ICCAD), 2024, IEEE/ACM.

УДК 004.89

Моделирование аппаратного дофаминоподобного обучения импульсной нейросети с мемристорными синаптическими весами

Аляев И. В.[1], Суражевский И. А.[1], Ильясов А. И.[1,2], Рыльков В. В.[1], Демин В. А.[1]
[1] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Разработана Verilog-A-модель импульсной нейросети, проведено ее дофаминоподобное обучение в решении задачи распознавания простейших образов. Показана необходимость использования однополярных импульсов постсинаптических нейронов для реализации динамической пластичности типа «колокол» и «антиколокол», а также положительное влияние тормозного слоя нейронов на работу системы.
Ключевые слова: нейроморфные вычисления; нейросинаптическое ядро; мемристор.

В настоящее время одним из перспективных направлений развития нейросетевых алгоритмов является область обучения с подкреплением. Показав значительные результаты в таких задачах искусственного интеллекта, как распознавание и генерация речи, текста и изображений, формальные алгоритмы с трудом поддаются обучению в задачах оптимального управления агентами с большим числом (более 15) степеней свободы, а также отличаются низким уровнем универсальности такого обучения, когда даже незначительное изменение среды приводит к некорректной работе всей системы.

Одним из возможных решений считается моделирование биологически подобных систем с формированием оценочной структуры среды на основе дофамина — медиатора вознаграждения в нервной системе человека [1]. Выработка дофамина ассоциируется с неожиданно большим подкреплением и субъективным ощущением удовольствия, а его отсутствие — со слишком незначительной по сравнению с ожидаемой наградой и, соответственно, с неприятными ощущениями. В итоге формируется некоторый набор ценностей, который формирует поведение животного, отличающееся адаптивностью и вариативностью. Относительно недавние исследования показывают, что дофамин может оказывать влияние на динамическую синаптическую пластичность, зависящую от интервалов между импульсами (спайками) (STDP, Spike-Timing-Dependent Plasticity), что обусловливает мотивацию задачи по реализации на аппаратном уровне обучения с подкреплением импульсной нейросети с мемристорными синаптическими весами [2].

В проведенном исследовании описана модель импульсной нейросети с поддержкой дофаминоподобного обучения в архитектуре «четыре входных пресинаптических нейрона — два выходных классифицирующих нейрона и два нейрона тормозного слоя», а также представлены оригинальные элементы для реализации данной системы на аппаратном уровне. Сформулированы требования к нейронам, которые необходимо удовлетворить, с одной стороны, для получения подходящей

модуляции окон STDP под действием дофаминоподобного стимула (тип «колокол» и «антиколокол»), с другой — для сохранения логики работы правил хеббовского обучения. Представлены результаты тестового обучения нейросети с помощью частотного кодирования входных простейших образов.

Литература

1. Schultz W. Multiple Dopamine Functions at Different Time Courses // Annu. Rev. Neurosci, 2007. Vol. 30. P. 259.
2. Nikiruy K. E., Emelyanov A. V., Demin V. A., Sitnikov A. V., Minnekhanov A. A., Rylkov V. V., Kashkarov P. K., Kovalchuk M. V. Dopamine-like STDP modulation in nanocomposite memristors // AIP Advances, 2019. Vol. 9. P. 065116.

УДК 004.891.3

Модель для классификации ноцицептивных состояний на основе спинальных и кортикальных вызванных потенциалов при лазерной и холодовой стимуляциях

к. ф.-м. н. Рябкин Д. И.[1,2], Путовит Г. М.[1], д. т. н. Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
ryabkindi@gmail.com
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Разработана модель для классификации ноцицептивных состояний, предназначенная для создания адаптивных систем стимуляции спинного мозга. На основе анализа спинальных и кортикальных потенциалов с помощью алгоритмов машинного обучения достигнута точность классификации состояний «боль/неболь» свыше 0.82.

Ключевые слова: ноцицепция; машинное обучение; стимуляция спинного мозга (SCS); вызванные потенциалы.

Объективная оценка боли является одной из ключевых нерешенных задач современной медицины и нейрофизиологии [1]. Разработка систем нейромодуляции с биологической обратной связью, в частности стимуляторов спинного мозга, требует наличия надежных нейрофизиологических маркеров ноцицепции для автоматического регулирования терапевтического воздействия.

Цель работы

Разработка и валидация модели для автоматической классификации ноцицептивных состояний на основе электрофизиологических сигналов, регистрируемых на уровне спинного и головного мозга.

Материалы и методы

Для построения и тестирования модели были использованы два набора данных: открытый набор данных кортикальных вызванных потенциалов [2] и данные, полученные в ходе проведенного острого эксперимента на крупной лабораторной модели (свинья). В ходе эксперимента проводилась многоканальная регистрация спинальных (эпидурально) вызванных потенциалов в ответ на локальную холодовую стимуляцию задней конечности.

Сигналы сегментировались на эпохи (окна) до (класс «неболь») и после (класс «боль») стимуляции. Для каждой эпохи рассчитывался вектор признаков, включающий статистические, спектральные и энтропийные характеристики сигнала. В целях построения оптимального классификатора проводилось сравнение нескольких алгоритмов машинного обучения: метод опорных векторов (SVM), k-ближайших соседей (k-NN) и ансамблевые методы градиентного бустинга (LightGBM, CatBoost). Процедура оптимизации включала подбор наилучшей модели, выбор наиболее информативного канала ЭЭГ и определение оптимальной длины анализируемого окна данных.

Результаты

В результате проведенной оптимизации наилучшую производительность продемонстрировала модель на основе градиентного бустинга. Итоговая точность (accuracy) бинарной классификации состояний «боль/неболь» на тестовой выборке превысила 0,82. Анализ важности признаков показал, что наибольший вклад в точность классификации вносят энтропийные метрики (в частности, Sample Entropy и Permutation Entropy), отражающие увеличение сложности и непредсказуемости нейрональной активности в ответ на ноцицептивный стимул.

Заключение

Разработана и валидирована эффективная модель, способная с высокой точностью классифицировать ноцицептивные состояния по данным спинальной и кортикальной электрофизиологической активности. Доказана высокая информативность энтропийных характеристик сигнала как маркеров боли. Полученные результаты являются важным шагом на пути к созданию адаптивных систем нейростимуляции для персонализированного контроля хронической боли.

Литература

1. Prunskis J. V., Masys T., Pyles S. T., Abd-Elsayed A., Deer T. R. et al. The Application of Artificial Intelligence to Enhance Spinal Cord Stimulation Efficacy for Chronic Pain Management: Current Evidence and Future Directions // Current Pain and Headache Reports, 2025. Vol. 29. P. 85.
2. Tiemann L., Hohn V. D., Ta Dinh S., May E. S., Nickel M. M. et al. Distinct patterns of brain activity mediate perceptual and motor and autonomic responses to noxious stimuli // Nature Communications, 2018. Vol. 9. № 1. P. 4487.

УДК 621.382; 004.383.8.032.26

Численное моделирование отказоустойчивости мемристорного кроссбар-массива при деградации его электрических параметров

Неустроев А. А., Бусыгин А. Н., д. ф.-м. н., Удовиченко С. Ю.
Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень Тюменской области, ул. Володарского, 6
al.a.neustroev@utmn.ru

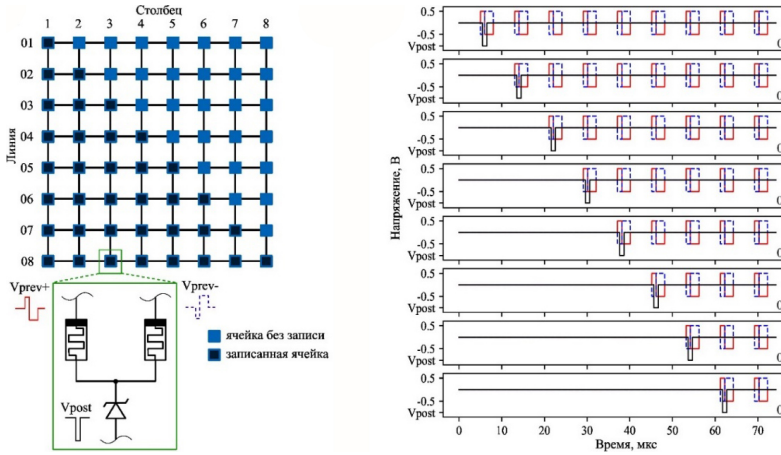
Проведено численное моделирование мемристорного кроссбар-массива с использованием модели мемристора на гладких функциях, отказоустойчивости аппаратной нейросети. Проведен анализ влияния степени деградации электрических параметров мемристора на деградацию выходного сигнала с кроссбар-массива.
Ключевые слова: мемристор; кроссбар; кроссбар-массив; деградация сигнала; селектор; нейроморфные вычисления.

В настоящее время мемристоры находят все большее применение как элементы микроэлектроники. Образованные из мемристоров и селекторов кроссбар-массивы с ортогонально расположенными электродами применяются в качестве компонентов нейроморфных устройств и аппаратных нейросетей. В частности, топология 1D2M (комплементарная пара мемристоров с диодом Зенера) реализует работу нейросети по правилу обучения «пластичность, зависящая от времени спайка» (STDP, Spike-timing-dependent plasticity), лежащему в основе биологических нейронных сетей [1].

Немаловажную роль в обеспечении работоспособности аппаратной нейросети играет анализ влияния нежелательных эффектов в кроссбар-массиве. Деградация электрических характеристик мемристора напрямую влияет на параметры выходного сигнала кроссбар-массива, может привести к потере точности аппаратной нейросети, снижению эффективности или отказу работы.

В работе проведен анализ влияния степени деградации электрических характеристик мемристора в составе ячейки кроссбар-массива топологии 1D2M на деградацию выходного сигнала и отказоустойчивость аппаратной импульсной нейросети путем численного моделирования схемотехнической модели кроссбар-массива. Для реализации изменчивости параметров была выбрана и модифицирована схемотехническая модель мемристора на гладких функциях [2]. Схема численного моделирования данного кроссбар-массива представлена на рис. 1*а*. Форма и вид последовательностей импульсов показаны на рис. 1*б*.

Оценка отказоустойчивости выполнена путем измерения показателей точности при классификации тестовой выборки датасета MNIST аппаратной импульсной нейросети с 49 входами и 10 выходами одного слоя. В качестве матрицы синаптических весов выступает запоминающая матрица на основе кроссбар-массива топологии 1D2M размерностью 49 столбцов на 10 строк. Сравнены между собой модели без деградации и с добавлением деградации мемристора. Численный эксперимент показан на рис. 2.



а *б*

Рис. 1. Схема моделирования кроссбар-массива (*а*) и последовательности импульсов (*б*)

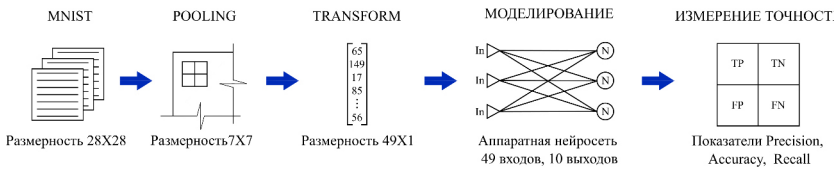


Рис. 2. Численный эксперимент оценки отказоустойчивости аппаратной нейросети

Анализ деградации выходного сигнала был проведен для мемристоров нескольких подходящих структур: Pt/HfO_2/TiN [3], Pt/YSZ/Zr [4], Pt/TiO_2/Pt [5]. Мемристоры из данных материалов характеризуются достаточно высоким отношением сопротивлений в открытом и закрытом состоянии, высокой скоростью переключения, подходящей для записи множества значений синаптических весов в виде сопротивления мемристора.

Были измерены значения токов записи в ячейки и чтения из них при различных значениях коэффициента деградации, проведен анализ зависимости деградации сигналов от вида материала, формы вольт-амперной кривой, количества ячеек в линии кроссбар-массива. Были измерены показатели точности аппаратной нейросети, проведен анализ потери точности при изменении коэффициента деградации мемристора, оценена отказоустойчивость. Представлены рекомендации для учета эффекта деградации, применимости различных материалов мемристоров, повышения уровня отказоустойчивости аппаратной нейросети.

Работы выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-21-00171), https://rscf.ru/project/24-21-00171.

Литература

1. Pisarev A. D. et al. A biomorphic neuroprocessor based on a composite memristor-diode crossbar // Microelectronics Journal, 2020. Vol. 102. P. 104827.
2. Yakopcic C. et al. A memristor device model // IEEE electron device letters, 2011. Vol. 32. № 10. P. 1436–1438.
3. Peng Z. et al. HfO_2-based memristor as an artificial synapse for neuromorphic computing with tri-layer $HfO_2/BiFeO_3/HfO_2$ design // Advanced Functional Materials, 2021. Vol. 31. № 48. P. 2107131.
4. Upadhyay N. K. et al. A memristor with low switching current and voltage for 1S1R integration and array operation // Advanced Electronic Materials, 2020. Vol. 6. № 5. P. 1901411.
5. Yang J. J. et al. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices // Nature nanotechnology, 2008. Vol. 3. № 7. P. 429–433.

УДК 51-72, 538.975.

Квазифрактальные пленки серебра вблизи порога перколяции для нейроморфных вычислений

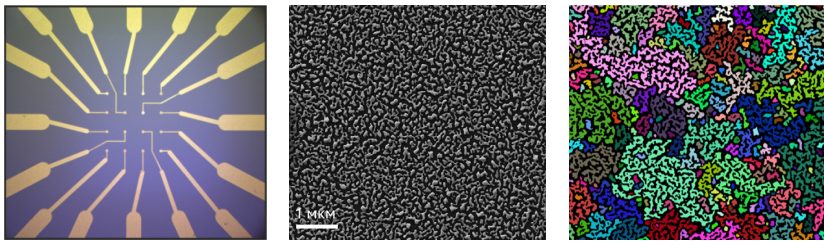
Ксенофонтова П. О., Сибатов Р. Т., Рязанов Р. М., Савицкий А. И.
НПК «Технологический центр»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
polina.ksenofontova.2002@mail.ru

Предложен метод формирования островковых пленок серебра вблизи порога перколяции. Оптимизированные пленки имеют квазифрактальную структуру, а их критическая динамика подчиняется статистике Леви. Это делает их перспективными для обработки сигналов с долговременными корреляциями.
Ключевые слова: резервуарные вычисления; островковые пленки серебра; критическая динамика; распределение Леви.

Перколяционные системы с пластичностью, такие как островковые мемристивные пленки, ансамбли наночастиц [1] или нанопроволок [2], перспективны для нейроморфных вычислений благодаря проявлению самоорганизованной критичности и способности формировать безмасштабные сети [3]. Критическое состояние этих систем вблизи порога перколяции обеспечивает низкое напряжение мемристивных переключений, высокую чувствительность к малым возмущениям и нелинейный отклик, что необходимо, в частности, для эффективной обработки временных сигналов [1, 2]. Принципиальное значение имеет поддержание систем вблизи перколяционного порога. За счет формирования и разрыва атомарных нитей (филаментов) между кластерами возникает динамическая перколяция, обеспечивающая уникальную комбинацию нелинейного отклика, эффекта затухающей памяти и стохастической проводимости [1–3].

В работе предложена методика формирования островковой пленки серебра (ОПС) вблизи порога перколяции с помощью термически-вакуумного испарения путем оптимального выбора испаряемой массы, времени и температуры отжига. ОПС состоят из квазифрактальных кластеров с размерностью Хаусдорфа $d_{\text{н}} = 1{,}6$–$1{,}9$ с многомасштабным распределением по размерам. Структурные особенности пленок исследованы методами электронной микроскопии и фрактального анализа.

ОПС испарялась на мультиэлектродную ячейку на основе пластины SiO_2 (рис. 1*а*) с золотыми электродами толщиной 150 нм. Для выбранной массы навески 20 мг исходная ОПС превышала порог перколяции, что подтверждено ее резистивным поведением на вольт-амперной характеристике. При оптимальном отжиге 230 °C в течение 30 минут в условиях вакуума 10^{-5} Торр ОПС распадается на фрактальные кластеры серебра различных масштабов (рис. 1*б*,в), представляющие фрагменты перколяционного кластера.



а *б* *в*

Рис. 1. Исследуемый образец с ОПС: изображение мультиэлектродной ячейки в оптический микроскоп, зазоры 80 мкм (*а*); РЭМ-изображение пленки серебра после отжига (*б*); цветовое разделение отдельных кластеров (*в*)

Исследована стохастическая динамика проводимости полученных пленок в диапазоне напряжений 0,1–1 В. При указанных напряжениях достигается критическое состояние, в котором макроскопическая структура остается стабильной, но проводимость между кластерами динамически изменяется, что обеспечивает ее высокую чувствительность к внешним воздействиям в сочетании с нелинейным откликом. Распределение амплитуд скачков и размеров лавин успешно аппроксимировано устойчивыми законами Леви. Времена ожидания между скачками проводимости имеют степенное распределение с показателем $\beta < 1$. Наблюдение самоорганизованной критичности и немарковской динамики в полученных ОПС подтверждает их перспективность для обработки временных сигналов с долговременными корреляциями.

Работа выполнена в рамках гос. задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект FNRM-2025-0010).

Литература

1. Mallinson J. B. et al. Experimental demonstration of reservoir computing with self-assembled percolating networks of nanoparticles // Advanced Materials, 2024. Vol. 36. № 29. P. 2402319.
2. Milano G. et al. In materia reservoir computing with a fully memristive architecture based on self-organizing nanowire networks // Nature materials, 2022. Vol. 21. № 2. P. 195–202.
3. Shirai S. et al. Long-range temporal correlations in scale-free neuromorphic networks // Network Neuroscience, 2020. Vol. 4. № 2. P. 432–447.
4. Sibatov R. T. et al. Self-Organized Memristive Ensembles of Nanoparticles Below the Percolation Threshold: Switching Dynamics and Phase Field Description // Nanomaterials, 2023. Vol. 13. № 14. P. 2039.
5. Milano G. et al. Self-organizing neuromorphic nanowire networks as stochastic dynamical systems // Nature Communications, 2025. Vol. 16. № 1. P. 3509.

Механизм универсальной компиляции вычислительного графа нейросетевых моделей для специализированных отечественных аппаратных платформ искусственного интеллекта

Баулин Ф. А.[1,2], Бабинцев Л. В.[1,2], Рожин А. К.[1,2], Щукин А. А.[1], Губазов Д. Д.[1], Нефедов С. И.[1]

[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
fabaulin_2@edu.hse.ru, lvbabintsev@edu.hse.ru, akrozhin@edu.hse.ru, aaschukin_3@edu.hse.ru, ddgubazov@edu.hse.ru, snefedov@hse.ru
[2] ООО «Аэтернум»
121205, г. Москва, Инновационный Центр Сколково
fabaulin@aeternumai.ru, lvbabintsev@aeternumai.ru, akrozhin@aeternumai.ru

Разработка и внедрение специализированных ускорителей для логического вывода нейросетевых моделей требует гибких и адаптируемых средств компиляции, способных учитывать архитектурные особенности целевого оборудования. В данной работе представлен универсальный механизм компиляции нейронных сетей, ориентированный на аппаратные платформы с нестандартной архитектурой и собственным набором инструкций.

Ключевые слова: искусственный интеллект; нейронные сети; энергоэффективные вычислительные системы; компиляторные технологии.

Современное разнообразие архитектур нейроускорителей — от встроенных процессоров до специализированных чипов и FPGA — требует гибких компиляторов, которые могут адаптировать нейросетевые модели под аппаратные особенности конкретного устройства [1, 2]. Существующие решения часто ориентированы на узкий класс платформ и не позволяют быстро интегрировать поддержку новых конфигураций. В данной работе рассматривается подход к созданию универсального компилятора нейронных сетей, который обеспечивает высокую адаптивность при сравнительно низких затратах на сопровождение и расширение.

Ключевыми компонентами системы являются механизмы преобразования графа вычислений [3], статическое распределение памяти с учетом особенностей архитектуры и генерация кода для низкоуровневого программного интерфейса. Архитектура проекта позволяет реализовывать поддержку новых устройств без полной переработки системы, что значительно ускоряет процесс разработки и упрощает исследование альтернативных решений. В качестве исходного формата принимаются нейросети в широко распространенном формате ONNX, что обеспечивает совместимость с основными инструментами машинного обучения.

Результаты экспериментов показали применимость разработанного механизма к ряду абстрактных и реальных платформ. Универсальность подхода позволяет использовать его как основу для реализации компиляторов под исследовательские и узкоспециализированные ускорители. В статье обсуждаются архитектурные решения, ограничения и перспективы дальнейшего развития, включая оптимизации времени компиляции, внедрение профилирования и автоматическое построение модели памяти устройства.

Литература

1. Vivienne Sze, Yu-Hsin Chen, Tien-Ju Yang, Joel S. Emer. Efficient Processing of Deep Neural Networks. — 2020
2. Кателкин Н. И., Бабинцев Л. В., Баулин Ф. А., Ильянова Д. С., Рожин А. К., Минеев А. В. Гетерогенная вычислительная система для задач локального искусственного интеллекта // Научная электронная библиотека, 2024. — 17 с.
3. Rotem N., Fix J., Abdulrasool S. et al. Glow: Graph Lowering Compiler Techniques for Neural Networks // arXiv:2009.00739 [cs.LG]. 2020.

УДК 537.9

Новые мемристорные структуры конденсаторного типа диэлектрик — нанокомпозит

Шакуров А. Р.[1], Ситников А. В.[1,2], д. ф.-м. н., Бабкина И. В.[1], Никонов А. Е.[1], к. ф.-м. н.

[1] Воронежский государственный технический университет
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
Aleks.shakurov@mail.ru
[2] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Получены мемристорные структуры конденсаторного типа на основе нанокомпозитных структур $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$, $(Co_{50}Fe_{50})_x(SiO_2)_{100-x}$ и $(Co)_x(SiO_2)_{100-x}$ с диэлектрическими прослойками $LiNbO_3$, Y_2O_3, $ZrYO_2$ и $HfBO_2$. Исследован комплекс основных мемристивных свойств полученных структур и предложены возможные пути их оптимизации.

Ключевые слова: мемристор; нанокомпозит; ReRam; резистивное переключение.

Одним из приоритетных направлений развития современной микроэлектроники является разработка новой электронно-компонентной базы для создания биоподобных нейроморфных вычислительных систем (НВС). Перспективными для решения данной задачи являются мемристивные элементы — структуры, способные изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от прошедшего через них заряда. Данное свойство обеспечивает мемристорам ряд преимуществ в сравнении с КМОП-элементами в части энергопотребления, масштабирования и аналогового (биоподобного) функционирования при использовании их для реализации НВС. Однако для эффективного применения в современной электронике мемристору необходимо обладать рядом практически значимых свойств, таких как отношение сопротивлений Roff/Ron, циклическая устойчивость резистивных переключений, временная стабильность резистивных состояний [1, 2]. Поэтому актуальной является задача по поиску новых материалов, удовлетворяющих данным требованиям.

В работе исследованы мемристивные свойства структур металл — нанокомпозит — диэлектрик — металл (Me/НК/ДЭ/Me): Cu/(CoFeB)x$(SiO_2)_{100-x}$/$LiNbO_3$/Cr/Cu/Cr/ситалл, Cu/(CoFeB)x$(SiO_2)_{100-x}$/ZrO_2(Y)/Cr/Cu/Cr/ситалл, Cu/(CoFeB)x$(SiO_2)_{100-x}$/HfO_2(B)/Cr/Cu/Cr/ситалл, Cu/(CoFeB)x$(SiO_2)_{100-x}$/ZrO_2(Y)/Cr/Cu/Cr/ситалл, Cu/(CoFe)x$(SiO_2)_{100-x}$/$ZrYO_2$/Cr/Cu/Cr/ситалл и Cu/(Co)x$(SiO_2)_{100-x}$/ $ZrYO_2$/Cr/Cu/Cr/ситалл, полученные методом ионно-лучевого распыления.

Выявлено, что во всех исследуемых структурах наблюдается многофиламентное биполярное резистивное переключение, обусловленное использованием НК в качестве одного из контактных электродов. Отношение Roff/Ron в зависимости от элементного состава и концентрации металлической фазы составляет ≈5,5–100. Кроме того, присутствует возможность индуцирования стабильных резистивных состояний с произвольным значением сопротивления в диапазоне между Roff и Ron. Обнаружено существенное влияние элементного состава НК и ДЭ-прослойки на временную стабильность резистивных состояний и количество устойчивых

циклов резистивного переключения. Так, при использовании прослойки $LiNbO_3$ наблюдается деградация сопротивления в состоянии Roff, в то время как в остальных структурах данных параметр остается устойчивым как минимум в течение 60 минут. Данное влияние можно компенсировать при отжигах структуры до 300 °C. Также обнаружено, что исключение бора из состава НК позволяет существенно (с ≈2500 до 10000) увеличить количество устойчивых циклов резистивного переключения. Дальнейшие исследования будут направлены на объяснение данного эффекта.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 25-29-00215.

Литература

1. Zhang T., Yang K., Xu X., Cai Y. et al. Memristive devices and networks for brain-inspired computing // Phys. Status Solidi RRL, 2019. Vol. 13. P. 1900029.
2. Zhang Y., Wang Z., Zhu J., Yang Y. et al. Brain-inspired computing with memristors: Challenges in devices, circuits, and systems // Appl. Phys. Rev., 2020. Vol. 7. P. 011308.

УДК 621.3.049

Искусственный интеллект для совместного проектирования программно-аппаратных нейроускорителей

Дорофеев В. П.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
dorofeev.vp@phystech.edu

Проведено исследование возможностей использования современных средств искусственного интеллекта и системного инжиниринга для совместного проектирования программно-аппаратных нейроускорителей для реализации обучения и вывода гибридной модели Nemotron-H.
Ключевые слова: искусственный интеллект; совместное проектирование; нейроускорители; большие языковые модели; модель структурированного пространства состояний; LLM; Transformer; Mamba.

В данной работе изучаются возможности использования открытой системы искусственного интеллекта DeepSeek [1] для обратного инжиниринга, совместного проектирования и разработки программно-аппаратных нейроускорителей. Для определения требований к системе программно-аппаратных ускорителей выбрана задача обучения и использования большой языковой модели Nemotron-H с гибридной архитектурой Transformer-Mamba компании NVIDIA [2].

На первом этапе на основе содержания статьи [2] система DeepSeek строит модель программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего обучение и использование модели Nemotron-H, на языке системного моделирования SysML v2 [3]. На следующих этапах проводится обратный инжиниринг и разработка моделей аппаратных и программных компонентов этой системы. Аппаратные компоненты анализируются и проектируются в синтаксисе SysML v2, на основе полученных моделей генерируется код на языках Chisel и SystemVerilog. Программные компоненты анализируются и проектируются на языке UML [4], на основе полученных моделей генерируется код на Scala и Python. Проводится формальная верификация кода с использованием инструментария Lean [5]. Все данные работы выполняются системой DeepSeek в режиме чата с человеком. Использование инструментов системного (SysML v2) и программного (UML) инжиниринга повышает прозрачность этих работ. При формулировке задач верхнего уровня (например, разработка на основе требований к инструментарию MegatronLM или разработка 64-ядерного процессора на системе команд x86_64) система генерирует упрощенный код с комментариями по необходимому дополнительному функционалу. Но при конкретизации задач до уровня набора инструкций и архитектуры процессора, компилятора и ассемблера система генерирует решения, пригодные для дальнейшего использования в разработке программно-аппаратного комплекса.

Результаты исследования доступны по ссылке: https://disk.360.yandex.ru/d/uQsuT5wsxYYkHQ.

Публикация выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме FNEF-2024-0001.

Литература

1. Liu A. et al. Deepseek-v3 technical report // arXiv preprint arXiv:2412.19437, 2024.
2. Blakeman A. et al. Nemotron-h: A family of accurate and efficient hybrid mamba-transformer models // arXiv preprint arXiv:2504.03624, 2025.
3. Bajaj M., Friedenthal S., Seidewitz E. Systems modeling language (SysML v2) support for digital engineering // Insight, 2022. Vol. 25. № 1. P. 19–24.
4. Pilone D., Pitman N. UML 2.0 in a Nutshell. O'Reilly Media, Inc., 2005.
5. De Moura L. et al. The Lean theorem prover (system description) // Automated Deduction-CADE-25: 25th International Conference on Automated Deduction, Berlin, Germany, August 1–7, 2015, Proceedings 25. — Springer International Publishing, 2015. P. 378–388.

УДК 004.032.26:004.896

Варианты нейроподобной реализации многоагентного управления роботом

Тельминов О. А., к. т. н.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
otelminov@niime.ru

Предлагается многоагентный нейросетевой алгоритм управления роботом. Приводятся оценки вариантов аппаратной реализации.
Ключевые слова: нейросетевые алгоритмы; многоагентные системы; роботы.

Предлагается система управления роботом, основанная на представлении робота, объекта его воздействия, соратников, соперников и окружающей среды с помощью программно-аппаратных агентов. Каждый из них является программной моделью, представляющей соответствующий физический объект, при этом агент робота является его цифровым двойником. В свою очередь агенты в разрезе поведенческой модели представляются на стратегическом, тактическом и рефлекторном уровнях. Каждый из них аппаратно реализуется с помощью нейросетевых алгоритмов в координатах «время принятия решения — размер нейросети».

Рассматриваются варианты нейроподобной реализации основных функций робота — восприятия сенсорной информации, ориентации в пространстве, навигации и планирования, взаимодействия с окружением, принятия решений и управления. Выполнена оценка реализуемости нейросетевых алгоритмов на традиционных [1] нейроускорителях с применением транзисторов и конденсаторов, а также на элементной базе на новых физических принципах (RRAM, MRAM).

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологий и микроэлектроника. — М.: Техносфера, 2020. — 434 с. EDN YEVRRQ.

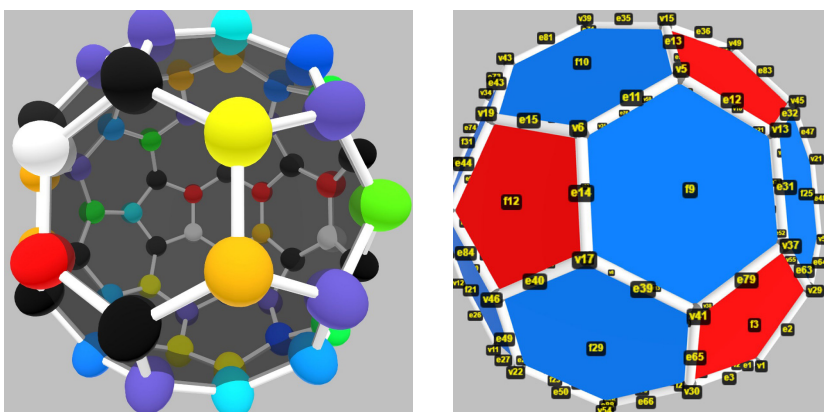
УДК 004.032.26

Нестандартные коннектомы К-систем и нейросетей и химерные состояния на них

Матюшкин И. В., к. ф.-м. н., Тельминов О. А., к. т. н., Локтионов А. Д.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
imatyushkin@niime.ru

Обсуждаются принципы выбора коннектома для ИНС и К-систем, прежде всего в маломасштабном пределе, а также критерии их сравнения и некоторые аспекты визуализации на примере фуллерена C_{60}. Для таких коннектомов дается формализация химерного состояния.
Ключевые слова: ИНС; коннекционизм; коннектомика; нелинейная динамика; химерное состояние.

Переход от искусственных нейросетей (ИНС) к К-системам [1] как к более общему конструкту усиливает значение коннектома и повышает статус коннектомики [2]. Авторы [3], выделяя коннектомы «тесного мира» в клеточных автоматах, ставят вопрос о влиянии коннектома на динамику сети. Проблематика химерных состояний [4], вышедшая из модели Курамото для связанных осцилляторов, требует обобщения, т. е. поиска сходных пространственно-временных феноменов для сетей с нестандартными коннектомами. Для маломасштабных сетей с числом элементов 30–300 такой поиск облегчается с учетом достижений научной визуализации [5]. К стандартным архитектурам мы причисляем послойную, сверточную ИНС, отчасти простого бинарного дерева.



а *б*

Рис. 1. Визуализации в авторской программе http://adloktionov.ru: начальное состояние по правилу раскраски *n*-й вершины по правилу *round*(8·sin(πn/60)) (*а*); визуализация граней индексами вершин, ребер, граней (*б*). Использованы данные https://nanotube.msu.edu/fullerene/fullerene.php?C=100

Источником нестандартных коннектомов были кортикальные структуры и бионейросети. Мы предлагаем обратиться к опыту кристаллографии: мультиплицированным ячейкам Браве, квазикристаллам, фуллеренам. Принцип регуляризации коннектома как необходимый копромисс между решеткой и хаотическими связями можно задать в виде многогранника и для масштабирования дополнить идеей фрактала, т. е. в вершине многогранника стоит такой же многогранник, например платоново, архимедово или каталаново тело, причем в пространстве размерности более трех. Принцип регуляризации может быть арифметическим по аналогии со спиралью Улама. Фуллерен C_{60} в каркасно-реберной семантике визуализации имеет масштаб (число элементов) m = 60 и степень (число связей на элемент) d = 3, а в семантике граней — m = 32 d = $(20 \cdot 6 + 5 \cdot 12)/32 = 5{,}625$.

Для сплошных сред непрерывный аналог химерного состояния есть солитон, для разреженных коннектомов нужна его новая формализация, а также нетривиальная визуализация.

Литература

1. Матюшкин И. В., Тельминов О. А. Формально-философские вопросы коннекционизма и актуальные проблемы разработки нейроморфных систем // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 2 (186). — С. 49–59. DOI: 10.7868/S2410993222020099. EDN LWHCSF.
2. Лебедева Н. Н., Майорова Л. А., Каримова Е. Д., Казимирова Е. А. Коннектомика: нейрофизиология, достижения и перспективы // Успехи физиологических наук, 2015. — Т. 46. — № 3. — С. 17–45.
3. Кузнецов О. П. Сложные сети и распространение активности // Автоматика и телемеханика, 2015. — № 12. — С. 3–26. EDN VKXJHT.
4. Schöll E., Zakharova A., Andrzejak R. G., eds. Chimera States in Complex Networks. Lausanne: Frontiers Media SA, 2020. 146 p. DOI: 10.3389/978-2-88963-311-1.
5. Rauber P. E., Fadel S. G. et al. Visualizing the Hidden Activity of Artificial Neural Networks // January 2016 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 23(1):1-1. DOI: 10.1109/TVCG.2016.2598838.

УДК 538.958

Селенсодержащие фазопеременные материалы с низкими оптическими потерями для приложений ИК-фотоники

Киселев А. В.[1], Бурцев А. А.[1], Михалевский В. А.[1], Ионин В. В.[1], Невзоров А. А.[1,2], Гребенев В. В.[1], Лотин А. А.[1,3]

[1] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1

[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» 119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

[3] Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9

Представлены результаты комплексного исследования термокинетических, структурных, оптических и транспортных свойств различных состояний фазопеременных материалов на основе селена. Продемонстрировано оптическое управление фазосдвигающей ячейкой на основе фазоизменяемых материалов.
Ключевые слова: PCM; оптические свойства; активная фотоника; оптическое управление.

Представлены результаты комплексного исследования термокинетических, структурных, оптических и транспортных свойств различных состояний фазопеременных материалов на основе селена [1]. Исследованные материалы демонстрируют низкие оптические потери и высокий коэффициент отражения в большей части ИК-спектра. Изменения структурных свойств проанализированы методами рентгеноструктурного и комбинационного рассеяния. Особенности фазовых превращений описаны методами термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии. Представлено экспериментальное исследование оптического контроля фазового сдвига оптического пучка в свободном пространстве, вызванного формированием слоистой структуры в элементарной управляемой ячейке из фазопеременного материала, подвергнутой управляющему воздействию импульсного лазерного излучения. Продемонстрировано изменение фазы сигнального оптического пучка, проходящего через управляемую ячейку из фазопеременного материала, относительно контрольного пучка в интерферометре Жамена [2].

$Ge_2Sb_2Se_4Te_1$ имеет более стабильную аморфную фазу, но требует больше энергии для переключения [3]. Температура кристаллизации Sb_2Se_3 и Bi_2Se_3 близка к температуре кристаллизации теллуридов, в первую очередь сплавов Ge-Sb-Te, что обеспечивает возможность их эффективного использования в качестве активных элементов фотонных интегральных схем и оптоэлектронных устройств и расширяет их возможные области применения [4].

$Ge_2Sb_2Se_4Te_1$ демонстрирует высокий контраст показателя преломления и низкое поглощение в ближнем и среднем ИК-диапазонах спектра. Bi_2Se_3 демонстрирует высокий контраст как показателя преломления, так и коэффициента экстинкции. Поэтому его вполне можно рассматривать в качестве активного элемента реконфигурируемого оптического поглотителя. Sb_2Se_3 можно рассматривать как переключаемый материал с малыми потерями благодаря его хорошей оптической прозрачности в ближней инфракрасной части спектра и высокому показателю преломления, близкому к показателю преломления кремния [5].

Представленные результаты открывают гораздо более широкий спектр применения оптических фазопеременных материалов в реконфигурируемой фотонике [6]. Сложная природа различных свойств и факторов должна быть учтена в реальных устройствах. Оптимизация устройств для повышения стабильности и долговечности может быть достигнута путем тщательного проектирования системы и выбора условий осаждения материала для конкретных приложений.

Литература

1. Burtsev A. A. et al. Low-loss Se-based phase-change materials for infrared photonics // Optical Materials, 2024. Vol. 157. P. 116117.
2. Kiselev A. V. et al. Optically Controlled Fine-tuning Phase Shift Cell Based on Thin-film Ge2Sb2Te5 for Light Beam Phase Modulation // JETP Letters, 2024. Vol. 120. № 6. P. 440–444.
3. Burtsev A. A. et al. Physical properties' temperature dynamics of GeTe, Ge2Sb2Te5 and Ge2Sb2Se4Te1 phase change materials // Materials Science in Semiconductor Processing, 2022. Vol. 150. P. 106907.
4. Wuttig M. et al. Phase-change materials for non-volatile photonic applications // Nature photonics, 2017. 11, 8. P. 465–476.
5. Delaney M. et al. A New Family of Ultralow Loss Reversible Phase-Change Materials for Photonic Integrated Circuits: Sb2S3 and Sb2Se3 // Advanced Functional Materials, 2020. 30, 36. P. 2002447.
6. Zhang Y. et al. Broadband transparent optical phase change materials for high-performance nonvolatile photonics // Nature Communications, 2019. 10, 1. P. 1–9.

Специализированная аппаратная архитектура расчета нелинейных функций для отечественной вычислительной платформы под задачи искусственного интеллекта

Баулин Ф. А.[1,2], Бабинцев Л. В.[1,2], Рожин А. К.[1,2], Губазов Д. Д.[1], Нефедов С. И.[1]
[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
fabaulin_2@edu.hse.ru, lvbabintsev@edu.hse.ru, akrozhin@edu.hse.ru, ddgubazov@edu.hse.ru, snefedov@hse.ru
[2] ООО «Аэтернум»
121205, г. Москва, Инновационный Центр Сколково
fabaulin@aeternumai.ru, lvbabintsev@aeternumai.ru, akrozhin@aeternumai.ru

В статье предлагается аппаратная архитектура вычисления нелинейных функций в составе отечественной вычислительной платформы. Актуальность работы обусловлена тем, что функции активации являются неотъемлемой частью большинства нейронных сетей. Решение ориентировано на снижение затрат ресурсов путем переиспользования вычислительных блоков и памяти, что особенно важно в условиях ограниченных ресурсов и энергопотребления FPGA. Предлагаемая архитектура позволяет гибко конфигурировать тип используемой функции и обеспечивает высокую пропускную способность при минимальном аппаратном бюджете.

Ключевые слова: искусственный интеллект; нейронные сети; энергоэффективные вычислительные системы.

Нелинейные функции, такие как функции активации (ReLU, sigmoid, softmax и др.), играют ключевую роль в работе нейронных сетей, обеспечивая их способность моделировать сложные зависимости. Однако реализация этих функций в аппаратном обеспечении (в частности, на FPGA) часто сопровождается избыточным использованием ресурсов [1]. Целью данной работы является разработка универсальной и ресурсоэффективной аппаратной архитектуры, способной вычислять широкий спектр нелинейных функций с возможностью масштабирования и повторного использования вычислительных примитивов [2].

Предложенная архитектура представляет собой модульную схему, состоящую из базовых арифметических примитивов, реализующих экспоненциальную функцию, сложение, умножение, деление и min/max-операции. Эти блоки формируют динамически конфигурируемый (в зависимости от целевой функции) конвейер, что позволяет гибко настраивать структуру под различные задачи и вычислять различные функции [3]. Для сохранения накопленных результатов имеются регистры. Дополнительные параметры масштабирования (scale) и смещения (bias) позволяют реализовывать нормализацию и сдвиги, обеспечивая совместимость со стандартными постпроцессингами в ИИ-моделях.

Благодаря принципу переиспользования компонентов модуль демонстрирует высокую эффективность по сравнению с типичными реализациями, где каждая функция требует отдельной логики. Верификация на синтетических тестах и типичных активационных функциях показала снижение использования логических

ресурсов и памяти до 40% при сохранении точности вычислений. Таким образом, разработанный модуль может быть эффективно интегрирован в более крупные аппаратные ускорители ИИ для выполнения настраиваемых нелинейных преобразований.

Литература

1. Zbigniew H. High accuracy FPGA activation function implementation for neural networks // Neurocomputing, 2017. Vol. 247. P. 59–61.
2. Jiang Y., Vaicaitis A., Dooley J., Leeser M. Efficient Neural Networks on the Edge with FPGAs by Optimizing an Adaptive Activation Function // Sensors, 2024. Vol. 24. P. 1829.
3. An F., Wang L., Zhou X. A High Performance Reconfigurable Hardware Architecture for Lightweight Convolutional Neural Network // Electronics, 2023. Vol. 12. P. 2847.

Особенности систем квантового распределения ключей с учетом актуальных подходов к защите информации

Науменко А. П.
[1] *ООО «СФБ Лаб»*
127273, г. Москва, ул. Отрадная, 2Б, стр. 1
[2] *АО «ИнфоТеКС»*
127273, г. Москва, ул. Отрадная, 2Б, стр. 1

В докладе рассмотрены основные особенности систем квантового распределения ключей (КРК) с точки зрения актуальных на данный момент, в том числе нормативно закрепленных, подходов к защите информации
Ключевые слова: нормативное регулирование; информационная безопасность; криптография.

Системы КРК в последнее десятилетие активно развиваются в нашей стране и за рубежом. Вместе с тем основная практическая функция указанных систем на данный момент — снабжение ключами надлежащего криптографического качества существующих и/или перспективных средств криптографической защиты информации (СКЗИ). Заметим, что для СКЗИ, как и вообще для защиты информации (информационной безопасности), в России разработан и успешно применяется уже более 20 лет подход к нормативному регулированию. В основе указанного подхода лежат следующие документы (список далеко не исчерпывающий и призван продемонстрировать лишь основные направления нормативного регулирования):

- Доктрина информационной безопасности Российской Федерации, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 05.12.2016 № 646;
- Стратегия национальной безопасности Российской Федерации, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 02.07.2021 № 400;
- Распоряжение Правительства РФ от 24.11.2023 N 3339-р, Стратегия развития отрасли связи до 2035 года;
- Распоряжение Правительства РФ от 11 июля 2023 г. № 1856-р об утверждении Концепции регулирования отрасли квантовых коммуникаций в РФ до 2030 г.;
- Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации»;
- Федеральный закон РФ от 27 июля 2006 года № 152-ФЗ «О персональных данных» — федеральный закон, регулирующий деятельность по обработке (использованию) персональных данных;
- Федеральный закон от 26 июля 2017 года № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации»;
- Положение ПКЗ-2005, утвержденное приказом ФСБ № 66 от 09.02.2005;
- Приказ ФСТЭК России от 11 февраля 2013 года № 17 «Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах»;
- Приказ ФСТЭК России от 18 февраля 2013 г. № 21 «Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению

безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных»;
- Методика оценки угроз безопасности информации, ФСТЭК, 2021 г.;
- Методические рекомендации 8-го Центра ФСБ России № 149/7/2/6-432 от 31.03.2015 г.;
- Приказ ФСБ России от 10 июля 2014 г. № 378 «Об утверждении Состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных...»;
- Р 1323565.1.012-2017 «Криптографическая защита информации. Принципы разработки и модернизации шифровальных (криптографических) средств защиты информации»;
- «Инструкция об организации и обеспечении безопасности...», утвержденная приказом ФАПСИ от 13 июня 2001 года № 152.

Заметим, что на данный момент системы КРК рассматриваются как одна из разновидностей СКЗИ.

Рассмотрим далее особенности систем КРК, которые могут способствовать более активному внедрению таких систем и, возможно, создают предпосылки для появления в рамках уже отлаженного подхода к нормативному регулированию специальных указаний (в т. ч. в форме дополнений/изменений текстов актуальных на данный момент НПА) по их применению.

Во-первых, системы КРК обеспечивают высокую степень автоматизации процессов выработки и распределения ключей для СКЗИ-потребителей. В частности, корректно спроектированная система КРК после своего запуска может функционировать полностью в автоматическим режиме, причем администратор системы не будет иметь доступа к формируемым и распределяемым ключам (так называемая безлюдная технология снабжения ключами). Заметим, что на данный момент в большинстве ИС администратор системы не предполагается нарушителем, что, к сожалению, не может быть надежно гарантировано — у территориально распределенной ИС сотни администраторов.

Во-вторых, в силу естественных предположений о возможностях нарушителя при рассмотрении атак на систему КРК класса КС3 (наиболее представленный на данный момент на рынке тип систем КРК) для многих атак может быть показана защищенность и по более высокому классу с учетом Р 1323565.1.012-2017 (в докладе мы предполагаем представить сводную таблицу соответствия атака / класс защиты). Соответственно, с использованием систем КРК возможно формирование ключей, криптографическое качество которых достаточно для использования в СКЗИ любого класса, что способствует повышению уровня защищенности информационной системы в целом.

В-третьих, при использовании системы КРК может быть теоретически доказана достаточность однократного ввода ключей на произвольный с практической точки зрения период времени (например, 10 лет) без угрозы компрометации в связи с долговременным хранением введенного ключа (фактически данный ключ может быть полностью заменен за несколько минут в ходе реализации протокола КРК). Соответственно, отпадает необходимость в проведении плановой смены мастер-ключей СКЗИ (процедура должна проводиться с заданной периодичностью, обычно раз в 15 месяцев), что не только позволяет снизить нагрузку на ответственных

за ввод ключей сотрудников и понизить требования к их квалификации, но и повышает надежность работы с ключами для информационной системы.

В-четвертых, системы КРК позволяют формировать новые ключи, даже теоретически не связанные с ранее выработанными, что в полной мере обеспечивает контроль рисков, связанных с нагрузкой на криптографические ключи и все возрастающим объемом защищаемых данных.

Также кажется целесообразным упоминание о так называемой квантовой угрозе. Она состоит в том, что имеются основания предполагать, что в обозримом будущем будет разработан квантовый вычислитель достаточной производительности, способный решать задачи, сложность которых лежит в основе стойкости целого ряда промышленно используемых в России и в мире асимметричных криптосистем (электронная подпись и протоколы открытого распределения ключей типа Диффи — Хеллмана). При этом, по современным представлениям, системы симметричной криптографии (шифрование, контроль целостности/имитозащита, хеширование) останутся стойкими (при необходимости повышения стойкости достаточно будет двукратного увеличения длин ключей и/или выходов хеш-функций). Учет квантовой угрозы необходим в первую очередь в системах, использующих асимметричные криптографические механизмы, в частности такие, где для защиты каналов связи применяются протоколы TLS и IPsec, использующие для установления общих ключей шифрования каналов протокол Диффи — Хеллмана. Замена в таких системах асимметричных протоколов выработки ключей на протоколы КРК обеспечит защиту от квантовой угрозы и при этом не потребует изменений других этапов реализации «классических» криптографических протоколов, что удобно с точки зрения эксплуатации.

Вышеуказанные особенности систем КРК наводят на мысль о целесообразности их использования в территориально распределенных системах, в первую очередь государственных (ГИС), в качестве меры, направленной на обеспечение гарантированно надежной (и не зависящей от человеческого фактора, безлюдной) работы с криптографическими ключами при любых возникающих сейчас и в обозримой перспективе нагрузках на ключи, в т.ч. с учетом перспективных угроз (в частности, квантовой угрозы).

Архитектура магистральных сетей квантовых коммуникаций

Соколов В. В., Смирнов К. В., Самбурская К. С., Демидова А. Л.
ОАО «РЖД»
107174, г. Москва, ул. Новая Басманная, 2/1, стр. 1
VSokolov@center.rzd.ru

Квантовые коммуникации в России давно вышли за рамки теоретической концепции, находятся на стадии интенсивного развития, коммерческого становления и имеют значительный потенциал для расширения их практического использования [1–2]. В широком смысле сети квантовых коммуникаций можно рассматривать как автоматизированные системы в защищенном исполнении, которые должны соответствовать нормативной базе, регулирующей организацию защищенного обмена и передачи данных [3].

На сегодняшний день Росстандартом утверждена и официально введена в использование нормативная база, включающая общие положения, термины и определения в области квантовых коммуникаций, квантового Интернета вещей, архитектуру и интерфейсы подключения типового программно-аппаратного комплекса распределения ключей, выработанных сетью квантового распределения ключей [4–7]. Это знаменует важный этап в развитии квантовых коммуникаций.

Доклад посвящен текущим подходам при практической реализации сетей квантовых коммуникаций в России. В докладе рассматривается специфика квантовых коммуникаций с точки зрения прикладных аспектов построения квантовых сетей связи, их использования и интеграции с существующей телекоммуникационной инфраструктурой.

Также в рамках доклада наглядно представлена архитектура квантовых сетей, включающая пять логических уровней иерархии, необходимых для масштабирования квантовой сети, и демонстрируется модель предоставления сервиса на базе квантовой сети связи.

Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года».
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 июля 2023 г. № 1856-р «Об утверждении Концепции регулирования отрасли квантовых коммуникаций в Российской Федерации до 2030 года».
3. ГОСТ Р 51583-2014. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. Общие положения.
4. ПНСТ 829-2023. «Квантовые коммуникации. Общие положения».
5. ПНСТ 830-2023. «Квантовые коммуникации. Термины и определения».
6. ПНСТ 831-2023. «Квантовый Интернет вещей. Общие положения».
7. ПНСТ 906-2023. «Квантовый Интернет вещей. Типовой программно-аппаратный комплекс распределения ключей, выработанных сетью квантового распределения ключей. Архитектура».

Перспективы использования квантовых коммуникаций в центрах обработки данных

Ханенков С. В.
ПАО«Ростелеком»
115172, г. Москва, ул. Гончарная, 30, стр. 1
skhan@rt.ru

Современные центры обработки данных (ЦОД) сталкиваются с растущими угрозами кибербезопасности, что требует внедрения инновационных методов защиты информации. Одним из наиболее перспективных направлений является использование квантовых коммуникаций, обеспечивающих принципиально новый уровень безопасности за счет фундаментальных свойств квантовой физики [1–2].

В рамках данного доклада рассматриваются актуальные и перспективные решения на основе квантовых технологий, включая квантовое распределение ключей (QKD) и интеграцию квантовых сетей в существующую телекоммуникационную инфраструктуру ЦОД. Особое внимание уделено преимуществам таких решений, как невозможность незаметного перехвата данных и высокая устойчивость к атакам на криптографические системы [3].

Доклад также охватывает технические и экономические вызовы, связанные с внедрением квантовых коммуникаций, включая необходимость модернизации инфраструктуры, высокие затраты на развертывание и обеспечение совместимости с действующими стандартами. Анализируются пути преодоления этих барьеров, а также перспективы развития технологии в контексте нормативной базы, утвержденной Росстандартом [4–5].

Основные выводы доклада включают рекомендации по поэтапному внедрению квантовых коммуникаций в ЦОД, оценку экономической эффективности и предложения по дальнейшему развитию нормативной и технической базы для обеспечения массового применения технологии.

Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года».
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 июля 2023 г. № 1856-р «Об утверждении Концепции регулирования отрасли квантовых коммуникаций в Российской Федерации до 2030 года».
3. ГОСТ Р 51583-2014 «Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. Общие положения».
4. ПНСТ 829-2023 «Квантовые коммуникации. Общие положения».
5. ПНСТ 830-2023 «Квантовые коммуникации. Термины и определения».

Квантовозащищенные каналы связи: от теории к практике

Малявкин А. С.,
АО «Компания ТрансТелеКом»
121357, г. Москва, ул. Верейская, 29, стр. 33
aleksandrmalyavkin@ttk.ru

Развитие в мире квантовых технологий увеличивает количество новых внешних рисков и угроз цифровому суверенитету Российской Федерации в части обеспечения информационной безопасности. Появление квантовых компьютеров, а также высокая степень развития квантовых вычислений и технологий искусственного интеллекта создают риски и угрозы компрометации существующих способов защиты данных (в т. ч. используемых методов шифрования данных).

В ОАО «РЖД» создана и развивается магистральная квантовая сеть (далее — МКС), которая призвана существенно снизить вероятность реализации указанных выше новых угроз.

Доклад посвящен основным причинам, по которым традиционные методы защиты каналов связи становятся менее надежными. В докладе рассматриваются ключевые отличия квантового распределения ключей, применяемого в МКС, от традиционных технологий обмена ключами и то, каким образом это снижает или вовсе исключает риски «взлома».

Также в рамках доклада будут представлены типовые схемы подключения к МКС и особенности использования услуг МКС.

Перспективы коммерциализации квантовых коммуникаций и оценка экономических эффектов

Лобов Д. С.
ООО «Кэпт Налоги и Консультирование»
125040, г. Москва, Ленинградский просп., 34А
dlobov@kept.ru

Квантовые коммуникации — передача информации посредством прямой передачи квантовых состояний или посредством квантовой запутанности. Основным носителем информации в квантовых коммуникациях являются квантовые системы, состояния которых изменяются в соответствии с передаваемой информацией. В квантовых коммуникациях в настоящее время в качестве квантовой системы для передачи информации используются фотоны, а основными системами передачи являются квантовые оптические системы [1]. Квантовый передатчик обеспечивает приготовление и передачу квантовых сигналов по квантовому каналу, а квантовый приемник — прием из квантового канала и обработку квантовых сигналов. Наиболее развитое сегодня приложение квантовых коммуникаций — квантовое распределение ключей, то есть процедура выработки и распределения секретных ключей, реализуемая с помощью квантовых криптографических протоколов и квантовых каналов связи. Функциональные преимущества квантового распределения ключей состоят в повышении устойчивости систем в условиях растущих рисков информационной безопасности.

Учитывая международный практический опыт [2], автор данной работы предполагает, что внедрение квантовых коммуникаций в качестве инструмента информационной безопасности может представлять интерес для компаний — владельцев объектов критической информационной инфраструктуры в связи с возможностью снижения экономических рисков, обусловленных потенциальными последствиями киберпреступлений, в результате применения устройств квантового распределения ключей, обеспечивающих автоматическую передачу и загрузку симметричных ключей в средства криптографической защиты информации, исключающих необходимость применения менее стабильных асимметричных алгоритмов, а также передачи токенов доверенными курьерами.

Для доказательства данной гипотезы автор провел исследование места и роли квантовых коммуникаций в системе информационной безопасности энергетического предприятия, оценил объем затрат на трансформацию инфраструктуры с применением квантового компонента и дал экономическую оценку рисков, связанных с отсутствием квантового уровня безопасности сети в долгосрочной перспективе.

Предложенная оригинальная модель позволяет оценить экономическую эффективность внедрения технологий квантовых коммуникаций, а обновленная теорема Моска — Лобова — определить экономически обоснованные сроки реализации квантовой трансформации [3].

Исследование показало, что квантовые коммуникации могут представлять наибольший интерес для компаний — владельцев ключевых объектов критической информационной инфраструктуры, обеспечивающих высокие показатели

выручки. Полученные результаты могут представлять практическую пользу для участников квантового рынка в России: регулятора, научно-исследовательских центров, коммерческих разработчиков решений, потенциальных клиентов.

Литература

1. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Квантовые коммуникации. — М.: Российский институт стандартизации, 2023.
2. Zhao B. et al. Performance Analysis of Quantum Key Distribution Technology for Power Business // Applied Sciences, 2020. Vol. 10 (8). P. 16. DOI: 10.3390/app10082906.
3. Лобов Д. С. Перспективы коммерциализации квантовых коммуникаций в энергетической отрасли: монография. — М.: РУСАЙНС, 2025. — 110 с.

Квантовые компьютеры: вызовы и решения для корпоративной кибербезопасности

Кузьмин Д. С.
ВЭБ.РФ
125009, г. Москва, ул. Воздвиженка, 10

Первая часть: обзор технологий, используемых в корпоративной кибербезопасности, которые будут уязвимы перед квантовыми компьютерами.

Вторая часть: вариант дорожной карты перехода на технологии, успешно противостоящие квантовым вычислителям.

Третья часть: функциональность в будущих СКЗИ — чего не хватает в настоящий момент для начала внедрения квантовоустойчивых решений.

Применение квантовой криптографии для повышения киберустойчивости компаний

Хараск М. А.
Angara Security
121096, г. Москва, ул. Василисы Кожиной, 1, корп. 1

1. Текущие вызовы классической криптографии.
2. Практические аспекты применения для госструктур и бизнеса.
3. Перспективы развития и стратегическая важность.

УДК 004.716

Практическое применение многопользовательских квантовых сетей с промежуточными доверенными узлами для задач защиты информации

Сантьев А. А., Яшин Д. А., Рогов Р. И., Алексеев А. Л.
ООО «СМАРТС-Кванттелеком»
199178, г. Санкт-Петербург, В.О., 6-я линия, 59, корп. 1, лит. Б, пом. 17/6
info@quanttelecom.ru

Рассмотрены перспективы развития систем квантового распределения ключей для построения магистральных и локальных квантовых сетей смешанной топологии. Обсуждаются вопросы, связанные с модернизацией методов управления ключами в средствах криптографической защиты информации, распределяющих квантовозащищенные ключи. Предложены направления для модернизации инфраструктуры квантовых сетей.
Ключевые слова: квантовое распределение ключей; квантовые ключи; квантово-защищенные ключи; квантовая сеть.

При построении квантовых сетей для преодоления ограничения по дальности функционирования сетей квантовой рассылки ключей (КРК) используется подход на основе доверенных промежуточных опорных узлов, позволяющий формировать квантово-защищенные ключи между опорными узлами сети на основе квантовых ключей. Таким образом, защита данных в квантовых сетях может обеспечиваться не только квантовыми ключами, но и квантово-защищенными ключами. Квантовые сети на основе данного принципа получили широкое развитие, особенно в Китае и России, однако разработчики квантовых сетей находятся в поиске возможных подходов к реализации цифровых сервисов, безопасность которых основывается криптографическими примитивами, использующими квантовые или квантово-защищенные ключи.

В настоящий момент комплексный подход о том, какой должна быть архитектура полноценных платформенных сервисов, в которых защита предоставляемых цифровых сервисов основана на применении технологии квантового распределения ключей, только формируется, в том числе в ряде научных публикаций [1–4].

В работе представлены опыт разработки и практические достижения по построению магистральных и локальных квантовых сетей смешанных топологий на промышленном оборудовании с учетом существующего опыта разработки систем квантового распределения ключей и сопряженных шифраторов. В том числе рассматриваются вопросы организации ключевого транспорта и формирования квантово-защищенных ключей, принципы удаленного распределенного управления и мониторинга, программного и аппаратного резервирования компонентов, предоставления сервиса и услуг на базе квантовых сетей.

Литература

1. Scarani V. et al. The security of practical quantum key distribution // Rev. Mod. Phys. APS, 2009. Vol. 81. № 3. P. 1301.
2. Alléaume R. et al. Using quantum key distribution for cryptographic purposes: a survey.

3. Van Meter R. Quantum Networking // Quantum Networking, 2014. Vol. 9781848215. 1–333 p.
4. Сантьев А. А. Методы оптимизации структуры квантовых сетей для обеспечения централизованного управления ключами // Вестник современных цифровых технологий, 2023. — № 15. — С. 12–19.

Космические квантовые коммуникации

Белинский А. А., Кулик С. П., Оседло В. И., Калинкин А. А., Шатский Н. И.
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

В рамках доклада будут изложены основные принципы передачи информации между удаленными пользователями посредством квантовых состояний, в частности для случая квантового распределения ключа космос — Земля, атмосферная квантовая криптография и ее основные проблемы; квантовые космические проекты в мире; проект РЖД и МГУ по квантовому распределению ключей в системе Земля — космос для стационарной межрегиональной связи.

УДК 621.373.826

Орбитальные испытания лазерной системы связи на МКА «Импульс-1»: результаты и перспективы

Мерзлинкин В. Е.[1,2], Бахшалиев Р. М.[1], Левашов С. Д.[1]
[1] ООО «КуСпэйс технологии»
143026, г. Москва, Сколково, ул. Луговая, 4, стр. 7
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Представлены результаты работы с МКА «Импульс 1» и лазерным терминалом «Вектор» как «лаборатории на орбите» для испытания компонентов и технических решений, предназначенных для будущей малой спутниковой платформы квантового распределения ключей (КРК). На основе полученных данных определены ключевые технические барьеры и потенциальные проблемы, возникающие при создании спутниковых систем КРК и лазерной связи, а также сформулированы пути их преодоления.

Ключевые слова: КРК; МКА; система наведения; лазерная связь.

МКА «Импульс 1» был запущен 27.06.2023 года с космодрома Восточный. Аппарат включал в себя две полезные нагрузки: ПН «Вектор» и ПН «РЕФОС». ПН «РЕФОС» — рентгеновский спектрофотометр, предназначенный для мониторинга солнечной активности в мягком рентгеновском диапазоне. ПН «Вектор» является лазерным терминалом, работающим на следующих длинах волн: 850 нм (нисходящий информационный канал), 808 нм (восходящий информационный канал) и 532 нм (лазер-маяк) [1]. Данный лазерный терминал являлся важным шагом для тестирования необходимых технических решений будущих спутников систем квантового распределения ключа [2]. В составе терминала есть два основных блока: система приема-передачи лазерного сигнала и контур точного наведения.

Оптическая система лазерного терминала имеет фокусное расстояние 37 мм и апертуру 30 мм. В качестве системы, обрабатывающей сигнал, используется программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС). Для приема сигнала на орбите использовался лавинный фотодиод от компании «Дефан». Восходящий информационный канал работает на длине волны 808 нм, в то же время нисходящий канал реализован на 850 нм. Нисходящий канал обеспечивает максимальную скорость передачи данных 50 Мбит/с при интегральной мощности излучения 100 мВт. В проекте применена модуляция по схеме «Манчестер» для работы с наземной приемной станцией, оснащенной полупроводниковым чувствительным элементом. Также предусмотрен режим фазово-импульсной модуляции со скоростью 6,25 Мбит/с, предназначенный для взаимодействия со сверхпроводниковым однофотонным детектором. Такое решение позволит увеличить внутригодовое время доступности канала связи.

Контур точного наведения обеспечивает юстировку оптических осей между наземной станцией и космическим аппаратом. Система работает на основе считывания лазерного пятна (лазера-маяка с наземной станции) на камере и выравнивания соосности с помощью MEMs-зеркала. Для разделения каналов использовались дихроичное зеркало и спектральные фильтры.

В работе представлены результаты наземных тестов систем лазерной передачи информации, контура точного наведения и исследования сверхпроводникового однофотонного детектора как приемного модуля для классической лазерной связи. Изложены выводы и достижения, полученные в ходе работы с аппаратом на текущий момент. Определены основные проблемы, а также предложены возможные пути их решения.

Литература

1. Miller A. V. et al. Vector-towards quantum key distribution with small satellites // EPJ Quantum Technology, 2023. Vol. 10. № 1. P. 52.
2. Khmelev A. et al. Eurasian-scale experimental satellite-based quantum key distribution with detector efficiency mismatch analysis // Optics Express, 2024. Vol. 32. № 7. P. 11964–11978.

УДК 535.14

Протокол квантового распределения ключа с использованием векторных оптических вихрей с аксиально-симметричной поляризацией

Вашукевич Е. А., Решетников Д. Д., Малютина Е. В., Король Т. К., Голубева Т. Ю.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
e.vashukevich@spbu.ru

В работе рассматривается протокол квантового распределения ключа с использованием оптических векторных вихревых полей с пространственной структурой поляризации, инвариантной к вращению в плоскости, перпендикулярной оси распространения пучка. Продемонстрированы схемы генерации и детектирования таких полей, а также проанализирована устойчивость протокола к наиболее распространенным атакам.
Ключевые слова: квантовое распределение ключей; спутниковая связь; оптические вихри; квантовая криптография.

Развитие систем квантового распределения ключей (КРК) обусловлено возросшими требованиями к защите информации в сетях связи. Протокол КРК BB84, который является базовым для квантовой криптографии, использует однофотонные квантовые состояния с линейной поляризацией. При этом применение протокола BB84 с использованием линейно-поляризованного света для задач КРК низкоорбитальных космических аппаратов существенно затруднено из-за необходимости фиксации положения плоскости поляризации света в каждый момент времени как передающими, так и принимающими системами на Земле и в космосе.

Эту проблему можно устранить, если использовать пучки с пространственно структурированной поляризацией [1]. Предлагается использовать степень свободы поляризации таких пучков в качестве носителя информации в системах КРК. В работе мы рассматриваем схему быстрой генерации оптических вихрей с заданной аксиально-симметричной системой структурой поляризации, предложенную в [2], а также анализируем устойчивость рассматриваемого протокола к атакам на протоколы КРК. Нами было показано, что оптические вихри могут быть сгенерированы в схеме интерферометра Маха — Цандера с использованием уголковых отражателей, статических элементов, меняющих орбитальный угловой момент света, и фазовых модуляторов.

Работа поддержана грантом ОАО «РЖД» по договору № 5950981.

Литература

1. Sokolov A. L. Optical vortices with axisymmetric polarization structure // Optical Engineering, 2017. Vol. 56. № 1. P. 014109–014109.
2. Решетников Д. Д. и др. Протокол квантового распределения ключа на аксиально-симметричных поляризационных пучках в атмосферном канале // Известия вузов. Радиофизика, 2024. — Т. 1. — № 67.

Фотонный квантовый интерфейс для гибридных квантовых коммуникаций

Моисеев С. А.[1], Гилязов Л. Р.[1], Мельник К. С.[1], Моисеев Е. С.[2], Перминов К. С.[1]

[1] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ
420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10
[2] Физический факультет, Университет МакГилла, Монреаль, Канада
samoi@yandex.ru

Системы квантового распределения ключа (КРК) позволяют обеспечивать высочайший уровень защиты информации благодаря использованию квантовых свойств передачи и детектирования фотонных кубитов [1, 2]. В настоящее время достигнуты большие практические успехи в создании ряда таких систем, использующих различные физические способы кодирования фотонных кубитов, которые находят активное применение в создании локальных квантовых сетей и квантовых магистралей [3]. Реализация данной технологии в сложных системах передачи и обработки информации приводит к необходимости создания гибридных квантовых сетей, объединяющих различные системы КРК в общую систему с сохранением квантового уровня защиты информации [4]. Решение этой задачи требует разработки соответствующих квантовых устройств, например, объединяющих фотонные кубиты с дискретным и непрерывным кодированием.

В настоящей работе разрабатываются схемы фотонного интерфейса, позволяющего детерминированным образом преобразовывать в прямом и обратном порядке фотонные кубиты, задаваемые амплитудно-фазовым кодированием многочастотного когерентного излучения в фотонные кубиты с поляризационным кодированием. Изучаются физические свойства прямой [5, 6] и обратной [7, 8] схем фотонного интерфейса, а также способы их интеграции в существующие системы КРК на боковых частотах и на поляризационных кубитах [9]. Мы также обсуждаем возможности использования предлагаемых схем фотонного интерфейса в способах реализации квантовых коммуникаций, сохранения и обработки квантовой информации [10].

Литература

1. Bennett C. H., Brassard G., Crepeau C., Jozsa R., Peres A., Wootters W. K. 1984 Proceedings of the IEEE international conference on computers,systems and signal processing // Phys. Rev. Lett., 1993. Vol. 70. P. 1895.
2. Ekert A. K. // Phys. Rev. Lett., 1991. Vol. 67. P. 661.
3. Xu F., Ma X., Zhang Q., Lo H. K., Pan J. W. // Reviews of Modern Physics, 2020. Vol. 92 (2). P. 025002.
4. Harney C., Fletcher A. I., Pirandola S. // Phys. Rev. Appl., 2022. Vol. 18. P. 014012.
5. Melnik K. S., Moiseev E. S. // Physical Review A, 2023. Vol. 107 (5). P. 052607.
6. Melnik K., Moiseev E., Gilyazov L., Moiseev S. // Bull. Lebedev Phys. Inst., 2024. Vol. 51 (Suppl 2). P. S117–S122.

7. Моисеев С.А., Мельник К.С., Моисеев Е.С. Способ для переноса фотонных кубитов с поляризационным кодированием информации одночастотного когерентного излучения на фотонные кубиты с фазовым кодированием информации: Заявка на изобретение. Дата поступления 13.05.2022, регистрационный номер № 2022113036.
8. Gilyazov L.R., Melnik K.S., Moiseev S.A. Photonic interface between polarization and phase physical encoding of photonic qubits (in progress).
9. Moiseev S.A., Melnik K.S., Gilyazov L.R., Moiseev E.S. Quantum key distribution protocol with subcarrier wave encoding in bases with non-orthogonal phase states // Laser Physics Letters, 2025. (In press).
10. Perminov N.S., Gilyazov L.R., Melnik K.S., Moiseev S.A. Proc. SPIE 13168, Optical Technologies for Telecommunications 2023, 131681K (6 September 2024)). URL: https://doi.org/10.1117/12.3026588.

УДК 004.735:530.145:003.26

Оптимизация архитектуры системы распределения квантово-защищенных ключей для мобильных потребителей

Герасимова А. Г., Емельянов В. М., Росликов А. Н., Третникова Е. Н.
ООО «Системы практической безопасности»
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 22, лит. А
emelyanov@systempb.com

Рассмотрена архитектура системы распределения квантово-защищенных ключей для мобильных потребителей. Методом Монте-Карло выполнена оценка надежности для вариантов архитектуры системы. Определено оптимальное положение элементов системы относительно узлов сетей квантового распределения ключей.

Ключевые слова: квантово-защищенная сеть связи; квантовое распределение ключей; доверенный промежуточный узел; средство криптографической защиты информации; центр распределения ключей; надежность; коэффициент готовности; метод Монте-Карло.

Развитие направления квантовых коммуникаций включает как увеличение протяженности сетей квантового распределения ключей (КРК), так и рост числа квантово-защищенных сетей связи (КЗСС) [1], а также расширение количества предоставляемых ими услуг связи и повышение доступности этих услуг. Сети беспроводной передачи данных и сети подвижной радиотелефонной связи (ПРТС) занимают на сегодняшний день доминирующее положение в мире по числу абонентов. Вследствие этого актуальной является задача внедрения технологий квантовых коммуникаций в сети ПРТС, при которой ее абоненты становятся потребителями квантовых и квантово-защищенных ключей (КЗК).

Однако непосредственное подключение абонентского терминала (АТ) сети ПРТС к сети КРК для получения квантового ключа или КЗК сопряжено с известными сложностями ввиду мобильности абонента и стационарной природы сети КРК. Для решения этой задачи требуется применение двух видов специализированных устройств [2]:

- устройств распределения ключей (УРК), обеспечивающих сопряжение с сетью КРК, а также распределение КЗК между АТ;
- устройств ввода предварительно распределенных ключей (УВПРК) в АТ.

УРК обеспечивают распределение и доведение до АТ через сеть ПРТС КЗК, которые далее могут быть использованы АТ в качестве парных ключей шифрования или иных целей. Однако организация канала связи между УРК и АТ требует предварительно распределенных ключей связи, для ввода которых в АТ используется УВПРК. Территориальное расположение УВПРК должно обеспечивать их доступность для абонентов, так как передача предварительно распределенных ключей не может выполняться по общедоступным каналам связи. Сходная архитектура может быть реализована и для устройств квантового Интернета вещей (КИВ) [3].

При построении системы распределения КЗК для мобильных потребителей — абонентов сетей ПРТС и устройств КИВ — актуальной является задача поиска оптимального количества и расположения подобных УРК и УВПРК. Принципиально возможны два варианта построения системы:

- централизованное, при котором в КЗСС имеется один или несколько УРК, получающих и распределяющих все множество ключей для АТ и устройств КИВ;
- распределенное, при котором имеется множество УРК, каждый из которых распределяет ключи только для небольшой группы абонентов. При этом множество УРК обеспечивает перекрестное резервирование на случай отказов самих устройств или участков сети КРК.

В настоящей работе представлены результаты моделирования методом Монте-Карло характеристик надежности системы распределения КЗК для мобильных абонентов в зависимости от:

- вариантов архитектуры системы распределения: централизованной или распределенной;
- вариантов топологии: линейной, кольцевой или ячеистой.

Выполнена оценка таких показателей системы, как вероятность доступности услуги распределения КЗК и длина квантового маршрута, используемого при выработке КЗК. В результате моделирования продемонстрировано, что оптимальное положение УРК в сети зависит как от топологии, так и от коэффициентов готовности линий и узлов сети КРК. Определены оптимальное взаимное положение основного и резервного УРК для различных вариантов топологии сети и показателей надежности ее компонентов, критерии выбора пар «основной УРК — резервный УРК» при использовании распределенной архитектуры системы.

Литература

1. ПНСТ 829-2023. Квантовые коммуникации. Общие положения. — Введ. 2023.07.11. — М.: Российский институт стандартизации, 2023.
2. Емельянов В. М., Герасимова А. Г., Шкоркина Е. Н., Новичков С. А. Квантовое распределение ключей для обеспечения сквозной безопасности в подвижных сетях радиосвязи // XXV научно-практическая конференция «РусКрипто'2023». — URL: https://ruscrypto.ru/resource/archive/rc2023/files/12_yemelyanov_gerasimova_shkorkina_ novichkov.pdf.
3. ПНСТ 906-2023. Квантовый Интернет вещей. Типовой программно-аппаратный комплекс распределения ключей, выработанных сетью квантового распределения ключей. Архитектура. — Введ. 2023.12.29. — М.: Российский институт стандартизации, 2023.

Создание многокубитных квантовых вычислителей на ионной платформе для выполнения практико-ориентированных алгоритмов

Колачевский Н. Н.[1,2]
[1] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН*
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53
[2] *Международный центр квантовых технологий*

Представлен текущий мировой прогресс в области разработки ионных квантовых вычислителей в части увеличения количества и качества кубитов, реализации логических кубитов и выполнения алгоритмов. Важной задачей дорожной карты РФ на период 2025–2030 по квантовым вычислениям (оператор — госкорпорация «Росатом») является применение практико-ориентированных полезных алгоритмов, что требует как разработки соответствующих многокубитных вычислителей, так и создания и тестирования оригинальных алгоритмов. В рамках текущих работ продемонстрирована возможность работы ионного квантового вычислителя в 50-кубитном режиме (25 ионов-кудитов), а также выполнения ряда важных, в том числе с практической стороны, алгоритмов. Для реализации наиболее глубоких вантовых алгоритмов использовались более короткие цепочки в 20 кубит, что обеспечивает достоверность >99,95 % (1Q) и >96 % (2Q) соответственно. С их использованием выполнены части алгоритма Шнорра (разложение числа 1591 на простые множители), реализованы многочастичные гейты Тоффоли с использованием кутритов, а также выполнен ряд оптимизационных алгоритмов и алгоритмов распознавания. В обозримой перспективе важной задачей является увеличение качества 2Q операций >99 %, что требует модернизации аппаратной части вычислителя и системы управления.

Литература

1. Заливако И. В. и др. Квантовые вычисления на ионах в ловушках: принципы, достижения и перспективы // УФН, 2025. — Т. 195. — С. 585–620.
2. Nikolaeva A. S. et al. Scalable improvement of the generalized Toffoli gate realization using trapped-ion-based qutrits // Phys. Rev. Lett. Accepted. https://doi.org/10.1103/p1z9-6w93.
3. Zalivako I. et al. Supervised binary classification of small-scale digit images and weighted graphs with a trapped-ion quantum processor // Phys. Rev. A, 2025. 111, 052436.

УДК 530.145

Применение ядерных методов для задач квантового машинного обучения

Киктенко Е. О.[1,2], Марданова А.[1,3], Семёнов С.[1,3], Лопес-Сальдивар Х. А.[1]
[1] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
[2] Отдел математических методов квантовых технологий, Математический институт им. В. А. Стеклова РАН
119991, г. Москва, ул. Губкина, 8
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Рассматривается гибридный квантово-классический алгоритм классификации квантовых данных с использованием аналогов методов опорных векторов и квантового вычисления ядерной матрицы. Подчеркивается практическая применимость предложенного подхода для устройств типа NISQ.
Ключевые слова: квантовое машинное обучение; гибридные алгоритмы; методы опорных векторов; квантовая классификация; квантовая кластеризация.

Квантовое машинное обучение (КМО) — активно развивающееся направление, сочетающее квантовые вычисления и методы машинного обучения. Особенно перспективным является применение алгоритмов, адаптированных для обработки квантовых данных, поскольку они позволяют выявлять структуры и зависимости, труднодоступные для классических методов.

В данной работе рассматривается задача классификации и кластеризации квантовых состояний при помощи гибридного алгоритма, состоящего из квантовой и классической частей. Квантовая часть реализует аналог теста SWAP для оценки перекрытий между квантовыми состояниями, соответствующими различным параметрам системы. Эти перекрытия используются для построения ядра, на основе которого затем обучается классический алгоритм опорных векторов (SVM). Такой подход позволяет выделить подмножество состояний, служащих опорными векторами для последующей классификации новых входных данных.

Преимуществом предложенной схемы является то, что сложность классической части масштабируется полиномиально по числу состояний в выборке, независимо от размерности квантовых состояний. Сложность квантовой части зависит от сложности подготовки квантовых состояний, что делает подход особенно релевантным для шумных квантовых устройств промежуточного масштаба (NISQ).

Таким образом, предложенный метод открывает путь к эффективной классификации квантовых данных, где классические методы оказываются неприменимыми из-за экспоненциального роста размерности пространства состояний.

Литература

1. Biamonte J., Wittek P., Pancotti N., Rebentrost P., Wiebe N., Lloyd S. Quantum machine learning // Nature, 2017. № 549. P. 195.

2. Zalivako I.V., Gircha A.I., Nikolaeva A.S., Drozhzhin D.A. et al. Supervised binary classification of small-scale digits images with a trapped-ion quantum processor // Phys. Rev. A, 2025. № 111. P. 052436.

УДК 539.184.2

Модель связанных квантовых мемристоров, закодированных в электронных состояниях одиночного иона Yb+

Стремоухов С. Ю.[1,2], Форш П. А.[1,2], Хабарова К. Ю.[2], Колачевский Н. Н.[2]
[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1*
[2] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН 119991, г. Москва, Ленинский просп., 53*

Проведено исследование поведения связанных квантовых мемристоров, закодированных в пяти электронных уровнях одиночного иона иттербия. Показано, что управление параметрами одного из мемристоров позволяет эффективно формировать типично гистерезисную зависимость ввода-вывода на связанном с ним втором мемристоре.
Ключевые слова: ион иттербия; квантовый мемристор; машинное обучение; многослойный персептрон.

Последнее время все чаще звучит предположение о квантовой природе процессов, происходящих при работе головного мозга, что привело к активному исследованию возможностей квантовых нейронных сетей и методов машинного обучения. Использование «квантового слоя» в схемах обучения нейронных сетей может дать существенное преимущество во времени и эффективности. Квантовый мемристор, являющийся квантовым аналогом классического мемристора — элемента, сохраняющего память о своих прошлых состояниях, может использоваться для формирования одного из слоев обучения нейронных сетей, имитируя работу нейронных синапсов [1].

Ранее мы предложили модель квантового мемристора, для кодирования которого используются электронные уровни в атоме или ионе [2]. Здесь мы продолжили исследование возможности реализации связанных квантовых мемристоров, для чего была решена задача о кодировании двух таких элементов в электронной системе уровней одиночного иона иттербия-171. При этом для кодирования использовалось пять электронных состояний, то есть одно из них было общим для обоих мемристоров. Наличие общего состояния позволяет передавать часть населенности с одного мемристора на другой, тем самым управляя функцией ввода-вывода связанного мемристора.

На рис. 1 представлены соответствующие зависимости ввода-вывода, полученные в случае связанных квантовых мемристоров в сравнении с соответствующими зависимостями, полученными для одиночных мемристоров при тех же параметрах поля при независимом их возбуждении. Исследуемая пятиуровневая система модельно возбуждалась последовательностью резонансных соответствующих переходам импульсов. При этом сначала возбуждался управляющий мемристор, а потом через общий уровень возбуждение передавалось на управляемый. Таким образом, продемонстрирована возможность передачи сигнала между мемристорами, закодированными в одном ионе.

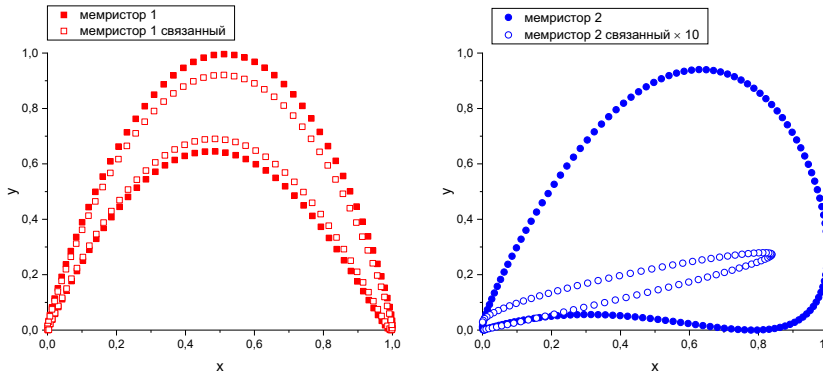


Рис. 1. Слева — функция ввода-вывода управляющего мемристора; справа — функция ввода-вывода управляемого мемристора. Закрашенные символы — динамика одиночных несвязанных мемристоров; пустые символы — динамика связанных мемристоров

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00415, https://rscf.ru/project/ 24-12-00415.

Литература

1. Alibart F. et al. An organic nanoparticle transistor behaving as a biological spiking synapse // Adv. Funct. Mater., 2010. Vol. 20. P. 330–337.
2. Stremoukhov S. et al. Proposal for Trapped-Ion Quantum Memristor // Entropy, 2023. Vol. 25. № 8. P. 1134.

УДК *530.145*

Методы оптимального управления квантовыми системами

Печень А. Н.
[1] *Математический институт им. В. А. Стеклова РАН*
119991, г. Москва, ул. Губкина, 8
apechen@gmail.com
[2] *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
[3] *Институт системного программирования им. В. П. Иванникова РАН*
109004, г. Москва, ул. Александра Солженицына, 25

Методы оптимального управления квантовыми системами широко применяются для решения различных задач квантовых технологий, от задач повышения точности генерации квантовых операций для квантовых вычислительных устройств до задач лазерной химии и ядерно-магнитного резонанса. В докладе рассмотрены различные математические методы оптимального управления квантовыми системами, в том числе открытыми при наличии декогеренции и при наличии ограничений на управление.

Ключевые слова: управление квантовыми системами; открытые квантовые системы.

Методы оптимального управления квантовыми системами широко применяются для решения различных задач квантовых технологий, от задач повышения точности генерации квантовых операций для квантовых вычислительных устройств до задач лазерной химии и ядерно-магнитного резонанса. Применение математических методов позволяет повышать эффективность управления в реальных экспериментальных ситуациях. В докладе рассмотрены различные математические методы оптимального управления квантовыми системами, в том числе открытыми при наличии декогеренции и шумов, и управление при наличии ограничений. Квантовые каналы могут быть параметризованы точками комплексного многообразия Штифеля. С использованием такой параметризации задачи управления открытыми квантовыми системами можно математически формулировать как задачи оптимизации на комплексных многообразиях Штифеля [1]. Разработаны градиентные методы оптимизации для открытых квантовых систем [1, 2]. Рассмотрены широкие классы целевых функционалов, включающие задачи генерации квантовых вентилей, неунитарных квантовых операций, создания заданных целевых состояний квантовых систем, управления термодинамическими величинами [3]. Исследуются ландшафты задач управления как для замкнутых [4], так и для открытых квантовых систем [3]. Для замкнутых квантовых систем установлено возникновение ловушек более высокого порядка при наличии симметрий в управляемой квантовой системе [4]. В работе [1] в общем случае был сформулирован метод проекции градиента для квантовых систем, находящихся под воздействием когерентного и некогерентного управления, с помощью параметризации управляемой динамики точками комплексного многообразия Штифеля. Метод проекции градиента недавно был адаптирован в разных работах для различных задач, включая исследование ландшафтов задач управления квантовыми системами при наличии ограничений [5]. Решена задача оптимального быстродействия для кубита,

взаимодействующего с окружением, где установлена важная роль импульсных управлений в задачах управления квантовыми системами [6].

Частичная поддержка РНФ 22-11-00330-П, Минобрнауки 075-15-2024-529, программы «Приоритет 2030» (проект «Квантовый Интернет»).

Литература

1. Oza A., Pechen A., Dominy J., Beltrani V., Moore K., Rabitz H. Optimization search effort over the control landscapes for open quantum systems with Kraus-map evolution // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2009. Vol. 42. P. 205305.
2. Petruhanov V. N., Pechen A. N. GRAPE optimization for open quantum systems with time-dependent decoherence rates driven by coherent and incoherent controls // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2023. Vol. 56. P. 305303.
3. Russkikh I., Volkov B., Pechen A. Quantum channels, complex Stiefel manifolds, and optimization // Quantum Information Processing, 2025. Vol. 24. P. 167.
4. Volkov B., Myachkova A., Pechen A. Phenomenon of a stronger trapping behavior in Λ-type quantum systems with symmetry // Physical Review A, 2025. Vol. 111. P. 022617.
5. Pechen A. N. On the analysis of quantum control landscapes using gradient projection method and Pontryagin maximum principle // Lobachevskii Journal of Mathematics, 2025. Vol. 46. P. 2615–2624.
6. Lokutsievskiy L. V., Pechen A. N., Zelikin M. I. Time-optimal state transfer for an open qubit // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2024. Vol. 57. P. 275302.

Результаты экспериментальных исследований аппаратуры синхронизации для дальнепролетной системы квантового распределения ключа

д. т. н. Нефедов С. И.[1], к. т. н. Ожегов Р. В.[1,2], Елезов М. С.[1], Коновальцев А. В.[1,3]
[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
snefedov@hse.ru, rozhegov@hse.ru, melezov@hse.ru,
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
[3] Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)
125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4

В докладе рассматриваются результаты экспериментальных исследований прицезионной системы синхронизации, разработанной для применения в дальнепролетных системах квантового распределения ключа с однофотонными детекторами. Исследованы статистические распределения вероятности приема сигналов синхронизации однофотонным детектором.

Ключевые слова: квантовая криптография; распределение ключа; система синхронизации; однофотонный детектор; дальнепролетная линия.

Квантовые коммуникации, как часть квантовых технологий, являются на сегодня одним из перспективных научных направлений. При создании аппаратуры квантовых коммуникаций большое внимание уделяется системам квантового распределения ключа, в том числе и для дальнепролетных магистральных линий связи. Показано, что в таких системах для регистрации квантовых состояний применяются однофотонные детекторы [1].

Важной и до недавнего времени нерешенной является задача синхронизации таких систем без применения сигналов спутниковых радионавигационных систем. Так, для того чтобы обеспечить генерацию ключа на дальности около 200 км при скорости генерации квантовых состояний 100 Мбит/с, необходимо произвести временную синхронизацию с точностью 2,5 нс.

В данном докладе рассматриваются метод и аппаратура синхронизации, обеспечивающая получение заданных характеристик в дальнемагистральной системе квантового распределения ключа [2]. Особенное внимание уделяется исследованию статистических распределений вероятности приема импульсов синхронизации однофотонным фазовым детектором. Делается вывод о возможности синтеза алгоритма синхронизации на основе полученных статистических распределений.

В заключение приводятся итоговые характеристики аппаратуры и системы синхронизации при применении ее в дальнепролетной системе квантового распределения ключа, оснащенной однофотонными детекторами.

Литература

1. Kurochkin V. L., Zverev A. V., Kurochkin Y. V., Ryabtsev I. I., Neizvestnyi I. G., Ozhegov R., Goltsman G., Larionov P. A. Long-Distance Fiber-Optic Quantum Key Distribution Using Superconducting Detectors // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2015. Vol. 51. № 6. P. 548–552.
2. Нефедов С. И., Ожегов Р. В., Евсютин О. О., Елезов М. С., Морозов В. И. Проблемы создания систем квантового распределения ключей для магистральных линий большой протяженности // Наноиндустрия, 2024. — Т. 17. — № S10-2 (128). — С. 553–558.

УДК 003.26

Влияние развития квантовых вычислений на эволюцию криптографических алгоритмов для устройств с ограниченными ресурсами

Кот М. А.[1], Панасенко С. П.[2], к. т. н., Турченко О. Ю.[1], к. т. н.
[1] ООО «КуАпп»
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
mkot@qapp.tech, oturchenko@qapp.tech
[2] АО «Актив-софт»
115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 1
panasenko@guardant.ru

Рассмотрены особенности реализации постквантовых криптоалгоритмов в низкоресурсных устройствах и предложены варианты реализации ряда отечественных постквантовых алгоритмов электронной подписи в подобных устройствах за счет оптимизации данных алгоритмов и применения специальных наборов параметров.

Ключевые слова: постквантовая криптография; электронная подпись; низкоресурсная криптография; квантовая угроза.

Угроза появления квантовых вычислителей с достаточными для проведения атак на реализации криптографических алгоритмов ресурсами оказывает значительное влияние на развитие криптографии. Наибольшему потенциальному воздействию со стороны квантовых вычислителей подвержены асимметричные криптографические алгоритмы, основанные на сложности факторизации целых чисел или дискретного логарифмирования (в т. ч. в группе точек эллиптической кривой), поскольку данные проблемы могут быть легко разрешимы с помощью алгоритмов для квантовых вычислений, в частности алгоритма Шора [1] и его вариантов. Известным методом противодействия указанной угрозе является применение постквантовых криптографических алгоритмов, устойчивых к анализу как с помощью традиционных, так и квантовых вычислителей.

Одним из классов устройств, в которых востребованы реализации постквантовых алгоритмов, являются вычислительные устройства, обладающие незначительными вычислительными ресурсами, примерами которых могут являться смарт-карты и радиочастотные метки. При этом постквантовые криптоалгоритмы обычно характеризуются значительной вычислительной ресурсоемкостью, а также большими размерами ключей, шифртекста или значений электронной подписи; последнее требует увеличения памяти устройств для хранения и обработки, а также увеличенной полосы пропускания [2].

Следовательно, для подобных устройств востребована разработка постквантовых криптоалгоритмов с пониженными требованиями к ресурсам. Одним из решений является формирование специальных наборов для применения в различных областях. Так, в работе [3] предлагается несколько наборов параметров отечественной постквантовой схемы подписи «Гиперикум», обладающих либо сниженными требованиями ко времени формирования подписи, либо сниженными размерами

подписи. В контексте низкоресурсных устройств подобный подход не решает всех проблем, в частности, когда к устройству применяются ограничения и по времени выполнения алгоритма, и по размерам передаваемых данных. Для решения подобных проблем необходима разработка специальных низкоресурсных версий постквантовых алгоритмов. Низкоресурсные версии постквантовых алгоритмов можно получить, вводя следующие изменения в их структуре: снижение размеров параметров (а следовательно, и стойкости) и ограничение на количество операций на секретном ключе. Зачастую оба этих метода можно комбинировать, получая разумные соотношения количества допустимых операций и уровня их защиты. Помимо этого, каждый из постквантовых алгоритмов имеет ряд особенностей, позволяющих повысить его эксплуатационные качества в условиях ограниченных ресурсов за счет следующих техник: параллельное выполнение алгоритма на специализированных сопроцессорах и потоковая передача данных в процессе работы алгоритма.

Результаты применения вышеописанных методов реализации постквантовых схем для устройств с незначительными вычислительными ресурсами и основные вызовы при формировании конкретных значений параметров низкоресурсных постквантовых алгоритмов «Гиперикум» и «Облепиха» будут изложены в докладе по настоящей работе.

Литература

1. Shor P. W. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer // SIAM Journal on Computing, 1997. Vol. 27 (5).
2. Панасенко С. П. О применимости постквантового стандарта электронной подписи SLH-DSA в смарт-картах // Вопросы кибербезопасности, 2025. — № 3 (67). — С. 29–37.
3. Турченко О. Ю., Усманов С. Р. Анализ параметров постквантовой схемы подписи Гиперикум // ПДМ. Приложение, 2024. — № 17. — С. 119–120.

УДК 530.145

Формализм производящих функций амплитуд вероятностей в оптических квантовых информационных технологиях

Богданов Ю. И.[1,2,3], **Богданова Н. А.**[1,2]

[1] *НИЦ «Курчатовский институт» — ФТИАН им. К.А. Валиева*
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
[2] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] *Российский квантовый центр*
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

Хорошо известна полезность традиционного аппарата производящих функций, описывающих распределения числа фотонов, для решения актуальных задач квантовой оптики и квантовых информационных технологий. В то же время из квантовой механики следует, что за вероятностями стоят более фундаментальные объекты — амплитуды вероятностей. Целью настоящей работы является создание аппарата производящих функций по отношению к амплитудам вероятностей. Предложенный подход позволяет представить всю полноту информации о квантовом состоянии в простом компактном виде.

Ключевые слова: производящие функции; амплитуды вероятностей; оптические чипы; квантовые информационные технологии.

Ранее в наших работах была продемонстрирована полезность традиционного аппарата производящих функций, описывающих распределения числа фотонов, для решения актуальных задач квантовой оптики и квантовых технологий [1, 2]. В то же время из квантовой механики хорошо известно, что за вероятностями стоят более фундаментальные объекты — амплитуды вероятностей. Целью настоящей работы является создание аппарата производящих функций по отношению к амплитудам вероятностей.

Разработанный математический аппарат производящих функций амплитуд вероятностей направлен на описание различных оптических квантовых состояний. Метод позволяет представить всю полноту информации о квантовом состоянии в простом компактном виде. В качестве примеров рассмотрены когерентные состояния, состояния Фока, сдвинутые состояния Фока, состояния сжатого вакуума, сжатые когерентные состояния и др. Численные результаты получаются путем автоматического дифференцирования производящих функций с использованием символьных вычислений в программной среде MATLAB. Отдельный акцент в работе делается на использовании разработанного аппарата производящих функций для рассмотрения преобразований амплитуд вероятностей квантовых состояний в делителях пучка и линейно-оптических интерферометрах. Такие интерферометры важны для классических и квантовых технологий, а также для построения аппаратно-эффективных искусственных нейронных сетей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00263-П, https://rscf.ru/project/22-12-00263.

Литература

1. Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Лукичёв В. Ф. Введение в квантовые информационные технологии. — М.: Техносфера, 2025. — 468 с.
2. Bogdanov Yu. I., Katamadze K. G., Avosopyants G. V., Belinsky L. V., Bogdanova N. A., Kalinkin A. A., Kulik S. P. Multi-photon subtracted thermal states: description, preparation and reconstruction // Physical Review A, 2017. Vol. 96. № 6. 063803.

УДК 621.382.2/.3

Интерференция ультракоротких оптических импульсов в интерферометре Маха – Цендера

Попов В. Г.[1,2,3], **Самарин С. С.**[4]
[1] *АО «ИнфоТеКС»*
127273, г. Москва, ул. Отрадная, 2Б, стр. 1
Vladimir.Popov@infotecs.ru
[2] *Отдел радиофотоники, НТЦ телекоммуникаций,*
Московский физико-технический институт
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] *Факультет информационных технологий и анализа больших данных,*
Финансового университета при правительстве РФ
109456, г. Москва, 4-й Вешняковский пр-д, 4
[4] *Центр инженерной физики, Сколковский институт науки и технологий,*
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1

В докладе представлены результаты экспериментального исследования интерференции ультракоротких лазерных импульсов в интерферометре Маха — Цендера. Использовался волоконный интерферометр с переменной величиной разбалансировки плеч, позволяющей задерживать импульсы излучения в плечах для исследования интерференции. Обнаружена существенная вибрационная чувствительность интерференции. Такая чувствительность может возникает в силу эффекта Доплера при внутреннем отражении света в волокне и изменении оптического пути. На основании обнаруженного эффекта предложена методика определения длительности лазерных импульсов, которая может быть применима в ситуации, когда низкая граничная частота фотодетектора не позволяет наблюдать полноценной интерференционной картины.

Ключевые слова: ультракороткие лазерные импульсы; интерферометр Маха — Цендера.

Развитие информационной цифровой инфраструктуры с увеличивающимся потоком обмена информацией предъявляет новые требования к быстродействию оптической связи и в особенности квантового распределения ключей. В то же время развитие оптических технологий уже достигло длительности оптических импульсов в аттосекундном диапазоне (10^{-18} с) [1], что при единичной скважности может дать скорость обмена информацией в 1 Эбит/с. Проблема в том, что отсутствуют электронно-оптические преобразователи, да и вычислители, работающие на таких частотах. Все это выдвигает новые требования для электронной компонентной базы и для методов исследования ультра- и сверхкоротких оптических импульсов. Обычно длительность импульса можно оценить при исследовании его спектра с использованием спектроанализатора. На сегодняшний день такие спектроанализаторы работают с использованием опорного лазера и интерферометра с движущимися зеркалами, проблема в том, что длина волны опорного лазера должна при этом быть близка длинам волн входящего в спектроанализатор излучения [2]. Если же разница будет велика, измерить достоверно спектр не получится, поскольку

разностная частота оптического сигнала превысит граничную частоту фотодетектора. А это означает, что при обратном фурье-преобразовании спектра будет получен профиль импульса с более широкими фронтами, чем он есть на самом деле. Поэтому возникает потребность в методике, позволяющей преодолеть ограничения, накладываемые граничной частотой фотодетектора. В качестве таковой методики мы предлагаем к использованию интерференцию на волоконном интерферометре Маха — Цендера с переменной балансировкой и пьезоактиватором в одном из плеч интерферометра (см. рис 1*а*). Пьезоэлемент ПЭ деформирует переменным образом волновод, вызывая в нем вибрации, которые влияют на волновой вектор и траекторию лучей в нем (см. рис. 1*б*). Все это влияет на фазу запаздывающей части импульса, что неизбежно отражается в интерференции, и возникает динамическое изменение интенсивности в выходном импульсе. Если же разница длин плеч интерферометра велика настолько, что импульсы не пересекаются на выходе интерферометра, то динамичность сигнала исчезает. Таким образом, измеряя разность длин плеч интерферометра, можно получить величину длительности импульса.

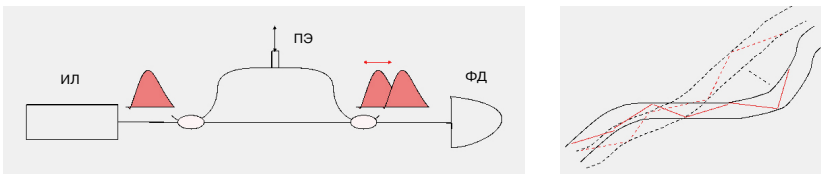


Рис. 1. Схема эксперимента. Красными фигурами обозначены оптические импульсы, перемещающиеся внутри волокна, обозначенного непрерывной черной линией. ПЭ — пьезоэлемент; ИЛ — импульсный лазер; ФД — фотодиод (*а*). Изменение оптических траекторий луча внутри волокна при его колебаниях (*б*)

Литература

1. Mourou G. Nobel Lecture: Extreme Light Physics and Application. 2018.
2. Белл Р. Введение в Фурье-спектроскопию. — М.: Мир, 1975.

УДК 538.945

Управление флаксониум-кубитом на основе сверхпроводниковой цифровой электроники

к. ф.-м. н. Бастракова М. В.[1,2], к. ф.-м. н. Пашин Д. С.[1]
[1] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
bastrakova@phys.unn.ru
[2] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

В работе предложен метод цифрового управления флаксониум-кубитом с использованием оптимизированных последовательностей SFQ-импульсов, обеспечивающий выполнение высокоточных (>99,99 %) однокубитных операций (например, NOT за ~70 нс), и алгоритмы автоматизированной оптимизации параметров кубитной цепи на основе градиентного спуска.
Ключевые слова: флаксониум-кубит; сверхпроводниковая электроника; SFQ-импульсы.

В настоящее время ключевой задачей в области сверхпроводящих квантовых процессоров является разработка эффективных методов управления кубитами, обеспечивающих высокоточные операции за минимальное время. Особое внимание уделяется сверхпроводящим кубитам, таким как трансмон и флаксониум [1]. Для оптимального управления необходимо учитывать энергетический спектр и предотвращать утечку на высоколежащие уровни. С ростом числа кубитов важно минимизировать использование микроволновых устройств, вносящих шум и усложняющих систему. Перспективное решение — применение коротких униполярных импульсов (Single Flux Quantum, SFQ), генерируемых сверхпроводниковой цифровой электроникой [2, 3].

В данной работе представлено исследование цифрового управления флаксониум-кубита с использованием униполярных последовательностей пикосекундных SFQ-импульсов. Подобная концепция управления ранее была апробирована для трансмон-кубитов на основе регулярных последовательностей SFQ-импульсов, воздействующих на периоде собственных колебаний кубита [2, 3], а также на базе оптимизационных протоколов подбора SFQ-импульсов на частоте высокочастотного генератора импульсов [4]. Отличительной особенностью флаксониум-кубитов от трансмонов является низкая собственная частота, в связи с этим в работе показано, что метод контроля на основе регулярных последовательностей импульсов является неприемлемым для управления флаксониумами, так как длительность однокубитных операций составляет несколько сотен наносекунд. Кроме того, во флаксониум-кубите существует асимметрия между зарядовыми и потоковыми степенями свободы за счет специфики волновых функций в двухъямном потенциале [1]. С учетом данных особенностей представлен протокол управления на основе регулярных подпоследовательностей из N SFQ-импульсов магнитного потока, действующих на частоте высокочастотного генератора (~ нескольких десятка ГГц), которые повторяются на каждом периоде колебаний кубита для совершения требуемой операции. Теоретически при параметрах управления, не допускающих

утечку вне вычислительного подпространства (двухуровневом приближении), была произведена оценка количества импульсов в подпоследовательности и угла поворота состояний на одном периоде колебаний кубита, а также представлен метод нахождения требуемого числа циклов повторений подпоследовательности. Аналитические результаты были подтверждены численным расчетам флаксониум-кубита в многоуровневом приближении, была рассчитана точность операции NOT на основе метрики фиделити (fidelity). Найдены оптимальные значения SFQ (амплитуды, длительности) и частоты генератора для совершения высокоточных квантовых операций более 99,99 %. Показано, что длительность операции, например NOT, составляет порядка 70 нс.

Важным результатом работы стала разработка алгоритмов автоматизированной оптимизации параметров кубитной цепи (индуктивности, емкости, элементы джозефсоновского перехода) на основе метода градиентного спуска. Эти алгоритмы позволяют находить оптимальные топологические параметры, удовлетворяющие критериям когерентности и реализации высокоточных квантовых операций.

Литература

1. Rower D. A., Ding L., Zhang H., Hays M., An J. et al. Suppressing Counter-Rotating Errors for Fast Single-Qubit Gates with Fluxonium // PRX QUANTUM, 2024. Vol. 5. P. 040342.
2. Leonard E., Jr., Beck M. A., Nelson J., Christensen B. G., Thorbeck T. et al. Digital Coherent Control of a Superconducting Qubit // Phys. Rev. Appl, 2019. Vol. 11. P. 014009.
3. Liu C. H., Ballard A., Olaya D., Schmidt D. R., Biesecker J. et al. Single Flux Quantum-Based Digital Control of Superconducting Qubits in a Multichip Module // PRX Quantum, 2023. Vol. 4. P. 030310.
4. Vozhakov V., Bastrakova M. V., Klenov N. V., Satanin A. M., Soloviev I. I. Speeding up qubit control with bipolar single-flux-quantum pulse sequences // Quantum Science and Technology, 2023. Vol. 8. № 3. P. 35024.

УДК 530.145

Столетний юбилей квантовой механики и перспективы развития квантовых информационных технологий

Богданова Н. А.[1,2], Богданов Ю. И.[1,2,3], Лукичев В. Ф.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] НИЦ «Курчатовский институт» — ФТИАН им. К.А. Валиева
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
[3] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

Доклад посвящен квантовой теории, которая кардинально изменила наш взгляд на мироустройство и породила технологии, без которых невозможно представить нашу сегодняшнюю жизнь. Текущий 2025 год Организация Объединенных Наций объявила Международным годом квантовой науки и технологий. Это решение знаменует собой столетие со дня появления квантовой механики, которая началась с ряда фундаментальных статей, появившихся 100 лет назад.

Ключевые слова: Международный год квантовой науки и технологий; первая квантовая революция; вторая квантовая революция; квантовые информационные технологии; декогерентизация и квантовые шумы.

Столетие назад в физике произошло такое изменение взглядов, которое имело для физических наук и технологий не меньшие последствия, чем теория Чарльза Дарвина об эволюции путем естественного отбора для биологии. Летом 1925 года, спасаясь от сезонной аллергии, 23-летний физик Вернер Гейзенберг отправился на остров Гельголанд в Северном море. 29 июля 2025 года он представил в журнал Zeitschrift für Physik статью «О квантово-теоретической интерпретации кинематических и механических соотношений» Эта работа мотивировала Гейзенберга и его близких коллег (Борн, Иордан, Дирак, Шредингер и др.) к дальнейшим исследованиям в последующие месяцы.

Квантовая революция 1925 года привела к тому, что физики были вынуждены отбросить законы классической механики и радикально переосмыслить такие классические понятия, как траектории движения частиц, их координаты, импульсы и др. Квантовая механика потребовала от ученых отказаться от основанных на здравом смысле идей, например от представления, что субатомные частицы имеют четко определенное положение и импульс в любой момент времени. Вместо этого физики обнаружили, что природные явления имеют изначально фундаментальную вероятностную природу.

Инженерные приложения, возникшие на основе квантовой механики, привели во второй половине 20 века к технологической революции, которую сейчас принято называть первой квантовой революцией. Эта технологическая революция привела к рождению ядерных технологий, а также созданию транзисторов, лазеров, компьютеров, мобильной связи, Интернета и многого другого, без чего невозможно представить нашу сегодняшнюю жизнь. Сейчас мир стоит на пороге второй квантовой революции. Ее ключевое отличие от первой квантовой революции

состоит в том, что если раньше квантовая механика применялась только на уровне «железа» (hardware), то теперь, в эпоху второй квантовой революции, она оказывается в самой сердцевине компьютерной логики и программного обеспечения (software). Логика вычислительных устройств нового типа (квантовых компьютеров) базируется на применении фундаментальных принципов квантовой механики, таких как суперпозиция и запутанность квантовых состояний [1]. Считается, что компьютеры, построенные на квантовых принципах, окажутся гораздо эффективнее своих классических собратьев в решении ряда практически важных классов задач в области физики, химии, материаловедения, фармацевтики, оптимальных методов управления, криптографии и др. В докладе обсуждаются наиболее яркие достижения последних лет в области квантовых вычислений и квантовых коммуникаций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00263-П, https://rscf.ru/project/22-12-00263.

Литература

1. Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Лукичёв В. Ф. Введение в квантовые информационные технологии. — М.: Техносфера, 2025. — 468 с.

Сенсоры на базе центров окраски в алмазе

Акимов А. В.
[1] *Российский квантовый центр*
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
[2] *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН*
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

Алмаз является уникальным кристаллом, обладающим большой прозрачностью, теплопроводностью и при этом физической и химической инертностью. Благодаря большой запрещенной зоне алмаз имеет много хорошо изолированных в зоне центров окраски, концентрацию и состав которых можно в существенной степени контролировать при росте алмаза или создавать при помощи имплантации. Часть из этих центров окраски научное сообщество пытается использовать в качестве кубитов для квантовых вычислительных машин. Высокая чувствительность кубитов к внешним возмущениям, однако, открывает другое возможное приложение центров окраски в алмазе — использование их в качестве сенсоров магнитных полей, температуры или вращения. В своем докладе я расскажу о работах моей группы в этом направления.

УДК 530.145

Моделирование ОДМР одиночных NV-центров в магнитном и электрическом полях

Калошин М. М.[1], Вергелес С. С.[1], к. ф.-м. н., Гусев А. С.[1], Косогорова Т. А.[1], Маргушин Р. Е.[1], д. ф.-м. н., Низовцев А. П.[1], Салказанов А. Т.[1], д. т. н., Каргин Н. И.[1]

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
MMKaloshin@mephi.ru

С помощью метода спинового гамильтониана построены спектры оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) одиночного NV-центра в электрическом поле. Также выполнено численное моделирование спектров комплекса ^{15}NV в магнитном и электрическом полях.

Ключевые слова: векторная магнитометрия; ОДМР; NV-центр.

Одним из наиболее перспективных одиночных квантовых систем для использования в квантовых технологиях является одиночный NV-центр. NV-центр представляет собой центр окраски в алмазе, который состоит из атома азота (N) и вакансии (V) [1]. Он обладает уникальными спиновыми и оптическими свойствами. Основным преимуществом NV-центра является возможность управления его спиновым состоянием при комнатной температуре [2]. Особенно перспективным является магнитометрия с NV-центрами. Для векторной магнитометрии можно использовать ансамбли NV-центров благодаря тому, что в ансамбле NV-центр может иметь 4 различных направления осей квантования, что позволяет получить величины проекций магнитного поля на эти оси и рассчитать параметры магнитного поля, полярного и азимутального угла. Такой подход обеспечивает высокую чувствительность [3], но относительно низкое пространственное разрешение. Именно поэтому основной проблемой становится увеличение пространственного разрешения, которое требует перехода к одиночным NV-центрам.

Данная работа посвящена анализу возможности использования одиночного NV-центра для векторной магнитометрии. Моделирование проводится с использованием метода спинового гамильтониана:

$$\hat{H}_{NV} = DS_z^2 + E\left(S_x^2 - S_y^2\right) + \mu_B g_e \vec{B}\vec{S} + \vec{S}A\vec{I} + QI_z^2 - g_n \mu_n \vec{B}\vec{I} \,,$$

где гамильтониан описывает суммарный спин S = 1 системы NV-центра с учетом взаимодействия с ядром ^{14}N или ^{15}N.

В результате расчеты показали (рис. 1), что при приложении электрического поля порядка 300 кВ/см перпендикулярно оси квантования NV-центра меняются свойства симметрии NV-центра и появляется чувствительность к азимутальному углу магнитного поля, что открывает путь для проведения полной векторной магнитометрии с нанометровым пространственным разрешением. Также проведено теоретическое исследование комплекса ^{15}NV, где было установлено, что двойное вырождение уровней снимается магнитным полем и не зависит от электрического поля. Этот эффект может быть использован для разделения влияния на сенсор магнитного поля внутрикристаллических электрических полей от измеряемого магнитного поля, таким образом повышая чувствительность магнитометрии.

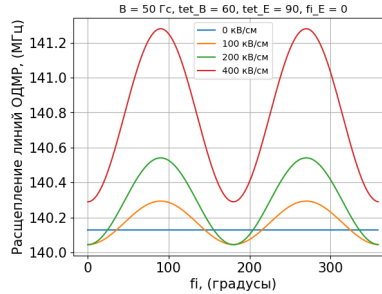


Рис. 1. Зависимость расщепления резонансных линий от азимутального угла

Данная работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение о предоставлении гранта № 075-15-2024-556).

Литература

1. Du Preez L. Electron paramagnetic resonance and optical investigations of defect centres in diamond. University of the Witwatersrand, Johannesburg (South Africa), 1965.
2. Doherty M.W. et al. The nitrogen-vacancy colour centre in diamond // Physics Reports, 2013. Vol. 528. № 1. P. 1–45.
3. Sengottuvel S. et al. Wide-field magnetometry using nitrogen-vacancy color centers with randomly oriented micro-diamonds // Scientific Reports, 2022. Vol. 12. № 1. P. 17997.

Квантовые сенсоры на основе высокодобротных оптических микрорезонаторов

Биленко И. А.
[1] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
igorbilenko@gmail.com

Микрорезонаторы с модой шепчущей галереи (WGM) с добротностью $Q > 10^8$ были предложены и продемонстрированы на физическом факультете МГУ более трех десятилетий назад [1]. В настоящее время микрокольцевые и микродисковые оптические резонаторы широко используются в физических измерениях и технических приложениях. Возможность достижения очень высокой добротности (10^{11} было продемонстрировано для кристаллических дисков из CaF_2) делает их чрезвычайно привлекательными для создания уникальных приборов, таких как спектрометры высокого разрешения, лазерные дальномеры и измерители скорости, стандарты частоты. Особый интерес представляют чувствительные сенсоры, поскольку наличие «выпадающего» поля у поверхности микрорезонатора позволяет с высочайшей точностью регистрировать изменение показателя преломления окружающей среды. На основе таких сенсоров был создан прибор, позволяющий обнаруживать наночастицы в водной среде [2]. Более того, генерация когерентных частотных гребенок в микрорезонаторе дает возможность не только регистрировать изменение, но и определять спектры поглощения, а значит, и химический состав среды. Появившаяся в последнее время технология изготовления высокодобротных интегральных микрорезонаторов открывает путь к массовому производству надежных и доступных приборов.

Предельная чувствительность данного метода зависит от мощности оптического излучения. Однако во многих случаях существуют принципиальные ограничения, связанные как с воздействием света на исследуемый объект, так и с нелинейными эффектами в самом микрорезонаторе. Преодолеть эти ограничения можно, используя так называемые квантовые сжатые состояния света. Сжатие на уровне 2 дБ было продемонстрированно в лаборатории Российского квантового центра, также была найдена принципиальная возможность снизить влияние потерь излучения на ввод и вывод из интегральной структуры [3].

Возникающая в микрорезонаторах с керровской нелинейностью кросс-фазовая модуляция позволяет реализовать квантово-невозмущающие измерения числа фотонов в сигнальной волне при помощи измерения сдвига фазы в пробной. Были проанализированы фундаментальные ограничения на пути реализации данного вида измерений, показано, что использование кристаллического резонатора из CaF_2 малого (менее 0,2 мм в диаметре) размера позволяет превзойти стандартный квантовый предел точности счета квантов в сигнальной волне [4].

Литература

1. Braginsky V. B., Gorodetsky M. L., Ilchenko V. S. Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes // Physics Letters A, 1989. 137, 393.
2. Самоленко А. А., Левин Г. Г., Лясковский В. Л., Миньков К. Н., Иванов А. Д., Биленко И. А. Применение оптических микрорезонаторов с модами типа «шепчущей галереи» для обнаружения наночастиц серебра в водной среде // Оптика и спектроскопия, 2017. — № 122 (6). — С. 1037–1039.
3. Salykina D., Balybin S., Khalili F. Y. Intracavity squeezing for a Kerr quantum nondemolition measurement scheme // Physical Review A, 2025. Vol. 111 (1). P. 013715.
4. Balybin S. N., Matsko A. B., Khalili F. Y., Strekalov D. V., Ilchenko V. S., Savchenkov A. A., Bilenko I. A. Quantum nondemolition measurements of photon number in monolithic microcavities // Physical Review A, 2022. Vol. 106 (1). P. 013720.

УДК 53.06

Квантовый сенсор на основе ультрахолодных атомов: компактный гравиметр

Афанасьев А. Е.[1], Быкова Д. В.[1,2], Калмыков А. С.[1], Идрисова А. А.[1,2], Балыкин В. И.[1]

[1] Институт спектроскопии Российской академии наук
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5
[2] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
afanasiev@isan.troitsk.ru

Квантовые сенсоры обеспечивают более высокий уровень точности измерения физических полей в сравнении с классическими аналогами. Среди кантовых сенсоров гравиметр — сенсор для измерения ускорения свободного падения — является одним из необходимых для обеспечения промышленной безопасности и суверенитета страны. Разрабатываемый в Институте спектроскопии РАН компактный гравиметр на основе технологий атомного и оптического чипов позволит обеспечить потребности различных отраслей промышленности в проведении долговременных автономных измерений.

Ключевые слова: атомный чип; оптический чип; квантовый сенсор; гравиметр; холодные атомы.

Развитие квантовых сенсоров направлено на повышение точности измерений, что необходимо для решения как фундаментальных, так и прикладных задач. Для построения квантовых сенсоров используются различные технологические платформы. Наибольшую точность демонстрируют сенсоры на основе атомарных газов, в которых удается достичь прецизионного уровня контроля квантовой системы. При этом предельные значения по точности достигаются в системах на основе холодных и ультрахолодных газов [1]. Примером является использование стандартов частоты на основе атомных фонтанов.

К наиболее развитым квантовым сенсорам на основе холодных атомов можно отнести сенсоры для измерения инерциальных сил [2]. К таким сенсорам относятся акселерометры, гироскопы, гравиметры и градиометры. Точность современных атомных гравиметров и градиометров уже превосходит точность многих классических аналогов [3], а их практическое применение демонстрирует высокую степень надежности [4]. Основной интерес сейчас сосредоточен в области создания транспортируемых устройств. Для задач гравиметрии уже созданы транспортируемые гравиметры и градиометры, представленные компаниями MuQuans, CAS ColdAtoms, MSquared и iXBlue. Основным преимуществом атомных гравиметров является отсутствие подвижных частей. Это позволяет значительно увеличить межповерочный интервал и, следовательно, время автономной работы. К областям применения таких устройств относятся: навигация, геологоразведка, сопровождение космических запусков и др. К отдельному направлению может быть отнесен мониторинг окружающей среды. В первую очередь это касается исследования и контроля запасов пресной воды, что является актуальной проблемой. Мониторинг и предсказание землетрясений, извержений вулканов, паводков и наводнений позволит обеспечить техногенную безопасность промышленных районов страны.

В основе транспортируемого гравиметра, который разрабатывается в Институте спектроскопии РАН, лежит использование оптических вакуумных ячеек, совмещенных с атомными и оптическими чипами [6, 7]. Атомный ансамбль охлаждается до температуры 1 мкК вблизи атомного и оптического чипов. Подготовленный атомный ансамбль используется в качестве тестовой массы в атомном интерферометре. При свободном падении атомы ансамбля взаимодействуют с последовательностью $\pi/2-\pi-\pi/2$ лазерных импульсов. Детектирование населенности уровней сверхтонкой структуры атомов позволяет определить разность фаз, приобретенную атомным ансамблем в интерферометре. Эта разность фаз зависит от ускорения свободного падения, которое измеряется с точностью не хуже нескольких мкГал.

Разрабатываемая в ИСАН схема атомного интерферометра является универсальной платформой для ряда квантовых сенсоров. Помимо гравиметра ее использование возможно для построения компактных акселерометра, гироскопа и атомных часов. Оптимизация массогабаритных параметров таких сенсоров позволит размещать их на мобильных платформах, включая летательные аппараты и спутники. Использование аналогичного подхода лежит в основе сенсоров на основе холодных атомов размещенных на борту квадрокоптеров.

Литература

1. Degen C. L., Reinhard F., Cappellaro P. Quantum sensing // Reviews of modern physics, 2017. Vol. 89. P. 035002.
2. Geiger R., Landragin A., Merlet S., Pereira Dos Santos F. High-accuracy inertial measurements with cold-atom sensors // AVS Quantum Science, 2020. Vol. 2. P. 024702.
3. Gillot P., Francis O., Landragin A., Pereira Dos Santos F., Merlet S. Stability comparison of two absolute gravimeters: optical versus atomic interferometers // Metrologia, 2014. Vol. 51. P. L15.
4. Bidel Y., Zahzam N., Blanchard C., Bonnin A., Cadoret M., Bresson A., Rouxel D., Lequentrec-Lalancette M. F. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry // Nature Communications, 2018. Vol. 9. P. 627.
5. Amit M., Amit O., Zhou S., Groswasser D., Japha Y., Folman R. Fifteen years of cold matter on the atom chip: promise, realizations, and prospects // Journal of Modern Optics, 2016. Vol. 63. P. 1840.
6. Skakunenko P., Bykova D., Kalmykov A., Kalmykov A., Kirtaev R., Balykin V. Efficient cold atom source from a single-layer atom chip // Chinese Optics Letters, 2024. Vol. 22. P. 060201.
7. Афанасьев А. Е., Быкова Д. В., Балыкин В. И. Атомный чип для задач квантовой сенсорики // Наноиндустрия, 18, принята к печати (2025).

УДК 530.1

Транспортируемый квантовый гравиметр на основе интерференции ультрахолодных атомов рубидия

Прудников О. Н.[1], Капуста Д. Н.[1], Гончаров А. Н.[1], Тайченачев А. В.[1,2], Юдин В. И.[1,2]

[1] Институт лазерной физики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15Б
[2] Новосибирский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Атомные интерферометры на основе волн материи представляют собой качественно новый, по отношению к классическим, подход для измерения физических величин. В докладе будут представлены основные научные результаты ИЛФ СО РАН в области построения высокоточных квантовых гравиметров.

Ключевые слова: атомная интерферометрия; квантовые сенсоры; квантовые гравиметры.

Атомные интерферометры на основе холодных атомов в настоящее время находят широкую область применения как для фундаментальных, так и прикладных задач. Сенсоры инерциальных сил на основе атомных интерферометров представляют большой интерес для решения практических задач в инерциальной навигации, навигации по картам гравитационных полей как на Земле, так и в космосе, геофизике, метрологии, мониторинге окружающей среды [1–6]. Одним из актуальных направлений для фундаментальных исследований представляются интерферометры на основе волн материи для детектирования гравитационных волн, чувствительные к низкочастотному диапазону спектра гравитационных волн (до 10 Гц), содержащему много интересных с астрофизической точки зрения источников [7]. Квантовые абсолютные гравиметры на основе интерференции ультрахолодных атомов с точностью измерения ускорения свободного падения g на уровне 0,1–1 мкГал представляют большой интерес для решения ряда практических задач и, в частности, необходимы для контроля высокостабильных стандартов частоты на наземных станциях ГНСС и систем КВНО (в перспективе использования новых стандартов частоты с относительной погрешностью на уровне 10^{-17}–10^{-18}) для контроля сдвигов частоты этих стандартов при изменении локального гравитационного поля из-за приливных, геофизических, атмосферных и других факторов [6].

Достижение рекордных характеристик точности в компактных переносных гравиметрах затруднено в силу ряда физических причин. В ИЛФ СО РАН ведется развитие нового класса атомных интерферометров, обладающих повышенной устойчивостью сдвига сигнала к шумовым воздействиям остаточных внешних полей, как и сдвигам, вызванным неидеальностями конкретных схем реализации интерферометров (таких как форма импульсов, различия в интенсивностях импульсов, связанных с прохождением различных зон атомным облаком). Основным методом для решения представленной задачи является идея использования модифицированных протоколов инициализации и опроса квантовой системы, подробно описанная нами в работе [8]. Так, например, использование композитных импульсов позволяет реализовать отказоустойчивые схемы атомных интерферометров, устраняющие ряд технических дефектов лазерного импульса, которые могут

возникнуть в течение всего протокола опроса квантовой системы. Такие методы являются ключевыми для повышения уровня точности переносимых гравиметров.

На начальном этапе исследований нами представлены результаты по созданию абсолютного квантового гравиметра на основе интерференции ультрахолодных атомов 87Rb. Проведена подготовка начального волнового пакета в немагнитном квантовом состоянии с селекцией атомов по скоростям, одномерной шириной скоростного распределения 0,5 см/с и числом атомов 1–2 % от их начального числа в МОЛ. Реализован атомный интерферометр-гравиметр по трехимпульсной схеме с использованием встречных рамановских пучков и временем свободного падения атомов до 20 мс. Получен сигнал интерференции атомов рубидия в атомном квантовом гравиметре, позволяющий измерить локальное ускорение свободного падения с точностью лучше 1 мГал [9]. Представленные результаты являются базовым шагом по выявлению основных факторов, влияющих на точность измерений в атомном интерферометре и определения основных направлений для ее улучшения.

Литература

1. Sandwell D. T., Müller R. D., Smith W. H., Garcia E., Francis R. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // Science, 2014. Vol. 346. P 65–67.
2. Wang H., Wu L., Chai H., Hsu H., Wang Y. Technology of gravity aided inertial navigation system and its trial in South China Sea // IET Radar Sonar Navig., 2016. Vol. 10. P 862–869.
3. Tapley B. D., Bettadpur S., Watkins M., Reigber C. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results // Geophys. Res. Lett., 2004. Vol. 31. P. L09607.
4. Bidel Y., Zahzam N., Blanchard C. et al. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry // Nat. Commun., 2018. Vol. 9. P. 627.
5. He M., Chen X., Fang J. et al. The space cold atom interferometer for testing the equivalence principle in the China Space Station // npj Microgravity, 2023. Vol. 9. P. 58.
6. Alonso I., Alpigiani C., Altschul B. et al. Cold atoms in space: community workshop summary and proposed road-map // EPJ Quantum Technol., 2022. Vol. 9. P. 30.
7. Ming-Sheng Zhan et al. // International Journal of Modern Physics D, 2020. Vol. 29. № 04. P. 1940005.
8. Zanon-Willette T., Wilkowski D., Lefevre R., Taichenachev A. V., Yudin V. I. Generalized hyper-Ramsey-Borde matter-wave interferometry: Quantum engineering of robust atomic sensors with composite pulses // Phys. Rev. Research., 2022. Vol. 4. P. 023222.
9. Бонерт А. Э., Гончаров А. Н., Капуста Д. Н., Адамов К. Н., Прудников О. Н., Тайченачев А. В. Интерференция ультрахолодных атомов 87Rb в квантовом гравиметре // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2025. — Т. 168. — № 1 (7). — С. 47–54.

УДК 621.3.049

Инфракрасное фотодетектирование в гетероструктурах Ван-дер-Ваальса

Шуплецов А.[1,2], Мыльников Д.[3], Бандурин Д.[4], Свинцов Д.[3], Гайдученко И.[5,6], Чернов А.[1,3]

[1] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
[2] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53
[3] Центр фотоники и двумерных материалов, Московский физико-технический институт
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[4] Кафедра материаловедения и инженерии, Национальный университет Сингапура, Сингапур, 117575
[5] Московский педагогический государственный университет
119991, г. Москва, ул. М. Пироговская, 1, стр. 1
[6] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20

Проведены измерения транспортных характеристик и инфракрасного фотоотклика в скрученном двухслойном графене, гетероструктурах на основе графена и других двумерных материалах. Устройства демонстрируют улучшенный фототермоэлектрический отклик по сравнению с предыдущими работами. Управляемое затвором фотонапряжение коррелирует с особенностями, наблюдаемыми в транспортных измерениях. Полученные результаты могут быть использованы для создания оптоэлектронных устройств для среднего инфракрасного диапазона.

Ключевые слова: двумерные материалы; гетероструктуры; графен; однофотонные источники.

Создание структур на основе монослоев двумерных ван-дер-ваальсовых материалов предоставляет различные степени свободы для управления их свойствами. Наложение двух монослоев приводит к формированию метаматериала с эффективным периодическим потенциалом благодаря возникающей муаровой сверхрешетке. Скрученный под малым углом двухслойный графен (tBLG) привлек большое внимание после прорывной экспериментальной работы [1] благодаря появлению низкоэнергетических плоских зон. Сильные электрон-электронные взаимодействия внутри этих зон приводят к реализации коррелированных фаз и открывают путь к созданию новых устройств. В работе мы исследуем два типа устройств на основе графена для улучшенного инфракрасного фотодетектирования. Первый тип — это скрученный под малым углом двухслойный графен (tBLG). Продемонстрирован управляемый затвором фотоотклик и обнаружены особенности при целочисленном заполнении зон при линейной и круговой поляризации возбуждения. Механизм фотодетектирования может быть объяснен объемным фотовольтаическим эффектом. Второй тип — туннельное устройство графен/hBN/графен,

которое также представляет интерес как чувствительный фотодетектор в среднем инфракрасном диапазоне. Продемонстриовано, что фототок пропорционален второй производной туннельного тока по напряжению смещения, достигая пика при туннелировании через уровень примеси в слое hBN (гексагонального нитрида бора). Было установлено, что генерация фототока обусловлена изменением вероятности туннелирования вследствие нагрева электронов в графеновых слоях под действием излучения [2]. Получаемый фототок может быть использован для точных измерений электронной температуры.

Литература

1. Dean C. R. et al. Hofstadter's butterfly and the fractal quantum Hall effect in moiré superlattices // Nature, 2013. Vol. 497. № 7451. P. 598–602.
2. Mylnikov D. A. et al. Infrared photodetection in graphene-based heterostructures: bolometric and thermoelectric effects at the tunneling barrier // npj 2D Materials and Applications, 2024. Vol. 8. № 1. P. 34.

УДК 538.953

Массивы сверхпроводящих RFTES-детекторов для анализа квантовых цепей и терагерцевой сенсорики

Д. ф.-м. н. Шитов С. В.[1,2], к. ф.-м. н. Чичков В. И.[1], к. ф.-м. н. Ермаков Ан. Б.[1,2], Руденко Н. Ю.[1], Соломатов Л. С.[1]

[1] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
Sergey3e@gmail.com
[2] ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

Отечественная технология RFTES сверхпроводящих болометрических детекторов апробирована в диапазоне частот 1,4–750 ГГц. На ее основе разработан ряд матриц для астрономии и схемотехнические решения для прямой интеграции массива детекторов с массивом сверхпроводящих кубитов в диапазоне частот 6–8 ГГц.

Ключевые слова: сверхпроводящий детектор; сверхпроводящий болометр; RFTES; сверхпроводящий кубит.

Уникальная технология RFTES разрабатывается с 2011 года [1] и позволяет создавать болометрические матрицы с собственными шумами $<10^{-17}$ Вт/√Гц при температурах 300–400 мК; она испытана на частотах сигнала 1,4–750 ГГц. В ТГц-диапазоне лежат задачи фундаментальной и прикладной радиоастрономии и систем пассивной подпокровной радиолокации, а также перспективные задачи космической связи. В ГГц-диапазоне лежат сигналы состояния квантовых битов, построенных на сверхпроводящей платформе. Разработанные болометры могут работать в режиме квантового сенсора — детектора единичных (счетного числа) фотонов. Квантовые сенсоры делятся на пороговые и линейные. Пороговые, например SSPD, имеют лишь два состояния, а болометрические выдают импульс, пропорциональный полученному теплу (энергии фотона). Сверхпроводящие квантовые вычислители оперируют с фотонами, энергия которых в 100 000 раз меньше, чем у оптических вычислителей, и работа идет над созданием и внедрении новой компонентной базы, ядром которой является тепловой детектор RFTES: комбинация микро(нано) мостика из сверхпроводящей пленки вблизи ее критической температуры и сверхпроводящего высокодобротного резонатора диапазона 1–10 ГГц с собственными шумами $<10^{-20}$ Вт/√Гц при температурах ~100 мК, что вписывается в задачи дорожной карты как по квантовым сенсорам, так и по квантовым вычислителям.

Сверхнизкие температуры создают уникальное сочетание малых собственных шумов и сверхвысокой добротности, позволяющей формировать простые по конструкции, но эффективные в своей работе массивы сенсоров с частотным разделением каналов (пикселей), что аналогично принципу разделения каналов традиционных радиостанций в общем эфире. Конкуренты представлены TES- и MKID-детекторами, которые разрабатываются заграничными партнерами примерно с 1995 и 2001 года соответственно и не лишены ряда недостатков.

RFTES-детекторы апробированы в лаборатории [2] и обладают следующими преимуществами:

- работают как на ТГц, так и на коммуникационных частотах, что включает диапазон рабочих частот кубитов;
- простая однослойная технология (без межслойной изоляции), совместимая с процессом изготовления кубитов;
- низкая чувствительность к нестабильности опорного генератора (генератора несущей);
- фундаментальный предел чувствительности (однофотонный) масштабируется размером микро-(нано-) мостика;
- возможность детектирования с усилением, что снижает требования к буферному усилителю;
- потенциал работы в невесомости с рефрижераторами 300 мК, малая чувствительность к космическим лучам;
- естественная помехозащищенность — отсутствие гальванических подключений к микро-(нано-) мостику.

Фактором, сдерживающим активное внедрение в практику массивов сверхпроводящих детекторов вообще и RFTES в частности, является доступ к рефрижераторным системам уровня 10–100 мК, а также к программируемым генераторам гребенчатого спектра в диапазоне 1–10 ГГц на основе FPGA.

В рамках работ по созданию RFTES-детекторов нового поколения были разработаны:

- одиночный детектор и гексагональная матрица 550–750 ГГц из 7 детекторов для рабочей температуры 5 К с несущей 5,6 и 8 ГГц; сотовая структура позволяет осуществлять неограниченное масштабирование, например, до 49 пикселей;
- одиночный детектор и гексагональная матрица 550–750 ГГц из 7 детекторов при 400 мК с несущей 1,5 ГГц;
- детектор проходящей мощности [3] и резонансный детектор [4] диапазона 6–8 ГГц для малоинвазивного измерения амплитуды тока в резонаторе сверхпроводящего кубита.

Литература

1. Шитов С. В. Болометр с высокочастотным считыванием для матричных применений // ПЖТФ, 2011. — № 37 (19). — С. 88.
2. Шитов С. В., Ким Т. М., Соломатов Л. С., Руденко Н. Ю., Меренков А. В., Ермаков Ан. Б., Чичков В. И. Прогресс технологии RFTES-детекторов // Журнал технической физики, 2024. — Т. 94. — Вып. 7. — С. 1060–1070.
3. Шитов С. В., Руденко Н. Ю., Хан Э. Р. Сверхпроводящий СВЧ детектор проходящей мощности // Заявка на изобретение. Дата регистрации ФИПС: 07.02.2025.
4. Шитов С. В. Сверхпроводящий резонансный детектор // Заявка на изобретение. Дата ФИПС: 28.04.2025.

УДК 528.2:539.188;535.4

Атомный интерферометр в условиях микрогравитации

Сутырин Д. В., Слюсарев С. Н., Белотелов Г. С., Семенко А. В., Вялых А. П.
ФГУП «ВНИИФТРИ»
141570, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)
office@vniiftri.ru

Рассмотрены особенности функционирования систем на холодных атомах в условиях микрогравитации и проведен анализ различных методов по созданию условий микрогравитации при исследованиях систем на холодных атомах.
Ключевые слова: лазерное охлаждение атомов; микролифт Эйнштейна.

Характеристики устройств на основе атомных интерферометров, гравиметров, гироскопов, акселерометров, градиентометров ограничены временем жизни холодных атомов из-за взаимодействия с гравитационным полем. Квантовые сенсоры на холодных атомах космического базирования в условиях микрогравитации способны улучшить свои метрологические характеристики в несколько раз из-за того, что облако атомов и атомы, захваченные оптической решеткой, разрушаются медленнее при отсутствии гравитации. Запуск систем на холодных атомах в космос достаточно дорог, хотя за рубежом подобные эксперименты проводятся [1, 2, 3]. Использование башен свободного падения и лифта Эйнштейна является альтернативой исследований систем на холодных атомах в космосе. В мире существует несколько подобных комплексов с максимальное время свободного падения до 9,2 с [4, 5, 6]. В России такие комплексы отсутствуют. Рассматривается возможность создания устройства для реализации режима работы атомного интерферометра в условиях микрогравитации.

Литература

1. Stamminger A., Ettl J., Grosse J., Hörschgen-Eggers M. et al. // ESA Special Publication. P. 183–190.
2. Elliott E. R., Krutzik M. C., Williams J. R., Thompson R. J., Aveline D. C. // NASA's CAL: system development and ground test status // npj Microgravity. Vol. 4 (1). P. 16.
3. Bongs K., Malcolm J., Ramelloo C. et al. // Quantum Information and Measurement. P. QTu3B-1.
4. Von Kampen P., Kaczmarczik U., Rath H. J. The new drop tower catapult system // Acta Astronautica. Vol. 59 (1–5). P. 278–283.
5. Neumann E. 2.2 second drop tower at NASA Glenn Research Center. 2008.
6. Kulas S., Vogt C., Resch A., Hartwig J. et al. // Microgravity Science and Technology. Vol. 29 (1–2). P. 37–48.

Разработка сверхкомпактного цифрового лазерного гироскопа

Крючков Д. С., Сошенко В. В., Колачевский Н. Н.
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53
dk@lebedev.ru

Кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ) с вибрационным разделением частот являются одной из наиболее точных и надежных реализаций датчика угловой скорости для современных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Одной из актуальных мировых тенденций является миниатюризация КЛГ и повышение технологичности его изготовления для снижения себестоимости и самого датчика, и БИНС в целом при сохранении достаточно высоких точностных характеристик. Компактные и сверхкомпактные КЛГ со стабильностью нулевого сигнала на уровне 0,01 °/час особенно востребованы в ряде критически важных задач, таких как автономная аппаратура во всех средах, задачи ближнего и среднего действия, иных навигационных задачах.

В докладе представлена опытно-конструкторская работа «Разработка сверхкомпактного цифрового лазерного гироскопа», предложенная в рамках Дорожной карты развития высокотехнологичной области «Квантовые сенсоры» на период 2025–2030 годов. Цель работы — создание технологичного одноосевого кольцевого лазерного гироскопа с вибрационным разделением частот, обладающего следующими характеристиками:

- сверхкомпактный треугольный кольцевой лазерный резонатор (длина базы не более 90 мм);
- габариты прибора: диаметр — до 70 мм, высота — до 50 мм;
- стабильность нулевого сигнала в запуске на уровне 0,01 °/час;
- стабильность нулевого сигнала от запуска к запуску на уровне 0,02 °/час;
- рабочий температурный диапазон от −24 °C до 45 °C;
- диапазон измерения до 900 °/сек;
- энергопотребление не более 3 Вт;
- цифровой интерфейс для массового применения в инерциальных и комбинированных системах навигации.

Разрабатываемый гироскоп представляет собой автономное устройство, совместимое с большинством существующих решений в области бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Его применение актуально для управления беспилотными аппаратами, выполнения специальных задач ближнего и среднего радиуса действия, бортовых навигационных систем. Внедрение данного гироскопа позволит снизить себестоимость производства БИНС широкого назначения, а также повысить их массовость и воспроизводимость.

УДК 530.145

От конечного нуль-поглощающего класса логики F_0 к отказоустойчивым кутрит-каналам

Есин А. А.[1,2], Калимулина Э. Ю.[2]
[1] АО «МирВайФай»
109469, г. Москва, ул. Поречная, 31, корп. 1
anton.esin@imm.amm
[2] Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН
127051, г. Москва, Большой Каретный пер., 19, стр. 1

В докладе рассматривается расширение конечного нуль-поглощающего класса логики F_0 на квантовую область. Показаны обратимые кутрит-гейты без анцилл, оценена их помехоустойчивость и применимость к отказоустойчивым каналам связи и протоколам QKD.

Ключевые слова: трехзначная логика; нуль-поглощающий класс F_0; кутрит-каналы.

Класс многозначных логических функций F_0, обладающий свойством нуль-поглощения, впервые детально исследован в работе [1]. В других работах одним из авторов была показана его структурная конечность (см., например, статью [2]). В работе второго автора была показана связь с критериями конечной порожденности для более общих одно- и многозначных классов [3]. При этом функции большинства и функции выбора доказательно исключаются из F_0, что упрощает алгоритмы построения суперпозиции [4] и дает возможность инженерной реализации [4, 5] для широкого класса приложений.

Перенос логики F_0 в квантовую область мотивирован недавними успехами схем на кутритах: компактные мультиплексоры [6], ancilla-free Clifford + T-гейты [7] и глубинно-оптимизированные арифметические цепочки [8]. Высокоразмерные альфа-каналы на основе qutrit-QKD демонстрируют повышенную помехоустойчивость и пропускную способность [9, 10], что подтверждает актуальность исследования логических классов, естественно сопряженных с релаксацией к состоянию $|0\rangle$.

В настоящей работе авторы расширяют класс многозначной логики F_0 для применения в квантовой связи. Получены следующие результаты.

1. Квантовое представление репрезентация F_0. Предложен алгоритм обратимого синтеза любой функции из F_0, использующий только Clifford + T-кутрит-гейты без внешних анцилл; показано, что асимптотическая T-сложность растет не быстрее, чем степенная функция по числу управляющих.
2. Модель шума. Доказано, что амплитудное затухание любого входного кутрита до состояния переводит выход схемы в детектируемый ноль, тем самым локализуя ошибки и ограничивая их распространение по каналу.
3. Оценка помехоустойчивости канала. Для трехуровневой линии MDI-QKD длиной 50 км получено 18 % относительного прироста скорости по сравнению с эквивалентной кубитной схемой при тех же потерях.
4. Компиляция логики в коммуникационные примитивы. Разработан прототип трехзначного мультиплексора/демультиплексора, сокращающий глубину схемы на 35 % по отношению к наиболее эффективным известным кубитным аналогам.

Функции большинства и выбора усложняют квантовые схемы из-за высокой контролируемости и необходимости анцилл [4, 6]. Исключение этих операций в F_0, подтвержденное теоретически [1–4], открывает путь к ресурсно-экономичным каналам, где поглощающий нуль естественно соответствует релаксационным процессам кутрита. Такое свойство критично для реальных линий связи, где доминирует амплитудное затухание, а внедрение коррекции ошибок без дополнительных кубитов сокращает накладные расходы [7–9].

Таким образом, в статье формально описывается конструктивный конечный базис F_0 и выводится схема его квантовой реализации; приведены оценки T-сложности, глубины и вероятности логической ошибки при распространении по каналам протяженностью до 100 км; продемонстрировано прототипное применение в MDI-QKD и мультиплексировании данных. Полученные выводы подтверждают, что нуль-поглощающая логика является перспективным инструментом для построения отказоустойчивых кутрит-каналов передачи данных.

Литература

1. Esin A.A. Finitely generated classes of multi-argument logic functions excluding majority and choice functions // AIMS Mathematics, 2025. Vol. 10. № 4. P. 10002–10027. DOI: 10.3934/math.2025457.
2. Esin A.A. Characteristics of structurally finite classes of order-preserving three-valued logic maps // Logic Journal of the IGPL, 2024. DOI: 10.1093/jigpal/jzae128.
3. Kalimulina E.Yu. Finiteness of one-valued function classes in many-valued logic // Fractal and Fractional, 2024. Vol. 8. № 1. Art. 29. DOI: 10.3390/fractalfract8010029.
4. Kalimulina E.Yu. Mutual generation of the choice and majority functions // Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, 2023. P. 49–57. DOI: 10.1007/978-3-031-21700-5_6.
5. Есин А.А. Анализ современных принципов построения систем управления на основе моделей многозначной логики // Управление большими системами, 2020. — Вып. 88. — С. 69–98. DOI: 10.25728/ubs.2020.88.4.
6. Taheri Monfared A., Ciriani V., Kettunen L. et al. Novel qutrit circuit design for multiplexer, de-multiplexer, and decoder // Quantum Information Processing, 2023. Vol. 22. Art. 12. DOI: 10.1007/s11128-022-03754-9.
7. Yeh L., van de Wetering J. Constructing all qutrit controlled Clifford+T gates in Clifford+T // arXiv 2204.00552, 2022.
8. Wang H. et al. Improved quantum circuits via intermediate qutrits // ACM Transactions on Quantum Computing, 2020. DOI: 10.1145/3406309.
9. Xu F. et al. High-dimensional measurement-device-independent quantum key distribution with qutrits // Scientific Reports, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-28382-w.
10. Kumar R. et al. High-dimensional quantum key distribution using a multi-plane light converter // Optica Quantum, 2025. Vol. 3. № 2. P. 182–189.

УДК 530.145

Замкнутые классы трехзначной логики как инструмент синтеза квантовых qutrit-каналов

Есин А. А.[1,2], Калимулина Э. Ю.[2]
[1] АО «МирВайФай»
109469, г. Москва, ул. Поречная, 31, корп. 1
anton.esin@imm.amm
[2] Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН
127051, г. Москва, Большой Каретный пер., 19, стр. 1

В докладе рассматривается перенос решетки замкнутых классов трехзначной логики в модель квантовых каналов трехуровневых систем. Работа опирается на более ранние результаты авторов по многозначной логике [1–3]. Показано, что сохранение популяций двух нижних уровней приводит ровно к пяти предполным подклассам каналов. Обсуждены практические следствия для квантового распределения ключей и сетевого кодирования.
Ключевые слова: замкнутые классы; трехзначная логика; qutrit-каналы; ресурсная теория; квантовая криптография.

Рассматривается решетка замкнутых классов тернарной логики, описанная в [1–3]. Мы переносим ту же конструкцию в категорию полностью положительных отображений трехуровневых квантовых систем (qutrit-каналов). Фиксируется наблюдаемый, различающий два нижних уровня (0, 1) от верхнего (2). Вводится квантовый оператор замыкания — аналог R-infinity из [1], который добавляет к множеству каналов все их композиции и допустимые унитарные перезаписи, не затрагивающие выбранный наблюдаемый.

Основные результаты исследования:

1) доказано существование ровно пяти максимальных собственных подклассов каналов, сохраняющих совокупную популяцию уровней 0 и 1;
2) каждый подкласс имеет конечный генераторный набор (не более шести примитивных действий), что является квантовым аналогом конечной базисности функции из [2];
3) решетка этих подклассов реализует ресурсную теорию: «ценой» служит величина допускаемой утечки в уровень 2, а «свободными» преобразованиями — стрелки решетки.

Прикладные следствия данных результатов заключаются в следующем:

1) для квантовой распределенной криптографии (QKD) показано, что фильтр из «нулепоглощающего» подкласса локализует амплитудное затухание и повышает секретную скорость ключа примерно на 18 %;
2) в квантовом сетевом кодировании синтезирован мультиплексор из «двойственно сохраняющего» подкласса, экономящий около трети запутанных ресурсов по сравнению с кубитовым аналогом.

Дополнительно в докладе будут рассмотрены открытые вопросы:

- конечность решетки при иных выборах наблюдаемого;
- связь с решетками из моделей калибровочных теорий;
- классическая сложность симуляции цепей, ограниченных данным предполным классом.

Литература

1. Kalimulina E. Y. Lattice Structure of Some Closed Classes for Non-binary Logic and Its Applications // Mathematical Methods for Engineering Applications. ICMASE 2021. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics. Vol. 384. Cham: Springer, 2022. P. 19–33. DOI: 10.1007/978-3-030-96401-6_2.
2. Kalimulina E. Y. Lattice Structure of Some Closed Classes for Three-Valued Logic and Its Applications // Mathematics, 2022. Vol. 10. № 1. 94. DOI: 10.3390/math10010094.
3. Esin A. A. On function classes in P_3 precomplete with respect to a strengthened closure operator // Mathematical Notes, 2008. Vol. 83. № 5–6. P. 594–603. DOI: 10.1134/S0001434608050027.

УДК 530.145:535.14

Разработка квантовой сети на запутанности с оптическими повторителями на многомодовых когерентных состояниях

Гончаров Р. К.[1,2], д. ф.-м. н. Киселев А. Д.[1], к. ф.-м. н. Егоров В. И.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А
rkgoncharov@itmo.ru
[2] СМАРТС-Кванттелеком
199178, г. Санкт-Петербург, В.О., 6-я линия, 59/1, лит. Б

Исследуется схема квантового повторителя, использующего фазомодулированные многомодовые состояния кота Шредингера. Рассмотрены две архитектуры, отличающиеся расположением источников: MeetInTheMiddle и MidpointSource. В исследовании определены оптимальные параметры для городских квантовых сетей и продемонстрированы их преимущества по сравнению со схемами на основе фотонных пар и одиночных фотонов.
Ключевые слова: квантовый повторитель; квантовые сети; запутанность; многомодовые состояния.

Квантовые повторители — ключевые элементы для масштабируемых квантовых сетей, преодолевающие фундаментальные ограничения передачи (граница PLOB). Современные повторители классифицируются на три поколения:

1. Первое — вероятностные схемы — подавление ошибок через объявленную запутанность и двустороннюю классическую связь.
2. Второе — гибридные — комбинация вероятностной генерации с детерминированным исправлением операционных ошибок.
3. Третье — детерминированные — использование квантовых кодов коррекции ошибок (поверхностные коды, GKP), односторонняя связь.

Для городских сетей актуальны оптические квантовые повторители на фазомодулированных многомодовых состояниях кота Шредингера, сочетающие высокую скорость с возможностью спектрального мультиплексирования [1, 2]. Разработаны и проанализированы две архитектуры элементарных звеньев таких повторителей.

1. MeetInTheMiddle — получены явные аналитические выражения для точности воспроизведения (от англ. *fidelity*) при использовании детекторов, разрешающих число фотонов. Исследована зависимость точности воспроизведения от доли сигнала, отправленного на центральный узел, и среднего числа фотонов. Показано, что процедура очистки существенно повышает точность воспроизведения при итеративном применении и соблюдении следующих условий: исходная точность должна быть выше 0,5, должно быть обеспечено успешное применение соответствующих вероятностных квантовых вентилей. В этом же случае продемонстрирована возможность использования детекторов в режиме Гейгера (сигнал регистрируется без различения числа фотонов). Реализация протокола MeetInTheMiddle демонстрирует преимущество в скорости генерации запутанности по сравнению со схемами на состояниях фотонных пар и однофотонных состояниях.

2. MidpointSource — были выведены формулы точности воспроизведения в случае использования одного и двух источников запутанности.

Получены аналитические решения для ключевых параметров квантовых повторителей на многомодовых состояниях. Определены оптимальные режимы работы для протоколов MeetInTheMiddle и MidpointSource для интеграции в существующую волоконную инфраструктуру. Результаты создают основу для экспериментальной реализации в городских сетях [3–5]. Перспективы включают внедрение гибридных схем (различных поколений, в т. ч. без памяти).

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-21-00484).

Литература

1. Goncharov R. et al. Quantum repeaters and teleportation via entangled phase-modulated multimode coherent states // Physical Review Applied, 2023. Vol. 20. № 4. P. 044030.
2. Goncharov R., Kiselev A. D., Egorov V. Performance of Quantum Repeaters Using Multimode Schrödinger Cat States // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2024. Vol. 88. № 6. P. 901–908.
3. Azuma K. et al. Quantum repeaters: From quantum networks to the quantum internet // Reviews of Modern Physics, 2023. Vol. 95. № 4. P. 045006.
4. Chakraborty T. et al. Towards a spectrally multiplexed quantum repeater // npj Quantum Information, 2025. Vol. 11. № 1. P. 3.
5. Azuma K. Networking quantum networks with minimum cost aggregation // npj Quantum Information, 2025. Vol. 11. № 1. P. 51.

УДК 530.145

От конечного нуль-поглощающего класса логики F_0 к отказоустойчивым кутрит-каналам

Есин А. А.[1,2], Калимулина Э. Ю.[2]
[1] АО «МирВайФай»
109469, г. Москва, ул. Поречная, 31, корп. 1
anton.esin@imm.amm
[2] Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН
127051, г. Москва, Большой Каретный пер., 19, стр. 1

В докладе рассматривается расширение конечного нуль-поглощающего класса логики F_0 на квантовую область. Показаны обратимые кутрит-гейты без анцилл, оценена их помехоустойчивость и применимость к отказоустойчивым каналам связи и протоколам QKD.

Ключевые слова: трехзначная логика; нуль-поглощающий класс F_0; кутрит-каналы.

Класс многозначных логических функций F_0, обладающий свойством нуль-поглощения, впервые детально исследован в работе [1]. В других работах одним из авторов была показана его структурная конечность (см., например, статью [2]). В работе второго автора была показана связь с критериями конечной порожденности для более общих одно- и много-значных классов [3]. При этом функции большинства и функции выбора доказательно исключаются из F_0, что упрощает алгоритмы построения суперпозиции [4] и дает возможность инженерной реализации [4, 5] для широкого класса приложений.

Перенос логики F_0 в квантовую область мотивирован недавними успехами схем на кутритах: компактные мультиплексоры [6], ancilla-free Clifford+T-гейты [7] и глубинно-оптимизированные арифметические цепочки [8]. Высокоразмерные альфа-каналы на основе qutrit-QKD демонстрируют повышенную помехоустойчивость и пропускную способность [9, 10], что подтверждает актуальность исследования логических классов, естественно сопряженных с релаксацией к состоянию $|0\rangle$.

В настоящей работе авторы расширяют класс многозначной логики F_0 для применения в квантовой связи. Получены следующие результаты.

1. Квантовое представление репрезентация F_0. Предложен алгоритм обратимого синтеза любой функции из F_0, использующий только Clifford + T-кутрит-гейты без внешних анцилл; показано, что асимптотическая T-сложность растет не быстрее, чем степенна функция по числу управляющих.
2. Модель шума. Доказано, что амплитудное затухание любого входного кутрита до состояния переводит выход схемы в детектируемый ноль, тем самым локализуя ошибки и ограничивая их распространение по каналу.
3. Оценка помехоустойчивости канала. Для трехуровневой линии MDI-QKD длиной 50 км получено 18 % относительного прироста скорости по сравнению с эквивалентной кубитной схемой при тех же потерях.
4. Компиляция логики в коммуникационные примитивы. Разработан прототип трехзначного мультиплексора/демультиплексора, сокращающий глубину схемы на 35 % по отношению к наиболее эффективным известным кубитным аналогам.

Функции большинства и выбора усложняют квантовые схемы из-за высокой контролируемости и необходимости анцилл [4, 6]. Исключение этих операций в F_0, подтвержденное теоретически [1–4], открывает путь к ресурсно-экономичным каналам, где поглощающий нуль естественно соответствует релаксационным процессам кутрита. Такое свойство критично для реальных линий связи, где доминирует амплитудное затухание, а внедрение коррекции ошибок без дополнительных кубитов сокращает накладные расходы [7–9].

Таким образом, в статье формально описывается конструктивный конечный базис F_0 и выводится схема его квантовой реализации; приведены оценки T-сложности, глубины и вероятности логической ошибки при распространении по каналам протяженностью до 100 км; продемонстрировано прототипное применение в MDI-QKD и мультиплексировании данных. Полученные выводы подтверждают, что нуль-поглощающая логика является перспективным инструментом для построения отказоустойчивых кутрит-каналов передачи данных.

Литература

1. Esin A.A. Finitely generated classes of multi-argument logic functions excluding majority and choice functions // AIMS Mathematics, 2025. Vol. 10. № 4. P. 10002–10027. DOI: 10.3934/math.2025457.
2. Esin A.A. Characteristics of structurally finite classes of order-preserving three-valued logic maps // Logic Journal of the IGPL, 2024. DOI: 10.1093/jigpal/jzae128.
3. Kalimulina E.Yu. Finiteness of one-valued function classes in many-valued logic // Fractal and Fractional, 2024. Vol. 8. № 1. Art. 29. DOI: 10.3390/fractalfract8010029.
4. Kalimulina E.Yu. Mutual generation of the choice and majority functions // Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, 2023. P. 49–57. DOI: 10.1007/978-3-031-21700-5_6.
5. Есин А.А. Анализ современных принципов построения систем управления на основе моделей многозначной логики // Управление большими системами, 2020. — Вып. 88. — С. 69–98. DOI: 10.25728/ubs.2020.88.4.
6. Taheri Monfared A., Ciriani V., Kettunen L. et al. Novel qutrit circuit design for multiplexer, de-multiplexer, and decoder // Quantum Information Processing, 2023. Vol. 22. Art. 12. DOI: 10.1007/s11128-022-03754-9.
7. Yeh L., van de Wetering J. Constructing all qutrit controlled Clifford+T gates in Clifford+T // arXiv 2204.00552, 2022.
8. Wang H. et al. Improved quantum circuits via intermediate qutrits // ACM Transactions on Quantum Computing, 2020. DOI: 10.1145/3406309.
9. Xu F. et al. High-dimensional measurement-device-independent quantum key distribution with qutrits // Scientific Reports, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-28382-w.
10. Ohad Lib, Kfir Sulimany, Mateus Araújo, Michael Ben-Or, Yaron Bromberg. High-dimensional quantum key distribution using a multi-plane light converter // Optica Quantum, 2025. Vol. 3. № 2. P. 182–189. DOI: 10.1364/OPTICAQ.531472.

УДК 004.738.2: 004.087.5: 004.056.55

Программно-аппаратный комплекс для обеспечения мобильных абонентов квантово-защищенными ключами шифрования

к. ф.-м. н. Зайцев Д. Л.[1], Стрижак Д. В.[1], Задиран Н. В.[1], Кожанов И. А.[1], к. ф.-м. н. Криштоп В. Г.[1,2], Поздняков А. М.[1,3], Сантьев А. А.[1,4], Дудкин П. В.[1], д. ф.-м. н. Андреев С. Н.[1,3]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] Институт проблем технологии микроэлектроники РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
[3] АО «ЦИР»
101000, г. Москва, Милютинский пер., 13, стр. 1, пом. I
[4] ООО «Смартс-Квантителеком»
199178, г. Санкт-Петербург, В.О., 6-я линия, 59, корп. 1, лит. Б, пом. 17/6н

Программно-аппаратный комплекс для обеспечения мобильных абонентов квантово-защищенными ключами шифрования может получать ключи от систем квантового распределения ключей по протоколу ProtoQa, генерировать вторичные ключи, передавать ключи в мобильные устройства, в т. ч. в георасределенных сегментах.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей; защищенная мобильная связь; защищенный обмен сообщениями; средство криптографической защиты информации.

Разработан специализированный программно-аппаратный комплекс (ПАК) для обеспечения мобильных абонентов квантово-защищенными ключами шифрования. ПАК обеспечивает выработку и распределение ключей на мобильные абонентские устройства связи и обмен зашифрованными сообщениями между абонентами в специализированном мессенджере с использованием полученных ключей.

ПАК может получать квантово-защищенные ключи от систем квантового распределения ключей (КРК) сторонних производителей по сертифицированному протоколу ProtoQa [1], генерировать вторичные ключи, передавать ключи в мобильные устройства, в том числе согласовывать ключи на абонентских устройствах, физически расположенных в разных георасределенных сегментах, с использованием сети КРК.

ПАК состоит из терминала распределения ключей (далее — *Терминал*) и специализированного приложения для абонентских устройств (далее — *Мессенджер*). Терминал предназначен для получения ключей КРК от устройств квантовой сети КРК по универсальному протоколу ProtoQa и передачи их на абонентские мобильные устройства, Мессенджер предназначен для защищенного обмена сообщениями с использованием ключей, полученных от Терминала, и обеспечивает шифрование и имитозащиту трафика и сообщений.

Терминал использует для генерации ключей встроенный ФГСЧ либо ключи, получаемые от устройств КРК по протоколу ProtoQa, и обеспечивает защиту

трафика и обмен защищенными сообщениями между абонентскими устройствами с использованием отечественных криптоалгоритмов. Терминал позволяет получать квантовые или квантово-защищенные ключи от систем КРК, формировать на их основе производные ключи, передавать их в абонентские устройства через интерфейс NFC.

Прототип Терминала построен на аппаратной платформе ARM Cortex-M4 с микроконтроллером STM32F429ZIT6 [2] и 64-Мбит SPI-флеш-носителем. Он использует периферийные модули Ethernet, USB, NFC, а также интерфейсы I2C и SPI для взаимодействия со встроенным физическим генератором случайных чисел (ФГСЧ) и монитором отображения информации. Питание подается либо от внешнего порта USB Type-C, либо автономно от встроенного аккумулятора. Программное обеспечение Терминала работает под FreeRTOS, включает драйверы Ethernet (TCP/IP) и NFC и обеспечивает такие функции, как управление устройством, меню оператора, обработка протокола ProtoQa, генерация и учет производных (сессионных) ключей, а также защищенный ввод ключей в абонентские устройства.

Приложение **Мессенджер** работает в ОС Android и обеспечивает шифрование и имитозащиту трафика на основе отечественных криптоалгоритмов с использованием полученных от Терминала ключей, а также содержит модули для управления и хранения ключевой информации, аутентификации пользователя и взаимодействия с Терминалом по NFC.

ПАК предназначен для организации защищенных корпоративных коммуникаций с контролем жизненного цикла криптографических ключей, решает задачу интеграции технологии квантового распределения ключей в систему защищенного обмена данными между мобильными абонентскими устройствами и обеспечивает повышение уровня безопасности мобильной коммуникации.

Векторами развития этой разработки могут стать перенос Терминала на отечественную аппаратную платформу на основе микроконтроллера российского производства, а также адаптация Мессенджера для российских мобильных операционных систем.

Литература

1. Р 1323565.1.046-2023 «Информационная технология. Криптографическая защита информации. Защищенный протокол взаимодействия квантово-криптографической аппаратуры выработки и распределения ключей и средства криптографической защиты информации».
2. URL: https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f429zi.html (дата обращения: 11.07.2025).

Возможности сопряжения систем квантового распределения ключа с системами и сетями связи

д. т. н. Нефедов С. И., д. т. н. Крук Е. А.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
snefedov@hse.ru, ekrouk@hse.ru

В докладе рассматриваются системные технические решения, ориентированные на встраивание систем квантового распределения ключа в сети подвижной связи. Проанализированы достоинства и недостатки существующих технических решений с точки зрения возможности их практического применения в современных сетях связи. Предложена концепция встраивания системы квантового распределения ключа в аппаратуру подвижной системы связи.
Ключевые слова: квантовые коммуникации; квантовая криптография; постквантовая криптография; системы связи.

Квантовые коммуникации [1] как одно из направлений квантовых технологий вышло на сегодняшний день на уровень исследования путей применения в реальных сетях связи, в том числе подвижной, в первую очередь для повышения уровня безопасности цифровых сервисов. Основным преимуществом, которое, по мнению авторов, может привнести квантовая аппаратура в существующие стандарты связи, является возможность гибкой организации быстрой смены ключа. В этом случае криптостойкость и защищенность системы может существенно вырасти и создать условия для повышения класса защиты без существенного изменения аппаратуры. Для этого системы квантового распределения ключа должны обладать обликом, позволяющим интегрировать их непосредственно в абонентскую аппаратуру и в аппаратуру базовых станций.

Система квантового распределения ключа в таком случае должна обладать возможностью генерации ключа в реальном масштабе времени и быть выполнена в микромодульном исполнении. Отдельным вопросом является выбор квантового канала связи и диапазона работы таких систем.

На сегодня исследователями предлагаются следующие варианты систем генерации ключа, пригодные для встраивания в системы подвижной связи:

- система космического базирования;
- система базирования на беспилотных летательных аппаратах;
- система на основе крипточипов с заложенными в них ранее сформированными квантовыми ключами.

К сожалению, ни один из этих способов не обеспечивает работы в реальном времени и, соответственно, вряд ли будет эффективен на практике.

Авторами предлагается в данном докладе облик системы связи с интегрированными в нее на канальном уровне магистральными высокоскоростными устройствами квантового распределения ключа [2]. На уровне абонентских устройств предлагается применять комбинированную аппаратуру кодирования на основе сочетания квантового ключа и алгоритмов постквантовой криптографии [3]. Для генерации квантового ключа в реальном времени показана возможность применения беспроводных устройств, поддерживающих каналы Li-Fi и Wi-Fi.

В заключение приводится аналитическая справка по сравнению различных концептуальных технических решений квантовых коммуникаций, предложенных к настоящему времени, с точки зрения возможности их встраивания в системы и сети подвижной связи.

Литература

1. Bennett C. H., Bessette F., Brassard G. et al. Experimental Quantum Cryptography // Journal of Cryptology, 1992. Vol. 5. № 1. P. 3–28.
2. Morozov V. I., Evsyutin O. O., Nefedov S. I. Study of a Quantum Key Distribution Protocol with Phase-Time Coding Using Simulation Modeling // Problems of Information Transmission, 2025. Vol. 61. № 1. P. 8–26.
3. Bernstein D. J. Introduction to post-quantum cryptography // Post-quan tum cryptography. Heidelberg: Springer, 2009. P. 1–14.

УДК 004.735:530.145:003.26

Анализ вариантов топологии и архитектуры сетей КРК: повышение отказоустойчивости и эффективности

Росликов А. Н., Емельянов В. М.
ООО «Системы практической безопасности»
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 22АБ
roslikov@systempb.ru

Предложена модель выбора расположения центров распределения ключей относительно узлов сети квантового распределения ключей, влияющего на характеристики системы выработки и распределения ключей. Использован метод Монте-Карло для моделирования вариантов топологии и оценки показателей надежности.
Ключевые слова: квантовое распределение ключей; топология сети; оптимизация; стохастический метод.

Сети квантового распределения ключей (КРК) сталкиваются с задачами оптимизации топологии для повышения отказоустойчивости и эффективности выработки ключей, обеспечивая безопасность передачи данных, однако их эффективность ограничена физическими свойствами квантовых каналов и сложностью интеграции с цифровыми сетями передачи данных. Особую сложность для обеспечения ключами со стороны сети КРК представляют пользователи, которые могут перемещаться между узлами сети КРК, подключаясь к любому из них. Подобные системы выработки и распределения ключей были предложены, например, в патентах РФ № 2831046 и № 2832103 [1, 2]. В них рассматривается сценарий, в котором пользователь регистрируется на базовом узле сети КРК при первом подключении к сети КРК. При запросе ключа для связи с другим пользователем система использует его зарегистрированный базовый узел сети КРК для выработки ключа путем пересылки запроса на базовый узел сети КРК, если он подключен к другому узлу. Тем самым пользователь остается зарегистрированным на своем базовом узле сети КРК и может запрашивать ключи, подключаясь к любому узлу сети КРК в любое время без ожидания второго пользователя. Для решения такой задачи может использоваться централизованная [1] или децентрализованная схема управления ключами [2].

Выбор оптимальной схемы определяется комплексом факторов, в число которых входят достигаемые показатели надежности, а также эффективность схемы выработки и распределения ключей, которая может определяться, например, средней длиной квантового маршрута. Для оценки этих показателей и выбора оптимальной архитектуры схемы управления ключами предложен способ моделирования топологии КРК методом Монте-Карло, учитывающий размещение основного и резервного центров распределения ключей (ЦРК) и расстояние между ЦРК и узлами подключения пользователей. Схожие методы оптимизации топологии сетей КРК были рассмотрены в [3]. Модель включает:

- определение оптимального расположения ЦРК с использованием стохастического метода для максимизации вероятности выработки ключей;

- оценку влияния на вероятность выработки и доставки квантово-защищенных ключей (КЗК) от расстояния между ЦРК и узлом, на котором пользователь получает КЗК.

Рассмотрены варианты топологий по расположению и связности узлов в сети КРК: линейная, кольцевая и ячеистая. Выработаны критерии выбора основного и резервного ЦРК для следующих схем управления ключами:

- централизованная, имеющая в архитектуре выделенный ЦРК;
- децентрализованная, в которой функции ЦРК распределены между множеством узлов сети КРК. Полученные результаты работы демонстрируют значимость оптимизации схем управления ключами с учетом топологии сетей КРК для масштабируемых квантовых сетей при их интегрировании в существующую цифровую сеть передачи данных.

Литература

1. Патент RU № 2832103 C1. Система выработки и распределения ключей, сопряженная с сетью квантового распределения ключей, и способ выработки и распределения ключей в ней. Заявитель: Бородин М. А., Жиляев А. Е., Уривский А. В., Юркин К. Ю.; опубл. 19.12.2024. Бюл. 35.
2. Патент RU № 2831046 C1. Способ формирования ключа между узлами вычислительной сети с использованием системы квантового распределения ключей. Заявитель: Бородин М. А., Жиляев А. Е., Уривский А. В., Юркин К. Ю.; опубл. 29.11.2024. Бюл. № 34.
3. Раздьяконов Е. С. Обзор методов оптимизации топологии сетей квантового распределения ключей // Инженерный вестник Дона, 2024. — № 7 (115). — С. 29–37.

УДК 530.145

ОДМР NV-центров в алмазе с различным содержанием ^{13}C

Салказанов А. Т., Вергелес С. С., Гусев А. С., Косогорова Т. А., Маргушин Р. Е., д. ф.-м. н., Низовцев А. П., Калошин М. М., д. т. н., Каргин Н. И.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
ATSalkazanov@mephi.ru

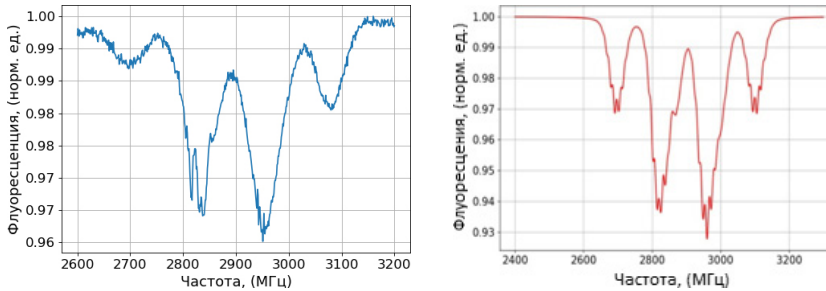
В работе исследованы комплексы NV–^{13}C в алмазах с различным изотопным составом. Показано, что в образцах с природным содержанием ^{13}C преобладают комплексы с ^{13}C в третьей и четвертой координационных сферах, что согласуется с биномиальной статистикой. В изотопно обогащенных алмазах наблюдается усложнение ОДМР-спектров из-за увеличения числа ядерных спинов. Для анализа использована модель на основе спинового гамильтониана.

Ключевые слова: комплекс NV-^{13}C; спиновый гамильтониан; ОДМР; алмаз; квантовый регистр.

NV-центры в алмазе являются перспективными квантовыми системами благодаря их длительным временам когерентности при комнатной температуре и возможности адресации отдельных спинов. Одной из ключевых задач в направлении квантовых технологий является реализация масштабируемых квантовых регистров на основе спинов близкорасположенных атомов углерода-13 (^{13}C), имеющих сверхтонкую связь с электронным спином NV-центра [1–3].

В настоящей работе представлены экспериментальные исследования комплексов NV-^{13}C в алмазах с различным изотопным составом: с природным содержанием ^{13}C (~1,1 %), а также в изотопно обогащенных алмазах с концентрациями ^{13}C около 15, 30 и 100 %. В образце с природным составом идентифицированы комплексы NV-^{13}C с атомами ^{13}C, расположенными в различных координационных сферах. В частности, было обнаружено значительное количество комплексов, в которых атом ^{13}C расположен в третьей и четвертой координационных сферах, что согласуется с оценками, полученными на основе биномиального распределения, предсказывающего вероятность появления таких комплексов на уровне 16 и 22 % соответственно.

В образцах с увеличенным содержанием ^{13}C соответственно повышается вероятность появления комплексов, где NV-центр имеет несколько близкорасположенных ^{13}C, что открывает путь для масштабирования. Для всех трех образцов были измерены спектры оптически детектируемого магнитного резонанса. На рис. 1*а* приведен экспериментальный спектр ОДМР образца с ~100%-м содержанием ^{13}C. Показано, что увеличение содержания ^{13}C существенно усложняет структуру ОДМР-спектров за счет увеличенного числа взаимодействующих ядерных спинов. Для интерпретации наблюдаемых резонансных переходов применена численная модель на основе диагонализации полного спинового гамильтониана, включающего электронный и ядерные спины. На рис. 1*б* приведен модельный спектр, который хорошо согласуется с экспериментом на рис. 1*а*.



а *б*

Рис. 1. Экспериментальный спектр ОДМР образца с ~100%-м содержанием ^{13}C (*а*), соответствующий модельный спектр (*б*)

Таким образом, экспериментально показано, что в образце с естественным изотопным составом преобладают комплексы, где ^{13}C расположен в третьей или четвертой координационной сфере. С использованием модели на основе спинового гамильтониана интерпретированы экспериментальные спектры ОДМР образцов с различным содержанием ^{13}C, что создает базу для рационального проектирования квантовых регистров и оптимизации импульсных последовательностей, направленных на инициализацию, управление и считывание состояний ядерных спинов ^{13}C, образующих квантовый регистр.

Данная работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение о предоставлении гранта № 075-15-2024-556).

Литература

1. Jelezko F. et al. Observation of Coherent Oscillation of a Single Nuclear Spin and Realization of a Two-Qubit Conditional Quantum Gate // Physical Review Letters, 2004. Vol. 93. № 13. P. 130501.
2. Childress L. et al. Coherent dynamics of coupled electron and nuclear spin qubits in diamond // Science, 2006. Vol. 314. № 5797. P. 281–285.
3. Низовцев А. П., Килин С. Я. Микроволны для эффективного манипулирования ядерными спинами в системах NV-13 C в алмазе // Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2020. — Т. 84. — № 3. — С. 310–316.

УДК 519.722:519.246.2

Физический генератор случайных чисел на основе кольцевых генераторов на КМОП-технологии

Лебедев А. В., Лысенко Е. В.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org

Разработан физический генератор случайных чисел на основе кольцевых генераторов на КМОП-транзисторах в соответствии с физико-математической моделью. Произведены опытные образцы на отечественной фабрике по технологии 130 нм. Проведены исследования статистических данных получаемых случайных последовательностей.
Ключевые слова: датчик случайных чисел; КМОП-транзистор; кольцевой генератор; физико-математическая модель; системы аутентификации; сертификация СКЗИ.

Введение

Современная практика создания миниатюрных электронных устройств идентификации и аутентификации, таких как смарт-карты, сим-карты, системы на кристалле или личные идентификаторы пользователей, требует создания генераторов случайных чисел (далее ГСЧ), обладающих малыми линейными размерами, низким энергопотреблением и высокой скоростью работы [1]

На сегодняшний день все датчики случайных чисел, как физические, так и программные, должны соответствовать требованиям международного стандарта AIS31 (AIS 20), NIST 800-90B [2], FIPSl40-2 [3] и российскому стандарту «Принципы разработки и модернизации шифровальных (криптографических) средств защиты информации» [4].

Разработка отечественного ФГСЧ

Разработан физический генератор случайных чисел на основе кольцевых генераторов на КМОП-транзисторах [5]. Данный тип ФГСЧ очень хорошо подходит для массового производства на микроэлектронной фабрике, т. к. не требует для своей работы каких-либо специальных компонентов (лазер, радиоактивный материал и т. д.) [6]. При этом такой генератор случайных чисел обладает малыми линейными размерами и низким энергопотреблением, что позволяет применять его в миниатюрных электронных устройствах в отличие от существующих ФДСЧ на основе шумового диода.

Производство разработанного ФГСЧ на отечественной микроэлектронной фабрике

Разработанный генератор случайных чисел выпущен на промышленных мощностях микроэлектронной фабрики ООО «НМ-Тех». Выпущены опытные образцы по техпроцессу 130 нм. Произведенная оценка статистических характеристик получаемых случайных последовательностей подтвердила корректность работы генератора, а также показала высокое качество этих последовательностей

Заключение

В ходе данной работы командой разработчиков и технологов фабрики ООО «НМ-Тех» успешно разработан и произведен физический генератор случайных чисел, удовлетворяющий требованиям для применения его в миниатюрных электронных устройствах.

Литература

1. Зиновьев Д. В., Лебедев А. В., Никитин А. П. О некоторых аспектах проектирования и практической реализации генераторов случайных чисел низкого энергопотребления // Тезисы 10-го межведомственного научно-практического семинара «Системы и средства защиты информации», 2018
2. Meltem Sönmez Turan, Elaine Barker, John Kelsey, Kerry A. McKay, Mary L. Baish, Mike Boyle. Recommendation for the Entropy Sources Used for Random Bit Generation // NIST Special Publication 800-90B, 2018. 84 p.
3. FIPS PUB 140-2: Security Requirements for Cryptographic Modules.
4. Р 1323565.1.012-2017. Криптографическая защита информации. Принципы разработки и модернизации шифровальных (криптографических) средств защиты информации. ОКС 35.040.
5. Mandal M. K., Sarkar B. C. Ring oscillators: Characteristics and applications.
6. Vratislav M. On the Low-power Design, Stability Improvement and Frequency Estimation of the CMOS Ring Oscillator.

УДК 538.915

Перспективы создания фоточувствительных материалов для высокотемпературных матричных детекторов ИК-диапазона на основе материалов A^3B^5, содержащих сурьму

Чернопицский М. А., Клековкин А. В., Ерошенко Г. Н., Ченцов С. И., Пашкеев Д. А., Савин К. А., Кривобок В. С., Николаев С. Н., Аминев Д. Ф., Дубовая А. Р., Шевченко М. А., Минаев И. И.
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53
krivobok@lebedev.ru

Рассмотрены особенности получения фоточувствительных материалов с XBn-архитектурой для матричных ИК-детекторов MWIR и LWIR ИК-диапазона. Обсуждается возможность создания гибридных матричных детекторов с одновременным подавлением диффузионной и генерационно-рекомбинационной компонент темнового тока.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия; ИК-диапазон; матричный детектор; XBn; A^3B^5.

В современной литературе активно обсуждаются детекторы ИК-излучения, в которых падающее излучение сначала преобразуется в поверхностную электромагнитную волну, которая затем поглощается полупроводниковой гетероструктурой. Данный подход подразумевает разработку гибридных систем на основе фотонно-кристаллического резонатора (ФКР), совмещенного с полупроводниковым фоточувствительным элементом. Сочетание поглотителя на основе барьерно-диодной структуры (XBn в англоязычной литературе) с резонаторным вводом излучения обеспечивает не только радикальное повышение чувствительности и/или рабочей температуры фотоприемных устройств (ФПУ), но и реализацию систем с селективной чувствительностью к поляризации детектируемого излучения. Основная идея состоит в том, что при использовании XBn-архитектуры ФПУ темновой ток в основном определяется диффузионным механизмом. В этом случае темновой ток прямо пропорционален толщине фоточувствительной области барьерно-диодной гетероструктуры. В обычном исполнении уменьшение толщины фоточувствительной области нецелесообразно, так как приводит к уменьшению поглощения и падению квантовой эффективности. В то же время использование резонатора позволяет достичь приемлемого поглощения (квантовой эффективности) в тонких поглощающих слоях. Это обеспечивает резкое подавление диффузионного тока, уменьшение связанных с ним шумов при сохранении квантовой эффективности ФПУ на надлежащем уровне.

Предложенные в литературе дизайны гибридных ФПУ достаточно сложны для реализации, требуют, в частности, электронной литографии высокого разрешения и обычно исключают переход к матричному исполнению. Основной целью данной работы является разработка адаптивного дизайна гибридного ФПУ для спектральных диапазонов 3–5 и 8–12 мкм, который, с одной стороны, не требует электронной литографии высокого разрешения, с другой стороны, допускает переход к матричному исполнению массива фоточувствительных элементов.

В рамках настоящей работы будут представлены результаты, полученные совместно ФИАН и АО «НПО «Орион», в области разработки фоточувствительных эпитаксиальных структур с барьерно-диодной (XBn) архитектурой для создания на их основе широкоформатных матричных детекторов, работающих в диапазонах 3–5 и 8–12 мкм. Будут описаны особенности отработанной технологии эпитаксиального роста соединений A^3B^5 с сурьмой на подложках InSb и GaSb, дизайн фоточувствительных материалов, включая короткопериодные сверхрешетки второго типа, и представлены фотоэлектрические характеристики тестовых фотоприемников, созданных на основе выращенных в ФИАН гетероструктур.

УДК 621.383.72

Основные направления развития современных фотоприемников, выпускаемых АО «ЦНИИ «Электрон»

Татаурщиков С. С., Вязников А. Н.
АО «ЦНИИ «Электрон»
194223, г. Санкт-Петербург, просп. Тореза, 68, лит. Р
info@niielectron.ru

Приведен краткий обзор фотоприемников, выпускаемых АО «ЦНИИ «Электрон», а также направлений и тенденций развития технологий отечественной фотоники.

Ключевые слова: вакуумные фотоприемники; ФЭУ; гибридные фотоприемники; ПЗС; КМОП; коллоидные квантовые точки.

АО «ЦНИИ «Электрон» разрабатывает и выпускает современные фотоприемники, крайне востребованные в самых различных сферах применения радиоэлектронной аппаратуры. К ним относятся:

1. Вакуумные фотоприемники

Вакуумные фотоприемники типа видиконов и ФЭУ — это приборы, предназначенные для применения в телевизионных системах специального применения в суровых условиях эксплуатации, повышенной радиационной стойкости, а также для фундаментальных и прикладных исследований, в ядерной физике и изучении космоса. События последних лет, связанные в первую очередь с санкциями Запада в отношении России, создали уникальные предпосылки для развития рынка этих приборов в части импортозамещения.

2. Твердотельные фотоприемники

Создание данного класса фотоприемников базируется преимущественно на технологии ПЗС и КМОП. При этом, как правило, фотоприемники, которые применяются в ТВ-системах за наблюдением малоподвижных объектов при низком уровне освещенности, построены на основе ПЗС-технологии. Для наблюдения быстропротекающих процессов, где требуется высокая частота обработки сигнала, применяется архитектура координатной адресации, которая реализуется в фотоприемниках по КМОП-технологии, которая требует для реализации их высоких характеристик проектную норму лучше 90 нм.

Применение технологии с обратной засветкой back-side позволяет при малых размерах пикселя вдвое увеличить чувствительность фотоприемника и отказаться от технологии микролинз, используемой при фронтальной засветке.

В АО «ЦНИИ «Электрон» проведена разработка такой технологии для изготовления ПЗС-матриц, которая может быть успешно распространена и на КМОП-фотоприемники.

3. Гибридные фотоприемники

Конструктивно эти изделия состоят из фотокатода и близко расположенной ПЗС или КМОП электронно-чувствительной матрицы. За счет высокого ускоряющего напряжения в вакуумном промежутке такой конструкции происходит усиление первичного фотоэмиссионного тока до нескольких сотен раз, что обеспечивает

высокую чувствительность гибридного фотоприемника и, как следствие, большую дальность обнаружения при их применении в бортовых обзорных системах.

4. Твердотельные фотоприемники на основе коллоидных квантовых точек

В последние годы значительный интерес исследователей привлекают коллоидные квантовые точки как перспективный материал для создания фотоприемников инфракрасного диапазона нового поколения. Благодаря эффектам размерного квантования коллоидные квантовые точки обладают рядом уникальных свойств, к которым можно отнести возможность тонкой подстройки спектральной чувствительности путем изменения размера квантовых точек, низкий уровень шумов при высокой квантовой эффективности, а возможность интеграции с существующими схемами считывания заряда на основе кремния позволит расширить спектральный диапазон от УФ до ИК.

Разработка отечественных матричных фотоприемников на основе коллоидных квантовых точек в значительной степени зависит от достигнутого технологического уровня создания КМОП-мультиплексоров, а технологические нормы, необходимые для реализации таких фотоприемников, должны быть не хуже 90 нм.

Развитие фотоприемников в ближайшие годы будет реализовано с применением следующих перспективных технологий:

- фотодиодных матричных мишеней ИК-видикона на основе материала InAs;
- КМОП крупноформатных матричных и линейных приборов с минимальным размером пикселей и с применением обратной засветки;
- ПЗС-фотоприемников в ограниченном сегменте применения для научных и специальных задач;
- гибридных фотоприемников с повышенной квантовой чувствительностью;
- фотоприемников на основе ККТ с повышенной стабильностью этого материала в условиях эксплуатации изделий и расширенным спектральным диапазоном.

УДК 621.383.4/5

Фотоприемники длинноволнового ИК-диапазона на основе QWIP-структур

Болтарь К. О.[1,2], Власов П. В.[1], Бурлаков И. Д.[1,3], Старцев В. В.[1,4], Лазарев П. С.[1,2], Терентьев Д. С.[1]

[1] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
orion@orion-ir.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
[4] АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха»
117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1

Представлены результаты исследований матричных ИК-фотоприемников (МФПУ) на основе QWIP-структур GaAs/AlGaAs, детектирующих излучение в спектральном диапазоне ИК-области спектра 7,8–9,3 мкм. Исследовано влияние темнового тока на характеристики. Проведена оптимизация состава и рабочей температуры QWIP-структур для минимизации доли темнового тока при заданной спектральной характеристике МФПУ.

Ключевые слова: МФПУ; QWIP-структура; GaAs/AlGaAs; ИК-фотоприемник; темновой ток.

Представлены результаты исследования матричных ИК-фотоприемников длинноволнового ИК-диапазона на основе квантово-размерных QWIP-структур GaAs/AlGaAs [1] формата 320×240, шаг 30 мкм, 384×288 элементов, шаг 25 мкм и 640×512 элементов, шаг 20 мкм. Экспериментально исследованы зависимости длины волны максимума и ширины спектральной характеристики чувствительности [2] от параметров QWIP-структур: мольной доли Al в барьере AlGaAs, концентрации доноров в слоях GaAs и толщины чередующихся слоев GaAs и AlGaAs.

Проведен анализ и поиск оптимальных режимов изготовления и измерения при производстве QWIP-структур. Снижение доли темнового тока позволяет обеспечить повышение рабочей температуры фотоприемных матриц на QWIP-структурах, что, в свою очередь, уменьшает тепловую нагрузку на микрокриогенную систему (МКС) и тем самым понижает ее энергопотребление. Это также снижает требования к МКС в части стабильности температуры охлаждения фотоприемного элемента. Проведена оптимизация состава и рабочей температуры QWIP-структур для минимизации доли темнового тока при заданной спектральной характеристике МФПУ.

Реализовано основное преимущество МФПУ на основе QWIP-структур: малое количество дефектных элементов (менее 0,04% и полностью бездефектная центральная зона 30×30 элементов для МФПУ формата 384×288 элементов), а также малый разброс вольтовой чувствительности и постоянной составляющей выходного сигнала. БИС, входящая в состав МФПУ формата 384×288 элементов, обеспечивает кадровую частоту до 120 Гц, дающую возможность использовать режим

микросканирования и реализовывать в тепловизионном канале формат изображения 768×576 пикселей. Эквивалентная шуму разница температур МФПУ формата 640×512 элементов составляет 35 мК при охлаждении МКС с холодопроизводительностью 0,75 Вт.

Литература

1. Boltar K. O., Burlakov I. D., Vlasov P. V., Lopukhin A. A., Chaliy V. P., Katsavets N. I. Long-Wave Infrared Focal Plane Arrays Based on a Quantum-Well AlGaAs/GaAs Structure with 384×288 Elements // Journal of Communications Technology and Electronics, 2018. Vol. 63. № 3. P. 300–304.
2. Давлетшин Р. В., Болтарь К. О., Егоров А. В. Исследование спектральных характеристик QWIP-фотоприемников // Прикладная физика, 2023. — № 6. — С. 36–40.

УДК 621.383

Методы реализации поляризационной чувствительности в оптико-электронных системах с микроболометрическими матричными детекторами

Соколов К. В., Хафизов Р. З., Шилейко Н. А., Москвичев В. Ю., Солодков А. А.
АО «ОКБ «Астрон»
140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1
skv@astrohn.ru, info@astrohn.ru

Рассмотрены методы реализации поляризационной чувствительности в оптико-электронных системах с микроболометрическими матричными детекторами.

Ключевые слова: ИК-излучение; микроболометрический детектор; фотоприемное устройство (ФПУ); оптико-электронная система (ОЭС).

Оптико-электронные системы, обеспечивающие чувствительность к поляризационной составляющей ИК-излучения, актуальны для многих сфер применений, включая дистанционное зондирование, астрономические исследования, экологический мониторинг, селекцию тепловых объектов и ряд других. Конструктивное исполнение таких систем зависит от специфики применения и доступных технологических возможностей.

К настоящему времени развито несколько методов получения поляриметрических изображений с помощью матричных фотоприемных устройств, в том числе в диапазоне 8–14 мкм.

Наиболее перспективным конструктивным решением является интегрирование поляризационных фильтров непосредственно в структуру фокальной плоскости детектора. При этом ориентации поляризаторов изменяются определенным образом от пикселя к пикселю. Благодаря такому подходу преобразование тепловой сцены осуществляется одним детектором, при этом использование интерполяции обеспечивает сохранение разрешения.

Практические результаты разработок по созданию фотоприемных устройств с поляризационной чувствительностью анонсированы рядом зарубежных компаний. Матричные фотоприемные устройства для таких решений на основе микроболометрических приемников форматом 640×512 и более элементов с шагом элементов 17 и 12 мкм предложены фирмами США, Японии, КНР.

Отечественные исследования и разработки поляризационно-чувствительных фотоприемных устройств для диапазона 8–14 мкм находятся на уровне расчетно-экспериментальных проработок. Так, для отечественных матричных микроболометрических детекторов в АО «ОКБ «Астрон» разработаны поляризационные фильтры.

Проведены экспериментальные исследования по формированию поляриметрических изображений в ИК-диапазоне 8–14 мкм с использованием микроболометрических ФПУ с применением метода последовательного считывания тепловой сцены, содержащей поляриметрическую информацию. Продемонстрированы

возможности увеличения контраста изображения за счет цветовой кодировки поляризационных составляющих излучения фильтром Байера (рис. 1).

Рис. 1. Поляриметрические изображения автомобилей в ИК-диапазоне 8–14 мкм

УДК 538.911

Квантово-каскадные детекторы для среднего инфракрасного диапазона

Дюделев В. В., Соколовский Г. С.
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
v.dudelev@mail.ru

Представлено исследование квантово-каскадных детекторов (ККД) спектрального диапазона 4,5 и 8 мкм. На основе ККД для спектральной области 8 мкм был изготовлен фотоприемник обратной связи для ККЛ, генератор случайных чисел, а также продемонстрирована возможность применения ККД в линиях беспроводной оптической связи со скоростью передачи данных до 10 МБ/с. ККД для спектрального диапазона 4,5 мкм продемонстрировали сравнимую чувствительность и быстродействие.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер; квантово-каскадный детектор.

Практический интерес к среднему инфракрасному диапазону связан в первую очередь с его уникальными свойствами, а именно наличием окон прозрачности атмосферы и множества уникальных линий поглощения различных веществ. Для детектирования излучения в среднем ИК-диапазоне применяются фотодетекторы на основе соединений InAsSb, CdHgTe, фотодетекторы на основе сверхрешеток (QWIP — англ.), а также квантово-каскадные детекторы (ККД). Преимуществами ККД по сравнению с остальными подходами являются относительная компактность, работа без охлаждения, а также возможность монолитной интеграции с наиболее эффективными источниками когерентного излучения в среднем ИК-диапазоне — квантово-каскадными лазерами (ККЛ).

В работе представлены исследования ККД, изготовленных из гетероструктур квантово-каскадных лазеров (ККЛ) для спектральных диапазонов 4,5 и 8 мкм [1, 2]. Максимальная чувствительность ККД для спектрального диапазона 8 мкм составляла ~20 мА/Вт при длине ККД ~0,7 мм. На основе пары ККЛ-ККД был создан генератор случайных чисел [3]. Также ККД применялись в качестве фотоприемника обратной связи для эффективного контроля выходной мощности ККЛ. Для этого ККД и ККЛ монтировались на общий теплоотвод с расстоянием между чипами несколько десятков микрометров. Помимо этого, продемонстрирована возможность применения ККД в качестве детекторов для беспроводных линий оптической связи на основе ККЛ со скоростью передачи данных до 10 МБ/с, ограниченной быстродействием электрической схемы прямой токовой модуляции передатчика. ККД для спектрального диапазона 4,5 мкм продемонстрировали сравнимую чувствительность и быстродействие.

Полученные результаты показывают, что использование пары ККД и ККЛ, изготовленных из одной гетероструктуры, имеет перспективы как для обеспечения эффективного контроля мощности ККЛ непосредственно в корпусе прибора, так и для дальнейшего применения в фотонных интегральных схемах и системах передачи данных среднего ИК-диапазона.

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 21-72-30020-П).

Литература

1. Dudelev V. V. et al. // Quant. El., 2024. Vol. 50. P. 989.
2. Cherotchenko E. et al. // Nanomaterials, 2022. Vol. 12. P. 3971.
3. Дюделев В. В. и др. // Письма в ЖТФ, 2024. — Т. 50 (22). — С. 65.

УДК 538.958

Электродинамически усиленное ИК-фотодетектирование структурами на основе двумерного материала с асимметричной сингулярной метаповерхностью

Сёмкин В. А.[1], Шабанов А. В.[1,2], Капралов К. Н.[1,2], Кащенко М. А.[1,2,3], Соболев А. С.[1,2], Мазуренко И. М.[1], Мыльцев В. Н.[1], Мыльников Д. А.[1], Никулин Е. И.[4], Чернов А. И.[1,4], Каменева Е. И.[1], Бочаров А. Ю.[2], Свинцов Д. А.[1,2]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
semkin.va@phystech.edu
[2] АО «Сканда Рус»
143403, г. Красногорск, ул. Речная, 8
[3] ООО «ЦННТ»
127495, г. Москва, Долгопрудненское ш, 3
[4] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

Представлен подход к проектированию быстрых неохлаждаемых инфракрасных детекторов на основе двумерных материалов, основанный на эффективном локальном усилении интенсивности излучения металлическими метаповерхностями. Продемонстрирован дизайн, обеспечивающий отношение чувствительностей при ортогональных поляризациях более 200.

Ключевые слова: инфракрасный детектор; двумерные материалы; асимметричная сингулярная метаповерхность; поляризационный контраст.

Уникальные физические свойства графена и других двумерных материалов позволяют закрыть недостатки, присущие классическим инфракрасным детекторам. Проблемы миллисекундного масштаба времени отклика термических детекторов и необходимости охлаждения детекторов квантового типа отсутствуют для устройств на основе двумерных материалов. Однако величина поглощения в слоях двумерных материалов чаще всего невелика, что приводит к низкой фоточувствительности устройств в базовых конфигурациях (например, в конфигурации типа металл/2D-материал/металл).

В представляемой работе экспериментально демонстрируется и теоретически обосновывается подход к конструированию инфракрасных фотодетекторов на основе двумерных материалов с электродинамически усиленным поглощением, обеспечиваемым металлическими асимметричными сингулярными метаповерхностями [1]. Асимметрия метаповерхности является необходимым требованием для формирования некомпенсированного фотонапряжения, а наличие сингулярных элементов позволяет получить локальное усиление в поглощении излучения в сотни раз и эффективно конвертировать поглощенную энергию в направленное движение носителей. Нами исследованы несколько различных дизайнов таких метаповерхностей, обеспечивающих различные функциональные возможности.

В частности, последовательно расположенные пилообразные полоски обеспечивают детектирование с огромным поляризационным контрастом (отношение фотонапряжений при освещении излучением с взаимноортогональными поляризациями) ~200 (рис. 1, слева). Большой поляризационный контраст фотодетектора является ключевым параметром во многих прикладных задачах, в частности в области оптических коммуникаций для демодуляции сигналов. Другой дизайн метаповерхности, в форме прямоугольной решетки из треугольных элементов, позволяет получить фотоотклик с настраиваемым управляющим напряжением знаком поляризационного контраста (рис. 1, справа).

Значимость полученных результатов состоит в представлении оригинального подхода в конструировании фотодетекторов. Также важно, что данный подход не требует двумерных материалов наивысшего качества, получаемых механическим методом в единичных экземплярах. Изученные устройства изготовлены на основе химически осажденного (методом CVD) графена, что делает устройства технологически совместимыми.

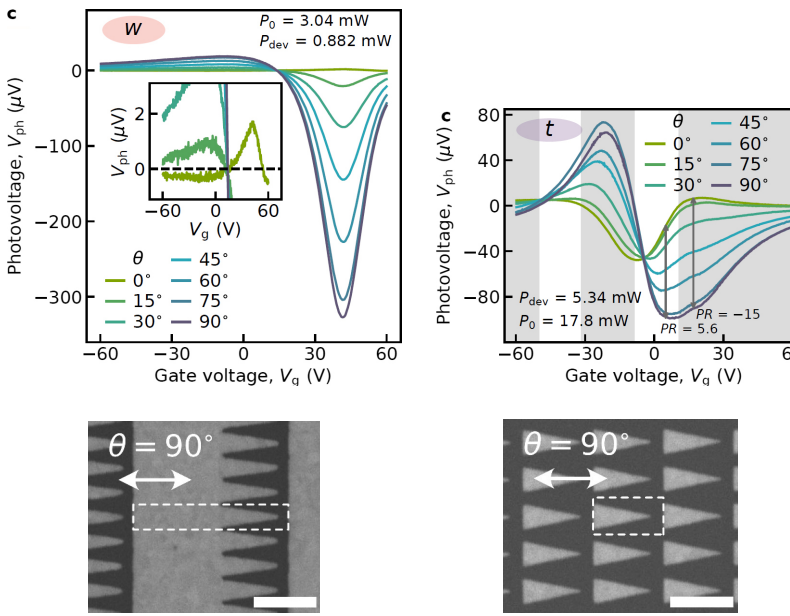


Рис. 1. Зависимости фотонапряжения в среднем ИК-диапазоне от управляющего напряжения на затворе при различных поляризациях излучения (обозначены цветом), а также изображения в растровом электронном микроскопе участков метаповерхностей соответствующих устройств

Оптоэлектронные измерения и моделирование выполнены при поддержке гранта РНФ № 24-79-10081. Изготовление устройств выполнено при поддержке гранта № 020-11-2021-1446 по заданию АО «Сканда Рус».

Литература

1. Semkin V., Shabanov A., Kapralov K., Kashchenko M., Sobolev A., Mazurenko I., Myltsev V., Mylnikov D., Nikulin E., Chernov A., Kameneva E., Bocharov ., Svintsov D. Multifunctional 2D Infrared Photodetectors Enabled by Asymmetric Singular Metasurfaces // Advanced Optical Materials, 2025. Vol. 13 (12). P. 2403189.

УДК 621.383.4/5:621.315.5

Проблемы при серийном изготовлении матричных фотоприемных устройств на основе InSb и пути их решения

Мирофянченко А. Е., Мирофянченко Е. В., Якушев Т. Ю., Новиков И. В., Атрашков А. С.
АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
a.mirofyanchenko@yandex.ru

В докладе освещаются проблемы, возникающие при серийном изготовлении матричных фотоприемных устройств на основе InSb для на средневолнового инфракрасного (3–5 мкм) диапазона спектра, и пути их решения. Рассмотрены основные аспекты, связанные с технологией изготовления, качеством исходного материала антимонида индия и их влиянием на формируемое тепловизионное изображение.

Ключевые слова: InSb; ИК МФПУ; ФЧЭ; технология; SWaP-C; БИС-считывания; средневолновой ИК-диапазон; ALD; плазмохимическое травления; ростовые дефекты; мегапиксель.

Современные инфракрасные (ИК) оптико-электронные системы (ОЭС), в основе которых лежат матричные фотоприемные устройства (МФПУ), широко применяются в оборонных, космических и промышленных областях, где от их качества зависит успешность мониторинга, управления и принятия решений. Максимальные характеристики таких ИК ОЭС, работающих в средневолновом (3–5 мкм) ИК-диапазоне спектра? достигаются при использовании матричных фотоприемных устройств на основе антимонида индия (InSb).

Одной из основных тенденцией является SWaP-C (Size, Weight and Power, Cost)? суть которой состоит в снижении энергопотребления и массогабаритных характеристик, а также улучшениb основных параметров фотодетекторов согласно критериям Джонсона.

Разделить проблемы при серийном изготовлении матричных фотоприемных устройств на основе InSb можно на две группы: связанные с качеством исходного материала и технологические. Отдельно будет рассмотрено развитие необходимых для этого аналитических методов исследования.

В данной работе технологические аспекты обсуждаются на базе серийного производства матриц формата 640×512 из InSb, изготавливаемых по мезапланарной технологии в АО «НПО «Орион» [1], в которой перед формированием элементов мезаструктуры *p-n*-переход создается имплантацией ионов Be в планарную полупроводниковую подложку. Ключевыми этапами в данной технологии являются формирование матричных фоточувствительных элементов (ФЧЭ) и их последующая качественная пассивация. Данные операции критическим образом влияют на электрофизические характеристики (ЭФХ) фотодиодных матриц, в том числе на уровень темнового тока и количество дефектных элементов матрицы ФЧЭ при рабочем напряжении смещения.

Качество используемого исходного материала в технологии изготовления таких устройств играет ключевую роль. При этом, несмотря на проведенные обширные исследования фундаментальных свойств антимонида индия в прошлом,

в мировой литературе практически отсутствуют данные о связи структурных дефектов исходного материала антимонида индия с качеством изображения матричных детекторов на его основе. Стремительное развитие последних с 2010-х годов на данный момент позволяет наглядно визуализировать на карте сигналов тепловизионного изображения новые, ранее недоступные, взаимосвязи между структурными дефектами в исходном материале и качеством изготавливаемых фотодиодов.

Будущими технологическими вызовами при изготовлении ИК МФПУ на основе InSb являются развитие эпитаксиальных методов выращивания и групповых методов стыковки chip-to-wafer (c2w), переход на пластины диаметром 3-4 дюйма, снижение шага элементов и увеличение формата матриц, разработка надежных методов формирования фоточувствительных элементов с последующей пассивацией и внедрение цифровых БИС-считывания.

Литература

1. Борисов: Россия заместила французские тепловизоры для бронетехники отечественными // ТАСС 14.09.2018 https://tass.ru/politika/5564274 (дата обращения: 16.08.23).

УДК 621.315.592

Зависимость дефектности, выявляемой при селективном травлении пластин антимонида индия, от кристаллографической ориентации поверхности пластин и направления выращивания исходных слитков

Фазилова И. Э.[1], Фазилов Д. Э.[1], Андрейчиков К. С.[1], Астахов В. П.[1], Карпов В. В.[1], Козлов Р. Ю.[2]
[1] АО «МЗ «САПФИР»
117545, г. Москва, Днепропетровский проезд, 4А, стр. 3А
[2] АО «Гиредмет»
111524, г. Москва, ул. Электродная, 2
innapopova1994@mail.ru

Исследована дефектность пластин антимонида индия с кристаллографической ориентацией по плоскостям (100), (111) и (211), нарезанных из слитков, выращенных по направлениям с теми же индексами при различных сочетаниях индексов плоскости поверхности и направления выращивания исходных слитков.
Ключевые слова: антимонид индия; кристаллографическая ориентация; плотность дислокаций; плотность неидентифицированных дефектов; селективное травление.

Исследуемые пластины нарезали по плоскостям (100), (111) или (211) из слитков, выращенных в направлениях с теми же кристаллографическими индексами, в тех сочетаниях, которые представлены в табл. 1 (см. столбцы 1 и 2). Поверхности пластин обрабатывали последовательными шлифовкой, химико-механической и химико-динамической полировками. Затем по методике ТУ 1775-329/0-0198396-11 проводили последовательную обработку пластин в травителе типа СР-4 и селективном травителе.

Картины травления выявили два типа ямок: № 1 — эллипсовидные в виде перевернутого конуса с острой вершиной; № 2 — эллипсовидные в виде перевернутого усеченного конуса с плоским дном. Ямки № 1 обычно идентифицируют как дислокации, а ямки № 2 наблюдаются давно, но до сих пор остаются неидентифицированными (НИ). В табл. 1 представлены результаты анализа выявленных дефектов.

Из данных табл. 1 следует, что на поверхности всех изучавшихся пластин, кроме поверхности (111)А, выявлены и дислокации, и неидентифицированные дефекты, причем плотность неидентифицированных дефектов превышает плотность дислокаций в (3–100) раз. Следует отметить, что для всех трех рассматриваемых плоскостей поверхности пластин наименьшие значения плотности дислокаций проявляются в тех случаях, когда кристаллографические индексы плоскости поверхности пластин и направления роста исходного слитка совпадают: ((100)÷[100], (111)÷[111] и (211)÷[211]). Из табл. 1 также следует, что средние размеры дислокаций и неидентифицированных дефектов соответствуют друг другу и находятся в пределах 10–60 мкм. При этом минимальные значения одновременно плотностей и дислокаций и неидентифицированных дефектов соответствуют сочетанию (100)–[100] (пластины нарезаны по плоскости (100) из слитков, выращенных по направлению [100]).

Из результатов травления и анализа поверхности следует, что на плоскости (111)А для всех трех направлений выращивания слитков ([100], [111] и [211]) наблюдается зернистая структура. При соответствии индексов направления выращивания слитка [111] с плоскостью поверхности (111)А зерна имеют плоскую вершину; в остальных случаях наблюдается острая вершина и размер зерна больше в ~2 раза, (см. данные табл. 2).

Таблица 1. Результаты наблюдения поверхностных дефектов

Плоскость поверхности пластин	Направление выращивания слитка	Средняя плотность дислокаций, $см^{-2}$	Размеры дислокаций, мкм	Средняя плотность НИ-дефектов, $см^{-2}$	Размеры НИ-дефектов, мкм
1	2	3	4	5	6
(100)	[100]	8,5	<50	130	<50
	[211]	76	10–40	2800	10–40
(111)B	[100]	230	<30	810	<30
	[111]	7,6	30–40	710	<40
	[211]	240	20–50	700	10–60
(211)	[211]	10–30	10–40	290	10–40

Таблица 2. Результаты наблюдения плоскости поверхности пластин (111)А, вырезанных из слитков, выращенных в направлениях [100], [111] и [211]

Плоскость поверхности пластин	Направление роста слитка	Внешний вид
(111)A	[100]	Зернистая структура с размером зерна (200–300) мкм. Зерна имеют острую вершину. В пределах одного зерна наблюдаются «мелкие» зерна, которые не выходят за границы «крупного» зерна
	[111]	Зернистая структура с размером зерна до 600 мкм. Зерна имеют плоскую вершину
	[211]	Зернистая структура с размером зерна (200–300) мкм. Зерна имеют острую вершину

Заключение

Наименьшие значения плотности дефектов проявляются в тех случаях, когда кристаллографические индексы плоскости поверхности пластин и направления роста исходного слитка совпадают. На поверхности всех изучавшихся пластин, кроме поверхности (111)А, выявлены дислокации и неидентифицированные дефекты, проявляющиеся при травлении как ямки с плоским дном, плотность которых превышает плотность дислокаций в 3–100 раз. При этом наименьшая плотность обоих видов дефектов соответствует совпадению кристаллографических индексов плоскости поверхности пластины (100) и направления роста исходного слитка [100].

УДК 538.915

Получение фоточувствительных барьерно-диодных структур и их исследования с помощью микроскопии сопротивления растекания тока

Минаев И. И., Клековкин А. В., Ерошенко Г. Н., Свиридов Д. Е., Савин К. А., Кривобок В. С., Николаев С. Н.
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53
i.minaev@lebedev.ru

Разработана технология роста с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии фотоприемных XBn-гетероструктур. Продемонстрирована актуальность и технологическая самостоятельность метода микроскопии сопротивления растекания тока для постростового исследования представленных гетероструктур.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия; XBn; микроскопия сопротивления растекания; A^3B^5.

В представленной работе продемонстрировано создание высококачественных барьерно-диодных (XBn) гетероструктур на основе соединений III–V, в частности систем InSb/InAlSb и InAsSb/AlSb. Эти архитектуры направлены на эффективное подавление темнового тока в инфракрасных фотоприемниках за счет введения униполярного барьера, который блокирует ток основных носителей при сохранении прозрачности для фотоактивных неосновных носителей.

Дизайн барьерно-диодных структур InSb/InAlSb включает в себя два контактных слоя InSb с концентрацией носителей ~10^{18}, между которыми находятся основной поглощающий слой InSb (~10^{15}) и барьерный слой $In_xAl_{1-x}Sb$. Варьирование содержания алюминия в барьере позволяет достичь оптимального баланса между высотой энергетического барьера и морфологическим качеством поверхности. Рост структуры производился на подложках InSb, что также помогает сократить вклад упругих напряжений в дефектообразование и повысить качество фотоприемников в целом. Рабочий диапазон — 3–5 мкм при температурах ~80 K.

Для реализации фотоприемных структур с большей рабочей температурой (~150 K) использовалась система материалов InAsSb/AlSb. Основной дизайн аналогичен системе InSb/InAlSb, но барьерный слой представляет из себя бинарный AlSb, обеспечивая резкий энергетический скачок в зоне проводимости. Поглощающий слой представляет из себя тройной раствор $In_xAs_{1-x}Sb$, варьирование состава позволяет менять рабочую длину волны. В данной работе состав был подобран таким образом, чтобы обеспечить лучшее согласование с подложкой GaSb. В данной конфигурации длина волны детектирования варьировалась в диапазоне ~4–4,7 мкм.

Наиболее значимым результатом работы стало использование микроскопии сопротивления растекания тока для детального анализа барьерных гетероструктур. Эта методика позволила визуализировать распределение тока в поперечном сечении структуры, подтвердив высокое сопротивление барьерной области и однородность проводимости по объему. В отличие от интегральных электрических измерений, МСР обеспечивает пространственное разрешение и позволяет выявлять

скрытые токовые пути, шунты или диффузионные аномалии, неразличимые другими методами.

Показано, что в выращенных структурах отсутствуют признаки локальных пробоев или диффузии и барьерный слой эффективно разделяет активную и контактную зоны. Продемонстрирована важность создания качественного буферного слоя, препятствующего прорастанию дефектов от подложки. Также удалось разрешить эффекты, связанные с перераспределением заряда на гетерограницах, что позволяет в будущем совершенствовать дизайн фотоприемника. Это подчеркивает технологическую состоятельность подхода и его применимость для создания фотоприемников со сниженным уровнем паразитных токов и возможностью работы при повышенных температурах.

Таким образом, XBn-гетероструктуры, созданные в рамках данной работы, обладают необходимым сочетанием морфологического, структурного и функционального качества. Применение методов сканирующей зондовой микроскопии, включая МСР, дополняет классические рентгеновские и оптические методики, обеспечивая комплексную диагностику и оптимизацию эпитаксиальных инфракрасных детекторов нового поколения.

УДК 621.3.

Разработка конструкции ЧЭ МЭМС ИК-сенсора на основе термопар с высокой чувствительностью и поглощающей способностью

Ткаченко А. В., Платонов Д. Д., Юркин Н. О.
ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
alexey.tkachenko@mapperllc.ru

Представлена конструкция разработанного чувствительного элемента (ЧЭ) сенсора инфракрасного (ИК) излучения на основе термопар, изготавливаемого по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), с высокой чувствительностью и поглощающей способностью. Увеличение чувствительности и поглощающей способности ЧЭ достигается за счет использования поглотителя ИК-излучения с пирамидальной структурой, который в сравнении с поглотителем ИК-излучения с плоской структурой обладает более низкой теплопроводностью и более высоким поглощением ИК-излучения.
Ключевые слова: МЭМС; ИК-сенсор; термопары; эффект Зеебека.

Недорогие термоэлементы широко используются в качестве чувствительных элементов (ЧЭ) для бесконтактных инфракрасных (ИК) термометров [1], недисперсионных ИК-сенсорных систем [2] и датчиков утечки газа/жидкостей на промышленных объектах [3]. Усовершенствование термоэлемента может способствовать разработке высокоэффективных систем измерения температуры, слежения за целями, ИК-обнаружения в промышленности и гражданском секторе. Как правило, ЧЭ неохлаждаемого приемника ИК-излучения на основе термопар состоит из матрицы термопар и пленочного ИК-поглотителя из диэлектрического материала. Высокая производительность ЧЭ в основном зависит от достаточного количества термопар, большой разницы в коэффициенте Зеебека, низкой теплопроводности и высокой поглощающей способности ИК-излучения. С развитием технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) количество термопар увеличилось с нескольких пар до более чем ста [4], в то время как коэффициент полезного действия матрицы термопар был близок к ~90 % [4]. Разница в коэффициентах Зеебека для типичных термопар poly-Si/металл, poly-Si/poly-Si и Si/металл составила более 150 мкВ·К$^{-1}$, 250 мкВ·К$^{-1}$ и 450 мкВ·К$^{-1}$ соответственно путем регулирования концентрации имплантируемой примеси в этих материалах [6].

К сожалению, высокое значение теплопроводности может быть вызвано высоким значением теплопроводности металлической и кремниевой подложки. Некоторые конструкции ЧЭ МЭМС ИК-сенсоров на основе термопар, такие как подвесные пленки и консольные балки, были разработаны для снижения теплопроводности за счет уменьшения площади контакта между поглотителем инфракрасного излучения и кремниевой подложкой. Кроме того, в качестве ИК-поглотителя, как правило, используется диэлектрическая пленка SiO_2 или SiN_x из-за ее низкой теплопроводности. Теплопроводность пленок SiO_2 и SiN_x составляет всего 1,4 Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$ и 20 Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$ соответственно. В дополнение к вышеуказанным факторам эксплуатационные характеристики термоэлемента также ограничены

относительно низким ИК-поглощением: ~0,7–0,8 в пределах 8–14 мкм пленкой SiO_2 или SiN_x [7].

Более эффективным методом является нанесение наноматериалов на поверхность тонкого диэлектрического ИК-поглотителя [5]. Однако данный метод по-прежнему имеет недостатки, связанные с несовместимостью технологических процессов, сложностью, высокой стоимостью и теплопроводностью металлических черных материалов.

В данной работе представлена конструкция разработанного ЧЭ МЭМС ИК-сенсора на основе термопар с поглотителем ИК-излучения с пирамидальной структурой (SiO_2/SiN_x), который в сравнении с поглотителем ИК-излучения с плоской структурой обладает более низкой теплопроводностью и более высоким поглощением ИК-излучения. Разработанная конструкция ЧЭ с термопарами вокруг поглотителя ИК-излучения с пирамидальной текстурой может обеспечить увеличение чувствительности и поглощающей способностью примерно на 60 % по сравнению с поглотителем ИК-излучения с плоской структурой.

Литература

1. Xu D. H., Wang Y. L., Xiong B., Li T. MEMS-based thermoelectric infrared sensors: a review // Front. Mech. Eng.-Proceeding, 2017. Vol. 12. P. 557–566.
2. Popa D., Ali S. Z., Hoppe R., Dai Y., Udrea F. Smart CMOS mid-infrared sensor array // Opt. Lett., 2019. Vol. 44. P. 4111–4114.
3. Ke W. J., Liu M., Li T., Wang Y. L. MEMS thermal gas flow sensor with self-test function // J. Micromech. Microeng., 2019. Vol. 29. P. 125009.
4. Chen S. J., Shen C. H. A new high-filling-factor CMOS-compatible thermopile // IEEE Trans. Instrum. Meas., 2007. Vol. 56. P. 1231–1238.
5. Chen C.-N., Huang W.-C. A CMOS-MEMS thermopile with low thermal conductance and a near-perfect emissivity in the 8–14-μm wavelength range // IEEE Electron Device Lett., 2011. Vol. 32. № 1. P. 96–98.

УДК 621.383.45

Оптико-электронный модуль средневолнового ИК-диапазона спектра на основе отечественного матричного фотоприемного устройства InSb формата 640×512

Старцев В. В.[1], Бурлаков И. Д.[1,2], Полесский А. В.[1,2], Хамидуллин К. А.[1], Ляпустин М. Ю.[1], Драгунов Д. Э.[1], Лазарев П. С.[1], Юдовская А. Д.[1]
[1] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
miklyapustin@gmail.com
[2] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Разработан оптико-электронный модуль на основе отечественного охлаждаемого матричного фотоприемного устройства (МФПУ) формата 640×512 элементов, работающего в спектральном диапазоне 3,6–4,9 мкм. Приведено описание алгоритмов обработки видеоизображения, описание основных блоков разработанного устройства, приведены характеристики прибора.
Ключевые слова: InSb; MWIR; средневолновый ИК-диапазон; тепловизор; отико-электронный модуль; обработка изображений.

На сегодняшний день бескорпусные оптико-электронные модули, работающие в спектральном диапазоне 3–5 мкм, пользуются большим спросом у заказчиков. Такие приборы находят применение в следующих системах:

- системы наблюдения;
- системы пеленгации вспышек;
- системы наведения боеприпасов;
- системы обнаружения утечек газов;
- системы термографии.

Подобные оптико-электронные модули должны соответствовать современным требованиям:

- наличие продвинутых алгоритмов обработки видеоизображения;
- поддержка стандартизированных протоколов передачи данных;
- начало работы сразу после подачи питания;
- конструктивная простота интеграции в готовую систему.

Главными преимуществами тепловизионных систем на основе МФПУ средневолнового ИК-диапазона спектра являются возможность обнаружения и распознавания объектов на больших расстояниях, возможность работы с оптическими системами малых габаритов и низкая стоимость (относительно систем, работающих в длинноволновом ИК-диапазоне). Специалистами из ГНЦ РФ АО «НПО «Орион» был разработан собственный оптико-электронный модуль на основе отечественного матричного фотоприемного устройства средневолнового ИК-диапазона спектра. Отличительной особенностью разработанного модуля является наличие отечественного объектива производства ООО «Опто-Технологическая Лаборатория» и отечественного охлаждаемого МФПУ формата 640×512 (InSb) производства ГНЦ РФ АО «НПО «Орион». Данный модуль состоит из варифокального

моторизированного ИК-объектива, блока обработки видеоизображения, блока питания и охлаждаемого матричного фотоприемного устройства.

Литература

1. Драгунов Д. Э. и др. Оптико-электронный модуль средневолнового ИК-диапазона на основе отечественного InSb фотоприемного устройства формата 640′512 // Успехи прикладной физики, 2021. — Т. 9. — № 5. — С. 410–416.
2. Ляпустин М. Ю., Драгунов Д. Э., Алексеев А. А. Алгоритм временного шумоподавления с адаптивным порогом для охлаждаемых тепловизионных оптико-электронных систем // Успехи прикладной физики, 2023. — Т. 11. — № 2. — С. 139–145.
3. Сорокин Д. В., Драгунов Д. Э., Ляпустин М. Ю., Семенченко Н. А. и др. Методы скоростной обработки видеоизображений с большим разбросом яркостей с использованием ПЛИС // Прикладная физика, 2022. — № 1. — С. 34–41.
4. Александровская А. А., Маврин Е. М. Реализация алгоритма контрастно-ограниченной эквализации гистограммы изображения на ПЛИС // Вестник науки и образования, 2019. — № 10. — С. 39–41.

УДК 621.383:621.315.5

Фотоприемные матрицы инфракрасного диапазона на основе наноразмерных материалов

Попов В. С.[1,2], Пономаренко В. П.[1,2]
[1] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В последние годы в фотосенсорике большое внимание уделяется развитию направлений, связанных с использованием новых подходов, в том числе с использованием наноразмерных материалов. Успехи развития одного из таких направлений привели к созданию гибридно-монолитных фотоприемных матриц на основе нольмерных квантоворазмерных полупроводниковых нанокристаллов — коллоидных квантовых точек (ККТ) [1].

Существенное упрощение процессов изготовления таких матриц за счет формирования фоточувствительной структуры из суспензий нанокристаллов непосредственно на поверхности СБИС считывания без использования индиевых микроконтактов позволило снять ограничения на шаг фоточувствительных элементов и максимальный формат и в то же время снизить стоимость матричных фотоприемников ИК-диапазона за счет использования более простых и легко масштабируемых технологических подходов [2, 3].

Активное развитие этого направления за рубежом и в нашей стране за короткое время привело к появлению матричных фотосенсоров практически важных форматов на видимый, ближневолновый и коротковолновый ИК-диапазоны. В последнее время появились примеры создания матричных фотосенсоров, чувствительных и в средневолновом ИК-диапазоне [4–8].

Представленные в литературе серийные матрицы и прототипы как на основе фотодиодов, так и на основе фоторезисторов имеют следующие наилучшие характеристики: удельная обнаружительная способность — $2 \cdot 10^{12}$ см·Гц$^{1/2}$·Вт$^{-1}$ (для коротковолнового ИК-диапазона); шаг элементов 1,62 мкм (для граничной длины волны 1,5 мкм) и максимальный формат 3064×2040 фоточувствительных элементов. Цена некорпусированной матрицы формата 640×512 достигает от 23 до 50 евро [5].

Достигнутые на сегодняшний день параметры по шагу, максимальному формату и стоимости позволяют говорить о том, что данное направление может обеспечить массовое распространение ИК-камер такого типа в различных сферах, где применение классических гибридных матричных фотоприемников ограничено или невозможно. В докладе рассмотрены вопросы построения таких матриц, проведен анализ передовых достижений по данному направлению в России и за рубежом.

Литература

1. About. SWIR Vision Systems [Electronic resource]. 2023. URL: https://www.swirvisionsystems.com/about.

2. Gréboval C. et al. Photoconductive focal plane array based on HgTe quantum dots for fast and cost-effective short-wave infrared imaging // Nanoscale. Royal Society of Chemistry, 2022. Vol. 14. № 26. P. 9359–9368.
3. Emberion Oy Introduces Groundbreaking Ultra Low-Cost SWIR Sensor [Electronic resource] // Emberion Oy. 2024. URL: https://www.emberion.com/emberion-oy-introduces-groundbreaking-ultra-low-cost-swir-sensor.
4. Пономаренко В. П. и др. Фотосенсоры на основе коллоидных квантовых точек // Успехи химии, 2024. — Т. 93. — № 4. С. RCR5113.
5. Попов В. С. и др. Фотосенсорика инфракрасного диапазона на основе гибридно-монолитных матриц на квантовых точках // Прикладная физика, 2024. — № 6. — С. 54–61.
6. Caillas A., Guyot-Sionnest P. Uncooled High Detectivity Mid-Infrared Photoconductor Using HgTe Quantum Dots and Nanoantennas // ACS Nano, 2024. Vol. 18. № 12. P. 8952–8960.
7. Xue X., Hao Q., Chen M. Very long wave infrared quantum dot photodetector up to 18 μm // Light Sci. Appl. Springer US. 2024. Vol. 13. № 1. P. 89.
8. Попов В. С., Пономаренко В. П. Новая фотосенсорика: 0D vs 2D: научн. монография. — М.: МФТИ, 2024. — 216 с.

УДК 621.383:621.315.5

Матричный фотосенсор 640×512 на основе коллоидных квантовых точек из сульфида свинца для области спектра 0,4–2,0 мкм

Пономаренко В. П.[1,2], Попов В. С.[1,2], Панков М. А.[1], Хамидуллин К. А.[1], Деомидов А. Д.[1], Федоров А. А.[1], Деев Г. Ю.[1], Драгунов Д. Э.[1], Епифанов О. В.[1], Зарипов Ш. И.[1], Лазарев П. С.[1], Мирофянченко Е. В.[1], Ильинов Д. В.[1], Петрушина В. А.[1], Кузнецов П. А.[1], Кузнецов А. Н.[1], Бурлаков И. Д.[1], Полесский А. В.[1], Старцев В. В.[1], Бричкин С. Б.[2,3], Спирин М. Г.[2,3], Товстун С. А.[2,3], Гапанович М. В.[2,3], Гак В. Ю.[2,3], Гадомская А. В.[2,3], Певцов Д. Н.[2], Кацаба А. В.[2], Кириченко А. С.[2], Демкин Д. В.[2], Иванова В. А.[2], Иванов В. В.[2], Разумов В. Ф.[2,3]

[1] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1

Представлены результаты создания отечественных матричных фотосенсоров формата 640×512 на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) из сульфида свинца для спектрального диапазона 0,4–2,0 мкм, приводятся архитектура и основные характеристики матричного фотосенсора.

Слой генерации основной доли фотоносителей выполнен из ККТ *n*-PbS путем замены исходного лиганда на йод при обработке слоя ККТ йодидом тетра-н-бутиламмония. Транспортный слой для дырок изготовлен на основе *p*-NiO_x, создавался методом магнетронного напыления. Транспортный слой для электронов изготовлен из *n*-ZnO (рис. 1) [1, 2].

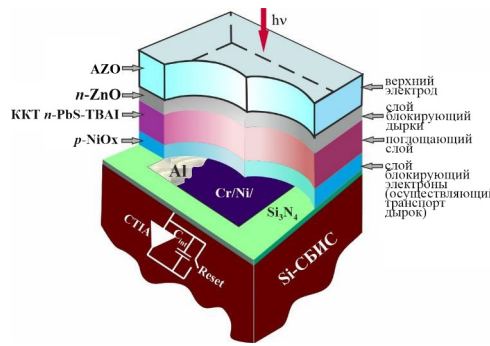


Рис. 1. Архитектура МФПУ 640×512 на основе ККТ PbS с чувствительными элементами, содержащими блокирующий электроны слой (*p*-NiO_x)

Обсуждаются особенности строения и основные характеристики созданного матричного фотосенсора.

Литература

1. Пономаренко В. П. и др. Неохлаждаемый матричный фотосенсор 640×512 для области спектра 0,4–2,0 мкм из коллоидных квантовых точек ККТ PbS с транспортным слоем для дырок на основе ККТ *p*-PbS-EDT // Прикладная физика, 2025. — № 1. — С. 45–54.
2. Пономаренко В. П. и др. Неохлаждаемый матричный фотосенсор 640×512 с расширенной областью чувствительности 0,4–2,0 мкм на основе коллоидных квантовых точек ККТ PbS со слоем из *p*-NiO_x, блокирующим электроны // Прикладная физика, 2025. — № 2. — С. 12–20.

УДК 621.315.592

PECVD-синтез пленок КРТ для ИК-детекторов

Телегин С. В., к. х. н., Карпова А. С., Слаповская Е. А., Мочалов Л. А., д. т. н.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
telegin@unn.mail.ru

Выполнен плазмохимический синтез пленок $Cd_xHg_{1-x}Te$ в аргон-водородной плазме. Пленки выращены на подложках Si, GaAs и стекло и охарактеризованы методами СЭМ, АСМ, рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии. Подтверждена пригодность полученных структур для применения в ФПУ ИК-диапазона.

Ключевые слова: CdHgTe; плазмохимия; PECVD.

Твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) занимают ведущее положение среди фоточувствительных материалов. Практически линейная зависимость ширины запрещенной зоны КРТ от значения *x* позволяет точно управлять длинноволновой границей чувствительности фотоприемных устройств (ФПУ) в широком диапазоне. Особый интерес представляет создание ФПУ для детектирования ИК-излучения во всех трех «окнах» прозрачности земной атмосферы: 1,5–2,5; 3–5 и 8–14 мкм [1, 2].

Плазмохимический синтез пленок КРТ и теллурида кадмия осуществлен в низкотемпературном неравновесном высокочастотном плазменном разряде (40,56 МГц, 100 Вт) при пониженном давлении. В ходе работы определены экспериментальные условия осаждения составов CdTe, $Cd_{0,8}Hg_{0,2}Te$, $Cd_{0,5}Hg_{0,5}Te$, $Cd_{0,3}Hg_{0,7}Te$. В качестве подложек использовались Si, GaAs и стекло; в качестве плазмообразующего газа применялась аргон-водородная смесь. Все образцы пленок КРТ и CdTe исследованы методами сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом, атомно-силовой микроскопии, высокоразрешающей рентгеновской дифракции (рис. 1), а также рамановской спектроскопии.

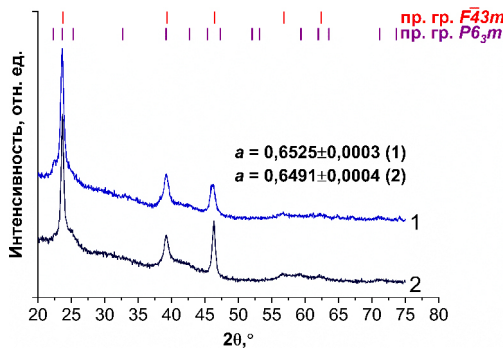


Рис. 1. Рентгенограммы $Cd_{0,8}Hg_{0,2}Te$ (1) и CdTe (2)

Полученные результаты свидетельствуют о возможности эффективного синтеза пленок КРТ, пригодных для создания ФПУ, методом PECVD в аргон-водородных газовых смесях.

Данная работа выполнена при поддержке учебного дизайн-центра электроники ННГУ им. Н. И. Лобачевского.

Литература

1. Sidorov Y. G., Dvoretskii S. A., Varavin V. S., Mikhailov N. N., Yakushev M. V., Sabinina I. V. Molecular-beam epitaxy of mercury-cadmium-telluride solid solutions on alternative substrates // Semiconductors, 2001. Vol. 35. № 9. P. 1045–1053.
2. Rogalski A. HgCdTe Infrared Detector Material: History, Status and Outlook // Rep. Prog. Phys., 2005. Vol. 68. P. 2267–2336.

УДК 621.315.5

Комплексные исследования объемных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs (100)

Климов Е. А.[1], Виниченко А. Н.[1,2], Васильевский И. С.[1,2], Грекова А. А.[1], Гладышева К. А.[1], Клочков А. Н.[1,2], Родина А. М.[1], Бурлаков И. Д.[1]

[1] АО «НПО «Орион»

111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

klimov_evgenyi@mail.ru

[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское ш., 31

Проведены комплексные исследования свойств, включая структурные, оптические и электронно-транспортные, монокристаллических слоев гетероэпитаксиальных структур на основе тройного твердого раствора теллурида кадмия-ртути различного состава, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с кристаллографической ориентацией поверхности (100). Для устойчивого формирования структурно-качественной однодоменной монокристаллической структуры КРТ использовался зародышевый/переходный слой теллурида цинка с последующим ростом толстого буферного слоя CdTe.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия; $Cd_xHg_{1-x}Te$; GaAs (100); переходные буферные слои.

Гетероэпитаксиальные структуры на основе тройного твердого раствора теллурида кадмия ртути с составом $0{,}2 < x < 0{,}4$ демонстрируют отличные фотоэлектрические характеристики и представляют значительный интерес для создания высокочувствительных инфракрасных фотодетекторов, работающих во всех трех окнах прозрачности атмосферы (ИК-диапазон): 1–3 мкм (SWIR), 3–5 мкм (MWIR), 8–14 мкм (LWIR), а также более 14 мкм (VLWIR) [1, 2]. На сегодняшний день одним из ключевых методов синтеза фоточувствительных слоев тройного твердого раствора теллурида кадмия-ртути (КРТ) является метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Данным методом можно выращивать КРТ-структуры как на согласованных по параметру кристаллической структуры подложках CdZnTe [3], так и на рассогласованных, альтернативных подложках, таких как GaAs [4, 5] и Si [6]. Оптимизация технологии роста гетероэпитаксиальных структур на основе КРТ развивается как в направлении поиска более выгодных ориентаций поверхности монокристаллических подложек GaAs и Si, так и в направлении поиска ростовых приемов формирования зародышевых и буферных слоев. Чтобы в полной мере реализовать преимущества альтернативных подложек для получения недорогих и высокоэффективных фотоприемных устройств, необходимо не только освоить процесс эпитаксиального роста активных фоточувствительных слоев HgCdTe, но и отработать технологию получения высококачественных переходных буферных слоев ZnTe и CdTe, которая на сегодняшний момент является одной из актуальных задач для обеспечения низкой плотности дефектов в активной области гетероструктуры ввиду значительного расхождения параметров решетки подложка — слой и коэффициента

теплового расширения между этими материалами. Несмотря на существенный прогресс в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, образование дефектов и дислокаций в слоях CdHgTe остается важным ограничивающим фактором, снижающим производительность ИК-фотоприемников. Эти дефекты могут служить центрами рекомбинации неосновных носителей заряда, приводить к флуктуациям ширины запрещенной зоны и ухудшению оптических и электрических свойств материала. Кроме того, для роста качественных объемных КРТ слоев необходимо с высокой степенью точности поддерживать термодинамически равновесные условия ростового процесса: температуру подложки и соотношение потока ртути к потокам кадмия и теллура, выход за пределы которых грозит ухудшением структурных свойств пленок, вплоть до прекращения роста монокристалла и аморфизации поверхности.

Таким образом, целью настоящей работы является отработка технологии эпитаксиального роста и оптимизация условий выращивания монокристаллических объемных слоев КРТ приборного качества на относительно недорогих и коммерчески доступных подложках GaAs (100) с использованием переходных буферных слоев, что, несомненно, должно привести не только к увеличению размеров матрицы фотоприемника, но и снижению их стоимости по сравнению с более дорогими и меньшими по площади подложками $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$.

Исследуемые в работе образцы были выращены методом МЛЭ на полуизолирующих epi-ready подложках GaAs с кристаллографической ориентацией поверхности (100) в сверхвысоковакуумной многокамерной установке Riber. Сгон окисла с поверхности подложек GaAs осуществлялся в камере роста в потоке теллура. В качестве зародышевого буферного слоя для сохранения ростовой фазы выращивалась пленка ZnTe толщиной порядка 150 нм, за которой следовал толстый буферный слой CdTe. Рост буферных слоев контролировался *in situ* с помощью системы дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). По завершении роста буферного слоя CdTe выращивался фоточувствительный слой CdHgTe под контролем *in situ* эллипсометрии, позволяющей предварительно оценить состав КРТ-слоя и скорость его формирования. Гетероэпитаксиальные структуры имели однородный по химическому составу слой с мольной долей CdTe x = 0,18–0,4 толщиной от 5,5 до 7 мкм.

Оптимизация условий эпитаксиального роста буферных слоев и объемных слоев КРТ позволила достичь следующих параметров для пленок $Cd_xHg_{1-x}Te$ толщиной 6 мкм (данные РЭМ и ИК-Фурье спектрометрии) и состава $x_{Cd} = 0,20$ (данные эллипсометрии и ИК-фурье-спектрометрии): среднеквадратичная шероховатость поверхности по данным АСМ-скана в поле 5×5 мкм — не более 10 нм, концентрация электронов — $n = 1,4 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$ при подвижности mu = 32000 см^2/(В·с) (T = 300 K) и концентрация электронов — $n = 1,8 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ при подвижности mu = 150000 (T = 77 K).

Литература

1. Lei W., Antoszewski J., Faraone L. // Appl. Phys. Rev., 2015. Vol. 2. P. 041303. DOI: 10.1063/1.4936577.
2. Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Ремесник В. Г., Сабинина И. В., Сидоров Ю. Г., Швец В. А., Якушев М. В., Латышев А. В. // Автометрия, 2020. — № 56 (5). —С. 12. DOI: 10.15372/AUT20200502.

3. Eminov Sh. O., Rajabli A. A., Ibragimov T. I. // Inorganic Materials, 2010. Vol. 46 (7). P. 714. DOI: 10.1134/S0020168510070058.
4. Carmody M., Yulius A., Edwall D., Lee D., Piquette E., Jacobs R., Benson D., Stoltz A., Markunas J., Almeida A. // J. Electron. Mater., 2012. Vol. 41. P. 2719. https://doi.org/10.1007/s11664-012-2129-z.
5. Варавин В. С., Дворецкий С. А., Икусов Д. Г., Михайлов Н. Н., Ремесник В. Г., Сидоров Г. Ю., Сидоров Ю. Г., Сизиков П. В., Ужаков И. Н. // Автометрия, 2013. — № 49 (5). — С. 68. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20501810.
6. Варавин В. С., Васильев В. В., Гузев А. А., Дворецкий С. А., Ковчавцев А. П., Марин Д. В., Сабинина И. В., Сидоров Ю. Г., Сидоров Г. Ю., Царенко А. В., Якушев М. В. // ФТП, 2016. № 50 (12). — С. 1652. DOI: 10.21883/ftp.2016.12.43894.40.

УДК 621.383

Оценка предельных характеристик матричных микроболометрических приемников ИК-излучения с шагом элементов 12 мкм, применяемых для создания тепловизионных приборов высокого разрешения

Бетрозов С. Б., Ерастов Д. А., Москвичев В. Ю., Попов В. К., Сильницкая О. А., Серов В. В., Соколов К. В., Солодков А. А., Худаяров З. Ф., Шилейко Н. А.
АО «ОКБ «Астрон»
140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1
saa@astrohn.ru, info@astrohn.ru

Представлены результаты аналитической оценки предельных характеристик матричных микроболометрических приемников ИК-излучения с шагом элементов 12 мкм, определяемых конструктивно-техническими решениями при проектировании чувствительных элементов на основе МЭМС-структур.
Ключевые слова: матричный микроболометрический приемник; инфракрасное излучение; микроэлектромеханические системы (МЭМС).

Программными средствами проектирования сформированы (синтезированы) варианты конструкции (3D-модели в CAD) единичных термочувствительных (ТЧ) МЭМС-элементов (всего 8 проектов), имеющих шаг элемента в матричном массиве 12 мкм и отличающихся между собой размерами консолей и мембран. Остальные параметры для каждого проекта, в том числе структура слоев в конструкции МЭМС-элемента, являются одинаковыми.

Получены расчетные оценки минимальной разрешаемой разности температур для прибора применения (тепловизора) с учетом вариаций эквивалентной шуму разности температур и модуляционной передаточной функции в зависимости от параметров каждого из проектных образцов МЭМС-элементов [1].

Сформированы с использованием метода конечных элементов расчетные оценки термомеханических деформаций перемещения, возникающих из-за температурного нагрева токопроводящих слоев единичного ТЧ МЭМС-элемента в рабочем режиме также в зависимости от параметров каждого из проектных образцов МЭМС-элементов.

Определены обобщенные оценки с учетом геометрических и термодинамических параметров и характеристик по каждому из синтезированных вариантов конструкции единичного ТЧ МЭМС-элемента [2].

Литература

1. Тарасов В., Якушенков Ю. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. — М.: Логос, 2004.
2. Шилейко Н. А., Москвичёв В. Ю., Соколов К. В., Хафизов Р. З., Конструкторско-технологические аспекты проектирования матричных микроболометрических детекторов с шагом элементов 12 мкм // Российский форум «Микроэлектроника-2024». 10-я научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули»: Сборник тезисов, Москва, 23-28 сентября 2024 года. — М.: Техносфера, 2024.

УДК 621.383.522

ИК-фотодиоды российского производства для оптоволоконных линий связи и сенсоров различного назначения

Воропаев К. О.[1], Воропаева И. О.[1], Васильев А. А.[1], Соболев М. С.[2], Пирогов Е. В.[2], Василькова Е. И.[2], Карачинский Л. Я.[3], Новиков И. И.[2,3]

[1] АО «ОКБ-Планета»

173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1н

voropaevko@okbplaneta.ru

[2] СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

[3] ООО «Коннектор Оптикс»

194292, г. Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16, лит. Б

В данной работе представлены результаты создания и исследования основных характеристик ряда ИК-фотодиодов, производимых предприятием АО «ОКБ-Планета» и перекрывающих спектральный диапазон от 0,6 до 2,5 мкм.

Ключевые слова: PIN-фотодиод; арсенид индия галлия; арсенид галлия; волоконно-оптические линии связи.

Основной причиной разработки быстродействующих СВЧ PIN-фотодиодов явилось развитие волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) с большой шириной полосы пропускания и низкими оптическими потерями. В оптическом волокне принято выделять три основных окна прозрачности: 850, 1310 и 1550 нм.

Из всех существующих конструкций фотодиодов для применения в ВОЛС наибольшим потенциалом обладают PIN-фотодиоды ввиду относительно низкой цены, низкой барьернаой емкости, высокой квантовой эффективности.

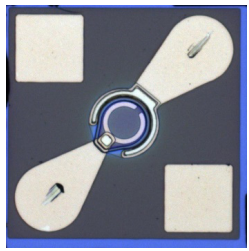
Для создания СВЧ PIN-фотодиодов диапазона длин волн 850 нм наиболее подходящим материалом является GaAs [1]. Характеристики и внешний вид таких фотодиодов, изготавливаемых АО «ОКБ-Планета» из гетероструктур ООО «Коннектор Оптикс», представлены на рис. 1.

Также одной из наиболее быстро развивающихся областей науки и техники является радиофотоника, где требуются высокоскоростные фотодиоды, способные обеспечить работу в спектральном диапазоне 1,3–1,55 мкм [2].

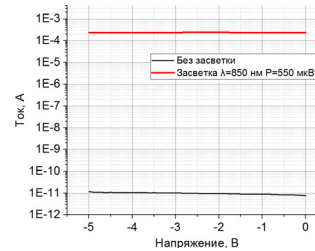
Сильное поглощение вблизи 1,55 мкм имеет германий и твердые растворы InGaAs. Наибольший потенциал для СВЧ-применений в в спектральной области 1,3–1,55 мкм имеют фотодиоды на основе твердого раствора $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ [3]. На рис. 2 представлен внешний вид и параметры СВЧ InGaAs PIN-фотодиодов, изготавливаемых АО «ОКБ-Планета» из гетероструктур ООО «Коннектор Оптикс», подходящих для применения в различных оптических трансиверах.

Для применения в лазерных дальномерах конструкция InGaAs PIN-фотодиода была модифицирована и были изготовлены фотодиоды с увеличенной апертурой (до 150 мкм) и низкими темновыми токами. Внешний вид и параметры полученных фотодиодов представлены на рис. 3.

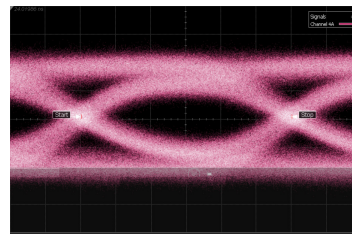
Для многих приложений востребованным является спектральный диапазон 1,9–2,7 мкм: газоанализаторы NH_3, CO и др., контроль выбросов CO_2 и CH_4, матричные фотоприемные устройства для тепловизоров и т. д.



а

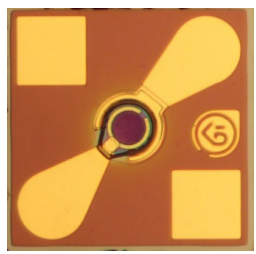


б

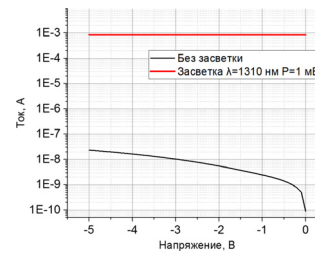


в

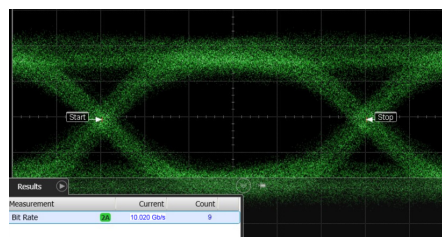
Рис. 1. СВЧ GaAs PIN-фотодиод: *а*) фотография кристалла; *б*) ВАХ; *в*) глазковая диаграмма 10 Гбит/с



а

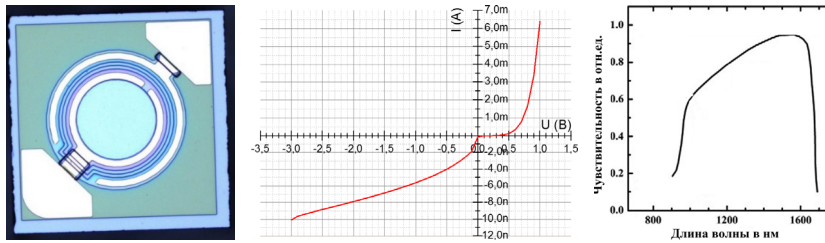


б



в

Рис. 2. СВЧ InGaAs PIN-фотодиод: *а*) фотография кристалла; *б*) обратная ветвь ВАХ; *в*) глазковая диаграмма 10 Гбит/с

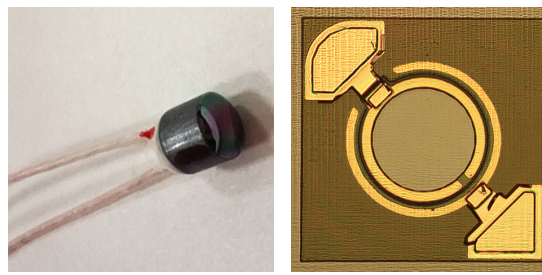


а *б* *в*

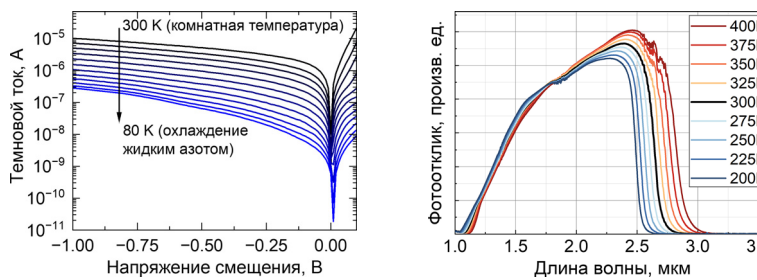
Рис. 3. InGaAs pin фотодиод для лазерной дальнометрии: *а*) фотография кристалла; *б*) ВАХ без засветки; *в*) спектральная характеристика

Для реализации таких фотоприемников Алфёровский университет вырастил методом молекулярно-пучковой эпитаксии гетероструктуры с повышенным содержанием In = 83 % на основе метаморфных буферных слоев InAlAs [4]. АО «ОКБ-Планета» были изготовлены InGaAs PIN-фотодиоды с размером апертуры 150 мкм, характеристики и внешний вид которых представлены на рис. 4.

Параметры и конструкция фотодиодов могут быть при необходимости модифицированы. По данной тематике АО «ОКБ-Планета» открыто к сотрудничеству.



а



б *в*

Рис. 4. Метаморфный InGaAs PIN-отодиод: *а*) фотография кристалла (справа) в корпусе (слева); *б*) вольт-амперные характеристики; *в*) спектральная характеристика

Работа Алфёровского университета выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования № FSRM-2025-0001 в рамках совместной лаборатории с АО «ОКБ-Планета».

Литература

1. Reichmuth S., Helmers H., Philipps S., Schachtner M., Siefer G., Bett A. // Prog. Photovolt.: Res. Appl., 2017. Vol. 25. P. 67–75.
2. Urick V.J., McKinney J.D., Williams K.J. // Fundamentals of microwave photonics, John Wiley & Sons, New Jersey, 2015.
3. Чистохин И.Б., Журавлев К.С. СВЧ-фотодетекторы для аналоговой оптоволоконной связи // Успехи прикладной физики, 2015. — Т. 3. — № 1. — С. 85 — 94.
4. Василькова Е.И., Пирогов Е.В., Шубина К.Ю., Воропаев К.О. и др. Электрофизические характеристики PIN-фотодиодов диапазона 2,2–2,6 мкм на основе гетероструктур InGa(Al)As/InP с метаморфным буферным слоем // Конденсированные среды и межфазные границы, 2024. — № 26 (3). — С. 417–423.

УДК 621.382

Планаризация поверхности различных материалов и топологических рельефов для изготовления приборов фотоники нового поколения

к. т. н. Трофимов А. А.[1,2], Андрусов Ю. Б.[3], Косякова А. М.[1], Гладышева К. А.[1], Кондрахин А. С.[1,2], Ильинов Д. С.[1], Кузнецов Г. В.[3], Андреева М. Ю.[3], к. т. н. Мирофянченко Е. В.[1], к. х. н. Попов В. С.[1,4], к. ф.-м. н. Панков М. А.[1]

[1] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
aa-trofimov@yandex.ru
[2] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
[3] АО «Гиредмет им. Н. П. Сажина»
111524, г. Москва, ул. Электродная, 2/1
[4] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Выполнены поисковые исследования, направленные на установление возможности прецизионной механической планаризации слоев HgCdTe, обратной стороны пластин кремния при переходе на увеличенный диаметр подложек в производстве фоточувствительных элементов, а также схем с топологическим рельефом. Показаны различные варианты обработки полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев.

Ключевые слова: полирование; планаризация; кремний; теллурид кадмия-ртути.

Процессы планаризации поверхности, т. е. сглаживания рельефа, являются одними из ключевых в производстве изделий микроэлектроники, поскольку снижают количество дефектов в слоях при последующих операциях формирования структуры микросхемы, обеспечивают высокую плотность интеграции и надежную изоляцию между слоями, улучшают литографию и позволяют контролировать толщину слоев и качество контактов [1]. При создании современных электронных компонентов используется многослойная технология, когда на поверхность пластины наносятся различные материалы слоями — вольфрам, медь, диэлектрические слои диоксида кремния и т. п. Неровная поверхность приводит к трудностям при создании тонких и качественных слоев, а также к дефектам в структуре микросхемы [2, 3].

Разработан процесс полирования пластин кремния с изготовленными на них фоточувствительными элементами при переходе от диаметра подложек 75 мм к диаметру 100 мм в серийном производстве [4].

Достигнута шероховатость поверхности ≤1 нм при планаризации поверхности гетероструктур HgCdTe/CdZnTe в целях улучшения эксплуатационных свойств фоточувствительного материала HgCdTe, выращенного методом жидкофазной эпитаксии [5].

Ведутся исследовательские работы по поиску путей повышения технических характеристик матричных фоточувствительных устройств на основе современных материалов фотоники (нового типа). Решение основано на технологии «изолирующего слоя», при котором используется слой диэлектрика, который затем полируется, выравнивая поверхность. Задача заключается в достижении наиболее однородного контакта между площадками считывания и наносимым фоточувствительным слоем.

Литература

1. Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Химико-механическое полирование. Часть 1. Основные закономерности: обзор // Вестник ПНИПУ. Механика, 2011. — № 3. — С. 26–42.
2. Холевин В. В. Некоторые особенности планаризации поверхности подложек изделий микро- и наносистемной техники // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. — № 6 (18). — С. 1–10.
3. В России создают установку для изготовления кремниевых пластин на замену американской // www.cnews.ru/news/top/2024-11-22_minpromtorg_vydelil_pochti.
4. Трофимов А. А., Царегородцев Д. О., Кондрахин А. С., Будтолаев Н. Ю., Рафикова В. А., Афлитонова С. Д. Прецизионное полирование обратной стороны пластин Si диаметром 100 мм с изготовленными на них оптоэлектронными фоточувствительными элементами // Прикладная физика, 2024. — № 4. — С. 34–38.
5. Трофимов А. А., Денисов И. А., Андрусов Ю. Б., Гришечкин М. Б., Царегородцев Д. О., Косякова А. М., Курепин С. А., Смирнов А. С., Долматов В. Ю. Планаризация эпитаксиальных слоев HgCdTe, выращенных на подложках CdZnTe методом жидкофазной эпитаксии // Журнал технической физики, 2025. — Т. 95. — Вып. 3. — С. 549–559.

УДК 621.3.049

Синтез высокочистых базовых материалов для опто- и фотоэлектроники

Мочалов Л. А., д. т. н., Телегин С. В., к. х. н., Слаповская Е. А.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
mochalov@chem.unn.ru

Разработаны технологии высоковакуумного синтеза базовых материалов опто- и фотоэлектроники — халькогенидных стекол различного макросостава, высокочистого поликристаллического арсенида галлия, антимонида индия и антимонида галлия. В качестве исходного сырья использованы элементы технической чистоты отечественного производства, для которых были определены лимитирующие примеси и разработаны технологии глубокой очистки.
Ключевые слова: арсенид галлия; антимонид индия; антимонид галлия; халькогенидные стекла; высокочистые вещества.

Специалистами лаборатории технологии высокочистых материалов НИИ химии университета Лобачевского ведется системная разработка технологий получения базовых материалов опто- и фотоэлектроники чистотой 7N и выше, таких как арсенид галлия, антимонид индия, антимонид галлия в виде поликристаллических слитков, а также халькогенидных стекол в виде объемных образцов.

Первым этапом является выбор отечественных поставщиков химических элементов технической чистоты, определение содержания примесей в исходных материалах.

Следующим этапом является разработка технологических подходов повышения чистоты исходных материалов, а также разработка технологической последовательности стадий очистки, позволяющих в конечном итоге получить исходные элементы с чистотой на уровне 7N и выше. Технологические цепочки, как правило, включают в себя как традиционные методы глубокой очистки, такие как дистилляция/сублимация, зонная плавка и т. д., так и вновь разработанные плазмохимические методы, позволяющие не только уменьшить содержание лимитирующих примесей, но и существенно понизить концентрацию наночастиц различной природы за счет снятия кинетических затруднений и повышенной реакционной способности последних.

Заключительной стадией таких технологических методов чаще всего является процесс, происходящий в условиях высокого (ниже $1 \cdot 10^{-6}$ Торр) динамического и статического вакуума.

На каждой из таких стадий осуществляется аналитический контроль, позволяющий установить концентрации, особенности поведения при тех или иных условиях, в том числе степень конверсии и химические формы.

Полученные таким образом высокочистые элементы помещаются в одно- или многозонные реакторы без потери вакуума, обеспечивая тем самым чистоту конечного материала на уровне чистоты исходных веществ. Отдельной задачей является контроль возможного поступления примесей из материалов аппаратуры.

Чистота конечных материалов подтверждается различными аналитическими методами с применением аттестованных методик.

Данные работы выполняются при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-91-20002) и учебного дизайн-центра электроники ННГУ им. Н. И. Лобачевского.

Литература

1. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. Фотоника — новый драйвер арсенида галлия // Фотоника, 2020. — Т. 14. — № 2. — С. 138–149.

УДК 621.383.45

ИК-фоторезисторы на основе гетероструктур HgCdTe с множественными квантовыми ямами

Давлетшин Р. В.[1], Болтарь К. О.[1,3], Михайлов Н. Н.[2], Дворецкий С. А.[2], Трухачев А. В.[1], Менщиков Р. В.[2], Ремесник В. Г.[2], Кучин Д. С.[1]

[1] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
[2] ИФП им. А. В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Изготовлены фоторезисторы спектрального диапазона 3–5 мкм на основе гетероструктур HgCdTe с множественными квантовыми ямами. Исследованы зависимости фотоэлектрических параметров от температуры охлаждения фотоприемного устройства в диапазоне от 80 до 300 K и напряжения смещения на фоторезисторе.

Ключевые слова: кадмий — ртуть — теллур; CdHgTe; гетероструктура; фоторезистор; ИК-фоторезистор; удельная обнаружительная способность; A_2B_6.

В настоящее время широко используются ИК-фотоприемники спектрального диапазона 3–5 мкм, работающие при температуре жидкого азота (~77 K). Интенсивно проводятся исследования по созданию фотоприемников, способных работать при более высоких рабочих температурах [1]. Промышленно выпускаемые ИК-фотоприемники на основе PbS и PbSe имеют рабочую температуру 200–300 K с длинноволновой границей чувствительности 3–5 мкм, но с нестабильными характеристиками при эксплуатации и хранении из-за поликристаллической структуры фоточувствительных слоев.

В данной работе впервые исследуются изготовленные в АО «НПО «Орион» фоторезисторы на основе гетероструктур HgCdTe с множественными квантовыми ямами (МКЯ).

Наногетероструктуры с МКЯ на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в ИФП СО РАН на уникальной научной установке (УНУ 353512) «Обь-М» на подложках (013)GaAs с прецизионным in situ эллипсометрическим контролем профиля распределения состава в слоях нанометрового размера [2]. Структуры представляли собой последовательно выращенные слои ZnTe/CdTe/МКЯ. Поглощающий слой структуры МКЯ состоял из 100 HgTe квантовых ям толщиной 3,0 нм, разделенных барьерными слоями широкозонного $Cd_{0,65}Hg_{0,35}Te$ толщиной 10 нм. Показана высокая воспроизводимость профиля распределения состава по толщине КЯ.

Были изготовлены фоторезисторы с фоточувствительной площадкой 1,2×1,2 мм^2 методом фотолитографии. Технологическая проблема создания омического контакта к каждой квантовой яме решалась за счет прецизионного травления структуры по трем последовательным фотолитографическим процессам.

На изготовленных фоторезисторах были измерены зависимости фотоэлектрических параметров от температуры охлаждения и напряжения смещения,

прикладываемого к фоторезистору. Граничная длина волны спектральной чувствительности по уровню 0,5 плавно изменяется от 4,5 мкм при T = 300 K до 5,5 мкм при T = 80 K.

Определено, что удельная обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности при напряжении на структуре изменяется от $2 \cdot 10^9$ Вт$^{-1}$ Гц$^{1/2}$ см при T = 300 K до $5 \cdot 10^{10}$ Вт$^{-1}$ Гц$^{1/2}$ см при охлаждении до температуры ниже 180 K.

Литература

1. Бурлаков И. Д., Кульчицкий Н. А., Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М., Горн Д. И. Униполярные полупроводниковые барьерные структуры для матричных фотоприемных устройств ИК-диапазона // Успехи прикладной физики, 2019. — Т. 7. — № 6. — С. 547–559.
2. Швец В. А., Михайлов Н. Н., Икусов Д. Г., Ужаков И. Н., Дворецкий С. А. Определение профиля состава квантовых ям HgTe/Cd_xHg_{1-x}Te методом одноволновой эллипсометрии // Оптика и спектроскопия, 2019. — Т. 127. — № 2. — С. 318–324.

УДК 621.382

Тенденции в разработках интегральных микросхем для матричных приемников

Аткин Э. В., к. т. н., Бочаров Ю. И., к. т. н., Бутузов В. А., к. т. н., Головин И. О., Громов И. С., Двинских П. Д., Лобанков Д. С., Малятина О. В., Норманов Д. Д., Чербов А. Д., Юровский В. О., Ямалиев С. И.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
evatkin@mephi.ru

Описываются тенденции в разработке интегральных микросхем (ИМС) для считывания сигналов матричных приемников в аппаратуре физического эксперимента и медицинской техники. Приводятся примеры практических разработок ИМС с использованием технологий проектного уровня 180–65 нм с учетом конструктивного исполнения в составе гибридных систем.
Ключевые слова: матричный приемник; съем и обработка сигналов; КМОП ИМС.

На основе данных информационных источников и опыта проведения работ в лаборатории проектирования специализированных ИМС (СИМС) НИЯУ МИФИ [1] можно отметить ряд тенденций в проектировании СИМС рассматриваемого класса.

Одно их основных направлений в развитии гибридных матричных детекторов — это попытки нахождения новых подходов к созданию таких устройств, в которых обеспечивалось бы оптимальное сочетание технологии соединения матрицы сенсоров с СИМС и технологии последующего конструктивного исполнения устройства. Для СИМС акцент делается на выбор оптимальной по стоимости КМОП-технологии. СИМС, как правило, реализуются по технологиям проектного уровня (180–65) нм, требуют 3–4 этапа прототипирования и не менее 5–7 лет до выхода на серийное производство.

Ряд факторов делает СИМС ценными для экспериментов с использованием матричных приемников. Наиболее важные — высокая степень интеграции, высокое быстродействие, низкая рассеиваемая мощность и стоимость. СИМС должны обеспечить требуемый функционал при новом наборе ограничений и компромиссов, таких как большой динамический диапазон (отношение сигнал/шум) обрабатываемых сигналов, высокоскоростная оцифровка в сочетании с низким энергопотреблением, мультиплексирование (сериализация) и быстродействующая периферийная передача большого объема данных.

Все проекты СИМС носят смешанный (аналого-цифровой) характер. В связи с переходом на технологии с меньшими проектными нормами налицо тенденция оцифровки сенсорных (пиксельных) сигналов на наиболее ранней стадии ввиду того, что даже на площади одиночного пикселя (как правило, в десятки квадратных мкм) возможно осуществить практически любые логические функции. При этом головная аналоговая часть занимает все меньшую площадь по сравнению с цифровой.

Матричная структура диктует использование маршрутов проектирования «сверху вниз»: начиная с вопросов системной интеграции и заканчивая

детализацией узлов и блоков на низовом уровне. При этом важным представляется учет паразитных параметров интеркоммуникационных линий в составе СИМС, достигающих в современных матрицах длин в десятки миллиметров.

Тенденция ко все большей гранулярности сенсоров приводит к острой необходимости учета межпиксельных разбросов по режимам питания, а также учета чисто технологических разбросов, что усложняет настройку СИМС и требует создания сложной калибровочной системы.

Направления для дальнейшего развития гибридных матричных детекторов — создание полноразмерных 2D-матриц сенсоров с возможностью их периферийного бесшовного соединения, например, благодаря применению комбинации конструкционных технологий типа перевернутого монтажа (Flip-Chip) и/или сквозных переходов (TSV).

Переход к архитектурам с пиксельными АЦП и субматричными преобразователями (АЦП в столбце или строке), интеграция цифровой предобработки на кристалле в целях минимизации объема обрабатываемых выходных данных, снижения энергопотребления и создания эффективных по площади стандартных библиотек, в первую очередь аналоговых сложнофункциональных блоков. Ожидается, что в ближайшие пять-десять лет подобные системы станут основой для отечественных решений в сфере интеллектуальной сенсорики, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта при проектировании гибридных матричных приемников.

С учетом перечисленных тенденций осуществлен ряд работ по заказам предприятий реального сектора экономики РФ. Так, по заказу АО ДЦ «Кристал» были разработаны считывающий канал и блок гибридного 14-битного АЦП для болометрической матрицы с использованием КМОП-процесса 180 нм АО «Микрон». Достигнута эффективная разрядность АЦП 12,6 бит при потреблении менее 500 мкВт на канал. По заказу АО «Медицинские технологии» осуществлена разработка прототипной СИМС для медицинской системы визуализации, где реализованная интеграция функциональных блоков позволила создать компактные и энергоэффективные решения. Разработка выполнена в базисе КМОП-процесса 90 нм со специальными опциями реализации оптических сенсоров компании SK hynix (Республика Корея) для визуализации без промежуточных этапов обработки с разрядностью кодов оцифровки изображения до 14 бит.

Литература

1. Материалы сайта Лаборатории проектирования специализированных интегральных микросхем. — URL: https://asic.mephi.ru.

УДК 538.975

Исследование процесса плазменного травления альфа-кремния для МЭМС-применений

Соловьев А. А., Юркин Н. О., Платонов Д. Д.
ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
anatoly.solovyov@mapperllc.ru

В данном исследовании рассматривается процесс плазменного травления альфа-кремния на глубину 2,5 мкм с использованием установки с индуктивно-связанной плазмой (ИСП). Основное внимание уделяется влиянию параметров травления на профиль структур и их дефектность.
Ключевые слова: плазменное травление; альфа-кремний; МЭМС; ИСП.

В работе рассматривается технологический процесс формирования микроструктур в альфа-кремнии с использованием плазменного травления в системе с индуктивно связанной плазмой (ИСП). Исследования проводились на стандартных кремниевых 100-мм подложках с нанесенным тонким слоем альфа-кремния. В качестве маски применялись фоторезистивные пленки, сформированные методом фотолитографии. Особое внимание уделялось влиянию предварительной термической подготовки маски на воспроизводимость и геометрию получаемых структур.

Анализировалось влияние совокупности параметров, определяющих режим плазменного воздействия, включая мощностные и газодинамические характеристики. Были выявлены взаимосвязи между отдельными элементами режима и качеством профиля. В частности, установлено, что изменение условий возбуждения плазмы может приводить к варьированию угла наклона боковых стенок и скорости процесса.

Разработанные условия травления позволили получить структуры с высоким уровнем повторяемости и соответствием критическим размерам. Контроль качества полученных структур осуществлялся на основании анализа их электрических параметров. Целевые показатели включали достижение требуемого уровня сопротивления на уровне отдельных элементов, а также минимизацию разброса значений по всей пластине. Эти данные использовались для обратной оценки эффективности выбранных подходов к формированию профиля.

Литература

1. Ouyang Z., Ruzic D. N., Kiehlbauch M. et al. Etching mechanism of the single-step through-silicon-via dry etch using SF6/C4F8 chemistry // Journal of Vacuum Science & Technology A, 2014. Vol. 32. № 4. P. 10.

УДК 629.5.058.7

Технология производства плоскопанельных дисплеев и развитие индустрии OLED-технологий в дисплейной отрасли

Нуриев А. В.[1,2], к. т. н., Стахарный С. А.[1]
[1] АО «ЦНИИ «Циклон»
107076, г. Москва, Щелковское ш., 77
a.nuriev@cyclone-jsc.ru
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Особенности технологии производства дисплейной отрасли существенно отличаются от классической полупроводниковой индустрии, при том что процессы и типовые операции имеют схожие цели и задачи. Качественные характеристики современных средств отображения информации напрямую связаны с техническими решениями и научными вызовами для современной науки. В данном исследовании приводится сравнительный анализ существующих технологий и основные направления для исследований в целях обеспечения современных средств отображения информации и развития данной индустрии в РФ. Рассмотрены вопросы и особенности при изготовлении современных OLED-дисплеев и основные требования, предъявляемые для современных дисплейных технологий.

Ключевые слова: OLED; AMOLED; display LCD-display; дисплеи; ОСИД; ЖК-дисплеи.

Индустрия OLED-дисплеев широко используется, развивается по всему миру и на данный момент является основным перспективным средством отображения информации по сравнению с ЖК-дисплеями, которые на данный момент занимают свою определенную нишу бюджетного коммерческого сегмента. Однако именно масштабное развитие ЖК-индустрии легло в основу развития современной отрасли органической электроники, основанной на разработке тонкопленочных транзисторов (TFT) и их дальнейшем промышленном применении в OLED-дисплеях и прочих средствах отображения информации, а также смежных устройствах.

Основным отличием дисплейной индустрии от классической электроники является применение подложек с габаритами, существенно превышающими классическую электронику, так, к примеру, самое передовое оборудование для производства полупроводниковых микросхем основано на пластинах диаметром 500 мм, при этом самый распространенный диаметр для изготовления полупроводниковой продукции в мире основан на пластинах в 200 и 300 мм. Основной размер подложек для изготовления дисплеев на данный момент превышает 2930×3370 мм. Поэтому применяемое оборудование для изготовления дисплеев в свою очередь не основано на уменьшении топологических размеров для повышения производительности устройств, а основано на увеличении размера (площади) устройств при неизменных параметрах однородности во время процессов нанесения активных слоев как тонкопленочных транзисторов, так и самой органической структуры. Таким образом, компромиссным фактором для производства современных TFT остается увеличение площади при сохранении однородности и уменьшении размерности пиксельной ячейки.

Основным параметром современного дисплея является высокая частота кадров при низком энергопотреблении, которая зависит как раз от качества изготовления TFT. Другим фактором развития становится увеличение яркости дисплея при сохранении контрастности, что уже является комплексной задачей, которая зависит от типа органической структуры, ее стабильности и стойкости к внешним воздействующим факторам.

Активное развития OLED-индустрии постоянно влечет за собой новые вызовы для научного сообщества как с точки зрения стабильности OLED-материалов, улучшения качества инкапсуляции, разработки схем управления, основанной на TFT-транзисторах, как и с точки зрения их практического применения в реальных устройствах. Поэтому в данном исследовании приводятся основные требования для изготовления устройств для современных средств отображения информации, основанных на передовых принципах развития современного научно-технического прогресса.

Исследования выполнены в рамках разработки предложений в дорожную карту развития фотоники и оптоэлектроники на ближайшую и долгосрочную перспективу по направлению «Системы отображения информации».

Литература

1. Jun Souk, Shinji Morozumi, Fang-Chen Luo, Ion Bita and others. Flat Panel Display Manufacturing. John Wiley & Sons Limited., 2018. ISBN 9781119161349.

УДК 629.5.058.7

Перспективные технологии создания микродисплеев

Кнышев С. Р.
ООО «Лазерные компоненты»
117105, г. Москва, Варшавское ш., 9, стр. 1Б, офис 504
s.knyshev@lasercomponents.ru

Рассмотрены основные технологические подходы по созданию новых поколений микродисплеев, которые потенциально по основным параметрам должны превосходить микродисплеи, построенные на базе существующих технологий LCOS (LCD) и OLED.
Ключевые слова: MicroLED-микродисплеи; QD-микродисплеи.

На сегодняшний день в окулярных и проекционных системах различного типа преобладают микродисплеи, созданные на базе двух технологий:

1. LCOS (Liquid Crystal on Silicon — жидкий кристалл на кремнии) является модификацией широко распространенной жидкокристаллической технологии (LCD), которая уже давно используется для изготовления микродисплеев различного вида [1]. Слабым местом LCOS-микродисплеев является недостаточная глубина цвета, низкая энергоэффективность, длительное время отклика и плохая адаптивность к климатическим условиям, что ограничивает их применение в устройствах специального назначения.
2. OLED (Organic Light Emitting Device — органический светоизлучающий элемент) [2]. Микродисплеи на органических диодах в целом превосходят LCOS-микродисплеи по ряду вышеперечисленных параметров, однако OLED-микродисплеи имеют достаточно высокую себестоимость производства и сложную многослойную структуру, что плохо сказывается на масштабируемости данной технологии. Еще одним важным недостатком OLED-микродисплеев является ограниченный срок службы, что связано с недолговечностью материалов на органической основе.

В настоящее время на пути совершенствования производственно-технологической базы изготовления микродисплеев рассматривается несколько вариантов технического исполнения, которые призваны, с одной стороны, сохранить и улучшить имеющиеся достижения по качеству передаваемого изображения, а с другой — преодолеть недостатки традиционных технологических подходов. Из ряда осваиваемых технологий по созданию микродисплеев нового поколения можно выделить две, которые представляются наиболее перспективными:

1. Технология MicroLED, где главным материалом для составления светодиодной матрицы служат микроскопические светодиоды из нитрида галлия (GaN), каждый из которых самостоятельно излучает свет, формируя изображение [3]. Структура такой матрицы намного проще, чем у OLED-микродисплеев (см. рис. 1), и в перспективе технология MicroLED должна стать хорошо тиражируемой благодаря конструкционной модульности элементной базы.

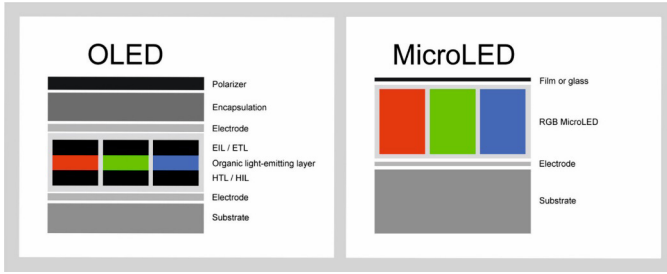


Рис. 1. Сравнение структуры светодиодных матриц OLED и microLED

MicroLED-микродисплеи обладают теми же эксплуатационными характеристиками, что и OLED, но при этом имеют практически неограниченный срок службы, а также отличаются более низким энергопотреблением и потенциально более высокой частотой обновления, но главным преимуществом технологии MicroLED является сверхвысокая яркость матрицы (до 5000 кд/кв.м против 1000 кд/кв.м — максимальная яркость OLED), что незаменимо для проекционных систем. И хотя пока что микродисплеи, созданные по технологии MicroLED, способны передавать только монохромное изображение, что связано со сложностью интеграции микроскопических диодов в RGB-структуру, но есть надежда, что в обозримом будущем эта проблема будет преодолена и появятся полноцветные MicroLED-микродисплеи.

2. Технология QD (Quantum Dots — квантовые точки), в основе которой лежит идея использования фотоэмиссионных полупроводниковых нанокристаллов, каждый из которых излучает свет определенного цвета в зависимости от своего размера (голубой — 2 нм, зеленый — 4 нм, желтый — 5 нм, красный — 6 нм) [4]. Физической причиной окрашивания квантовых точек является эффект квантового ограничения, который напрямую связан с их энергетическими уровнями. Однако для создания полностью самоизлучающих QD-светодиодов необходимо решить проблему плохой электропроводности в излучающих QD-слоях, поэтому сейчас слой квантовых точек в дисплеях используется не как самостоятельная структура, а для улучшения свойств светодиодной подсветки матриц, изготовленных по традиционной технологии. Примером такой гибридной схемы могут служить QD-LED-экраны (см. рис. 2), где слой квантовых точек позволяет отказаться от светофильтров, уменьшая тем самым толщину матрицы и обеспечивая более равномерную цветопередачу.

С точки же зрения производства микродисплеев более прогрессивным техническим решением является объединение технологий QD и OLED (QD-OLED), которое подразумевает размещение квантовых точек между слоями органических материалов, переносящих электроны и дырки. Под действием электрического поля электроны и дырки перемещаются в слой квантовых точек, где они рекомбинируют, испуская фотоны. QD-OLED-микродисплеи должны иметь совершенный угол обзора, высокий уровень контраста, большую глубину цвета, а также высокую четкость и яркость передачи изображения, но вопрос долгосрочной эксплуатации

возможно решить лишь за счет создания QD-светодиодов на основе неорганических материалов, таких как селенид или фосфид индия (In_2Se и InP). Такие QD-светодиоды будут отличаться высокой чистотой цвета и долговечностью в сочетании с эффективностью, гибкостью и низкой стоимостью обработки по сравнению с аналогичными органическими светоизлучающими устройствами.

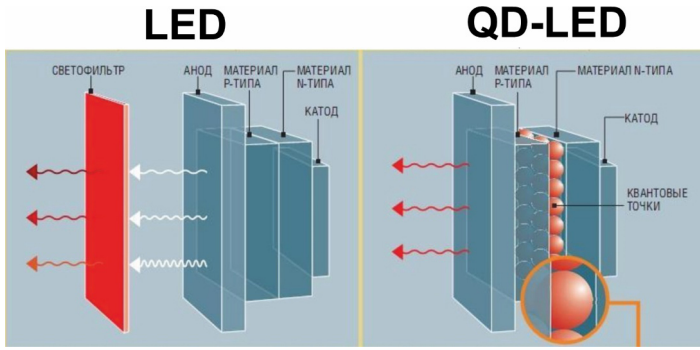


Рис. 2. Сравнение светодиодной структуры LED и QD-LED

Литература

1. Самарин А. LCoS микродисплеи и их применение // Компоненты и технологии, 2008. — № 8. — С. 24–32.
2. Усов Н., Грачёв О., Кондрацкий Б., Котовский О., Новичков А., Нуриев А., Чередниченко А. Микродисплеи на основе органических светодиодов МДО 01 // Современная электроника, 2016. — № 1. — С. 34–37.
3. Hongxiang Jiang, Jingyu Lin. Micro LEDs. — Cambridge, MA. 2021. ISBN978-0-12-823063-3.
4. Tingzhu Wu, Yu-Ming Huang, James Singh Konthoujam, Zhong Chen, Hao-Chung Kuo. Chapter Five — Quantum-dot-based full-color micro-LED displays // Semiconductors and Semimetals, 2021. Vol. 106. P. 173–201.

УДК 621.3.049.77:621.315.5

Применение методов фотолитографии и прямой печати при создании фоточувствительных структур на основе ККТ PbS

Мирофянченко Е. В.[1], Петрушина В. А.[1], Тальвеже В. В.[1], Попов М. А.[1,2], Ильинов Д. В.[1], Арсенов П. В.[2], Иванова В. А.[2], Мирофянченко А. Е.[1], Федоров А. А.[1], Деомидов А. Д.[1], Попов В. С.[1,2], Панков М. А.[1], Пономаренко В. П.[1,2]

[1] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
emirofyanchenko@yandex.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Проведено сравнение различных подходов к формированию топологического рисунка при создании фоточувствительных структур на основе ККТ PbS: классической фотолитографии и прямой печати. Показана применимость данных подходов, ранее не использовавшихся в отечественной практике изготовления фоточувствительных элементов на основе ККТ. Характеризация полученных структур проводилась различными аналитическими методами оптической и растровой микроскопии, также исследовались электрофизические характеристики.

Ключевые слова: коллоидные квантовые точки; фотолитография; фотоприемные устройства; СБИС считывания фотосигналов.

В последнее время наблюдается интенсивное развитие фотоприемных устройств на основе коллоидных квантовых точек. Применение технологических подходов, используемых в производстве микроэлектроники, открывает перспективу повышения воспроизводимости, масштабируемости и снижения себестоимости производства таких устройств.

Особую актуальность приобретает адаптация процессов фотолитографии для работы с фоточувствительными слоями на основе коллоидных квантовых точек, которые существенно отличаются по химико-физическим свойствам от традиционных полупроводниковых материалов.

Специфической сложностью данного процесса является химическое взаимодействие между органическими лигандами и компонентами фоторезистов [1]. Такие взаимодействия могут вызывать как деградацию фоточувствительного слоя, так и нарушение параметров фоторезиста, включая ухудшение его адгезии и термостабильности.

В связи с этим проведение фотолитографических процессов по слоям с ККТ требует специального подбора технологических режимов нанесения, термической обработки, экспонирования и особенно условий удаления фоторезиста. Подбор состава фоторезиста, минимально взаимодействующего с лигандной оболочкой ККТ, является необходимым условием для сохранения фоточувствительности и однородности слоя.

Альтернативным подходом к формированию топологического рисунка является метод прямой печати, в котором маска фоторезиста не используется [2]. Это позволяет полностью избежать контакта фоточувствительных слоев на основе коллоидных квантовых точек с компонентами фоторезиста. Вместе с тем такие методы обладают рядом ограничений: сравнительно низким пространственным разрешением, ограниченной встраиваемостью в технологический маршрут производства и потенциально высокой стоимостью оборудования.

Формирование топологического рисунка по фоточувствительным слоям ККТ является актуальной задачей. Проведена оценка влияния отдельных операций фотолитографии на морфологию и фоточувствительные свойства пленок PbS ККТ. Дополнительно исследованы изменения электрофизических характеристик, возникающих в результате фотолитографических процессов.

Разработаны методики как фотолитографических подходов, так и прямой печати при формировании топологического рисунка по фоточувствительным слоям коллоидных квантовых точек на СБИС считывания фотосигналов, ранее не использовавшихся в отечественной практике. Полученные фоточувствительные элементы с использованием этих подходов демонстрируют параметры, находящиеся на уровне зарубежных аналогов, что указывает на высокую перспективность как фотолитографических процессов, так и методов прямой печати в условиях производства.

Литература

1. Zhou W., Zheng L., Cheng X. et al. PbS colloidal quantum dots patterning technique with low vertical leakage current for the photodetection applications // J. Mater. Sci., 2020. Mater. Electron. 31. P. 5900–5906.
2. Yang J., Yoo J., Yu W. S. et al. Polymer-Assisted High-Resolution Printing Techniques for Colloidal Quantum Dots // Macromol. Res., 2021. Vol. 29. P. 391–401.

Оптико-электронный канал тепловой пеленгации на основе микроболометрического ФПУ

Серов В. В.[1], Ракитин А. В.[2], Попов В. К.[1], Хафизов Р. З.[1]
[1] АО «ОКБ «Астрон»
140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1
[2] АО «НИИ «Субмикрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2

В работе представлены результаты разработки оптико-электронного канала тепловой пеленгации на основе микроболометрического ФПУ. Рассмотрены основные компоненты канала и проанализированы их технические параметры.

Ключевые слова: оптико-механический блок (ОМБ); микроболометр (МБ); интегральная сила излучения (ИСИ); фотоприемное устройство (ФПУ); программное обеспечение (ПО).

Одной из важнейших активно развивающихся областей применения ИК-фотоприемников является тепловая пеленгация. Развитие МЭМС-технологии отрыло уникальные возможности для создания микроболометрических матричных детекторов, которые в последнее время стали активно применяться в составе тепловизионных оптико-электронных систем благодаря таким их достоинствам, как небольшая стоимость, малый вес, низкая потребляемая мощность и длительный срок службы.

ОКБ «Астрон» разработан прототип оптико-электронного канала тепловой пеленгации на основе микроболометрического ФПУ.

В состав канала входят следующие основные элементы:

- оптико-механический блок (ОМБ), включающий в себя объектив и фотоприемное устройство с микроболометрическим матричным детектором;
- гиростабилизированный карданов подвес, обеспечивающий установку на нем оптико-механического блока;
- обтекатель из селенида цинка с пропусканием ИК-излучения;
- источники электропитания ФПУ и карданова подвеса;
- блок считывания и обработки сигналов ФПУ, осуществляющий формирование диаграмм импульсного питания мультиплексора детектора, оцифровку выходного сигнала, выравнивание чувствительности и фильтрацию сигналов по заданным алгоритмам;
- блок управления кардановым подвесом, осуществляющий формирование команд на исполнительные устройства для управления поворотами измерительной оси ОМБ;
- процессор со специализированным программным обеспечением (ПО), формирующий сигналы для блока управления кардановым подвесом;
- монитор с интерфейсом пользователя, осуществляющим формирование команд на запуск алгоритмов работы канала и контроль в реальном времени за параметрами его функционирования.

Развитие технологий приводит к расширению спектра объектов теплопеленгации и предъявляет новые технические требования к таким системам.

Направлением, получившим новую актуальность, является всеракурсная теплопеленгация. Исследования в рамках текущей работы показали, что необходимо создавать новые классы устройств, обеспечивающие дальность и быстродействие. Одним из вариантов таких устройств являются высокоапертурные всеракурсные теплопеленгаторы с разрешенным противоречием «поле зрения — дальность».

УДК 53.083.98

Технологические аспекты понижения дефектности контактного анкера в массиве термочувствительных элементов, изготавливаемых по МЭМС-технологии

Юркин Н. О., Платонов Д. Д., Мелехин М. А., Соловьев А. А., Ткаченко А. В.
ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
nikita.yurkin@mapperllc.ru

В данной работе представлены результаты оптимизации технологии изготовления контактного анкера в целях понижения дефектности массива термочувствительных элементов.

Ключевые слова: МЭМС; единичный термочувствительный элемент; массив термочувствительных элементов.

В соответствии с разработанным в ООО «Маппер» технологическим маршрутом [1] был изготовлен массив термочувствительных элементов (МТЭ) по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе оксида ванадия (VO_x). К основным элементам конструкции единичного термочувствительного элемента (ЕТЭ) данного МТЭ относятся: анкер, обеспечивающий контакт ЕТЭ и контактной площадки интегральной микросхемы считывателей; ЕТЭ, содержащий термочувствительный слой; слой, поглощающий инфракрасное (ИК) излучение; упругие элементы подвеса (ламели). Основными фотоэлектрическими параметрами МТЭ являются: эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ) и чувствительность ЕТЭ. Кроме того, важным фактором, влияющим на качество МТЭ, является количество дефектных ЕТЭ.

Дефектность МТЭ значительно зависит от качества исполнения контакта между ЕТЭ и контактной площадкой интегральной микросхемы считывателя. В работе представлены технологические аспекты отработки контактного анкера между ЕТЭ и интегральной схемой считывателей и их влияние на количество дефектов МТЭ.

Литература

1. Юркин Н. О., Платонов Д. Д., Панин Д. И., Ткаченко А. В., Фролова А. О., Лысенко И. Е. Технология изготовления неохлаждаемой микроболометрической ИК-матрицы с шагом элементов 17 мкм // Российский форум «Микроэлектроника-2024». 10-я научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули»: Сборник тезисов, Москва, 23–28 сентября 2024 года. — М.: Техносфера, 2024. — С. 1526. EDN FRHPDE.

УДК 537.86:681.7.024.3

Инженерный анализ в разработке и конфигурировании стендов и систем стыковки оптических каналов ФИС

Новиков Е. С., Белокрылов М. Е.
ООО «ИННФОКУС»
614066, г. Пермь, ул. Стахановская, 54, стр. П, офис 401
photonics@infcs.ru

В работе представлен практический опыт разработки и конфигурирования ручных стендов и автоматизированных систем стыковки оптоволоконных выводов ФИС. Рассмотрена и обоснована необходимость применения комплексного инженерного анализа для разработки и оптимальной конфигурации таких систем.
Ключевые слова: фотонная интегральная схема; стыковка оптических каналов; интегральная фотоника.

Для промышленной эксплуатации устройств на базе фотонных интегральных схем (ФИС) необходимо решить задачу корпусирования. Одним из этапов корпусирования является стыковка ФИС с оптическими волокнами. Операция также иногда называется в индустрии монтажом оптоволоконных выводов ФИС.

Стыковка оптических волоконных выводов с ФИС заключается в поиске максимума проходящего оптического сигнала между стыкуемыми объектами и последующим созданием неразрывного соединения путем их склеивания или крепления элементов с применением лазерной сварки. Ввиду малых размеров модовых полей волноводов, процесс оптической юстировки требует применения высокоточных позиционеров с субмикронным разрешением перемещения.

С учетом высоких требований к разрешению системы позиционирования, а также большого количества одновременно контролируемых пространственных координат стыкуемых объектов в процессе поиска максимума сигнала оптическая стыковка является одной из наиболее времязатратных технологических операций при производстве изделий на базе ФИС [1]. Сегодня задача стыковки в промышленном производстве решается с помощью специальных стендов или автоматизированных программно-аппаратных комплексов.

Ввиду многообразия материалов изготовления, типоразмеров и назначения ФИС, а также типов оптических волокон и массивов оптических волокон (МВС) ряд функциональных узлов системы стыковки требуют конфигурирования и оптимизации для решения стыковки конкретных объектов. Конфигурирование системы основывается на комплексном инженерно-техническом анализе задачи, учитывающем полный спектр геометрических, оптических и оптико-механических параметров стыкуемых объектов и требований к готовому устройству. Каждый из рассматриваемых вопросов в отдельности является достаточно простым, однако важно учитывать все факторы комплексно. По результатам анализа осуществляется конфигурация системы позиционирования, системы видеонаблюдения, системы нанесения и отверждения оптического адгезива, модулей подвода электрических зондов. Проводится разработка оснастки центрального столика для фиксации ФИС, губок зажимов для МВС, а также подбор источника оптического излучения и измерителя оптической мощности.

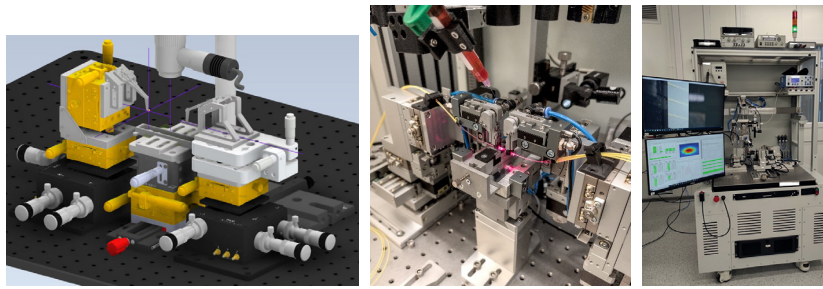


Рис. 1. Ручные стенды и автоматизированные аппаратно-программные комплексы для оптической стыковки компонентов оптоэлектроники и интегральной фотоники

Правильная конфигурация системы стыковки является необходимым, но не достаточным условием решения задачи оптической стыковки. С точки зрения перспективы развития индустрии интегральной фотоники и создания производств устройств на базе ФИС необходимо уделять особое внимание положению процесса стыковки в технологической цепочке и его связи с другими этапами производства [2]. Интеграция системы в техпроцесс предусматривает разработку технологии оптической стыковки, которая включает детальное описание операций, начиная от размещения стыкуемых объектов в системе, алгоритмов оптических юстировок, технического зрения и заканчивая алгоритмами нанесения и отверждения оптического адгезива. Своевременная профессиональная интеграция процедуры стыковки в технологический процесс позволит существенно повысить скорость отладки техпроцесса и технико-экономическую эффективность производства.

Литература

1. Carroll L. et al. Photonic packaging: transforming silicon photonic integrated circuits into photonic devices // Applied Sciences, 2016. Vol. 6. № 12. P. 426.
2. Bogaerts W., Rahim A. Programmable photonics: An opportunity for an accessible large-volume PIC ecosystem // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020. Vol. 26. № 5. P. 1–17.

УДК 621.56, 536.2, 621.383.4

Отечественные МКС для серийных перспективных матричных ФПУ

Бабенко Д. Д.[1,2], Банников М. В.[1], Болтарь К. О.[1,3], Коротаев Е. Д.[1], Некрасов Г. И.[1], Сычева Е. Д.[1]
[1] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
rainbowdm1802@gmail.com
[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Для удовлетворения спроса, вызванного применением высокотемпературных фоточувствительных элементов для матричных фотоприемных устройств, АО «НПО «Орион» разрабатывает малогабаритную интегральную роторную микрокриогенную систему, работающую на обратном цикле Стирлинга. Представлены характеристики разработанных и разрабатываемых микрокриогенных систем, текущий уровень разработки, некоторые результаты испытаний.
Ключевые слова: микрокриогенная система; цикл Стирлинга; матричные фотоприемные устройства; газовая криогенная машина.

Современным матричным фотоприемным устройствам среднего и дальнего ИК-диапазона (МФПУ) для обеспечения стабильной работы необходимо эффективное охлаждение до криогенных температур. Такое охлаждение в современных МФПУ может обеспечивается микрокриогенными системами (МКС). МКС позволяет фоточувствительному элементу выйти на рабочую температуру и поддерживать ее за счет уменьшения уровня запрещенной зоны и увеличения отношения сигнал/шум, что позволяет распознать эквивалентную шуму разницу температур, равную 25 мК.

С развитием МФПУ и оптоэлектронных систем на их основе растет потребность в компактных устройствах и соответствующих системах охлаждения. В МФПУ используются новые материалы, такие как сверхрешетки второго типа (T2SL), структуры на основе квантовых ям, которые работают при более высоких температурах (около 150 K), и xBn-структуры. Это позволяет снизить тепловую нагрузку на микрокриогенные системы (МКС), что приводит к уменьшению их размеров, веса и энергопотребления [1].

Промоделированы и апробированы некоторые ключевые изменения конструкции МКС, позволяющие уменьшить энергопотребление, габаритные размеры и массу, которые были использованы при проектировании опытных конструкций МКС [2].

В АО «НПО «Орион» разработано два типа интегральных роторных микрокриогенных систем и разрабатывается малогабаритная МКС с характеристиками, приведенными в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики разрабатываемых МКС АО «НПО «Орион»

Характеристика	Крио 1000	Крио 2000	Разрабатываемая малогабаритная МКС
Холодопроизводительность, мВт	500 (80 К, 55 °С)	750 (80 К, 55 °С)	300 (80 К, 55 °С)
Потребляемая мощность с МФПУ формата 640×512 при НКУ, Вт - в форсированном режиме - в стационарном режиме	 20 9	 40 12	 11 5
Масса, г	410	510	350 (в составе с МФПУ)

Для разработанных МКС проведены основные виды испытаний: по измерению холодопроизводительности, потребляемой мощности, времени выхода на режим при НКУ при температурах среды — повышенной и пониженной (+55 °С и −50 °С соответственно), а также испытания на воздействие различных внешних факторов. В данный момент проводятся испытания на безотказность. Для малогабаритной МКС проведены испытания макетного образца.

Литература

1. Filis A., Carmiel M., Nachman I. // Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVII, 2022. Vol. 12107. 121070K. DOI: 10.1117/12.2618471.
2. Бабенко Д. Д., Банников М. В., Коротаев Е. Д., Некрасов Г. И. // Успехи прикладной физики, 2024. — Т. 12. — №4. — С. 343.

УДК 621.59

Разработка МКС типа «Сплит-Стирлинг»

Оганесян Н. Н., Тельнов И. Р., Кононов А. Я., Родин М. С.
АО «ОКБ «Астрон»
140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1
info@astrohn.ru

Разработана технология микрокриогенной системы типа «Сплит-Стирлинг». Проведены аналитические исследования в целях последующего развития технологии — увеличения холопроизводительности и миниатюризации. Выполнено прототипирование для последующего сбора экспериментальных данных и верификации результатов анализа.
Ключевые слова: Сплит-Стирлинг; микрокриогенная система; охлаждаемые фотоприемные устройства.

Охлаждаемые фотоприемные устройства (тепловизоры) имеют широкое применение как в военной отрасли, так и в различных федеральных органах исполнительной власти (пограничная служба ФСБ, ФСО, МЧС), а также в промышленности (контроль и диагностика). Данное применение задает ограничения и требования к микрокриогенной системе как к определяющему элементу тепловизора с точки зрения массогабаритных и эксплуатационных характеристик.

Развитие разработок микрокриогенных систем, работающих по обратному регенеративному циклу Стирлинга конструкционного типа «Сплит-Стирлинг», является логическим продолжением исследований, направленных на улучшение точности криостатирования и интегрируемости систем. Основная особенность данного типа микрокриогенных систем состоит в том, что источник давления не только прокачивает рабочее тело через регенератор, но и задает динамику вытеснителя-регенератора. Преодоление этой сложности позволяет адаптировать существующую технологическую базу, созданную для моноблочных систем, под разрабатываемую технологию.

В основе процесса разработки лежит метод триангуляции данных. Использовались три типа источников:

1. Литературные источники в виде научно-исследовательских статей, монографий и соответствующих диссертаций [1, 2].
2. Информация о промышленных аналогах в форме работ, связанных с оптимизацией подобных систем и реверс-инжинирингом [3].
3. Разработанная математическая модель первого рода.

Полученные данные проверялись перекрестно с выявлением противоречий и несоответствий. При разработке модели использовались фундаментальные законы сохранения. Модель верифицировалась на данных из литературных источников.

В результате исследования был выполнен параметрический анализ и получены функциональные зависимости, отражающие влияние параметров системы на ее производительность. Выполнено прототипирование системы.

Литература

1. Cheng C. H., Huang J. S. Development of a 100-K pneumatically driven split-type cryogenic Stirling cryocooler based on experimental and numerical study // Cryogenics, 2020. № 105.
2. Архаров А. М., Беляков В. П. Криогенные системы // Машиностроение, 1987.
3. Park S. J., Hong Y. J., Kim H. B. et al. The effect of operating parameters in the Stirling cryocooler // Cryogenics, 2002. № 42. P. 419–425.

УДК 621.383

ИК-сенсоры в условиях глобальной конкуренции: анализ технологий, сравнение мировых решений и прикладное использование

Бокатый И. О., к. т. н.
ООО «СДС»
191014, г. Санкт-Петербург, ул. Маяковского, 12а, лит. П, пом. 3-Н (67)
I.Bokatyi@sdsolutions.ru

В статье рассматриваются современные тенденции развития инфракрасных сенсоров в условиях глобальной технологической конкуренции, анализируются ключевые направления совершенствования ИК-фотосенсорики. Проведено сравнение мировых решений, таких как миниатюрные MWIR-модули, микрокриогенные системы, КМОП-сенсоры с обратной засветкой и T2SL-детекторы. На основе анализа зарубежного опыта оценено состояние отечественной промышленности в данной области.

Ключевые слова: КРТ-приемники; микрокриогенная система; неохлаждаемые микроболометры; массогабаритные параметры; измерительные параметры; анализ рынка.

В настоящее время основными тенденциями развития технологий инфракрасной фотосенсорики и фотоники определены [1]:

- разработка одно- и многоспектральных охлаждаемых матричных фотоприемных устройств (МФПУ) мегапиксельных форматов, повышающих вероятность обнаружения и распознавания объектов и другие тактико-технические характеристики систем;
- совершенствование фоточувствительных гетероэпитаксиальных полупроводниковых структур различной архитектуры МФПУ с повышенной относительно «азотной» рабочей температурой охлаждения;
- исследование и разработка новых методов регистрации слабых оптических сигналов, в том числе на новых физических принципах;
- развитие и использование фотодетекторов на основе короткопериодных сверхрешеток второго типа в среднем ИК-диапазоне;
- развитие матричных микроболометрических приемников в части увеличения формата матричного массива (более 10^6 элементов) и уменьшения шага элементов в массиве (до 12–8 мкм).

На основе открытых данных о состоянии отечественных разработок по направлениям, обозначенным выше, подготовлен сравнительный анализ актуальной фазы развития технологий и достигнутых тактико-технических и измерительных параметров. Выполнено сравнение таких технических решений, как миниатюрные MWIR-модули, миниатюрные микрокриогенные системы циркулярного и последовательного движения, MWIR-сенсоры высокой рабочей температуры [2], КМОП-сенсоры с обратной засветкой, T2SL-сенсоры среднего ИК-диапазона [3] и микроболометры из VOx с минимальным размером пикселей.

Детально описан опыт зарубежных партнеров и на основе этих данных сделаны выводы о состоянии отечественной промышленности.

Литература

1. Бурлаков И. Д., Старцев В. В., Яковлев А. Ю. Основные тенденции и направления современного развития фотоэлектроники // Успехи прикладной физики, 2024. — Т. 12. — № 5.
2. Kwan D. et al. Latest advancements in bandgap engineered MCT for HOT MW and low dark current arrays at Leonardo UK // Infrared Technology and Applications LI. — SPIE, 2025. Vol. 13469. P. 240–246.
3. Qi X. et al. Design and simulation of mid-wavelength InAs/GaSb type-II superlattice avalanche photodiodes // Nanoscale, 2025. Vol. 17. № 15. P. 9262–9269.

УДК 621.383

Анализ характеристик различения тепловых объектов оптико-электронными системами с микроболометрическими матричными детекторами

Шилейко Н. А., Соколов К. В., Хафизов Р. З.
АО «ОКБ «Астрон»
140080, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1, корп. 1
sna@astrohn.ru, info@astrohn.ru

Проведен анализ влияния параметров оптики и микроболометрических ФПУ на характеристики различения тепловых объектов тепловизионными оптико-электронными системами.
Ключевые слова: ИК-излучение; микроболометрические матричные детекторы; фотоприемное устройство (ФПУ); эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ); оптико-электронная система (ОЭС).

Параметры оптических каналов тепловизионных оптико-электронных систем (ОЭС) должны обеспечивать решение задач детектирования низкоконтрастных целей при различных погодных условиях и сложной фоновой обстановке с учетом достижимого сегодня уровня чувствительности матричных микроболометрических ФПУ в терминах ЭШРТ на уровне 30–50 мК. При этом в зависимости от предъявляемых к ОЭС требований важнейшими параметрами становятся формат (количество элементов) и разрешение (шаг элементов) детекторов в составе ФПУ и весогабаритные параметры системы в целом, включая объектив и фотоприемный модуль, состоящий из ФПУ и блока электронной обработки изображения.

В рамках работы проведены оценки параметров тепловизионных ОЭС с объективами с различными фокусными расстояниями, относительными отверстиями и полями зрения.

Рассчитаны дальности обнаружения и распознавания человека (критический размер 0,6 м, превышение температуры объекта над фоном 10 К) по критерию Джонсона [1] для тепловизионных ОЭС с микроболометрическими детекторами с шагом элементов 12 и 17 мкм.

Литература

1. Johnson J. Analysis of Image Forming Systems // Image Intensifier Symposium, Fort Belvoir, VA, 6–7 October 1958.

УДК 621.382.2

Характеристики матричных ИС считывания для перспективных приложений опто- и фотоэлектроники

Болтунов Д. В.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
boltunov@niisi.ru

Получены и рассмотрены основные параметры и характеристики ИС считывания, требуемые для управления массивом функциональных элементов различного принципа действия и сформулированы их физико-технологические ограничения.

Ключевые слова: ИС считывания; КМОП; КНИ; матричные фотоприемные устройства; МЭМС; МОЭМС; техническое зрение.

В системах технического зрения, обнаружения объектов и видеонаблюдения на основе оптоэлектромеханических устройств широко востребованы интегральные схемы (ИС) считывания для реализации приема, накопления и мультиплексирования информации от многоэлементного массива сенсоров. Особый интерес для приложений опто- и фотоэлектроники представляют ИС считывания, изготовленные по КМОП- и КМОП-КНИ-технологиям, за счет относительно высокой скорости модуляции сигнала порядка 10 ГГц, низкого энергопотребления (менее 0,1 мВт на ячейку), низкого управляющего напряжения до 5 В и возможности их изготовления по групповым кремниевым технологиям поверхностной микрообработки. Такие ИС считывания технологически совместимы с матричными фото- и видеоприемниками изображения и микродисплеями, но также могут применяться и в качестве самостоятельных устройств в составе гибридных микросборок и многокристальных модулей микроболометров, дифракционных оптоэлектромеханических антенн и др. Одной из современных тенденций является применение конфигурируемых ИС считывания с совмещенной функцией видеообработки [1, 2] для построения на их основе высокопроизводительных устройств машинного обучения перспективных информационных систем различного назначения.

В работе рассмотрены параметры и характеристики, предъявляемые к ИС считывания, требуемые для управления массивом функциональных элементов различного принципа действия (см. табл. 1).

Объектом исследования являлась аналоговая ИС считывания КМОП-КНИ 0,35 мкм формата 128×128 элементов. Выбор конфигурации ИС считывания обусловлен высокими требованиями к стабильности технологического процесса, надежности и стойкости к воздействию специальных факторов (на уровне не менее 200 кРад) конечных изделий.

В работе получены основные параметры и характеристики ИС считывания, требуемые для управления массивом функциональных элементов различного принципа действия, и сформулированы их физико-технологические ограничения.

Таблица 1. Типы элементов ячейки и их параметры для матричных устройств опто- и фотоэлектроники

Тип функционального элемента ячейки	Коэффициент усиления	Постоянная времени, с
МЭМС	1	10^{-4}
Фототранзистор	10^{2}	10^{-6}
Фоторезистор	$1–10^{5}$	$10^{-2}–10^{-7}$
Фотодиод с *p-n*-переходом	1	$10^{-6}–10^{-8}$
Лавинный фотодиод	$10^{2}–10^{4}$	10^{-9}
Диод с *p-i-n*-переходом	1	$10^{-8}–10^{-10}$
Диод с поверхностным барьером	1	10^{-10}

Литература

1. Javaid F., Rashid M., Khan S. A configurable high resolution digital pixel readout integrated circuit with on-chip image processing // Computers & Electrical Engineering, 2020. Vol. 86. P. 1–17.
2. Mu Y., Zhao Z., Chen C., Yuan D., Wang J., Gao H., Chi Y. The Design of a Low-Noise, High-Speed Readout-Integrated Circuit for Infrared Focal Plane Arrays // Sensors, 2023. Vol. 23. Iss. 21. P. 12.

УДК 544.022

Комплексные соединения ртути (II) для синтеза коллоидных квантовых точек HgTe

к. х. н. Медведев А. Г., Королева Т. В., Хакимов К. Т., Сапцова О. А., Яковлев В. О., к. х. н. Попов В. С.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Фотодетекторы на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) представляют на сегодняшний день одно из самых перспективных направлений разработок в инфракрасной оптоэлектронике. Благодаря применению ККТ достигается ряд преимуществ, таких как чувствительность в широкой области ИК-спектра, упрощенный синтез и снижение производственных затрат. Поскольку свойства материала зависят от способа получения и природы прекурсора, актуальным остается поиск новых исходных соединений для синтеза ККТ. В данной работе предложены координационные соединения Hg(II) для синтеза ККТ HgTe, обеспечивающие узкое распределение по размерам и воспроизводимость результатов.

Ключевые слова: коллоидные квантовые точки; координационные соединения; ацетилацетонат; теллурид ртути.

Коллоидные квантовые точки на основе теллурида ртути (II) отличаются широким спектральным диапазоном поглощения, в том числе средневолнового ИК-диапазона (3–5 мкм), что обусловливает их применение в качестве чувствительного слоя фотоэлементов [1]. Кроме того, относительная устойчивость ККТ HgTe на воздухе обеспечивает возможность упрощения технологии получения за счет исключения работы в инертной атмосфере. Однако координация ртути с молекулами воды и/или гидроксо/оксогруппами может приводить к нежелательным поверхностным состояниям ККТ. В связи с этим актуальным представляется поиск новых прекурсоров ртути и разработка способов получения ККТ на их основе. Наиболее перспективными при этом являются координационно насыщенные соединения ртути (II).

В данной работе получен и исследован спектральными и дифракционными методами первый гомолептический комплекс ртути (II) с ацетилацетонатными лигандами. Ацетилацетонат-анион способен координироваться с различными ионами переходных металлов, формируя устойчивые хелатные соединения. В таких комплексах металл связывается одновременно с двумя кислородными атомами лиганда, что приводит к образованию шестичленных металлоциклов. Кроме того, повышенная нуклеофильность центрального атома углерода ацетилацетона приводит к образованию комплексов путем связывания Hg-C. По данным рентгеноструктурного анализа ацетилацетонаты ртути, полученные из хлоридного прекурсора, являются гетеролептическими комплексами с Hg-C-связями [2–4].

Исследование ацетилацетонатов ртути (II) с соотношением Hg/ацетилацетонат = 1:1, 1:2 и 1:3 методом колебательной спектроскопии выявило только тип связывания металл — углерод [5].

Синтез проводили в водной среде в присутствии фторида натрия. Полученный порошок малорастворим в воде и других органических растворителях. По данным рентгеноструктурного анализа, атомы ртути окружены только ацетилацетонат-ионами, при этом выявлено только Hg-C-связывание. Полученный комплекс является первым структурно охарактеризованным гомолептическим комплексом ацетилацетоната ртути (II).

Квантовые коллоидные точки на основе ацетилацетонатного комплекса ртути отличаются узким распределением по размерам, что, по-видимому, связано с прочностью Hg-C-связей. Полученные результаты обосновывают важность разработки и структурного изучения новых ртутьсодержащих комплексных прекурсоров для коллоидных квантовых точек.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации проекта № FSMG-2025-0024.

Литература

1. Пономаренко В. П., Попов В. С., Шуклов И. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. Фотосенсоры на основе коллоидных квантовых точек // Успехи химии, 2024. — Т. 93. — № 4. — RCR5113.
2. McCandlish L. E., Macklin J. W. Mercury β-Diketonato complexes: II. The crystal and molecular structure of 3,3-bis(chloromercury)-2,4-pentanedione // Journal of Organometallic Chemistry, 1975. Vol. 99. № 1. P. 31–40.
3. Toledano P., Bonhomme C., Henry M., Livage J. Structure d'un produit de mercuration de la 2,4-pentanedione, $Hg(C_5H_7O_2)Cl$ // Acta Crystallographica, 1993. Vol. C49. P. 1916–1918.
4. Bonhomme C., Toledano P., Livage J. A new dimercurated derivative of acetylacetone, $[Hg_2(C_5H_6O_2)Cl_2]\cdot CH_3CN$ // Acta Crystallographica, 1994. Vol. C50. P. 1590–1592.
5. Macklin J. W. Mercury β-diketonato complexes — I. Vibration spectra and structure of mercury acetylacetonato compounds // Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy, 1976. Vol. 32. № 8. P. 1459–1470.

УДК 621.3.049

Синтез высокочистого поликристаллического арсенида галлия с высокой подвижностью носителей

Мочалов Л. А., д. т. н., Слаповская Е. А., Телегин С. В., к. х. н.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
slapovskaya@unn.ru

Разработана технология синтеза слитков высокочистого поликристаллического арсенида галлия диаметром 100 мм с подвижностью носителей $5{,}55 \cdot 10^3$ см^2/(В·сек) и плотностью дислокаций $2{,}8 \cdot 10^3$ см$^{-2}$. В качестве исходного сырья использованы мышьяк и галлий марки 4N, которые были очищены плазмохимической сублимацией и дистилляцией в потоке водорода.
Ключевые слова: арсенид галлия; полупроводники A^3B^5; высокочистые вещества.

Арсенид галлия (GaAs) — полупроводниковый материал, обладающий уникальными электронными и оптическими свойствами. Его применение охватывает широкий спектр отраслей, таких как микроэлектроника, фотоника, лазерная оптика. По сравнению с кремнием, арсенид галлия имеет ряд преимуществ, однако и работать с ним сложнее, поскольку состоит он из двух элементов. Приборы на основе GaAs генерируют меньше шума, чем кремниевые, на той же частоте, могут рассеивать большие мощности и обладают более высокой радиационной стойкостью [1]. Для достижения максимальной эффективности устройств на основе арсенида галлия критически важна высокая степень чистоты материала, поскольку примеси ухудшают электронные и оптические характеристики. Совершенствование методов очистки и выращивания монокристаллов арсенида галлия позволит расширить область его применения, в частности в квантовых вычислениях и системах связи нового поколения. Особое значение эти разработки имеют для обеспечения технологического суверенитета России в микроэлектронной промышленности.

В данном исследовании арсенид галлия синтезировался в двухзонном реакторе из кварцевого стекла при температуре 1260 °C в течение 10 часов из элементарных высокочистых мышьяка и галлия.

Исходный галлий марки 4N был очищен методом, включающим в себя две стадии — получение хлорида галлия из исходного галлия и элементарного хлора и восстановление хлорида галлия (III) в водородной плазме высокочастотного разряда (13,56 МГц) при пониженном давлении. На первом этапе в установке для хлорирования проводилась реакция исходного галлия с хлором. Установка состояла из кварцевого хлоратора (реактора), оснащенного внешним нагревателем, кварцевой приемной ампулы и баллона с хлором, подсоединенного к верхней части хлоратора. Галлий в виде расплава загружался в хлоратор и нагревался до 120 градусов Цельсия. Затем открывали баллон с хлором и начиналась его подача в нижнюю часть хлоратора. После начала реакции нагрев выключали, так как реакция является экзотермической. В ходе синтеза был получен жидкий хлорид галлия, который затем был загружен в кварцевую ампулу без контакта с атмосферой. Восстановление хлорида галлия проводили в высокочастотной низкотемпературной неравновесной плазме (13,56 МГц) при пониженном давлении (1 Торр). Установка состояла

из кварцевого реактора, оснащенного внешним нагревателем, плазмообразующей системой, системой подачи газа, вакуумной системой и оптико-эмиссионной диагностической системой. Хлорид галлия был загружен в реактор и нагрет до 200 °C. Процесс восстановления проводили в реакционной газовой смеси аргон-водород (1:1). Процесс включал частичное восстановление трихлорида галлия до дихлорида галлия и его конденсацию в промежуточной ампуле. Выделяющийся хлористый водород был откачан с помощью вакуумной системы, а металлический галлий сконденсировался на стенках приемной ампулы реактора.

Исходный мышьяк марки 4N был очищен сублимацией в неравновесной водородной ВЧ-плазме (13,56 МГц) при низком давлении ($1 \cdot 10^{-2}$ Торр). Температура источника мышьяка постоянно поддерживалась на уровне 450 °C, скорость осаждения мышьяка составляла около 50 г/час.

Очищенные мышьяк и галлий загружались в реактор без потери вакуума, что позволило сохранить чистоту исходных материалов и избежать загрязнения «бытовыми» примесями. Затем проводили синтез по «классическому» методу, основанному на взаимодействии паров летучего соединения с расплавом нелетучего. В результате был получен слиток поликристаллического арсенид галлия диаметром 100 мм, массой около 7 кг. Чистота 7N подтверждена методом ICP-MS.

Данная работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-91-20002) и учебного дизайн-центра электроники ННГУ им. Н. И. Лобачевского.

Литература

1. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. Фотоника — новый драйвер арсенида галлия // Фотоника, 2020. — Т. 14. — № 2. — С. 138–149.

УДК 621.3.049

Деградация ватт-вольтных характеристик гетероструктур AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами

Орлова К. Н.[1,2], к. т. н., Градобоев А. В.[3], д. т. н.
[1] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
Budarina_na2013@mail.ru
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
[3] Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30
Gradoboev1@mail.ru

Представлены результаты исследования изменения ватт-вольтных характеристик светодиодов ($\lambda1 = 623$ нм и $\lambda2 = 590$ нм), изготовленных на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямам, при облучении быстрыми нейтронами в пассивном режиме питания. Установлено, что снижение мощности излучения при облучении происходит в несколько стадий. При этом для гетероструктур AlGaInP ($\lambda = 623$ нм) переход от стадии 1 к стадии 2 сопровождается изменением механизма протекания тока, в то время как для гетероструктур AlGaInP ($\lambda = 590$ нм) при переходе от стадии 1 к стадии 2 изменения механизма протекания тока не установлено. Рассмотрены возможные причины наблюдаемого изменения ватт-вольтных характеристик гетероструктур.

Ключевые слова: светодиоды; гетероструктуры; AlGaInP; радиационная стойкость.

Светодиоды (далее СД) являются основой для изготовления различных электронных систем и устройств, которые работают в самых разнообразных условиях, в том числе в условиях действия ионизирующего излучения. При этом интерес представляет не только исследование радиационной стойкости, но исследование механизмов снижения выходных параметров СД при облучении.

Целью работы является исследование изменения ватт-вольтных характеристик гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении быстрыми нейтронами. Исследования были выполнены на СД красного цвета свечения ($\lambda = 623$ нм) (далее — ГсКр) и желтого цвета свечения ($\lambda = 590$ нм) (далее — ГсЖ), т. е. исследуемые СД отличались только шириной запрещенной зоны, т. е. составом активного слоя. Ватт-вольтную характеристику (ВВХ) СД измеряли в шаре до и после облучения быстрыми нейтронами. Степень воздействия быстрых нейтронов характеризовали флюенсом частиц.

В результате исследований установлено, что снижение мощности излучения при облучении быстрыми нейтронами происходит в три стадии. На первой стадии снижение мощности обусловлено радиационно-стимулированной перестройкой исходных дефектов (дефектов роста и технологических дефектов), формируемых в процессе изготовления СД. На второй стадии снижение мощности излучения обусловлено введением радиационных дефектов. Заключительной стадией снижения мощности излучения СД является переход в режим низкой инжекции электронов,

при котором мощность излучения не зависит от величины рабочего тока. Для двух типов исследуемых гетероструктур существует идентичный механизм деградации в результате облучения быстрыми нейтронами. Первая стадия снижения мощности излучения ГсКр не связана с введением центров безызлучательной рекомбинации (нет изменений механизма протекания тока), в то время как вторая стадия обусловлена введением центров безызлучательной рекомбинации, что и приводит к изменению характера протекания тока. В этом случае снижение мощности излучения активного слоя при облучении быстрыми нейтронами на первой стадии можно объяснить введением центров поглощения генерируемого излучения, которые не принимают участия в протекании тока. Эти центры поглощения могут быть расположены как в активном слое, так и в соседних слоях. На второй стадии снижение мощности излучения обусловлено введением центров безызлучательной рекомбинации, о чем свидетельствует изменение характера протекания тока на ВВХ.

При этом на ВВХ ГсЖ не наблюдается изменения механизма протекания при смене выявленных стадий снижения мощности излучения. Можно предполагать, что снижение мощности излучения при облучении быстрыми нейтронами гетероструктур ГсЖ может быть обусловлено поглощением излучаемого света в активном и/или соседних слоях.

В дальнейшем необходимо исследовать изменение спектров излучения на выявленных стадиях снижения мощности излучения при облучении гамма-квантами, а также сопоставить полученные результаты с результатами введения глубоких центров в нейтральный объем и в область пространственного заряда.

Литература

1. Цаплин С. В., Болычев С. А. Оценка и анализ поглощенной дозы в гетероструктуре AlGaN/GaN при воздействии ионизирующих потоков радиационных поясов земли в условиях эксплуатации наноспутника // Журнал радиоэлектроники, 2023. — № 11.
2. Orlova K. N., Gradoboev A. V. Change in radiating power of the AlGaInP heterostructures under irradiation by fast neutrons // 2014 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. IEEE, 2014. P. 874–875.
3. Градобоев А. В., Симонова А. В., Орлова К. Н. Влияние облучения гамма-квантами 60Co на надежность ИК-светодиодов на основе гетероструктур AlGaAs // physica status solidi (c), 2016. Vol. 13. № 10–12. P. 895–902.
4. Вигдорович Е. Н. Радиационная стойкость эпитаксиальных структур на основе GaAs // Russian Technological Journal, 2019. Vol. 7. № 3. P. 41–49.
5. Орлова К. Н., Градобоев А. В. Радиационная стойкость гетероструктур AlGaInP (λ = 630 нм) с множественными квантовыми ямами // Известия высших учебных заведений. Физика, 2014. — Т. 57. — № 2-2. — С. 63–66.
6. Байдусь Н. В. и др. Особенности излучательных характеристик гетероструктур InGaAs/GaAs с квантовыми ямами и точками, облученных нейтронами // Физика и техника полупроводников, 2015. — Т. 49. — № 3. — С. 370–374.

УДК 621.373.826

Мощные квантово-каскадные лазеры среднего инфракрасного диапазона

Соколовский Г. С.
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

В докладе представленЫ результаты по разработке мощных квантово-каскадных лазеров среднего ИК-диапазона, все технологические операции по созданию которых выполнены в нашей стране. Для диапазонов 4,5 и 8 мкм продемонстрирована пиковая выходная оптическая мощность более 20 Вт при импульсной накачке. Разработаны мощные непрерывные ККЛ, а также импульсные ККЛ, излучающие сотни милливатт средней мощности без существенного разогрева активной области. Созданы мощные одночастотные ККЛ, перестраиваемые в диапазоне 600 нм (100 $см^{-1}$), и продемонстрирована возможность их применения для детектирования метана в воздухе в концентрации на два порядка ниже взрывоопасной.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер; средний инфракрасный диапазон.

Квантовые каскадные лазеры (ККЛ) с момента предложения принципа их работы Сурисом и Казариновым в 1971 году [1] и в особенности после их практической реализации в 1994 году группой Капассо [2] привлекают пристальное внимание научного сообщества из-за перспектив многочисленных применений в газоанализе, биомедицинских исследованиях, беспроводной оптической связи и многих других областях.

Повышение эффективности, а также обеспечение отвода тепла от активной области являются первостепенными задачами при разработке мощных ККЛ: большинство квантовых каскадных лазеров требует работы при высоких напряжениях, что в совокупности с высокими пороговыми токами приводит к значительной потребляемой мощности и перегреву чипа.

В работе обсуждаются результаты разработки и исследования мощных ККЛ среднего инфракрасного диапазона, все технологические операции по созданию которых выполнены в нашей стране. Среди результатов следует отметить получение пиковой выходной оптической мощности более 22 Вт для ККЛ с длиной волны генерации 4,5 мкм [3] и рекордную, превышающую 21 Вт, пиковую мощность, достигнутую в ККЛ спектрального диапазона 8 мкм при импульсной накачке 100 нс / 11 кГц [4]. Рассмотрены подходы к конструированию активной области ККЛ, обеспечивающие повышение эффективности и температурной стабильности его пороговых и мощностных характеристик [4]. Особое внимание уделено исследованиям механизмов разогрева активной области ККЛ [5], изучение которых позволило разработать мощные непрерывные ККЛ [4], а также импульсные ККЛ, излучающие сотни милливатт средней мощности без существенного разогрева активной области. Кроме того, проведены исследования по созданию мощных одночастотных ККЛ, перестраиваемых в диапазоне 600 нм (100 $см^{-1}$) [6], и продемонстрирована возможность их применения для детектирования метана в воздухе в концентрации на два порядка ниже взрывоопасной.

Исследования поддержаны Российским научным фондом (проект № 21-72-30020-П).

Литература

1. Казаринов Р. Ф., Сурис Р. А. // ФТП, 1971. — № 5. — С. 797.
2. Faist J. et al. // Science, 1994. № 264. P. 553.
3. Sokolovskii G. S. // Int. Conf. ALT, Vladivostok, 2024.
4. Дюделев В. В. и др. // УФН, 2024. — № 194 (1). — P. 98.
5. Cherotchenko E. D. et al. // Int. J. Therm. Sci., 2025. Vol. 210. P. 109618.
6. Дюделев В. В. и др. // Письма в ЖТФ, 2024. — № 50 (22). — С. 65.

УДК 535.8

Жесткая бинарная и троичная интегральная оптическая логика на основе ядер фотонного вектор-матричного умножения

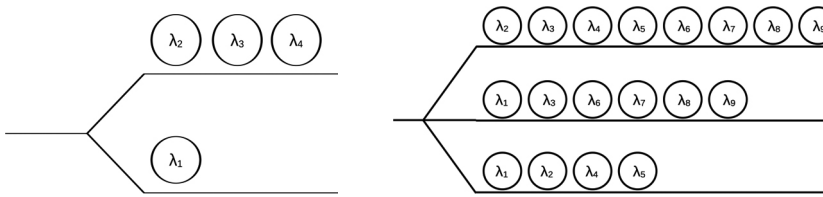
Крылов А. А.[1,2], Светиков В. В.[1,3], Певчих К. Э.[1]
[1] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН
119991, ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Показан принцип реализации логических элементов с использованием представления логики как вектор-матричных операций. Были реализованы компактные модели элементов НЕ и ИЛИ для двоичной и троичной логики; также было проведено моделирование бинарного логического элемента НЕ методом конечных разностей во временной области (FDTD), подтвердившее работоспособность элемента. Построенные модели показывают работоспособность предложенного принципа.
Ключевые слова: интегральная оптическая логика; элементы троичной логики; фотонное вектор-матричное умножение.

Обычные логические элементы основаны на операциях с двоичными логическими состояниями «0» и «1». Однако в ряде приложений требуется использование трех состояний. Эти приложения включают в себя обработку информации в базах данных, работу с изображениями. В системах запросов баз данных реализована работа с троичной логикой при обработке запросов и видится возможность ускорения операции за счет использования элементов троичной логики, для обработки изображений возможно использование трех состояний для описания цвета пикселя в RGB-кодировке. Также именно в троичной кодировке достигается наибольшая плотность информации, а также на основе троичной логики возможно построить существенно больше логических элементов. В связи с этим был разработан подход для обработки логических состояний в виде векторов с двух- или трехмерными размерностями.

Представление логических операций с использованием матриц перехода дает возможность использовать фотонные интегральные схемы (ФИС) для умножения матриц в качестве оптического логического вычислителя. Такие схемы могут быть реализованы для логических элементов произвольной сложности как для двоичной, так и для древовидной логики. Для таких логических элементов требуются только линейные элементы без внешнего управления, поскольку требуется только, чтобы элемент умножался на 0 и 1. В качестве потенциальных кандидатов для реализации элементов для структуры логического элемента предлагаются логические элементы на основе микрокольцевых резонаторов. Предложен алгоритм построения логического элемента, который генерирует схему элемента.

Компактные модели логических элементов были реализованы с использованием векторно-матричной структуры, основанной на микрокольцевых резонаторах. Элементы ИЛИ были реализованы для бинарной и троичной логики (рис. 1). Было продемонстрировано, что эти элементы выполняют логическую операцию ИЛИ. Кроме того, была реализована модель бинарного логического элемента НЕ в векторно-матричной структуре с использованием метода конечных разностей во временной области (FTDT).



а *б*

Рис. 1. Схемы элементов ИЛИ для бинарной (*а*) и троичной (*б*) логики

Литература

1. Williams C. P. Explorations in quantum computing. Springer Science & Business Media, 2010.
2. Simos S. et al. An all-passive Si_3N_4 optical row decoder circuit for addressable optical RAM memories // Journal of Physics: Photonics, 2023. Vol. 5. № 4. P. 045002.

УДК 621.391.63

Оптический волноводный каскадный спектрометр на чипе

Стебельков А. Н.[1], Абросимов В. Ю.[1], Резаева А. Д.[1], Ph.D, Ивонин И. А.[2], Светиков В. В.[1,3], Певчих К. Э.[1]

[1] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
[2] ООО «Фотонные интегральные схемы и системы»
125167, г. Москва, ул. Викторенко, 16, стр. 1, пом. 4/2
[3] Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38
stebelkov@zntc.ru

Исследован прототип каскадного SiON-спектрометра на двух AWG (20/0,8 нм) для диапазона 1300–1550 нм. Численно изучена зависимость параметров AWG от геометрии, экспериментально — спектральный отклик. Предложена концепция каскадного спектрометра с областью дисперсии 1300–1650 нм и разрешением до 0,1 нм.

Ключевые слова: плоский волноводный спектрометр; спектрометр на чипе; DPH; AWG; CWDM.

Для задач измерения лазерных спектров, обработки сигналов оптических датчиков и широкого круга сенсорных применений требуются спектрометры с достаточно высоким разрешением, желательно на уровне 10 пм. В настоящее время спектрометры с таким разрешением имеют относительно большие габариты и не могут быть мобильными устройствами. Достижения в области интегральной фотоники уже позволяют создавать компактные волноводные спектрометры на чипе с разрешением 0,0375 нм/канал [1]. Однако такие спектрометры обладают крайне узкой областью дисперсии порядка нанометра.

Для преодоления ограничения малой области дисперсии можно использовать каскадную структуру спектрометра, где спектрометр с грубым разрешением предшествует спектрометру с более высоким разрешением. При условии использования высокоразрешающих DPH-спектрометров с областью дисперсии 0,8 нм [1] перед ним следует установить спектрометр с соответствующим межканальным разрешением 0,8 нм и областью дисперсии 20–40 нм, которому, в свою очередь, может предшествовать спектрометр с межканальным разрешением 20 нм и областью дисперсии 150–300 нм. Таким образом, можно создать спектрометр с разрешением около 40 пм/канал и областью дисперсии 150–300 нм.

Такой спектрометр позволит с высокой точностью измерять спектры от брэгговских и интерференционных датчиков в режиме параллельной обработки данных. Более того, в случае реализации высокоразрешающего спектрометра на основе цифровой планарной голограммы (DPH), а всех остальных спектрометров — на основе AWG-структур благодаря свойству изопланатизма, присущему как DPH-, так и AWG-структурам, каждый из каскадов может состоять из идентичных структур.

В данной статье представлены результаты исследований, проведенных в рамках разработки каскадного спектрометра с межканальным разрешением до 0,1 нм, что позволит разместить все ступени составного спектрометра на одном чипе.

Для экспериментального исследования прототипа спектрометра на чипе была выбрана конструкция на основе фазовых волноводов (AWG). Целевой рабочий спектральный диапазон составил 1300–1550 нм, межканальный интервал — 20 нм, спектральная форма каналов была выбрана гауссовой. В качестве материала волновода был выбран низкоконтрастный SiON. Было проведено численное моделирование AWG- и DPH-структур с разными областями дисперсии и канальным разрешением, а также экспериментально исследованы спектральные характеристики изготовленных устройств, подтвердившие эффективность выбранного подхода.

Литература

1. Peroz C., Calo C., Goltsov A., Dhuey S. et al. Multiband wavelength demultiplexer based on digital planar holography for on-chip spectroscopy applications // Optics Letters, 2012. Vol. 37. №4. P. 695–697.

УДК 535.015

Газовые и микрофлюидные сенсоры на основе фотонных интегральных схем из нитрида кремния

к. ф.-м. н. Ковалюк В. В.[1,2], Кузин А. Ю.[1,3], Флоря И. Н.[1], к. т. н. Чернышев В. С.[3,4], Васильев С. Н.[1,3], Ан П. П.[1,5], Голиков А. Д.[1,5], Рожков К. Ю.[1,2], PhD. Зайцев В. Д.[1,3], д. х. н. Горин Д. А.[3], д. ф.-м. н. Гольцман Г. Н.[1,6]

[1] Лаборатория фотонных газовых сенсоров, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» 119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

[2] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» 109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11

[3] Центр фотоники и инженерии Сколковского института науки и технологий, 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

[4] Национальный медицинский исследовательский центр акушерства, гинекологии и перинатологии им. академика В. И. Кулакова 117997, г. Москва, ул. Академика Опарина, 4

[5] Московский педагогический государственный университет 119991, г. Москва, ул. М. Пироговская, 1, стр. 1

[6] Российский квантовый центр 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

В работе рассмотрены отдельные вопросы разработки, изготовления и использования фотонных интегральных схем из нитрида кремния с микрофлюидными каналами для создания компактных и чувствительных рефрактометрических датчиков на чипе.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; нитрид кремния; микрофлюидика; сенсоры.

В докладе представлены результаты работы молодежной лаборатории фотонных газовых сенсоров, созданной в рамках национального проекта «Наука и университеты» (FSME-2025-0004). Работа посвящена численному моделированию, дизайну, изготовлению и исследованию фотонных интегральных схем (ФИС) в комбинации с микрофлюидными каналами. Для ввода-вывода света в ФИС используются дифракционные решетки с эффективностью связи 20–30 % или торцевой ввод (~40 %). За счет эванесцентной волноводной связи происходит взаимодействие волноводной моды с окружением ФИС, благодаря чему разрабатываемые нами неселективные рефрактометрические сенсоры позволяют получить высокую чувствительность (~100 нм/RIU) и низкий предел обнаружения (11 ppm) вместе с малым объемом требуемого аналита (~25 мкл) [1, 2]. На основе таких сеноров с применением машинного обучения нами представлен усовершенствованный метод измерения состояния заряда в проточных батареях окислительно-восстановительного типа [3], который открывает простой путь для точного прогнозирования состояния батареи с минимальной выборкой данных. Разработанный нами метод функционализации

поверхности с контролем в режиме реального времени [4] открывает захватывающий путь получения настраиваемых селективных сенсоров для широкого круга биомедицинских применений. Например, покрытие поверхности ФИС искусственно созданными белками (ДАРПинами), имитирующими антитела, позволяет селективно захватывать внеклеточные везикулы (экзосомы) со специфичными рецепторами HER2, связанными с раком молочной железы [5], а нанесение наноразмерных шариков из оксида кремния открывает путь для газовой биопсии дыхания за счет конденсации в микропорах [6].

Литература

1. Kuzin A. et al. Hybrid nanophotonic–microfluidic sensor for highly sensitive liquid and gas analyses // Optics Letters, 2022. Vol. 47. № 9. P. 2358–2361.
2. Kuzin A. et al. Microfluidic–nanophotonic sensor for on-chip analysis of complex refractive index // Applied Physics Letters, 2024. Vol. 124. № 6.
3. Vlasov V. I. et al. Hybrid nanophotonic-microfluidic sensor integrated with machine learning for operando state-of-charge monitoring in vanadium flow batteries // Journal of Energy Storage, 2025. Vol. 111 P. 115349.
4. Kuzin A. et al. In Situ Monitoring of Layer-by-Layer Assembly Surface Modification of Nanophotonic-Microfluidic Sensor // Analytical Chemistry, 2022. Vol. 94. № 42. P. 14517–14521.
5. Kuzin A. et al. Real-time surface functionalization of a nanophotonic sensor for liquid biopsy // Applied Physics Letters, 2023. Vol. 123. № 19.
6. Zaytsev V. et al. Convective assembly of silica colloidal particles inside photonic integrated chip-based microfluidic systems for gas sensing applications // Nanoscale, 2024. Vol. 16. № 37. P. 17365–17370.

УДК 621.315.5+544.164

Исследование методов увеличения чувствительности микрорезонаторной интегрально-оптической структуры с модифицирующим слоем функционализированных углеродных нанотрубок для создания газовых сенсоров

Митрофанова А. Е.[1,2], Ромашкин А. В.[3], Светиков В. В.[1,4]
[1] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
mitrofanova.ae@phystech.edu
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[4] Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН
119991, ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, 38

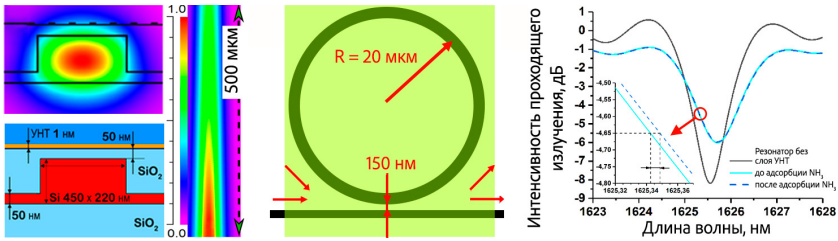
Разработана модель чувствительного элемента газового датчика на основе микрокольцевого резонатора. Исследовано влияние геометрических параметров структуры на чувствительность. Оценена чувствительность при адсорбции NH_3 и H_2O.

Ключевые слова: интегральная фотоника; газовый сенсор; углеродная нанотрубка.

Актуально создание селективных газовых датчиков с низким энергопотреблением. Это возможно на основе структур интегральной фотоники с использованием слоев, изменяющих показатель преломления (n) при адсорбции газов. Согласно эллипсометрии, n у амидированных УНТ (аУНТ) при увеличении концентрации H_2O на 12500 ppm снизился с 1,708 до 1,706 ($\Delta n = -0{,}002$) на длине волны $\lambda = 1625$ нм, но остался почти неизменным ($n = 1{,}628$; $\Delta n < 0{,}001$) при $\lambda = 1319$ нм. Для карбоксилированных УНТ (кУНТ) n при том же росте концентрации H_2O, напротив, вырос [1]: $\Delta n = 0{,}002$ при 1625 нм, а при 1319 нм существенно изменился: $\Delta n = 0{,}012$. Экспозиция NH_3 (2000 ppm) привела к изменению n для аУНТ с 1,697 до 1,710 ($\Delta n = 0{,}013$) при 1625 нм; с 1,620 до 1,638 ($\Delta n = 0{,}018$) при 1319 нм. Для кУНТ изменение n имеет другой характер для NH_3: $\Delta n = 0{,}004$ при 1625 нм, но почти неизменный ($\Delta n < 0{,}001$) при 1319 нм [1]. Различия в характере изменения n между аУНТ и кУНТ на определенной λ при отклике на H_2O и NH_3 могут использоваться для создания массива селективных датчиков, исключающих влияние влажности воздуха на оценку NH_3 и других газов, а также обладающих радиационной стойкостью.

Моделирование проведено методами распространения пучка и конечных разностей во временной области (BPM и FDTD, RSoft CAD). Несмотря на высокий коэффициент экстинкции УНТ ($k \approx 0{,}7$) и потери в волноводе ~0,9 дБ на 100 мкм, возможна реализация чувствительного элемента на основе микрокольцевого резонатора ($R = 20$ мкм, рис. 1*б*) [2], покрытого буферным слоем и тонким слоем УНТ (рис. 1*а*). Добротность структуры составила при $\lambda = 1625$ нм $Q \approx 1900$. Сдвиг резонансного пика после адсорбции NH_3 составил 5 пм (рис. 1*в*), что позволяет оценить

чувствительность структуры как $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ пм/ppm, предел детектирования ≈40 ppm, что сопоставимо с экспериментом [2]. Двухмодовый резонатор и изменение *n* буфера может увеличить чувствительность.



а *б* *в*

Рис. 1. Основная ТЕ-мода и геометрия, потери в волноводе с аУНТ (*а*); схема микрокольцевого резонатора (*б*); сдвиг резонансного пика при адсорбции NH_3 (*в*)

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки России (государственное задание FSMR-2023-0002).

Литература

1. Romashkin A.V. et al. Change in the carbon nanotube thin layer refractive index after water and ammonia molecules adsorption // St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics, 2024. Vol. 75. № 3.1. P. 68–74.
2. Mi G., Horvath C., Van V. Silicon photonic dual-gas sensor for H_2 and CO_2 detection // Optics express, 2017. Vol. 25. № 14. P. 16250–16259.

УДК 535.643.8

Перспективные технологии производства микродисплеев, основанных на различных физических принципах

Стахарный С. А.[1], Нуриев А. В.[1,2], к. т. н.
[1] АО «ЦНИИ «Циклон»
107076, г. Москва, Щелковское ш., 77
s.staharnyj@cyclone-jsc.ru
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

В современной аппаратуре применяются микродисплеи, основанные на различных физических принципах, имеющие особенности в зависимости от конкретного типа применения в конечных изделиях. Данные средства отображения информации используются в цифровых приборах наблюдения и прицеливания, нашлемных системах индикации и особенно перспективны в очках и шлемах виртуальной, дополненной и смешанной реальности (VR/AR/MR). Проведен анализ основных направлений по перспективным технологиям производства микродисплеев с учетом особенностей комплектующих изделий и применяемых материалов. Проведена оценка наличия российских компетенций в области технологий производства и материалов для возможности разработки микродисплеев различных типов с характеристиками, не уступающими мировому уровню.

Ключевые слова: microdisplay; image display; LCoS; DMD; Si-OLED; OLED; MicroLED; микродисплеи; органические светодиоды; ОСИД; микромеханические дисплеи; ЖК; жидкокристаллические дисплеи; микросветодиодные дисплеи; кремниевые СБИС; средства отображения информации.

На сегодняшний день новым направлением в средствах отображения информации становятся миниатюрные моно- и бинокулярные системы на основе микродисплеев, основанных на различных физических принципах. Микродисплеи уже широко применяются в потребительской и специальной аппаратуре как средства отображения информации в моно- и бинокулярных видоискателях для построения цифровых приборов наблюдения и прицеливания, включая приборы мультиспектрального видения. В последнее время особенно перспективным стало развитие технологий очков и шлемов виртуальной, дополненной и смешанной реальности (VR/AR/MR). Данные технологии имеют широкий спектр применений, от потребительских и развлекательных приложений, до промышленных, профессиональных и специальных приложений, включая военные технологии.

В докладе проводится обзор мировых технологий производства микродисплеев с учетом их применения, освоенности и современности технологий, достоинств и недостатков применительно использования в аппаратуре. Рассматриваются базовые принципы технологии изготовления микродисплеев на основе:

- жидких кристаллов (LCoS);
- микромеханических зеркал (DMD);
- органических светодиодов (OLED);
- матриц микросветодиодов (MicroLED).

Микродисплеи перечисленных типов изготавливаются с использованием кремниевых СБИС активно-матричного управления, имеющих технологические особенности в зависимости от физического принципа формирования изображения, его основных параметров, принципов цветоделения и необходимости наличия внешнего источника излучения. Комплекс технологических принципов построения средства отображения информации в целом определяет конечные характеристики, применимость для конкретных приложений, а также массогабаритные и ценовые параметры изделий. В докладе приводится анализ наличия российских научнотехнических компетенций для возможности и степени готовности к разработкам микродисплеев как в зависимости от их физического принципа действия, так и применения в различных типах аппаратуры для решения задач в ближнесрочной и дальнейшей перспективе.

Исследования выполнены в рамках разработки предложений в дорожную карту развития фотоники и оптоэлектроники на ближайшую и долгосрочную перспективу по направлению «Системы отображения информации».

Литература

1. David Artmitage, Ian Underwood, Shin-Tson Wu. Introductions to microdisplays, John Wiley & Sons, 2006.
2. Melzer J. E., Moffitt K. Head mounted displays. McGraw-Hill, 1997.
3. Cheng D. et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook // Light advanced manufacturing, 2021.
4. Забабурин А. Ю., Нуриев А. В., Стахарный С. А., Шипицин Д. С. Тонкая настройка качества изображения для вывода на экране OLED микродисплеев с кремниевой СБИС управления // Сборник тезисов 9-й научной конференции «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». DOI: 10.18384/2310-7251-2020-3-13-22.
5. Усов Н. Н., Стахарный С. А. Органические светодиоды // Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. — М.: Светотехника, 2019. — С. 47–60.
6. Нуриев А. В., Стахарный С. А., Усов Н. Н. Гамма-коррекция полноцветных активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов // Вестник МГОУ. DOI: 10.18384-2310-7251-2020-3-00-00.
7. Дарвин Д. О., Забабурин А. Ю., Ильин С. А., Илюшкин Т. Ю., Ласточкин О. В., Нуриев А. В., Стахарный С. А., Титов А. И., Шипицин Д. С. Семейство полноцветных и монохромных активно-матричных микродисплеев на основе органических светодиодов // Наноиндустрия, Октябрь 2021. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.314.316.

УДК 621.3.049.779

Центр Сколтеха по прототипированию интегрально-оптических устройств: результаты и перспективы на 2025–2030 гг.

Денисов А. А.
Сколковский институт науки и технологий,
Центр исследовательской инфраструктуры
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1
a.denisov@skoltech.ru

В рамках доклада будут представлены результаты и перспективы созданного в 2023–2024 годах в Сколтехе Центра по прототипированию устройств на базе фотонных интегральных схем (ФИС). Основное внимание будет уделено разработке платформы по интегрально-оптической сборке устройств на базе ФИС. На примере созданного макета перестраиваемого лазера будут продемонстрированы основные возможности платформы, а также перспективы ее применения для создания более сложных систем.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; кремний на изоляторе; интегрально-оптическая сборка; контрактное производство; интеграция источников с ФИС.

В 2023–2024 годах на базе Центра исследовательской инфраструктуры Сколтеха запустился уникальный комплекс оборудования для прототипирования устройств на базе фотонных интегральных схем (ФИС) — более 30 единиц оборудования. Обеспечен замкнутый цикл создания интегрально-оптических устройств: кристальное производство, участок сборки и участок измерений. Основной целью центра является создание в РФ площадки прототипирования изделий на базе ФИС — от телекоммуникационного оборудования и систем квантового распределения ключей до медицинских изделий, лидаров, оптоволоконных сенсорных систем и др. Технологии, разрабатываемые в Центре, ориентированы на совместимость с создаваемыми в РФ опытными производствами фотонных интегральных схем, тем самым обеспечивая бесшовный процесс разработки, тестирования и последующего производства высокотехнологичных продуктов в РФ.

В рамках доклада будут освещены ключевые возможности Центра и результаты его деятельности за последний год. Также будут представлены перспективные проекты в разработке. Основное внимание будет уделено разработке платформы по интегрально-оптической сборке устройств на базе ФИС. На примере созданного макета перестраиваемого лазера будут продемонстрированы основные возможности платформы, а также перспективы ее применения для создания более сложных систем.

УДК 535.93

Перестраиваемые фотонные интегральные схемы на нитриде кремния со сверхмалыми потерями для прототипирования оптоэлектронных устройств

Бузаверов К. А.[1,2]
[1] *Научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова 127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22*
[2] *МГТУ им. Н. Э. Баумана 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1*

В работе представлены возможности прототипирования устройств интегральной оптики на базе разработанной технологии изготовления фотонных интегральных схем на нитриде кремния, обеспечивающей сверхмалые потери на распространение менее 0,1 дБ/см в диапазоне длин волн 1510–1630 нм.
Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; нитрид кремния; оптические потери; высокодобротные микрорезонаторы; оптические модуляторы.

Развитие технологий интегральной оптики за последние 30 лет открыло возможности для применения фотонных интегральных схем (ФИС) в матричных и квантовых сопроцессорах, твердотельных лидарных системах, биомедицинских системах неинвазивной диагностики. Эти возможности обусловлены развитием компонентной базы и технологий изготовления фотонных интегральных схем. В настоящее время наибольший интерес для создания ФИС представляют платформы на основе кремния, нитрида кремния и ниобата лития, а также гетерогенные платформы, сочетающие несколько материалов [1]. Нитрид кремния занимает особое место в интегральной фотонике, обладая широким диапазоном пропускания от 400 до 4000 нм и сверхмалым уровнем потерь менее 0,01 дБ/см, а возможность интеграции с кремнием, ниобатом лития и материалами группы A^3B^5 позволяет создавать практически полезные устройства для биофотоники, атомной и молекулярной физики, квантовых технологий, нейроморфных вычислений и сенсорике [2]. Особые возможности для исследования и разработки ФИС представляет реализация экосистем с мультипроектными пластинами (MPW) на базе фотонных фабов за рубежом, обеспечивая использование заранее разработанных и протестированных базовых элементов ФИС (волноводы, микрорезонаторы, структуры ввода и вывода излучения, модуляторы), а также апробированной базовой технологии изготовления [3–5]. Этот подход начинает развитие и в России на базе действующих центров коллективного пользования, предлагая широкие возможности как для исследовательских команд, так и для крупных заказчиков из различных секторов промышленности.

В данной работе представлен разработанный в НОЦ ФМНС комплекс серийных технологий изготовления фотонных интегральных схем со сверхмалыми потерями для устройств нанофотоники, работающих в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Представлены результаты численного моделирования базовых элементов ФИС и разработанные правила проектирования. В рамках работы была разработана базовая технология изготовления ФИС на нитриде кремния, включающая в себя этапы синтеза оптических слоев, прецизионные процессы

электронно-лучевой литографии и плазмохимического травления, а также формирование структур для ввода и вывода излучения [6, 7]. Получены потери на распространение менее 0,1 дБ/см, внутренняя добротность микрорезонаторов более 3 миллионов, потери на ввод и вывод излучения через решетки менее 4,5 дБ, мощность для сдвига фазы на π менее 65 мВт.

Литература

1. Xianhg C. et al. Silicon nitride passive and active photonic integrated circuits: trends and prospects // Photon. Res., 2022. Vol. 10. A82-A96.
2. Buzaverov K.A. et al. Silicon nitride integrated photonics from visible to mid-infrared spectra // Laser Photonics Rev., 2024. Vol. 18. 2400508.
3. Wörhoff K. et al. TriPleX: a versatile dielectric photonic platform // Advanced Optical Technologies, 2015. Vol. 4. P. 189–207.
4. Liu J. et al. High-yield, wafer-scale fabrication of ultralow-loss, dispersion-engineered silicon nitride photonic circuits // Nat. Commun., 2021. Vol. 12. 2236.
5. Ji X. et al. Efficient mass manufacturing of high-density, ultra-low-loss Si3N4 photonic integrated circuits // Optica, 2024. Vol. 11. 1397-1407.
6. Buzaverov K.A. et al. Low-loss silicon nitride photonic ICs for near-infrared wavelength bandwidth // Opt. Express, 2023. Vol. 31. P. 16227–16242.
7. Avdeev S.S. et al. Tutorial on Silicon Photonics Integrated Platform Fiber Edge Coupling // arXiv:2405.11980. 2024.

УДК 535.512

Моделирование элементов фотонных интегральных схем на основе тонкопленочного ниобата лития

Москалев Д. Н.[1,2], Салгаева У. О.[3,1], Лихачев Б. В.[1]
[1] ООО «Дифра Лаб»
614007, г. Пермь, ул. Рабоче-Крестьянская, 22
info@difralab.ru
[2] Пермский государственный национальный исследовательский университет
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15
[3] Сколковский институт науки и технологий
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

В настоящей работе представлен новый подход к моделированию спектральной характеристики анизотропных кольцевых резонаторов, а также приведены оценки применимости некоторых популярных методов моделирования элементов фотонных интегральных схем на основе тонкопленочного ниобата лития X- и Z-срезов.

Ключевые слова: тонкопленочный ниобат лития; теория связанных мод; моделирование в фотонике; программное обеспечение Difra для интегральной фотоники.

Благодаря своим уникальным свойствам тонкопленочный ниобат лития (ТНЛ) — перспективная материальная платформа для интегральной фотоники. Фотонные интегральные схемы (ФИС) на подложке из ТНЛ находят применение при создании широкого набора различных устройств [1].

При проектировании ФИС на основе ТНЛ требуется учитывать его анизотропию, в особенности когда используется X-срез ТНЛ, так как анизотропия в этом случае проявляется в плоскости чипа ФИС в виде зависимости эффективных показателей преломления мод от направления распространения излучения, а также в виде появления межмодовой оптической связи. Задача учета этих эффектов при проектировании ФИС из ТНЛ может быть корректно решена с помощью ограниченного количества существующих методов моделирования.

В работе сделаны оценки применимости метода эффективного показателя преломления (ЭПП) и модовых решателей на основе конечных разностей в векторной постановке и в приближении ТЕМ-мод для расчета характеристик оптических мод в канальных волноводах из ТНЛ X- и Z-срезов.

В работе показано, что такие классические подходы, как метод ЭПП и ТЕМ-приближения для волнового уравнения, работают корректно только в ограниченном диапазоне параметров волноводов и не учитывают наличие анизотропии в материале, не могут быть использованы для точного проектирования таких комплексных элементов, как кольцевые резонаторы на основе ТНЛ. Для точного решения обозначенной задачи может быть использован метод решения волнового уравнения в векторной постановке.

Также в рамках данных исследований был реализован и протестирован новый метод расчета спектра анизотропного кольцевого резонатора, позволяющий

моделировать влияние межмодовой связи и анизотропии на распространение излучения в кольцевых резонаторах из ТНЛ [2].

Все вышеперечисленные методы моделирования реализованы в российском программном обеспечении Difra и позволяют проектировать набор базовых элементов ФИС на основе анизотропных материалов.

Литература

1. Chen G., Li N., Ng J. D., Lin H. L., Zhou Y. et al. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives // Advanced Photonics, 2022. Vol. 4. № 3. P. 034003–034003.
2. Moskalev D., Voblikov E., Kozlov A., Salgaeva U., Maximenko V., Krishtop V. Model of anisotropic ring resonator based on coupled mode theory // Optics Continuum, 2025. Vol. 4. № 2. P. 210–226.

УДК 539.1.074.2, 621.383.523

Кремниевые фотоумножители для сцинтилляционных детекторов систем радиационного контроля

Виноградов С. Л.[1,2], Бужан П. Ж.[2], Каракаш А. И.[2], Теверовский Ю. Л.[2]
[1] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53
vinogradovsl@lebedev.ru
[2] ООО НПП «Доза»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 4

Разработана вероятностная модель регистрации ионизирующего излучения в сцинтилляционных детекторах на основе кремниевых фотоумножителей. Проведен анализ пороговой чувствительности детекторов радиационного контроля с выделением роли конструкции и ключевых характеристик кремниевых фотоумножителей.

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель; сцинтиллятор; ионизирующее излучение; вероятностная модель; пороговая чувствительность.

Кремниевые фотоумножители (SiPM), разработанные в России в 1990–2000-х годах, получили мировое признание как новый тип фотодетекторов с разрешением числа фотонов в световом импульсе начиная с единичных фотонов [1, 2]. Благодаря высокой эффективности регистрации фотонов ~50 %, большому коэффициенту умножения ~10^6, сверхнизкому шум-фактору ~1,01 SiPM нашли широкое применение в физике высоких энергий, ядерной медицине, системах безопасности и радиационного контроля, научном приборостроении. Замена вакуумных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и кремниевых лавинных фотодиодов (ЛФД) на SiPM привела к существенному повышению чувствительности сцинтилляционных детекторов и разработке новых поколений калориметров частиц высоких энергий, позитронно-эмиссионных томографов, рентгеновских сканеров досмотра людей и грузов. В 2010-х серийный выпуск SiPM начали за рубежом, и сейчас их производят Hamamatsu Photonics (Япония), Broadcom (США), On Semiconductor (США) и ряд компаний из КНР. На отечественной технологической базе разработки SiPM в настоящее время не ведутся, за исключением единичных попыток [3].

Для сцинтилляционных детекторов, применяемых в системах радиационного контроля, важнейшей характеристикой является чувствительность к потокам излучений, особенно при малой энергией частиц, когда количество зарегистрированных фотонов сцинтилляционной вспышки составляет единицы и десятки. Поэтому здесь требуется пересмотр стандартных подходов и представлений об оптимальной конструкции и оптимальных параметрах SiPM, сложившихся в наиболее типичных и массовых применениях, указанных выше, где от SiPM в основном требуется высокое энергетическое разрешение и/или широкий динамический диапазон.

В нашей работе рассматривается вопрос о том, какой кремниевый фотоумножитель является оптимальным для систем радиационного контроля, какую роль играет его конструкция, какие его фотодетекторные и шумовые характеристики критичны. Для такого анализа разработана вероятностная модель регистрации ионизирующего излучения по фотоотклику SiPM на сцинтилляционную вспышку

на основе теоретических и экспериментальных исследований SiPM [4, 5]. В модели учитывается вся цепочка преобразования вероятностных распределений сигнала и шума в ходе случайного процесса детектирования (распределение Пуассона фотонов и фотоэлектронов, лавинное умножение, оптический кросс-толк как ветвящийся процесс марковского типа с распределением Бореля, темновая генерация и шум электроники).

Анализ показывает оптимальность планарной конструкции SiPM с большими ячейками и изолирующими канавками (тренчами) вокруг них для максимального подавления оптического кросс-толка.

Литература

1. Buzhan P., Dolgoshein B., Ilyin A., Kantserov V., Kaplin V., others, An advanced study of silicon photomultiplier // ICFA Instrum. Bull., 2001. P. 28–41. URL: http://inspirehep.net/record/572187?ln=en.
2. Buzhan P., Dolgoshein B., Filatov L., Ilyin A., Kantzerov V., Kaplin V., Karakash A., Kayumov F., Klemin S., Popova E., Smirnov S. Silicon photomultiplier and its possible applications // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., 2003. Vol. 504. P. 48–52.
3. Виноградов С. Л., Жуков А. А., Ветчинин С. А., Дюжев Н. А., Чиненков М. Ю., Филиппов Н. А., Парамонов В. В., Денисов В. Е. Разработка кремниевого лавинного фотоумножителя непланарной конструкции // Наноиндустрия, 2024. — № 17. — С. 615–618.
4. Vinogradov S., Vinogradova T., Shubin V., Shushakov D., Sitarsky C., Sitarsky K., Sitarsky C. Efficiency of Solid State Photomultipliers in Photon Number Resolution // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2011. Vol. 58. P. 9–16.
5. Vinogradov S. Analytical models of probability distribution and excess noise factor of solid state photomultiplier signals with crosstalk // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., 2012. № 695. P. 247–251.

УДК 621.391.63

Кремниевые микронные фотонные интегральные схемы как основа локальных бортовых сетей летательных аппаратов

Байшев О. Д.[1], Козлов Д. В.[1], к. т. н., Смирнов И. П.[1], Новиков В. М.[2], Гончаров А. А.[2]

[1] АО «Российские космические системы»
111250, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53
[2] ФАУ «ГосНИИАС»
125319, г. Москва, ул. Викторенко, 7

Рассмотрено применение фотонных интегральных схем (ФИС) в качестве основы локальных бортовых сетей. Проведено моделирование элементов ФИС, изготовлены макеты кристаллов ФИС, показана актуальность микронной технологии «кремний на изоляторе» для изготовления ФИС бортового применения.

Ключевые слова: локальные бортовые сети; фотонные интегральные схемы; волноводы микронных размеров; кремний на изоляторе.

Современные бортовые вычислительные системы требуют высокопроизводительных локальных бортовых сетей (ЛБС) для параллельного обмена данными между модулями. Это обеспечивается применением детерминированных оптических сетей реального времени (ДОС РВ) [1] в ЛБС. Однако традиционные волоконно-оптические компоненты ДОС РВ увеличивают массу и габариты ЛБС при масштабировании. Решением является использование фотонных интегральных схем (ФИС), которые снижают массу аппаратуры на 50 % и более с сохранением исходного функционала.

ФИС на основе технологии «кремний на изоляторе» (КНИ) являются наиболее подходящими для ДОС РВ, позволяя создавать наиболее компактные волноводные элементы. Микронные размеры поперечного сечения волновода [2] обеспечивают наименьшие потери при стыковке с кристаллами лазеров и фотодиодов InP с оптическим волокном.

В ходе работы были разработаны модели элементов ФИС, включая тейпер, пересечения, повороты, интерферометры и AWG-демультиплексор. Полная параметризация геометрии позволила оптимизировать топологию и определить допустимые отклонения их геометрических параметров, вызванные технологическими особенностями производства.

По результатам моделирования были изготовлены технологические макеты ФИС. Измерения подтвердили соответствие геометрических параметров расчетным допускам, доказав пригодность технологии.

Созданный задел в виде отдельных элементов и технологии их формирования позволяет перейти к созданию перспективных ЛБС летательных аппаратов на основе ФИС.

Литература

1. Соловьев А. М., Семенов М. Е., Сельвесюк Н. И. и др. Концепция построения полностью оптической бортовой информационно-вычислительной сети с интеллектуальным управлением // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2023. — № 1. — С. 37–54.
2. Zilkie A. J. et al. Multi-Micron Silicon Photonics Platform for Highly Manufacturable and Versatile Photonic Integrated Circuits // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019. Vol. 25. № 5. P. 1–13.

УДК 537.86:681.7

Автоматизация оптической и оптоэлектронной характеризации ФИС и компонентов на их основе

Новиков Е. С.[1], Белокрылов М. Е.[1], Кожевников В. С.[1], Паньков А. С.[2], Пономарев Р. С.[2], к. ф.-м. н.
[1] ООО «ИННФОКУС»
614066, г. Пермь, ул. Стахановская, 54, стр. П, офис 401
photonics@infcs.ru
[2] Пермский государственный национальный исследовательский университет
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15
lab.photon.psu@gmail.com

В работе описан подход к разработке измерительных комплексов с программной платформой для автоматизации измерений оптоэлектронных параметров фотонных интегральных схем. Рассматривается интеграция аппаратно-программного комплекса с автоматизированной зондовой станцией (ЗС).
Ключевые слова: оптоэлектронная характеризация; зондовая станция; фотонная интегральная схема.

Характеризация оптических и оптоэлектронных компонентов фотонных интегральных схем является важным этапом разработки и производства [1]. Для получения полной информации об исследуемых устройствах (ИУ) требуется проводить измерения с применением специализированных аппаратных или аппаратно-программных средств в соответствии с заданными требованиями и выбранной методикой.

Тестируемые устройства фотонных интегральных схем (ФИС) могут обладать различными спектральными характеристиками, чувствительностью к поляризации излучения, требованиями по перестройке длины волны и форматами модуляции. Для проведения характеризации таких устройств существуют стандартные общепринятые величины. В списке паспортизуемых величин можно выделить: вносимые (IL) и возвратные потери (RL), поляризационные потери (PDL), состояние поляризации (SOP) и степень поляризации излучения (DOP), а также спектральный анализ [2].

Выполнение таких измерений вручную может представлять собой длительную рутинную операцию, зависимую от человеческого фактора, а также не позволяет масштабировать процесс. В случае индустриального производства, начиная с мелкой серии, ручной процесс может сказываться на повторяемости процессов и годности результатов. Эта проблема может быть решена с помощью автоматизации измерений.

В настоящей работе описан и реализован подход к созданию аппаратно-программного комплекса (АПК), состоящий из девяти ключевых этапов, включающих:

1. Анализ параметров ИУ. В этап входят основные уточнения по конфигурации всех параметров ИУ.
2. Измеряемые (анализируемые) параметры. Определяется перечень измерений для конкретного ИУ.
3. Определение требований к измерениям. На этом этапе определяются основные ограничения, особенности и требования к измерениям.
4. Разработка принципиальных схем. На базе полученной ранее информации об устройстве, измерениях и требований к ним подготавливаются принципиальные схемы.

5. Определение требований к оборудованию. На этом этапе разрабатываются требования к каждой единице оборудования, а затем определяются конфигурации конкретных приборов исходя из опциональных возможностей.
6. Разработка схемы коммутации. На этапе описываются все коммутационные связи между оборудованием с учетом всех типов интерфейсов, их полярностей, частотных ограничений и прочих особенностей.
7. Выбор или разработка программного обеспечения. На данном этапе определяется целесообразность и степень автоматизации измерений, а также выбор программного решения и его параметров.
8. Разработка технической документации. На измерительный комплекс разрабатывается техническая документация в согласованном объеме и требованиях.
9. Реализация: поставка, монтаж, пусконаладочные работы.

Для решения задачи этапа № 7 компанией «Иннфокус» разработана программная платформа для проведения измерений и анализа характеристик ФИС PANDA Photonic Suite. Настоящее программное обеспечение (ПО) дает возможность интегрировать приборы разных производителей в единый комплекс в целях проведения автоматизированных измерений.

В настоящее время реализованы базовые сценарии измерений для вносимых и возвратных потерь, измерения поляризационно-зависимых потерь, спектральный анализ, характеризация AWG-чипов по стандартам ITU Grid и модуль для оптоэлектронного тестирования [3]. К 2026 году запланирован релиз нового модуля для программирования гибких сценариев измерений, в том числе силами самого пользователя.

Отдельно рассмотрен вопрос применения специализированных оптоэлектронных зондовых станций, используемых в том случае, когда ИУ представлено в виде чипа без состыкованных оптоволоконных выводов и/или без смонтированных электрических контактов для приема-передачи полезных сигналов, управляющих сигналов и питания ФИС [4].

В рамках реализации гранта РНФ № 24-91-21002 (индустриальный заказчик ООО «ИННФОКУС») реализуется проект разработки автоматизированной оптоэлектронной зондовой станции. В результате будет разработан полноценный АПК для цикличного тестирования чипов на пластине диаметром до 150 мм.

Литература

1. Alt S., Pellish J. Photonic Integrated Circuit (PIC) Device Structures: Background, Fabrication Ecosystem, Relevance to Space Systems Applications, and Discussion of Related Radiation Effects // NASA Electronic Parts and Packaging (NEPP) Program Report, 2016. P. 1–60.
2. Montali F., Petrini M., Morichetti F., Melloni A. Testing Techniques for Photonic Integrated Circuits with Statistical Approaches // IEEE Journal of Lightwave Technology, 2021. Vol. 39. № 15. P. 5120–5131.
3. ITU-T Recommendation G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid // International Telecommunication Union (ITU), 2012. P. 1–14.
4. Carroll L. et al. Photonic packaging: transforming silicon photonic integrated circuits into photonic devices // Applied Sciences, 2016. Vol. 6. № 12. P. 426.

УДК 535.93

Интегральные электрооптические модуляторы на основе нитрида кремния и прозрачных проводящих оксидов

Лотков Е. С.[1,2]
[1] *Научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова*
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22
[2] *МГТУ им. Н. Э. Баумана*
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
lotevg@bmstu.ru

В данной работе впервые демонстрируются фазовые и амплитудные электрооптические модуляторы на основе оксида индия с содержанием олова и без него, гетерогенно интегрированные в фотонную интегральную схему на основе нитрида кремния для телекоммуникационного диапазона длин волн.
Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; оптические модуляторы; оксид индия; нитрид кремния.

Создание быстродействующих и компактных электрооптических модуляторов на платформе Si_3N_4 остается серьезной проблемой, ограничивающей развитие фотонных интегральных схем в мире. Например, традиционные электрооптические сегнетоэлектрические материалы, такие как ниобат лития (LN), имеют относительно низкую эффективность модуляции, что приводит к необходимости использования модуляторов длиной порядка нескольких сантиметров [1]. Титанат бария (BTO) обеспечивает более высокую эффективность, но его многодоменная структура ограничивает степень миниатюризации устройств, а также его использование подразумевает температурные ограничения [2]. Более того, такие сегнетоэлектрические материалы требуют сложных и дорогостоящих методов изготовления тонких пленок для интеграции с Si_3N_4. Оксид индия-олова и другие слои на основе оксида индия, напротив, зарекомендовали себя как перспективные электрооптические материалы [3], предлагающие преимущества при интеграции с фотонными схемами на основе Si_3N_4. Однако к настоящему времени модуляторы на основе ITO и In_2O_3 были продемонстрированы только на кремниевой платформе, а электрооптические свойства и стабильность этих материалов остаются недостаточно изученными.

Для разработки конструкции устройства были проведены трехмерные моделирования для оценки эффективности модуляторов и получены результаты, согласующиеся с нашими теоретическими ожиданиями. Поскольку усиление ограничения оптических мод на горизонтальном металлическом электроде достигается только при использовании TM-поляризованного света, в разработанных конструкциях используется относительно толстый (>300 нм) волновод Si_3N_4 для обеспечения эффективного перекрытия мод со слоем ITO. Для создания фазовых модуляторов на основе стеков с несколькими слоями In_2O_3 или ITO использовались волноводы толщиной 220 нм для работы с TE-поляризованной фотонной модой без усиления. Были тщательно охарактеризованы тонкопленочные элементы ITO и In_2O_3 (изготовленные методом взрывной литографии) и подтверждена их повторяемость на каждом этапе изготовления устройства. Полученные модуляторы обладают субгигагерцевой полосой пропускания 3 дБ (~1,07 ГГц), компактными

размерами (длина устройства ~9,3 мкм), низкими вносимыми потерями (~5,7 дБ при смещении 8 В) и коэффициентом затухания ~1,18 дБ [4]. Достигнут сдвиг фазы π/6 для фазовых модуляторов. В частности, работа представляет новое применение электронно-лучевого испарения с ионным ассистированием в сочетании с методом взрывной литографии и последующим отжигом, что позволяет изготавливать сверхтонкие кристаллические электрооптические элементы из прозрачного проводящего оксида. Этот подход был описан в предыдущей работе [5] и был отмечен в недавнем обзоре как конкурентоспособная альтернатива электрооптическим полимерам [6]. Результаты работы обеспечиваются новые возможности нанопроизводства для создания электрооптических модуляторов субмикрометрового масштаба на кристалле. Результаты будут интересны широкому кругу исследователей в таких областях, как сверхбыстрая связь, нейроморфные и квантовые вычисления, наномасштабные сенсоры и лидары.

Литература

1. Churaev M. et al. A heterogeneously integrated lithium niobate-on-silicon nitride photonic platform // Nat. Commun., 2023. Vol. 14. P. 3499.
2. Chelladurai D. et al. Barium titanate and lithium niobate permittivity and Pockels coefficients from megahertz to sub-terahertz frequencies // Nat. Mater., 2025. Vol. 24. P. 868–875.
3. Hsu W. C. et al. Sub-volt high-speed silicon MOSCAP microring modulator driven by high-mobility conductive oxide // Nat. Commun., 2024. Vol. 15. P. 826.
4. Lotkov E. S. et al. Integrated Electro-Optic Absorption Modulator for Silicon Nitride Platform // arXiv:2412.19306, 2024.
5. Lotkov E. S. et al. ITO film stack engineering for low-loss silicon optical modulators // Sci. Rep., 2022. Vol. 12. P. 6321.
6. Dalton L. R. et al. Perspective: Nanophotonic electro-optics enabling THz bandwidths, exceptional modulation and energy efficiencies, and compact device footprints // APL Materials, 2023. Vol. 11. P. 050901.

Эндогенная биофотоника на основе оптического излучения биологических систем

Ильин В. К.[1], Майбуров С. Н.[2], Демихов Е. И.[2], Дунин Н. В.[2]
[1] Институт медико-биологических проблем РАН
123007, г. Москва, Хорошевское ш. 76, А
[2] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

Представлена разработанная в ФИАН в рамках проекта «Система детекторов оптического излучения» четырехканальная детекторная система на основе фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), предназначенная для регистрации сверхслабого фотонного излучения биологических объектов в спектральном диапазоне 290–600 нм. Будут рассмотрены ключевые характеристики системы, включая ее высокую чувствительность, низкий уровень шумов и устойчивость к внешним воздействиям, что делает ее применимой как в наземных исследованиях, так и в условиях полета на космической станции.

Особенности разработанной детекторной системы сверхслабого фотонного излучения включают в себя:

1) созданную компактную конструкцию с регистрацией фотонов для четырех каналов в аэрокосмическом исполнении, предназначенную для интеграции с внешним биореактором, не имеющую аналогов по сочетанию габаритов, модульности и отношения сигнал/шум;
2) наличие собственного устройства регистрации (аппаратно-программного комплекса), интегрируемого с детекторной системой на базе отечественного микроконтроллера «Миландр 1986ВЕ92QI» со встроенным ПО, клиентским интерфейсом и возможностью удаленного мониторинга;
3) нестандартное применение схемотехнических решений: использование схемы подключения фотокатода под нулевым потенциалом, предварительное формирование фронта сигнала на последнем диноде ФЭУ, применение схемы антисовпадений для подавления мюонного фона и реализации гальванической развязки через оптопары для улучшения отношения сигнал/шум.

В заключительной части доклада будут обсуждаться перспективы применения основных результатов работы (одноканального детектора оптического фотонного излучения, четырехканальной детекторной системы и устройства регистрации для сбора данных) для прикладных исследований.

В рамках реализации опытно-конструкторской работы проекта «Система детекторов оптического излучения» для измерения характеристик митогенетического излучения был создан блок регистрации митогенетического излучения на основе фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), окружающих биологический объект, и регистрирующий испускаемое им митогенетическое излучение. Это излучение характеризуется низкой интенсивностью и временной структурой ярко выраженных узких вспышек.

Разработана аппаратура для регистрации сверхслабого оптического излучения от биокультур. Создан малогабаритный блок регистрации оптического излучения

в режиме счета фотонов на основе чувствительных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) со схемой дифференциального дискриминатора в каждом канале ФЭУ. Созданная четырехканальная система детекторов предназначена для регистрации и обработки электромагнитных колебаний, генерируемых микроорганизмами в активной и покоящихся фазах. Изучены характеристики излучения, испускаемого биокультурой сахаромицет boulardii.

В программно-аппаратном комплексе блока регистрации интенсивности событий был реализован следующий функционал: наличие файловой системы, запись измерений на карту SD, измерение температуры с внешнего цифрового датчика, коммуникация по UART в режиме циклического опроса. Микроконтроллер ARM Cortex-M3 1986BE92QI от фирмы «Миландр», установленный на печатную плату регистрации интенсивности событий, осуществляет подсчет импульсов детектора оптического излучения и детектора космического излучения.

Ультрафиолетовые лазерные источники российского производства «УЛЬТРА»

Акулов В. А.[1], Телегин И. А.[2]
[1] ООО «Оптические технологии»
630090, г. Новосибирск, ул. Николаева, 12/2
akulov.v84@gmail.com
[2] АО «Нанотроника»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10
i.telegin@nanotronica.ru

Ключевые слова: ультрафиолетовые лазеры; волоконные лазеры; четвертая гармоника; микроэлектроника; литография; импортозамещение; технологическая безопасность.

В работе представлена разработка единой оптической платформы для ультрафиолетовых лазерных источников с длинами волн 257, 266 и 355 нм, а также создание непрерывного волоконного лазера с длиной волны 257 нм, переданного в опытно-промышленную эксплуатацию. Актуальность исследования обусловлена потребностью полупроводниковой промышленности в надежных и энергоэффективных УФ-лазерах для литографии, генерации изображений фотошаблонов и метрологии. В настоящее время в данной отрасли преимущественно используются аргоновые/криптоновые ионные лазеры (488 нм, 514 нм) с преобразованием во 2-ю гармонику (244/257 нм) и твердотельные лазеры (1064 нм) с генерацией 3-й (355 нм) и 4-й (266 нм) гармоник. Однако такие системы, производимые компаниями Coherent (Innova FreD, Azure), обладают существенными недостатками: высоким энергопотреблением (до 60 кВт), необходимостью частой замены нелинейного кристалла BBO (каждые 200–300 часов) и зависимостью от иностранных поставщиков, что в текущих условиях создает риски для технологической безопасности России.

Предлагаемое решение основано на волоконной лазерной технологии, обеспечивающей значительное снижение энергопотребления (до 0,6 кВт) и повышение надежности. В рамках проекта разработана унифицированная оптическая платформа, позволяющая реализовать генерацию на ключевых для микроэлектроники длинах волн УФ-диапазона. На текущем этапе завершены разработка и изготовление двух лазерных систем с длиной волны 257 нм, которые переданы в ОАО «Планар» для опытно-промышленных испытаний. Основные технические характеристики разработанного лазера представлены в табл. 1.

Предварительные результаты прогонных испытаний показаны на рис. 1.

Разработанные лазерные системы предназначены для применения в критически важном оборудовании полупроводниковой промышленности, включая генераторы изображений фотошаблонов, установки проекционной литографии и системы метрологического контроля. Их внедрение позволит обеспечить импортонезависимость, снизить эксплуатационные затраты и повысить технологическую безопасность российской микроэлектроники. Перспективы работы связаны с расширением линейки УФ-лазеров на базе созданной платформы и масштабированием производства для полного покрытия потребностей отечественной промышленности.

Таблица 1. Основные технические характеристики «УЛЬТРА 257»

Характеристика	Значение
Длина волны генерации	257,4 ± 0,2 нм
Шумы, среднеквадратичные	<2 % (в полосе от 30 кГц до 20 МГц)
Режим генерации лазера	CW (непрерывный)
Выходная мощность	Регулируемая, 300 ± 0,1 мВт
Ширина спектра (FWHM)	<500 кГц
Стабильность положения линии	<2 пм
Спектральная чистота излучения	>99 %
Диаметр пучка	3 ± 0,2 мм
Эллиптичность пучка	От 0,9 до 1,1
Расходимость	<0,5 мрад
Профиль излучения по осям	TEM00-мода
Осевая нестабильность	<4 мкрад/°C за 8 часов работы лазера
Потребляемая электрическая мощность	≤600 Вт

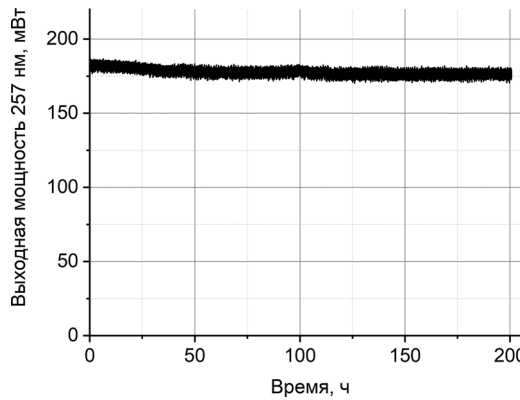


Рис. 1

УДК 535.93

Интегрированные на волновод сверхпроводниковые однофотонные детекторы с близкой к единице эффективностью поглощения

Степанов И. А.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
stepanovia@bmstu.ru

В работе продемонстрирована технология изготовления сверхпроводниковых однофотонных детекторов, монолитно интегрированных на чип фотонной интегральной схемы с возможностью как вертикального, так и горизонтального ввода излучения. Экспериментально достигнута эффективность поглощения 99,78 %, продемонстрированы результаты характеризации детекторов при криогенных температурах.

Ключевые слова: фотонная интегральная схема; однофотонный детектор; нитрид кремния; нитрид ниобия; сверхпроводимость; криогенная температура.

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы (SNSPD) за последние два десятилетия стали одной из наиболее совершенных технологий детектирования одиночных фотонов благодаря уникальному сочетанию характеристик. Благодаря возможности достижения квантовой эффективности до 99 % [1–3], скорости счета свыше 1 ГГц [4, 5], джиттера менее 3 пс [6] и скорости темнового счета порядка 10^{-3} Гц [7] SNSPD на сегодняшний день находят применение в различных областях, включая квантовые вычисления. Однако по мере развития масштабируемых квантовых технологий возрастает потребность в интеграции SNSPD с другими компонентами на едином чипе, включая волноводы с низкими потерями, источники фотонов и электрооптические модуляторы [8]. Такая интеграция не только минимизирует потери на оптических соединениях, но и повышает масштабируемость системы, позволяя реализовать многоканальное детектирование без потери производительности в едином криостате. Таким образом, разработка воспроизводимой технологии изготовления интегрированных на волновод сверхпроводниковых однофотонных детекторов является обязательным шагом на пути к созданию интегральных схем для фотонных квантовых сопроцессоров, а также необходимым условием для создания масштабируемых систем квантовых коммуникаций.

В данной работе представлена разработанная в НОЦ ФМНС технология изготовления фотонных интегральных схем на платформе SiN с интегрированными на волновод сверхпроводниковыми однофотонными детекторами на основе NbN и вертикальными и горизонтальными элементами ввода излучения. Представлены результаты численного моделирования чувствительного элемента детектора и элементов фотонной интегральной схемы. Представлена технология изготовления интегрированных на волновод SNSPD, включающая в себя этапы синтеза оптических и сверхпроводящих слоев, прецизионные процессы электронно-лучевой литографии и плазмохимического травления, а также формирование структур для ввода и вывода излучения [9, 10]. Получена эффективность поглощения детекторов вплоть до 99,78 % на длине волны 1550 нм и продемонстрированы результаты криогенной характеризации детекторов при температуре <1 K.

Литература

1. Chang J. et al. Detecting telecom single photons with 99.5−2.07+0,5 % system detection efficiency and high time resolution // APL Photonics, 2021. Vol. 6. № 3.
2. Reddy D. V. et al. Achieving 98 % system efficiency at 1550 nm in superconducting nanowire single photon detectors // Conference on Coherence and Quantum Optics. — Optica Publishing Group, 2019 P. W2B. 2.
3. Hu P. et al. Detecting single infrared photons toward optimal system detection efficiency // Optics Express, 2020. Vol. 28. № 24. P. 36884–36891.
4. Zhang W. et al. A 16-pixel interleaved superconducting nanowire single-photon detector array with a maximum count rate exceeding 1,5 GHz // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019. Vol. 29. № 5. P. 1–4.
5. Resta G. V. et al. Gigahertz detection rates and dynamic photon-number resolution with superconducting nanowire arrays // Nano Letters, 2023. Vol. 23. № 13. P. 6018–6026.
6. Korzh B. et al. Demonstration of sub-3 ps temporal resolution with a superconducting nanowire single-photon detector // Nature Photonics, 2020. Vol. 14. № 4. P. 250–255.
7. Shibata H. et al. Ultimate low system dark-count rate for superconducting nanowire single-photon detector // Optics letters, 2015. Vol. 40. № 14. P. 3428–3431.
8. Buzaverov K. A. et al. Silicon nitride integrated photonics from visible to mid-infrared spectra // Laser Photonics Rev., 2024. Vol. 18. 2400508.
9. Stepanov I. A. et al. Sputtered NbN films for ultrahigh performance superconducting nanowire single-photon detectors // APL Materials, 2024. Vol. 12. № 2.
10. Avdeev S. S. et al. Tutorial on Silicon Photonics Integrated Platform Fiber Edge Coupling // arXiv:2405.11980. 2024.

УДК 621.389

Технологии фотонных интегральных схем для криогенных приложений

Родионов И. А.[1,2]
[1] *Научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова*
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22
[2] *МГТУ им. Н. Э. Баумана*
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
irodionov@bmstu.ru

Представлены результаты НОЦ ФМН по развитию технологий фотонных интегральных схем для создания устройств оптической обработки информации. Акцент будет сделан на параметрах изготовленных ФИС и крио-ЭКБ для телекоммуникационной длины волны (1550 нм), включая оптические потери в волноводах (2 дБ/м), добротность интегральных микрорезонаторов ($15 \cdot 10^6$), эффективность элементов ввода-вывод излучения (до 0,15 дБ), параметры интегральных модуляторов (до 1 ГГц). Описаны экспериментальные стенды для измерения параметров интегральной ЭКБ ФИС при комнатной и сверхнизких температурах (до 0,9 К), а также текущие результаты разработки интегральных однофотонных детекторов и технологий криофотонных сборок. Представлены разработанные правила проектирования кристаллов ФИС и описан опыт контрактного производства ФИС в интересах коммерческого партнера.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; электрооптические модуляторы; криофотонные сборки; интегральные микрорезонаторы; однофотонные детекторы.

УДК 537.86

Критерии оптимизации электродов бегущей волны для сверхвысокочастотной модуляции оптического излучения в фотонных интегральных схемах на подложках ниобата лития

Парфенов М. В., Варламов А. В., Тронев А. В., к. т. н., Агрузов П. М., Ильичев И. В., к. х. н., Шамрай А. В., д. ф.-м. н.
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
mvparfenov@mail.ioffe.ru

Исследована зависимость характеристик модулятора на подложке ниобата лития от топологии электродов бегущей волны с учетом ограничений, накладываемых топологией оптических волноводов модулятора. Рассмотрены факторы, ограничивающие полосу частот модуляции и критерии оптимизации конфигурации электродов бегущей волны. Представлена топология электродов, обеспечивающая полосу модуляции 40 ГГц.

Ключевые слова: интегральная оптика; модуляторы; ниобат лития; фотонные интегральные схемы.

Модуляция оптического излучения — актуальная задача для фотонных интегральных схем. В зависимости от материальной платформы интегральной фотоники для модуляции могут использоваться различные эффекты и, соответственно, различные топологии устройств. Одним из наиболее распространенных материалов интегральной фотоники является кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$) [1]. Благодаря наличию хорошо отработанных технологий для изготовления оптических волноводов с низкими потерями, прозрачности в широком диапазоне длин волн, а также наличию эффектов для управления оптическим излучением, в первую очередь сильно выраженного электрооптического эффекта Поккельса, он активно применяется в качестве материла подложки для изготовления электрооптических модуляторов разных конфигураций [2], причем по достижимой ширине полосы модуляции материальная платформа ниобата лития превосходит конкурирующие материальные платформы, такие как полупроводники A^3B^5 и кремний.

Сверхширокополосные модуляторы на подложках ниобата лития состоят из оптических волноводов, сформированных в приповерхностной области кристаллической подложки, и связанных с ними электродов бегущей волны, конфигурация которых определяет эффективность модуляции оптического излучения [3]. Обеспечение сверхширокой полосы модуляции в таких устройствах достигается точным подбором параметров топологии устройства, которые во многом определяются технологическими возможностями и ограничениями, накладываемыми оптической схемой модулятора. Кроме того, требования по достижению сверхширокой полосы модуляции зачастую находятся в противоречии с требованиями повышения других характеристик модулятора, таких как управляющее (полуволновое) напряжение, оптические потери и контраст модуляции. В связи с этим возникает задача выбора критериев оптимизации электродов, зависящих от конфигурации оптической схемы модулятора, а также областей практического применения.

В работе рассмотрены критерии при проектировании электродов бегущей волны в модуляторах на объемных кристаллических подложках ниобата лития, исследован характер влияния элементов топологии на характеристики копланарных электродов, продемонстрирована взаимосвязь между характеристиками электродов и характеристиками модулятора. Рассмотрены различные паразитные эффекты, связанные с топологией электродов, такие как возбуждение мод подложки и рассогласование импедансов. Для экспериментальной отработки топологии электродов представлен метод оценки рабочей полосы частот модулятора на основе зондовых измерений его электродов, что позволяет определить полосу частот изготовленных чипов модуляторов на пластине без электрооптических измерений. Представлен пример топологии, обеспечивающей эффективную модуляцию оптического излучения в полосе частот 40 ГГц.

Результаты получены при финансовой поддержке РНФ, проект № 24-91-22001 на выполнение ориентированных и прикладных научных исследований в рамках стратегических инициатив президента Российской Федерации в научно-технологической сфере в области производства приборов СВЧ и терагерцевого диапазона (в части чипов и микроэлектронных составляющих).

Литература

1. Петров В. М., Агрузов П.М., Лебедев В. В., Ильичев И. В., Шамрай А. В. Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития // Успехи физических наук, 2021. — Т. 191. — С. 760–780.
2. Wooten E. L., Kissa K. M., Yi-Yan A., Murphy E. J., Lafaw D. A. et al. A Review of lithium Niobate Modulators for Fiber-Optic Communications Systems. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000. Vol. 6. P. 69–82.
3. Broadband optical modulators. Science, Technology, and Application / ed. by A. Chen, Ed. Murphy, Boca Raton: CRC Press, 2012.

УДК 621.375.4

Разработка и экспериментальное исследование отечественного GaAs трансимпедансного усилителя и оптического приемника 5 Гбит/с на его основе

Коряковцев А. С., к. т. н., Коколов А. А., к. т. н., Ходжиков Д., Бабак Л. И., д. т. н.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
artem.s.koriakovtsev@tusur.ru

В настоящей работе представлены результаты разработки интегральной схемы (ИС) трансимпедансного усилителя (ТИУ) с полосой пропускания DC 5 ГГц на основе отечественной 0,5-мкм GaAs pHEMT-технологии. На основе представленной ИС ТИУ и InGaAs PIN-фотодиода (ОКБ «Планета») разработан и экспериментально исследован макет модуля гибридного оптического приемника для скоростей передачи 5 Гбит/с.

Ключевые слова: трансимпедансный усилитель; GaAs; СВЧ; оптический приемник.

Трансимпедансные усилители (ТИУ) играют ключевую роль в современных волоконно-оптических системах передачи данных, обеспечивая преобразование тока фотодиода (ФД) в напряжение и дальнейшее усиление полученного сигнала. Для аналоговых оптических приемников, как правило, состоящих из интегральных схем (ИС) ФД и ТИУ, крайне важна высокая чувствительность и широкая полоса частот, что достигается за счет использования современных полупроводниковых техпроцессов, схемных решений и конструкций. Наиболее распространенными технологиями для разработки ИС ТИУ можно считать кремниевые КМОП и SiGe БиКМОП, а также A^3B^5 (GaAs, InP) техпроцессы. За рубежом широко применяются ИС ТИУ на базе радиочастотных (РЧ) КМОП и SiGe БиКМОП полупроводниковых технологий, так как, помимо широкой полосы частот и высокого быстродействия (до 40 Гбит/с и более для одного канала), они имеют также низкие стоимость и энергопотребление. В России наиболее подходящими для разработки ТИУ являются 180 и 90 нм РЧ КМОП-техпроцессы (АО «Микрон»), а также GaAs-технологии (АО «Светлана-Рост», ОКБ «Планета», АО «НПФ «Микран» и т. д.). В настоящей статье представлены результаты разработки ИС ТИУ на основе 0,5 мкм GaAs pHEMT-технологии (АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург), а также оптического приемника для скоростей передачи 5 Гбит/с с использованием разработанной GaAs ИС ТИУ и InGaAs PIN-фотодиода (ОКБ «Планета», г. Великий Новгород).

Основными особенностями разработанной GaAs ИС ТИУ являются использование каскада на двух полевых транзисторах по схеме «общий исток (ОИ) — общий сток (ОС)» с отрицательной обратной связью и двухполярное питание [1]. Так как предполагается использование микросхемы для широкополосного цифрового сигнала, то структура ТИУ представляет собой усилитель постоянного тока (УПТ), при этом нижняя граница полосы пропускания определяется внешними компонентами. Согласно проведенным зондовым измерениям, GaAs ИС ТИУ обладает следующими характеристиками: полоса пропускания DC 5,9 ГГц, коэффициент усиления $|S_{21}|$ = 16,6–19,4 дБ, коэффициент трансимпедансного усиления Z_T = 50,4–53,4 дБ·Ω,

потребляемый ток $I_п$ = 85 мА, напряжение питания $U_п$ = +3,3/–4 В, габариты чипа 1×1 мм^2, выходная мощность 2,5 дБм, коэффициент шума не более 3,5 дБ.

Для проведения экспериментального исследования макета оптического приемника (ОПрм) с использованием GaAs ИС ТИУ и InGaAs PIN-фотодиода была разработана тестовая печатная плата. Кристалл ФД обладает следующими характеристиками: рабочая полоса частот 7 ГГц, чувствительность ~0,6 А/Вт, напряжение смещения –3 В, длина волны 1550 нм [2]. Для измерения оптоэлектронного коэффициента преобразования ОПрм был использован ВАЦ с частотным диапазоном до 43,5 ГГц (Ceyear 3872C) совместно с анализатором оптического сигнала (Ceyear 6433F). Ввод оптического сигнала осуществлялся при помощи сколотого одномодового оптоволокна SMF28 и прецизионного манипулятора. Основные характеристики по результатам измерений ОПрм на длине волны 1550 нм и при мощности оптического сигнала 0 дБм следующие: полоса пропускания 5,3 ГГц, коэффициент преобразования ОПрм 3,6–7,2 дБ, уровень согласования по выходу приемника не хуже –10 дБ, потребляемая мощность ~300 мВт.

Разработка выполнялась в рамках государственного задания при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 23-91-06207).

Литература

1. Коряковцев А. С. Автоматизированное проектирование и разработка интегральных трансимпедансных усилителей для быстродействующих оптических приемников: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Томск: ТУСУР, 2025. — 248 с.
2. Васильев А. А., Логинов А. С., Воропаев К. О. PIN-фотодиод ИК-диапазона на основе гетероэпитаксиальной структуры InP/InGaAs // Материалы XXVII научной конференции преподавателей, аспирантов и студентов НовГУ «Дни науки и инноваций НовГУ», 2020. — С. 137–144. DOI: 10.34680/978-5-89896-668-3/2020.dn-3.19.

УДК 621.315.592, 621.373.8, 621.383

Технология МОС-гидридной эпитаксии для современных задач фотоники и оптоэлектроники

Ладугин М. А., Мармалюк А. А., Сабитов Д. Р., Телегин К. Ю.
АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха»
117342, г. Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1
laduginma@niipolyus.ru

В настоящей работе представлены результаты применения метода МОС-гидридной эпитаксии для формирования полупроводниковых гетероструктур на подложках GaAs и InP в системе материалов A^3B^5 в целях создания на их основе современных приборов фотоники и оптоэлектроники.

Ключевые слова: МОС-гидридная эпитаксия; полупроводниковая гетероструктура; квантовая яма; лазерный диод; фотоприемник; модулятор; интегральная фотоника.

Полупроводниковые лазеры, фотоприемники, модуляторы, транзисторы и другие современные приборы давно и широко используются в ключевых областях науки и техники. Выходные характеристики таких приборов во многом определяются конструкцией гетероструктур и технологией их получения. Причем значительные успехи при создании полупроводниковых приборов как в дискретном, так и интегральном исполнении были достигнуты благодаря развитию и совершенствованию эпитаксиальных нанотехнологий. В последнее время среди возможных методов формирования эпитаксиальных гетероструктур на первый план выходит МОС-гидридная эпитаксия. Большая гибкость в выборе исходных материалов, широкий диапазон варьирования параметров роста, возможность получения резких гетерограниц и сверхтонких квантоворазмерных слоев, хорошая масштабируемость процесса роста для увеличения количества одновременно обрабатываемых пластин, снижение себестоимости единицы изделия делают этот метод незаменимым при организации промышленного производства.

В настоящей работе представлены результаты применения метода МОС-гидридной эпитаксии для формирования полупроводниковых гетероструктур на подложках GaAs и InP в системе материалов A^3B^5 в целях создания на их основе современных приборов фотоники и оптоэлектроники. Последовательно описан процесс проектирования, изготовления и исследования квантоворазмерных приборов, работающих на межзонных и внутризонных переходах в квантовых ямах и сверхрешетках. Показано, что тщательный контроль толщины и упругих напряжений слоев, резкости гетерограниц и заданного профиля легирования позволяет создавать высокоэффективные лазеры (лазерные линейки и матрицы, РОС-лазеры, лазер-тиристоры) и фотоприемники (*p*-*i*-*n*-диоды и однозарядные UTC-диоды).

Обсуждаются перспективы развития технологии МОС-гидридной эпитаксии для современной фотоники и оптоэлектроники, включая задачи интегральной фотоники.

УДК 621.3.049

Особенности определения диэлектрических постоянных тонких пленок в терагерцевом диапазоне частот в условиях сильного изменения проводимости

Конникова М. Р., Шкуринов А. П.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
konnikovamaria@gmail.com

В целях управления электромагнитными характеристиками терагерцевого (ТГц) излучения разработаны и изготовлены динамически перестраиваемые метаповерхности на основе фазоизменяемых материалов (ФИМ) с оптически управляемой проводимостью. Для повышения точности восстановления диэлектрических характеристик пленок, входящих в состав метаповерхности, разработана теоретическая модель, учитывающая одновременно отраженные и прошедшие через пленку поля. Верификация модели проведена на пленках металлов, диэлектриков и ФИМ.
Ключевые слова: перестраиваемые метаматериалы; тонкие пленки; ТГц-спектроскопия; фазоизменяемые материалы.

Последние несколько десятилетий связаны с прорывом в области диагностики материалов в терагерцевом диапазоне частот благодаря развитию метода терагерцевой импульсной спектроскопии. Несмотря на широкое применение тонких пленок в областях фотоники и сверхскоростной микроэлектроники, вопросы, связанные с определением диэлектрических свойств материалов субволновых масштабов, до сих пор до конца не решены. Более того, существующие экспериментальные подходы не позволяют восстанавливать диэлектрические характеристики пленок разной проводимости, что важно для разработки гетероструктур и многослойных метаматериалов.

В рамках работы предложен новый феноменологический подход для определения комплексной диэлектрической проницаемости пленок, толщина которых значительно меньше длины волны терагерцевого излучения. Этот подход основан на одновременной регистрации отраженных и прошедших ТГц-волн от/через пленку, нанесенную на подложку [1].

Экспериментальная верификация модели проведена на пленках металла, полупроводника и халькогенида, меняющего свою проводимость при внешнем оптическом воздействии. На основе восстановленных значений комплексной диэлектрической проницаемости пленок разработаны и изготовлены перестраиваемые планарные устройства ТГц-диапазона частот, демонстрирующие фотоиндуцированную частотную перестройку и амплитудное подавление фано-моды [1, 2].

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

1. Konnikova M., Tretyakov A., Kistenev Y. et al. Novel method for extracting electromagnetic parameters of thin films based on dual-mode terahertz time-domain spectroscopy measurements // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2025. Vol. 46. № 3. P. 18.
2. Konnikova M. R., Khomenko M. D., Tverjanovich A. S. et al. Gete2 phase change material for terahertz devices with reconfigurable functionalities using optical activation // ACS applied materials & interfaces, 2023. Vol. 15 (7). P. 9638–9648.

УДК 535.47: 535.514.9

Киральные метаматериалы для фотоники на основе наноструктурированных тонких пленок

д. ф.-м. н. Трушин О. С.[1], Фаттахов И. С.[1], к. т. н. Попов А. А.[1], к. ф.-м. н. Мазалецкий Л. А.[1,2], Федоров А. С.[3,4], д. ф.-м. н. Логунов М. В.[3,4]
[1] ОФТИ им. К. А. Валиева, НИЦ «Курчатовский институт»
150067, г. Ярославль, ул. Университетская, 21
otrushin@gmail.com
[2] ЯрГУ им. П. Г. Демидова
150000, г. Ярославль, ул. Советская, 14
[3] ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
[4] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Разработана технология получения киральных пленочных метаматериалов для фотоники методом наклонного напыления с вращением подложки (GLAD). Представлен обзор экпериментальных исследований по получению и исследованию оптических характеристик этих метаматериалов на основе наноструктрированных пленок металлов, полупроводников и диэлектриков.
Ключевые слова: GLAD; киральные метаматериалы; циркулярный дихроизм.

Оптические метаматериалы и технологии их получения находятся в фокусе внимания в современной научной литературе. Важным примером такого рода являются киральные пленочные структуры [1–3]. Киральные системы характеризуются нарушением зеркальной симметрии, что проявляется в оптических явлениях в виде различного характера взаимодействия такого материала с право- и левоциркулярно поляризованным светом. При пропускании света через такой метаматериал наблюдается явление кругового дихроизма, при отражении от такой поверхности происходит изменение состояния поляризации и интенсивности света. Эти явления можно использовать для практических применений — для создания оптических фильтров, поляризаторов и сенсоров разного типа [3]. Преимуществом таких пленочных структур является их малая толщина (сотни нанометров) и компактность, что дает возможность их интеграции при создании оптических чипов.

В настоящей работе представлен обзор экспериментальных и теоретических работ, выполненных авторами, по получению и исследованию киральных метаматериалов на основе наноструктурированных пленок различных материалов (металлов, полупроводников, диэлектриков). Эксперименты по напылению пленок различных материалов на наклонную подложку проводили на установке электронно-лучевого испарения «Оратория-9» при комнатной температуре. Анализ микроструктуры получаемых пленок проводился методом сканирующей электронной микроскопии (Supra-40). Оптические характеристики измерялись методом спектроскопии кругового дихроизма на просвет (J-1500) в видимом диапазоне. Анализ полученных микроскопических изображений показывает, что при включении вращения подложки в процессе роста пленки формируется массив наноспиралей (геликонов). При изменении скорости вращения изменяются шаг спирали и число

витков на толщине пленки. Анализ оптических характеристик полученных пленок показывает, что данные пленки демонстрируют ярко выраженный эффект кругового дихроизма величиной до нескольких градусов.

Литература

1. Trushin O. S., Fattakhov I. S., Popov A. A., Mazaletskii L. A., Gaidukasov R. A., Myakonkikh A. V. Chiral Thin Film Structures Based on Arrays of Cobalt Nanohelices Obtained By Oblique Deposition // Phys. Solid State, 2024. Vol. 66. P. 1062–1067.
2. Hawkeye M. M., Taschuk M. T., Brett M. J. Glancing Angle Deposition of Thin Films. London: John Wiley & Sons, London, 2014.
3. Schaferling M. Chiral Nanophotonics, Springer series in Optical Sciences. Switzerland: Springer International Publishing, 2017.

УДК 621.389

Сопроцессоры на основе фотонных интегральных схем для матричной обработки данных

Бабурин А. С.
[1] *Научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова*
127030, г. Москва, ул. Сущевская, 22
[2] *МГТУ им. Н. Э. Баумана*
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
baburin@bmstu.ru

В мире происходит поиск новых аппаратных архитектур, оптимизированных для искусственного интеллекта. Оптические системы являются одной из предпочтительных платформ, так как выполняют линейные матричные операции с высокой скоростью и эффективностью. Мы предлагаем вариант реализации системы на основе ФИС и характеризацию ее параметров.
Ключевые слова: фотонные сопроцессоры; матричная обработка данных; фотонные интегральные схемы.

Фотонные интегральные схемы все чаще рассматриваются как возможная платформа для матричной обработки данных. Две ведущие области супервычислений на базе света: квантовые фотонные вычисления и нейроморфные фотонные вычисления, используют перемножение матриц для обработки данных. Они могут быть реализованы с использованием матричного сопроцессора на основе сеток интерферометров Маха — Цендера [1].

Матричный сопроцессор изготавливается на базе волноводов, образующих сетку интерферометров Маха — Цендера. Одним из перспективных материалов для фотонных интегральных схем является нитрид кремния, демонстрирующий на сегодняшний день минимальные потери. Создание кристаллов на его основе состоит из следующих этапов: окисление кремниевой пластины, нанесение нитрида кремния, литография для формирования топологии, травление нитрида кремния и покрытие верхней оболочкой. Использованный в данной работе техпроцесс формирования схемы обеспечивает минимальные ошибки сшивания (максимальная ошибка менее 10 нм), малые критические размеры топологических элементов (минимальный размер до 50 нм), минимальную шероховатость края линии и поверхности волновода (среднеквадратичное значение менее 0,5 нм) и наименьшего потери при распространении (0,02 дБ/см для длины волны 1550 нм).

В данном докладе будет рассмотрена реализация системы для обеспечения операций умножения вектора 1×4 на матрицу 4×4, основанная на ФИС из нитрида кремния, и характеризация ее основных параметров.

Литература

1. Mehonic Adnan et al. Roadmap to neuromorphic computing with emerging technologies // APL Materials, 2024. 12.10.
2. Buzaverov K. A. et al. Low-loss silicon nitride photonic ICs for near-infrared wavelength bandwidth // Optics Express, 2023. 31.10. P. 16227–16242.

УДК 539.1.074.2, 621.383.523

Разработки систем радиационного контроля на основе современных волоконно-оптических и фотодетекторных технологий

Бужан П. Ж.[1], Виноградов С. Л.[1,2], Каракаш А. И.[1], Теверовский Ю. Л.[1]
[1] ООО НПП «Доза»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 4
karakash@doza.ru
[2] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53

Разработана серия высокочувствительных детекторов ионизирующих (альфа, бета, гамма) излучений для контроля радиоактивных загрязнений. Детекторы основаны на пластических сцинтилляторах с интегрированным спектросмещающим волокном, свет с которого регистрируется с помощью кремниевых фотоумножителей.

Ключевые слова: ионизирующее излучение; радиоактивное загрязнение; пластический сцинтиллятор; спектросмещающее волокно; кремниевый фотоумножитель.

Необходимость контроля радиоактивных загрязнений (персонала, инструмента, одежды, грузов) актуальна для всех предприятий, имеющих дело с радиоактивными материалами и излучениями. Для этого используются счетчики Гейгера — Мюллера или сцинтилляционные детекторы. Их пороговые характеристики определяются эффективностью регистрации частиц и уровнем шумов детектора.

Сцинтилляционные детекторы наиболее эффективны при поглощении частиц высоких энергий. Однако для частиц с энергиями в нижней части диапазона энергий (≤100 кэВ) требуется зарегистрировать ≤10 фотонов. Для этого используют фотодетекторы с большим внутренним усилением, в основном фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Максимальный сбор фотонов тогда достигается за счет прямого контакта сцинтиллятора и фотокатода ФЭУ большой площади.

У такого детектора есть ряд недостатков, например низкая эффективность детектирования фотона в видимой области спектра ~20–30 % у ФЭУ против ~80 % у кремниевых лавинных фотодиодов (ЛФД). Но из-за высокого шум-фактора лавинного умножения ~3–10 и, соответственно, малого коэффициента умножения ~30–100 ЛФД не позволяет выделять малофотонные сигналы из шума. Его пороговая чувствительность находится на уровне 100 фотонов в импульсе.

Существенный прогресс в развитии сцинтилляционных детекторов связан с разработанными в России кремниевыми фотоумножителями (SiPM) — новым типом микропиксельных гейгеровских ЛФД [1, 2]. Благодаря высокому коэффициенту умножения ~10^6 и сверхнизкому шум-фактору ~1,01 SiPM позволяют детектировать световые импульсы начиная с единичных фотонов. SiPM имеют эффективность ~50 %, площадь от 1 до 36 мм^2, работают в широком диапазоне температур (−50...+50 °C) при низком напряжении питания (30–70 В). Основным недостатком SiPM по сравнению с ФЭУ являются большой темновой счет и оптический кросстолк [3].

Кроме того, работы по сцинтилляторам привели к появлению сцинтилляционных волокон и спектросмещающих волокон (WLS), которые позволили обеспечить совмещение в них сразу двух функций: регистрации заряженной частицы и транспорта вспышки света от нее до фотодетектора. Это дало возможность разрабатывать новые топологии считывания света.

Мы представляем результаты усовершенствования технологии регистрации ионизирующего излучения, основанной на регистрации с помощью SiPM вспышек света от пластического сцинтиллятора большой площади с интегрированным спектросмещающим волокном [4]. На этой основе разработана серия детектирующих модулей для альфа-, бета- и гамма-излучения.

Модули имеют чувствительную площадь 146 и 465 $см^2$, высокую чувствительность, большой динамический диапазон ($1–1 \cdot 10^6$ частиц$\cdot см^{-2} \cdot мин^{-1}$ для бета-модуля и $0{,}1–1 \cdot 10^5$ частиц$\cdot см^{-2} \cdot мин^{-1}$ для альфа-модуля) и хорошую температурную стабильность (3 % в диапазоне от −20 до +50 °C).

На основе таких модулей было обновлено прежде выпускавшееся дозиметрическое оборудование, а также запущено производство новых приборов контроля радиоактивного загрязнения: рук, ног и одежды; всего тела; мелких и средних предметов в 4π-геометрии; портативная установка для контроля посылок, ручной клади; установка разбраковки спецодежды.

Литература

1. Buzhan P., Dolgoshein B., Ilyin A., Kantserov V., Kaplin V. et al. An advanced study of silicon photomultiplier // ICFA Instrum.Bull., 2001. P. 28–41. URL: http://inspirehep.net/record/572187?ln=en.
2. Buzhan P., Dolgoshein B., Filatov L., Ilyin A., Kantzerov V., Kaplin V., Karakash A., Kayumov F., Klemin S., Popova E., Smirnov S. Silicon photomultiplier and its possible applications // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., 2003. Vol. 504. P. 48–52.
3. Vinogradov S., Popova E. Status and perspectives of solid state photon detectors // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., 2020. Vol. 952. P. 161752.
4. Buzhan P., Karakash A. Hand-foot monitors for nuclear plants based on scintillator-WLS-SiPM technology // J. Phys. Conf. Ser., 2020. P. 1689.

УДК 621.373.826

Отечественные вертикально излучающие лазеры спектрального диапазона 1300–1550 нм

Воропаев К. О.[1], Воропаева И. О.[1], Блохин С. А.[2], Карачинский Л. Я.[3], Новиков И. И.[3], Егоров А. Ю.[3]

[1] АО «ОКБ-Планета»
173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1н
voropaevko@okbplaneta.ru
[2] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
[3] ООО «Коннектор Оптикс»
194292, г. Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16, лит. Б

В данной работе представлены результаты создания и исследования одночастотных длинноволновых вертикально излучающих лазеров оптического O- и C-диапазонов, изготавливаемых АО «ОКБ-Планета». Приведены конструкция и достигнутые характеристики.

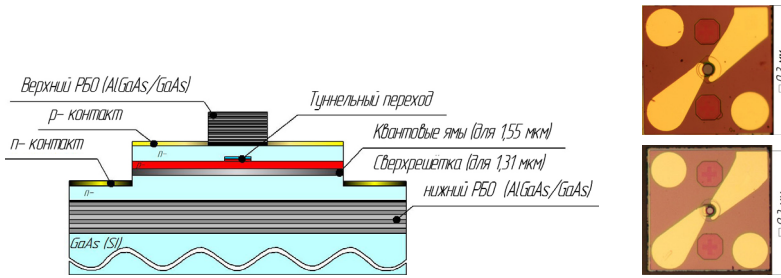
Ключевые слова: вертикально излучающий лазер; прямое межмолекулярное соединение; молекулярно-пучковая эпитаксия; прямая модуляция.

Длинноволновые вертикально излучающие лазеры (ВИЛ) представляют интерес для различных систем оптической связи. Также ВИЛ представляют интерес для реализации оптической передачи данных на сверхкороткие расстояния, при гибридной интеграции с кремниевыми оптическими и электронными схемами ввиду оптической прозрачности волноводов на основе кремния на данной длине волны [1].

Для практической реализации ВИЛ спектрального диапазона 1300–1550 нм использовались гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) активной области на основе InAlGaAs/InP и ГЭС, содержащие структуры верхнего и нижнего распределенного брэгговского отражателя (РБО) на основе AlGaAs/GaAs. При этом соединение ГЭС в одну структуру осуществлялось при помощи последовательного межмолекулярного соединения пластин [2]. Такой подход позволяет решить проблемы низкой теплопроводности распределенных брэгговских отражателей на основе решеточно-согласованных с InP четвертьволновых слоев в случае применения монолитной ГЭС. Конструкция кристаллов ВИЛ, изготовленных в рамках такой концепции, и технология их изготовления описаны в работах [3, 4]. Внешний вид и сечение кристаллов показаны на рис. 1. Стоит отметить, что в рамках данной работы ГЭС для формирования конечной структуры ВИЛ были реализованы исключительно в рамках технологии молекулярно-пучковой эпитаксии на предприятии ООО «Коннектор Оптикс».

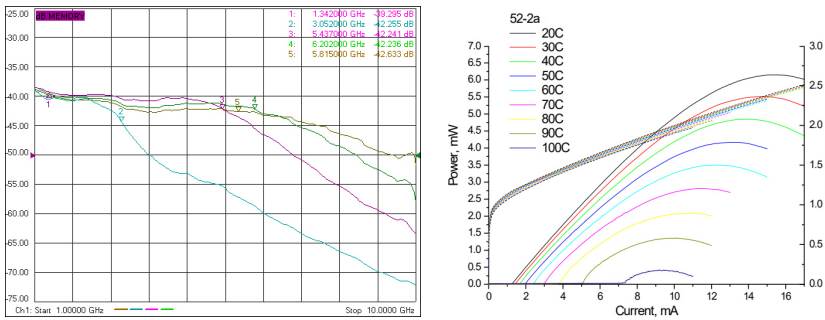
Освоенная технология позволяет изготавливать ВИЛ с целевой длиной волны в спектральном диапазоне 1280–1700 нм, что дает перспективу для применения данных ВИЛ во многих областях применений.

На рис. 2, 3 представлены характеристики ВИЛ 1300 и 1550 нм, изготавливаемых АО «ОКБ-Планета».

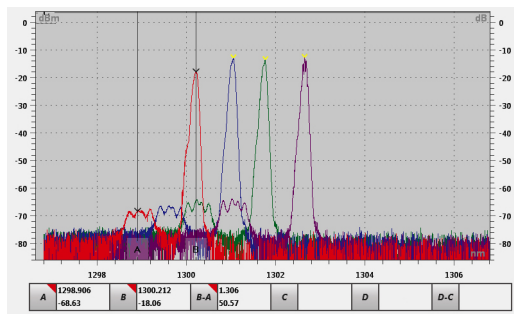


а *б*

Рис. 1. ВИЛ оптического диапазона 1300–1550: *а*) схематическое сечение кристалла ВИЛ; *б*) фотография изготовленных кристаллов ВИЛ 1300 нм (сверху), 1550 нм (снизу)



а *б*



в

Рис. 2. Характеристики полученных ВИЛ 1300 нм: частотно-модуляционная характеристика (*а*), вольт-ватт-амперная характеристика (*б*), спектральная характеристика (*г*)

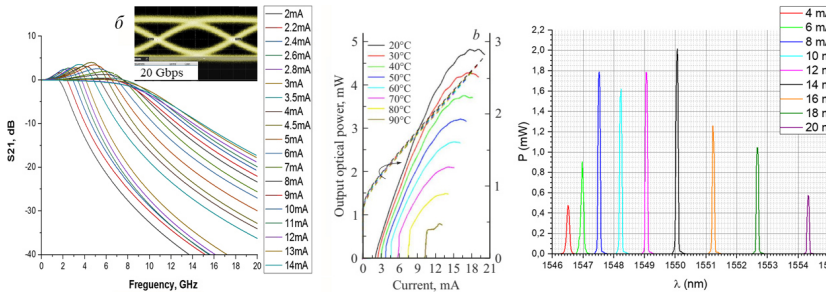


Рис. 3. Характеристики полученных ВИЛ 1550 нм: *а*) частотно-модуляционная характеристика; *б*) глазковая диаграмма при 20 Гбит/с; *в*) вольт-ватт-амперная характеристика; *г*) спектральная характеристика

Литература

1. Haglund P., Kumari S., Haglund E., Gustavsson J. S., Baets R. G., Roelkens G., Larsson A. Silicon-integrated short-wavelength VCSELs // IEEE J. Selected Topics Quantum Electron., 2017. Vol. 23. P. 1–9.
2. Sirbu A., Iakovlev V., Mereuta A., Caliman A., Suruceanu G., Kapon E. Wafer-fused heterostructures: Application to vertical cavity surface-emitting lasers emitting in the 1310 nm band // Semiconductor Science and Technology, 2011. Vol. 26. P. 014016.
3. Voropaev K. O., Seleznev B. I., Prokhorov A. Yu., Ionov A. S., Blokhin S. A. The fabrication technology of VCSELs emitting in the 1.55 μm waveband // J. Phys.: Conf. Ser., 2020. Vol. 1658. P. 012069.
4. Blokhin S., Babichev A. V. et al. // Optical Engineering, 2022. Vol. 61. № 9. P. 096109.

УДК 539.231

Генерация ТГц-излучения в тонкопленочных спинтронных слоистых структурах на основе антиферромагнетиков, полученных методом ИЛО

Николаева И. Н.[1], к. т. н., Гусев Д. С.[2], Паршина Л. С.[2], Синько А. С.[1,2], Дмитриев А. И.[3], Дмитриева М. С.[3], Конникова М. Р.[1,2], д. ф.-м. н., Новодворский О. А.[2], акад., Шкуринов А. П.[1,2]

[1] МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
[2] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
[3] Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1

Продемонстрирована возможность управления ТГц-сигналом при использовании тонких антиферромагнитных пленок NiO в качестве интерфейсного слоя для переноса и усиления спинового тока в спинтронных слоистых структурах, полученных методом импульсного лазерного осаждения.

Ключевые слова: тонкопленочные структуры; спинтроника; ТГц-излучение; импульсное лазерное осаждение.

Спинтронные ТГц-излучатели — это новые широкополосные источники терагерцевого излучения, возникшие на стыке сверхбыстрой спинтроники и терагерцевой фотоники. Для создания спинтронного ТГц-излучателя активно исследуется сверхбыстрая спиновая динамика, возбуждаемая излучением фемтосекундного лазера, в слоистых структурах на основе ферромагнитных (ФМ) материалов и немагнитных (НМ) металлов с сильной спин-орбитальной связью [1]. Эффективность ТГц-излучения сильно зависит от конструкции спинтронного излучателя и свойств материалов ФМ и НМ слоев. Использование полупроводника MoS_2 вместо НМ слоя способствует увеличению эффективности ТГц-излучателя. Сверхбыстрая спиновая инжекция из ФМ в полупроводниковый слой может находиться под влиянием межфазного барьера Шоттки, который будет увеличивать спиновую поляризацию инжектированных носителей. Более того, длина распространения спиновых токов внутри полупроводникового слоя значительно больше, чем в металлах, что также может повысить эффективность генерации ТГц-излучения. Введение промежуточного слоя между ФМ- и НМ-материалами в слоистых структурах влияет на распределение спинового тока, проходящего через дополнительный интерфейс, и ТГц-излучение [2]. Тонкий антиферромагнитный промежуточный слой, в частности NiO, усиливает спиновый ток, поступающий в НМ-слой, и ТГц-сигнал [3]. Использование промежуточного антиферромагнитного слоя NiO для контроля спиновой динамики на интерфейсах позволит решить фундаментальную проблему потерь спинового тока в традиционных структурах и создать основу для энергоэффективных спинтронных ТГц-устройств.

Импульсное лазерное осаждение является одним из самых эффективных способов создания тонких пленок толщиной в единицы нанометров, что очень важно для получения спинтронного ТГц-излучателя. Исследования слоев ФМ и НМ в зависимости от толщины показывают, что терагерцевые спиновые и зарядовые токи локализованы в пределах нескольких нанометров на границе ФМ/НМ и, таким образом, могут рассматриваться как межфазные зонды сверхбыстрой динамики заряда и спина. В методе импульсного лазерного осаждения наличие большой доли возбужденных атомов и ионов позволяет понизить температуру эпитаксиального роста, а высокая скорость зарождения зародышей благодаря высокой степени ионизации факела дает возможность получать чрезвычайно тонкие сплошные пленки.

Методом импульсного лазерного осаждения синтезированы ФМ, НМ, антиферромагнитные и полупроводниковые тонкопленочные компоненты спинтронных слоистых структур. Исследованы структурные, оптические, электрофизические свойства и морфология поверхности полученных пленок и структур в зависимости от их толщины и условий осаждения. Продемонстрирован качественный контроль роста тонких пленок MoS_2 от одного до нескольких монослоев независимо от типа подложки и состава мишени. Рентгеновские дифракционные спектры как отдельных пленок NiO, так и в составе структур демонстрируют дифракционные пики NiO (111), что подтверждает высокое кристаллическое совершенство синтезированных пленок без проведения дополнительного постростового отжига. Исследована генерация ТГц-излучения спинтронными слоистыми структурами на основе тонких пленок ферромагнетиков, немагнитных металлов, антиферромагнетиков и дихалькогенидов переходных металлов в зависимости от конфигурации, толщины и условий формирования слоев структуры при возбуждении импульсами фемтосекундного лазера.

Литература

1. Liu Y., Zeng C., Zhong J., Ding J., Wang Z. M. et al. Spintronics in two-dimensional materials // Nano-Micro Lett., 2020. Vol. 12. P. 93.
2. Scheuer L., Ruhwedel M., Karfaridis D., Vasileiadis I. G., Sokoluk D. et al. THz emission from Fe/Pt spintronic emitters with L10-FePt alloyed interface // iScience, 2022. Vol. 25. № 5. P. 104319.
3. Kanistras N., Scheuer L., Anyfantis D. I., Barnasas A., Torosyan G. et al. Magnetic properties and THz emission from Co/CoO/Pt and Ni/NiO/Pt trilayers // Nanomaterials, 2024. Vol. 14. № 2. P. 215.

УДК 535.8

Технологии фотонных интегральных схем для магистральных ВОЛС

Артемов Д. Е., Старых Д. Д., Самоделкин Л. А., Наний О. Е., Трещиков В. Н.
ООО «Т8»
107076, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1
artemov.de@t8.ru

Проведен обзор технологий интегральной фотоники, применяемых в настоящее время в магистральных волоконно-оптических системах связи.
Ключевые слова: ВОЛС; фотонные интегральные схемы.

Российская компания «Т8» с 2008 года разрабатывает и производит телекоммуникационное DWDM-оборудование мирового уровня. В настоящее время компания «Т8» производит ~10 000 систем в год (~30 % рынка).

Основным направлением развития магистральных ВОЛС по-прежнему остается увеличение их пропускной способности [1] в силу наблюдаемого и прогнозируемого роста объема трафика. Для этого ожидается внедрение оборудования DWDM с расширенным рабочим спектральным диапазоном [2] (что позволит увеличить число каналов) и увеличенной скоростью передачи сигнала по каждому оптическому каналу. Обе эти задачи решаются путем совершенствования ключевых компонентов магистральных ВОЛС — когерентных транспондеров, спектрально-селективных компонентов и оптических усилителей в составе оптоволоконного тракта [3].

В силу высоких требований к рабочей полосе и стабильности характеристик в когерентных транспондерах и трансиверах (приемо-передатчиках) массово используются компоненты на основе фотонных интегральных схем [4].

Излучатели в лазерных источниках для когерентных ВОЛС основываются на различных соединениях группы A^3B^5 в зависимости от желаемой длины волны лазерного излучения [5]. Такие излучатели используются в первую очередь в перестраиваемых лазерных сборках (ITLA) [6, 7] и лазерных диодах накачки для волоконных оптических усилителей [8, 9].

Электрооптические модуляторы в когерентных передатчиках в последнее время все чаще основываются на технологии «кремний на изоляторе» [10] из-за возможности интеграции передатчика и приемника на одном оптическом кристалле [11]. В то же время непрерывное развитие технологий обработки и формирования тонких пленок ниобата лития [12] позволяет рассматривать данный материал в качестве будущей основы для высокоскоростных электрооптических передатчиков [13, 14].

Помимо развития базовых материалов интегральной фотоники в настоящее время также ведется разработка технологий по совмещению базовых материалов [15–19], что в перспективе может создать почву для перехода к оптическим системам на едином кристалле.

Литература

1. Конышев В. А. и др. Тенденции и перспективы развития волоконно-оптических систем передачи информации // Квантовая электроника, 2022. — Т. 52. — № 12. — С. 1102–1113.
2. Трещиков В. Н. и др. Достижения и перспективы отечественных DWDM-систем связи // Фотоника, 2022. — Т. 16. — № 7, — С. 564–583.
3. Трещиков В. Н., Листвин В. Н. DWDM-системы, пятое издание. — М.: Техносфера, 2024.
4. Pathak S. Photonics integrated circuits // Nanoelectronics, 2019. Elsevier. P. 219–270.
5. Agrawal G. P., Dutta N. K. Semiconductor lasers. Springer Science & Business Media, 2013.
6. Horikawa K. et al. Development of ITLA using a full-band tunable laser // Furukawa Rev., 2009. Vol. 35 P. 1–5.
7. Yamamoto A. et al. Development of a Micro ITLA for Optical Digital Coherent Communication // Furukawa Electric Review, 2015. Vol. 46 P. 3–6.
8. Лешко А. Ю. и др. Мощные одномодовые лазерные диоды на основе квантово-размерных InGaAsP/InP-гетероструктур (λ = 1,3–1,6 мкм) // Физика и техника полупроводников, 2002. — Т. 36. — № 11. — С. 1393–1399.
9. Naji A. W. et al. Review of Erbium-doped fiber amplifier // International Journal of the Physical Sciences, 2011. Vol. 6. № 20. P. 4674–4689.
10. Doerr C., Chen L. Silicon photonics in optical coherent systems // Proceedings of the IEEE, 2018.
11. Liow T. Y. et al. Silicon modulators and germanium photodetectors on SOI: monolithic integration, compatibility, and performance optimization // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009. Vol. 16. № 1. P. 307–315.
12. Qi Y., Li Y. Integrated lithium niobate photonics // Nanophotonics, 2020. Vol. 9. № 6. P. 1287–1320.
13. Xu M. et al. Dual-polarization thin-film lithium niobate in-phase quadrature modulators for terabit-per-second transmission // Optica, 2022. Vol. 9. № 1. P. 61–62.
14. Li H. et al. 800 Gbit/s QSFP-DD transceiver based on thin-film lithium niobate photonic integrated circuit // Journal of Lightwave Technology, 2023. Vol. 41. № 11. P. 3462–3469.
15. Yu Q. et al. Heterogeneous photodiodes on silicon nitride waveguides // Optics Express, 2020. Vol. 28. № 10. P. 14824–14830.
16. Liu Y. et al. A photonic integrated circuit–based erbium-doped amplifier // Science, 2022. Vol. 376. № 6599. P. 1309–1313.
17. Churaev M. et al. A heterogeneously integrated lithium niobate-on-silicon nitride photonic platform // Nature communications, 2023. Vol. 14. № 1. P. 3499.
18. Wei C. et al. Ultra-wideband waveguide-coupled photodiodes heterogeneously integrated on a thin-film lithium niobate platform // arXiv preprint arXiv:2305.07861, 2023.
19. Xie X. et al. A 3.584 Tbps coherent receiver chip on InP-LiNbO3 wafer-level integration platform // Light: Science & Applications, 2025. Vol. 14. № 1. P. 172.

УДК 621.373.826

Фазовые шумы высококогерентных лазеров на основе технологий интегральной оптики, волоконной оптики и микрооптики

Артемов Д. Е.[1], Кондаков А. А.[1], Фомиряков Э. А.[1], Резников А. В.[1], Иванов Г. Ю.[1], Никитин С. П.[1], Наний О. Е.[1,2], Трещиков В. Н.[1]
[1] *ООО «Т8»*
107076, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1
[2] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова*
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
artemov.de@t8.ru

Разработаны конструкции и собраны образцы высококогерентных лазеров на основе технологий гибридной интеграции фотонных интегральных схем, технологий волоконной оптики и технологий микрооптики. Исследована стабильность характеристик каждого лазера и проведен анализ их различий.
Ключевые слова: высококогерентный лазер; фазовые шумы; волоконная оптика; микрооптика; фотонные интегральные схемы.

Одним из ключевых элементов интерферометрических систем (когерентные рефлектометры, лидары, эталоны частоты) является высококогерентный лазерный источник, для производства которого используются технологии объемной микрооптики [1], волоконной оптики [2, 3] и интегральной оптики [4]. Высококогерентные лазеры на основе этих технологий характеризуются различными фазовыми шумами [5]. Нами разработаны конструкции и произведены образцы лазерных источников на основе трех технологий [6] (волоконный лазер F-LAS, лазер на основе элементов микрооптики E-LAS и интегральный лазер I-LAS), для которых на рис. 2 приведены графики спектральной плотности мощности шума частоты, измеренной в схеме автогетеродинирования [7] (рис. 1).

В рамках доклада будут рассмотрены ключевые отличия шумовых характеристик разработанных высококогерентных лазерных источников.

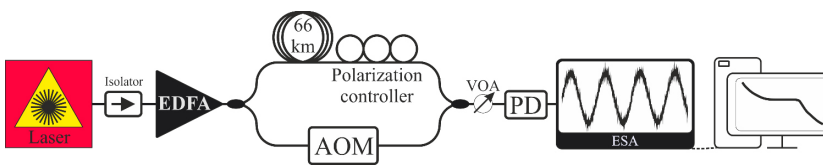


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения характеристик фазовых шумов: EDFA — эрбиевый волоконный усилитель, AOM — акустооптический модулятор, VOA — перестраиваемый оптический аттенюатор, PD — фотодиод, ESA — электрический анализатор спектра

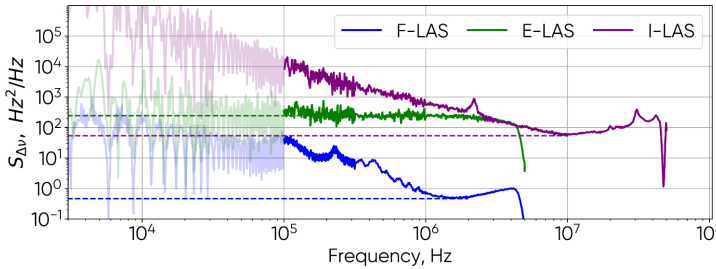


Рис. 2. Спектральная плотность мощности шума частоты трех разработанных образцов высококогерентных лазерных источников. Пунктирными линиями отмечены характерные уровни белого шума

Литература

1. Ding K. et al. Research on narrow linewidth external cavity semiconductor lasers // Crystals, 2022. Vol. 12. № 7. P. 956.
2. Dai Z. et al. Stable high power narrow linewidth single frequency fiber laser using a FBG FP etalon and a fiber saturable absorber // 2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2010. P. 1–4.
3. Skvortsov M. I. et al. Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique // Laser Physics Letters, 2018. Vol. 15. № 3. P. 035103.
4. Epping J. P. et al. Hybrid integrated silicon nitride lasers // Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXVIII, 2020. Vol. 11274. P. 203–212.
5. Bengalskii D. M. et al. Characterization of Laser Frequency Stability by Using Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry // Photonics. MDPI, 2023. Vol. 10. № 11. P. 1234.
6. https://t8.ru/ru/research-center/development-and-technologies/narrowband-laser.
7. Fomiryakov E. et al. New approach to laser characterization using delayed self-heterodyne interferometry // Journal of Lightwave Technology, 2021. Vol. 39. № 15. P. 5191–5196.

УДК 621.3.049

Оптические межсоединения для ЦОД на базе технологии microLED

Дорофеев В. П.
НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
dorofeev.vp@phystech.edu

В докладе представлен краткий обзор технологий оптических межсоединений в ЦОД. Подробно рассмотрена технологии LightBundle компании Avicena на базе microLED.

Ключевые слова: оптические межсоединения; microLED; высокопроизводительные вычисления.

Использование оптики для интерчиповых межсоединений — активно развивающаяся область [1]. Ведущие поставщики высокопроизводительных вычислительных систем активно внедряют решения на основе оптики.

Значимым событием стало создание компанией Huawei вычислительного кластера CloudMatrix384, в котором 384 чипа Ascend 910C были объединены по топологии «каждый с каждым» при помощи оптических интерконнектов. Данное решение почти в два раза превзошло по производительности вычислительный кластер NVL72 компании NVIDIA [2]. На базе CloudMatrix384 было создано специализированное решение для LLM CloudMatrix-Infer [3]. Сравнение характеристик вычислительных кластеров приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение NVL72 и CloudMatrix384

Metric	NVIDIA NVL72	Huawei CloudMatrix 384	Advantage
BF16 Compute	180 PFLOPS	300 PFLOPS	Huawei: **1.7**× ↑
HBM Capacity	13.8 TB	49.2 TB	Huawei: **3.6**× ↑
Memory Bandwidth	576 TB/s	1,229 TB/s	Huawei: **2.1**× ↑
Interconnect Bandwidth	518.4 Tb/s (scale-up)	1,075.2 Tb/s (scale-up)	Huawei: **2.1**× ↑
Power Consumption	145 kW	560 kW	NVIDIA: **3.9**× ↓

Разработанная компанией Avicena технология межсоединений LightBundle на базе microLED предлагает более энергоэффективное решение [4]. Общая архитектура технологии LightBundle приведена на рис. 1.

Основные компоненты технологии:

- LightBundle Chiplet: центральный процессор, связанный с хост-микросхемой (GPU, CPU, ...);
- LED Array: microLED на основе GaN, действующие как оптические трансиверы;
- PD Array: преобразует входящие оптические сигналы обратно в электрический ток;
- Lens Array: фокусирует свет;

- Fiber Bundle: передает параллельные оптические потоки;
- Ferrule: механический соединитель, фиксирующий концы жгута волокон;
- Silicon Interposer: обеспечивает высокоплотную электрическую разводку между чиплетом LightBundle и хост-микросхемой;
- D2D Interface: межпроцессорное соединение «кристалл — кристалл»;
- Frame: обеспечивает термическую и структурную стабильность во время работы.

Компания TSMC объявила о сотрудничестве с Avicena по производству межсоединений на базе microLED [5], что делает высоковероятным выход технологии на промышленный уровень.

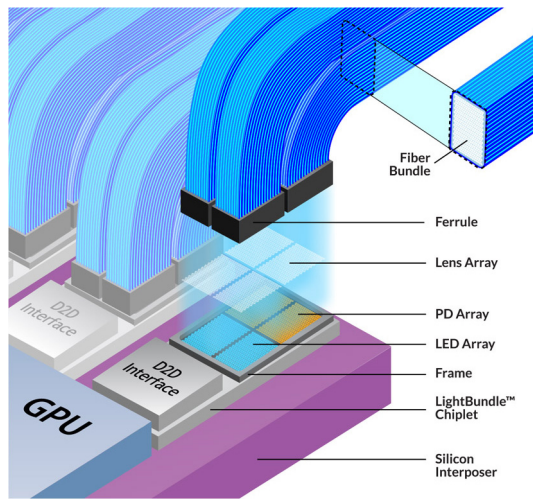


Рис. 1. Архитектура технологии LightBundle

Публикация выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме FNEF-2024-0001.

Литература

1. Lu Y., Gu H. Flexible and scalable optical interconnects for data centers: Trends and challenges // IEEE Communications Magazine, 2019. Vol. 57. № 10. P. 27–33.
2. Youvan D. Huawei's Ascend 910D and CloudMatrix 384: Redefining the Global AI Hardware Race // ResearchGate Preprint, 2025.
3. Zuo P. et al. Serving Large Language Models on Huawei CloudMatrix384 // arXiv preprint arXiv:2506.12708, 2025.
4. Pezeshki B. et al. LED-array based optical interconnects for chip-to-chip communications with integrated CMOS drivers, detectors, and circuitry // Optical Interconnects XXII. SPIE, 2022. Vol. 12007 P. 31–34.
5. TSMC Bets on Unorthodox Optical Tech // IEEE Spectrum, 2025. URL: https://spectrum.ieee.org/tsmc-microled-optical-interconnects.

УДК 681.7-1/-9

Тонкопленочные оптические покрытия, получаемые по технологии молекулярного наслаивания

Кольцов Ю. С., Меш М. В., Волков Д. Ю., Карцева Т. Ю.
АО «СКТБ Кольцова»
198095, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, 29, лит. О
volkov.d@koltsov-kb.ru

В докладе рассматриваются преимущества метода молекулярного наслаивания (ALD) для получения многослойных оптических покрытий различного назначения.

Ключевые слова: молекулярное наслаивание; оптические покрытия; тонкопленочные технологии.

В настоящее время оптические покрытия широко используются в фотонике. Нанесение таких покрытий на оптические элементы позволяет изменить их спектральные характеристики отражения и пропускания, повысить стойкость к внешним воздействующим факторам и надежность. Оптические покрытия получают различными методами, преимущественно физическим осаждением: термическое испарение, магнетронное распыление, электронно-лучевое испарение.

В настоящей работе рассматриваются возможность и преимущества получения оптических покрытий, в частности многослойных, методом молекулярного наслаивания. Молекулярное наслаивание — это метод получения высококачественных тонких пленок различных химических веществ, основанный на циклическом процессе последовательного наращивания монослоев заданного химического состава и строения на поверхности твердофазной матрицы за счет реализации химических реакций между функциональными группами твердого тела и подводимыми к ним реагентами в условиях максимального удаления от равновесия. При этом процесс носит самоорганизующийся характер, так как после вступления в реакцию всех доступных функциональных групп на поверхности подложки формируется не более одного мономолекулярного слоя. Метод позволяет получать пленки с минимальным количеством дефектов и высокой однородностью по толщине. Метод МН был разработан сотрудниками Ленинградского технологического института в 60-е годы XX века.

Рассмотрены различные материалы для покрытий, примеры получаемых структур. На основе собственных результатов и результатов других исследователей проведено сравнение покрытий, наносимых различными методами.

Показано, что метод молекулярного наслаивания является перспективной технологией для создания оптических покрытий за счет возможности точного контроля толщин слоев, низкой дефектности получаемых пленок и возможности покрытия микрообъектов и поверхностей сложной формы (микролинзы, оптоволокно).

Литература

1. Малыгин А.А., Малков А.А., Соснов Е.А. Структурно-размерные эффекты и их применение в системах «ядро-нанооболочка», синтезированных методом молекулярного наслаивания // Известия Академии наук. Серия химическая 11, 2017. — С. 1939–1962
2. Yaowei Wei, Hao Liu, Ouyang Sheng, Zhichao Liu, Songlin Chen, and Liming Yang. Laser damage properties of TiO_2/Al_2O_3 thin films grown by atomic layer deposition // Appl. Opt., 2011. Vol. 50. P. 4720–4727.

УДК 608.4

Метод обнаружения препятствий на пути движения наземного транспортного средства

Попова И. В., Шулекин С. Ф., Афонин А. В.
АО «ГИРООПТИКА»
194044, г. Санкт-Петербург, ул. Чугунная, 14
shulekin@gyro.ru

Описан метод на основе оптической локации для обнаружения препятствий на пути движения наземного транспортного средства (ТС). Метод может быть полезен для построения систем предотвращения столкновений с препятствиями при движении ТС. Цель метода — повышение безопасности движения ТС.

Ключевые слова: обнаружение препятствий; наземное транспортное средство; предотвращение столкновений; безопасность движения.

Метод был разработан для контроля дистанции между автономным подвижным устройством и препятствием [1]. В дальнейшем метод был доработан [2] для применения в системах повышения безопасности при эксплуатации наземных транспортных средств (ТС), как беспилотных, так и с водителем. По этому методу можно строить системы по предотвращению столкновений ТС с препятствиями и другими участниками движения на пути движения ТС. В настоящее время получили распространение различные средства предупреждения водителя о потенциально опасных моментах движения ТС, построенные на основе локаторов, с помощью которых определяется расстояние от ТС до препятствия. Локаторы могут быть ультразвукового, оптического или радиодиапазонов. Недостатком ультразвуковых локаторов являются их малая дальность обнаружения препятствия, составляющая единицы метров. Основное предназначение этого класса приборов — помощь водителю при парковке ТС. Недостатком оптических локационных систем является трудности измерения дистанции в диапазоне от единиц до десятков метров. В этом диапазоне дальностей необходимо использовать лазерные системы засветки пространства на пути следования ТС с длительностью оптических импульсов в единицы наносекунд и технически сложную схему измерения короткого временного интервала между посылкой локационного светового импульса и приходом отраженного от препятствия сигнала. Локационные системы радиодиапазона не имеют необходимой точности определения дальности до препятствия на малых дистанциях.

В предлагаемом методе перечисленные выше недостатки сведены к минимуму. Это достигается введением в оптический дальномер дополнительного фотоприемного канала. Суть метода поясняется на рис. 1.

Дальномер состоит из импульсного источника света (1), который облучает пространство в направлении движения ТС, двух фотоприемных каналов 2, 3 и блока сравнения амплитуд, сигналов в фотоприемных каналах 4. Фотоприемники 2 и 3 имеют идентичные параметры и поля зрения. Диаграммы направленности фотоприемников пересекают ось движения ТС, пересекаясь между собой на расстоянии С от ТС. Расстояние от корпуса ТС и точки пересечения осей фотоприемников С является минимальным с точки зрения предотвращения столкновения,

его замеряет дальномер предлагаемой конструкции. При приближении ТС к препятствию отраженный сигнал попадает в поле зрения фотоприемника 3 (расстояние А), где преобразуется в электрический сигнал. Сигнал с фотоприемника 3 поступает в блок сравнения амплитуд сигналов фотоприемных каналов блока 4. При дальнейшем сближении ТС с препятствием отраженное излучение попадает в фотоприемник 2 (расстояние В), продолжая оставаться в поле зрения фотоприемника 3. При дальнейшем сближении ТС с препятствием наступает момент (расстояние С), когда амплитуды сигналов с фотоприемника 2 и фотоприемника 3, становятся равны. Равенство амплитуд сигналов фиксируется в блоке сравнения амплитуд сигналов, после чего блок вырабатывает сигнал «ТРЕВОГА». Это расстояние и является безопасным расстоянием от ТС до препятствия, на котором можно избежать столкновения ТС с препятствием. Одновременная работа двумя фотоприемными каналами по одной области препятствия и сравнение амплитуд отраженных сигналов в каналах позволяют:

- исключить зависимость определения дистанции от амплитуды отраженного от объекта сигнала, обусловленное коэффициентом отражения от его поверхности, что позволяет повысить точность измерения дистанции;
- снизить требования по частотным характеристикам фотоприемного тракта и длительности лазерного импульса.

Это, в свою очередь, существенно упрощает конструкцию и удешевляет стоимость устройств, работающих на этом методе.

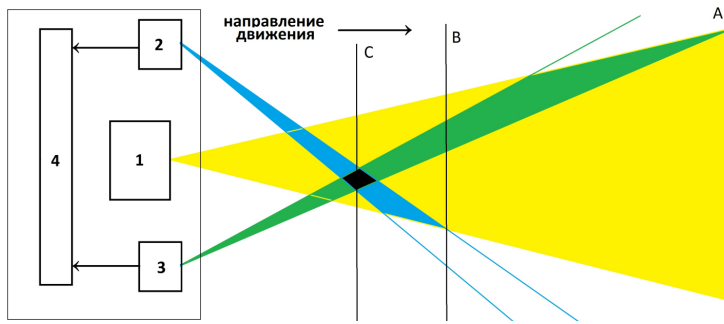


Рис. 1. Дальномер с двумя фотоприемными каналами

Литература

1. Попова И. В., Афонин А. В., Шулекин С. Ф. Патент на полезную модель RU 220 878 U1 от 09.10.2023 г.
2. Попова И. В., Афонин А. В., Шулекин С. Ф. Патент на полезную модель RU 235 100 U1 от 20.06.2025 г.

Адаптация нейронных сетей для вычисления на фотонных ячейках умножения с накоплением

Щепетов Д. С.[1], к. т. н., Седунов С. М.[1], Пятибратов К. Н.[2], Хмелев Е. Д.[1]
[1] ПАО «Софтлайн»
119021, г. Москва, ул. Льва Толстого, 5, стр. 1
dshchepetov@synth-cad.tech
[2] Сколковский институт науки и технологий
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

Исследованы методы адаптации нейронных сетей к вычислению на фотонных ячейках умножения с накоплением, проведена характеризация ячеек и разработана соответствующая им нейросетевая модель; показано, что с помощью дообучения можно компенсировать влияние платформы вычислителя и получить качество работы нейросетевого алгоритма, сравнимое с исходным.
Ключевые слова: фотонные интегральные схемы; ячейки умножения с накоплением; адаптация нейросетей под фотонные платформы.

На сегодняшний день нейросетевые (НС) решения являются стандартом для реализации алгоритмов машинного обучения (МО). Существующие НС-решения требуют специализированных архитектур вычислителей, например NVidia GB102 (B100), и изготавливаются по современным технологическим нормам. Уже сейчас из-за большого энергопотребления и латентности вычислений значительная часть решений неприменима в робототехнике и на носимых устройствах. Более того, развитие кремниевой электроники ограничено предельным размером канала транзистора (0,5–1,5 нм), который может быть достигнут уже в 2029 году. Это делает задачу поиска новых платформ для вычисления НС и способов адаптации НС к этим платформам крайне актуальной.

Использование фотонной платформы, а именно фотонных ячеек умножения с накоплением (ФЯ-УСН) [1], для организации вычислений НС позволяет получить существенно лучшие характеристики в части задержки (latency) и энергопотребления, чем для полупроводниковой электроники. Однако фотонные вычисления имеют низкую (аналог 6–8 бит) точность и специфический набор шумов. Поэтому существующие архитектуры НС без адаптации неработоспособны.

Было отмечено, что проблемы с адаптацией НС под ФЯ-УСН и под аналоговые платформы схожи, поэтому была адаптирована библиотека [2]. Этот подход предполагает следующие стадии:

- характеризация ФЯ-УСН;
- определение шумовых параметров ФЯ-УСН;
- построение PyTorch-модели слоя, использующего ФЯ-УСН;
- дообучение нейросети с использованием предложенной модели слоя;
- проверка выполнения целевых метрик.

В качестве тестового объекта была выбрана ФЯ-УСН пространственного светового модулятора фазы, для которой была проведена характеризация с использованием коммерческого решателя Ansys HFSS. Коэффициенты модели шумов [3] определены с помощью моделирования в пакете QuantCad. Тестирование

производилось на наборах данных Cifar-10 и Coupled Electric Drive (CED [4]). С учетом модели шумов был разработан PyTorch-слой для моделирования вычисления НС на ФЯ-УСН, проведено тестирование НС с этим слоем и дообучение. Было показано, что значительное начальное увеличение тестовой ошибки на означенных наборах данных полностью компенсируется дообучением.

Таким образом, адаптация распространенных НС под ФЯ-УСН возможна практически без потери качества. Реализация библиотеки адаптации НС под фотонные платформы, аналогичной [2], будет продолжаться в рамках разработки ПО для фотонного кластера ПАО «Софтлайн».

Литература

1. Zhou H. et al. Photonic matrix multiplication lights up photonic accelerator and beyond // Light: Science & Applications, 2022. Vol. 11. № 1. P. 30.
2. Le Gallo M. et al. Using the IBM analog in-memory hardware acceleration kit for neural network training and inference // APL Machine Learning, 2023. Vol. 1. № 4.
3. Nahmias M.A. et al. Photonic multiply-accumulate operations for neural networks // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019. Vol. 26. № 1. P. 1–18.
4. Nonlinear Benchmark Repository [Электронный ресурс]. URL: https://www.nonlinearbenchmark.org (дата обращения: 05.06.2025).

УДК 547.279.2, 621.315.592.9, 547.876

Компоненты литографических материалов и инновационные продукты для органической и гибридной электроники

Кузнецов И. Е.[1], Заморецков Д. С.[1], Агапитова М. М.[1,2], Живчикова А. Н.[1,2], Сидельцев М. Е.[1], Новиков А. С.[1], Теплякова М. М.[2], Аккуратов А. В.[1]

[1] Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
akkuratow@yandex.ru
[2] Сколковский институт науки и технологий
143026, г. Москва, ул. Нобеля, 3

Предложены способы экономичного синтеза фотогенераторов кислоты, используемых для выпуска химически усиленных фоторезистов 193 и 248 нм. Разработаны инновационные органические полупроводниковые материалы для создания устройств тонкопленочной электроники — органических и перовскитных солнечных батарей. Гибридные фотопреобразователи на основе полученных дырочно-транспортных материалов демонстрируют эффективность преобразования света до 20%.

Ключевые слова: фоторезист; фотолитография; фотогенератор кислоты; перовскитная электроника; органическая электроника; полупроводниковые материалы.

Введение

Актуальной проблемой на сегодняшний день является дефицит качественных материалов для производства микроэлектроники. В оптической литографии востребованы фоторезисты (ФР), включающие в свой состав фотогенератор кислоты (ФГК) и полимер на основе производных каркасных углеводородов [1]. Методы получения большинства ФГК и мономеров основаны на многостадийном синтезе [2], что ограничивает доступность ФР. Наряду с традиционной электроникой большой интерес вызывает гибридная и органическая электроника, особенно устройства на основе перовскитоподобных материалов. В работе представлены достижения лаборатории фоточувствительных и электроактивных материалов ФИЦ ПХФ и МХ РАН по разработке простых подходов к получению ключевых компонентов для разработки российских фоторезистов и инновационных материалов в целях создания эффективной органической и гибридной электроники.

В ходе работы оптимизированы условия для получения перспективных фотогенераторов кислоты на основе нафталинового и антраценового ядра (рис. 1).

Преимущество предложенных подходов заключается в использовании недорогих и доступных реагентов. Сокращено количество отходов, что важно при переходе к реакторному синтезу. ФГК 1 был апробирован для изготовления фоторезиста, тестирование которого в модельном литографическом процессе показало удовлетворительные результаты.

В дизайне новых сопряженных соединений был предложен подход, когда в молекулярный скелет основной цепи вводятся три(изопропил)силильные группы, которые улучшают зарядово-транспортные характеристики соединений и их сродство к полярной поверхности активного слоя солнечных батарей. Благодаря

этому положительные носители зарядов эффективно экстрагируются молекулами PBPh-ff и DPMes-TT из перовскита и с меньшими энергетическими потерями собираются на металлическом электроде. Это в свою очередь позволяет повысить КПД преобразования света вплоть до 20 %.

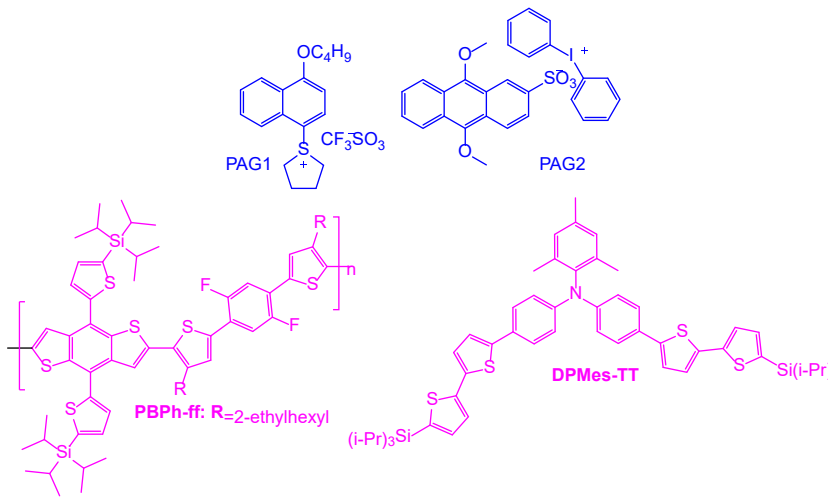


Рис. 1. Молекулярные формулы ФГК 1 и 2, полимера PBPh-ff и молекулы DPMes-TT, обеспечивающих высокие КПД перовскитных солнечных батарей

Заключение

Усовершенствованы химические цепочки получения двух перспективных фотогенераторов кислоты, что является значимым результатом для перехода к выпуску соединений в крупных партиях. Разработаны новые органические полупроводниковые материалы для перовскитных солнечных батарей. Оптоэлектронные, зарядово-транспортные и физико-химические свойства соединений обеспечили хорошие электрические характеристики солнечных батарей. Ожидается, что дальнейшая модификация структуры полупроводниковых материалов позволит преодолеть 20%-ю планку КПД и улучшить стабильность устройств.

Литература

1. Quero J. M., Perdigones F., Aracil C. Microfabrication technologies used for creating smart devices for industrial applications // Smart Sensors and MEMS: Intelligent Devices and Microsystems for Industrial Applications (Sec. Ed.) Ed. by Nihtianov S. and Luque A, 2018. P. 291–311.
2. Hossain Md. D, Ikegami Y., Kitamura T. Reaction of Arenes with Iodine in the Presence of Potassium Peroxodisulfate in Trifluoroacetic Acid. Direct and Simple Synthesis of Diaryliodonium Triflates // J. Org. Chem., 2006. Vol. 71. P. 9903–9905.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (125032604426-5).

УДК 678.744.3

Опыт ФИЦ ПХФ и МХ РАН в разработке материалов для микроэлектроники

Акад. Алдошин С. М., д. х. н. Бадамшина Э. Р., к. х. н. Малков Г. В.
Федеральный исследовательский центр
проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1

Проведена разработка компонентов отечественных материалов, предназначенных для использования в техпроцессе литографии. На основе результатов расшифровки импортных образцов-аналогов созданы рецептуры отечественных материалов.

Ключевые слова: литография; антиотражающие покрытия; резисты; фотогенераторы кислоты; ПАВ; материалы.

ФИЦ ПХФ и МХ РАН работает в области импортозамещения материалов, необходимых для производства микроэлектроники с 2019 года, когда по инициативе академиков Г. Я. Красникова и С. М. Алдошина и чл.-корр. РАН Б. Г. Грибова был создан эффективно действующий до настоящего времени консорциум, состоящий из представителей науки (ФИЦ ПХФ и МХ РАН), прикладного НИИ (АО «НИОПИК»), производственников (АО «ПОЛИКЕТОН»), АО «Микрон» и АО «НИИМЭ», играющего координирующую роль.

Производство полупроводниковых интегральных микросхем (ИС) включает в себя до 200 технологических операций, разделенных на технологические процессы оксидирования, фотолитографии, диффузии, эпитаксии, ионного легирования и др. Одним из наиболее важных является фотолитографический процесс формирования на функциональных поверхностях подложек для ИС рельефных покрытий (топологических элементов). Работа нашего коллектива сконцентрирована на создании и исследовании материалов для литографии.

Целью проведенной работы ФИЦ ПХФ и МХ РАН было создание технологии синтеза компонентов материалов для литографии: полимеров для полимерных пленкообразующих композиций (антиотражающих покрытий, фото- и электронно-лучевых резистов), фотогенераторов кислоты, ПАВ, включающей разработку и изготовление технологической оснастки для синтеза и соответствующей документации, наработку экспериментальных и опытных образцов и партий, их тестирование, проведение сравнительного анализа составов импортных аналогов и разрабатываемых материалов.

На основании обзора литературы и патентных поисков были определены составы многокомпонентных сополимеров, которые могли бы выполнить функцию пленкообразования в композициях. Была проведена экспериментальная работа по получению этих со-, тер- и квадрополимеров различного состава, их комплексной охарактеризации методами ГПХ, ДСК, ТГА, вискозиметрии, ИК-, УФ- и ЯМР-спектроскопии. Была отработана методика расчета среднего мономерного состава синтезированных полимеров. Установлены зависимости состава полимеров, молекулярной массы и полидисперсности, вязкости и поведения в растворах от состава реакционной смеси, а также оценены кинетические особенности процессов сополимеризации, в итоге были предложены оптимальные по скорости и выходу

условия проведения процесса полимеризации смесей мономеров. После этого был отработан способ очистки растворов сополимеров от примесей металлов, показавший необходимое минимальное соотношение между временем взаимодействия и соотношением количества раствора полимера с количеством катионита. Разработана, изготовлена и апробирована система фильтрации растворов полимеров под давлением, показавшая свою эффективность в уменьшении концентрации взвешенных частиц до заданного количества. В результате были наработаны партии полимеров необходимого состава в количестве, достаточном для изготовления на их основе опытных образцов литографических материалов.

Полученные образцы материалов были использованы для приготовления композиций, которые затем были успешно протестированы на технологических линиях производственных предприятий.

УДК 667.6

Разработка полимерной основы для i-line-фоторезистов

Пугачёва Т. А.[1], Кузнецова Н. А.[2], Мухаметшин С. В.[2], Малков Г. В.[1], Курбатов В. Г.[1]

[1] Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
[2] Научно-исследовательский институт полупродуктов и красителей
141701, г. Долгопрудный, Лихачевский проезд, 7
kurbatovvg@list.ru

Разработана технология синтеза полимерной основы для резистов i-line. Подобраны условия, позволяющие регулировать молекулярно-массовые характеристики олигомеров, использующихся для получения фоторезистов. Изучено влияние различных факторов на устойчивость пленки к проявителю.

Ключевые слова: крезол-формальдегидные олигомеры; полимерная основа; фоторезисты; молекулярная масса; проявитель.

Фоторезисты (ФР) являются важным продуктом для производства интегральных микросхем, а также в других областях промышленности для создания изображений на различных подложках. ФР классифицируются по длине волны экспонирующего света и типу изображения (позитивное или негативное). Несмотря на развитие фотолитографических процессов и появление продуктов с рабочей длиной волны 248 и 193 нм, материалы с рабочей длиной волны 365 нм являются одними из наиболее крупнотоннажных и востребованных в микроэлектронике. Чаще всего в качестве полимерной основы фоторезистов для рабочей длины волны 365 нм использовались крезол-формальдегидные олигомеры, сырье для которых на сегодняшний день не производится на территории РФ. Ввиду этого актуальной задачей является разработка полимерной основы для ФР с рабочей длиной волны 365 нм из доступного сырья.

Целью данной работы является разработка полимерной основы для ФР с рабочей длиной волны 365 нм.

Исходя из анализа состава промышленно выпускаемых образцов и литературных данных была разработана технология синтеза крезол-формальдегидных олигомеров для использования их в качестве полимерной основы фоторезистов i-line. В качестве исходных соединений фенольного ряда были использованы м-, о-, п-крезол, 3,4-, 2,5-, 3,5-ксиленолы и их смеси в различных соотношениях.

Получен набор крезол-формальдегидных олигомеров различного строения, составы которых подтверждены спектральными методами, а молекулярно-массовые характеристики определены с помощью гель-проникающей хроматографии. Показано, что содержание катализатора влияет на ход синтеза и молекулярно-массовые характеристики по-разному, в зависимости от реакционной способности используемых мономеров. Увеличение содержания формальдегида в реакционной смеси приводит к увеличению молекулярной массы, что соответствует классическим закономерностям реакции поликонденсации (при соотношении крезолы: формальдегид = 1 : 0,75 M_w = 5940, а при соотношении фенол : формальдегид 1 : 0,9 M_w = 11600).

Введение в состав мономеров 2,5-ксиленола и 3,4-ксиленола привело к тому, что при неизменном количестве катализатора и времени синтеза получены полимеры с молекулярной массой почти в два раза ниже, чем у продуктов, где в качестве мономеров использовались различные смеси крезолов. Дальнейшее увеличение количества ксиленолов в мономерной смеси приводило к снижению молекулярной массы. При этом использование 3,5-ксиленола, который отличается большей функциональностью и существенно большей реакционной способностью, ввиду согласованной ориентации всех заместителей при прочих равных условиях по времени синтеза и количеству катализатора приводил к получению полимера с существенно более высокой молекулярной массой.

Определена стойкость полученных полимерных основ в проявителях. Показано, что стойкость к проявителю для полученных смол определялась как молекулярно-массовыми характеристиками, так и составом мономерных звеньев, входящих в состав полимерной основы.

Работа выполнена по теме государственного задания № FFSG-2024-0017 с использованием оборудования аналитического центра коллективного пользования ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

УДК 621.3.049.77:541.64

Разработка и исследование электронно-лучевых резистов на основе сополимеров ММА-МАК

Бороздина А. А.[1], Малков Г. В.[1], Князев М. А.[2], Рощупкин Д. В.[2], Курбатов В. Г.[1]

[1] Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
gaff.alice@yandex.ru
[2] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

Разработан отечественный аналог резиста для ЭЛЛ на основе сополимера ММА-МАК. Проведены анализ зарубежного образца, синтез аналога, литографические испытания. Резист показал сопоставимую чувствительность. Установлено влияние содержания МАК на чувствительность резиста. Для составов с повышенным содержанием МАК необходим подбор условий сушки.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография; электронный резист; материалы для микроэлектроники; сополимер ММА-МАК.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания отечественного аналога электронно-лучевого резиста в связи с приостановкой поставок импортных материалов двойного назначения, критичных для производства СВЧ-компонентов микроэлектроники.

Был проведен анализ зарубежного позитивного электронно-лучевого резиста. Определен его состав, количественное соотношение компонентов. Установлено, что полимерной основой является сополимер метилметакрилата (ММА) и метакриловой кислоты (МАК) с содержанием МАК 8,5% мас. Проведен подбор условий синтеза целевого сополимера ММА-МАК (8,5% мас. МАК). Продолжительность синтеза составила 8 часов, что обеспечило конверсию мономеров свыше 90%. Среди исследованных растворителей синтеза (ацетон, диоксан, метилизобутилкетон, этиллактат) оптимальным выбран диоксан. Оптимизирован выбор осадителя для выделения синтезированного сополимера. В результате синтезирован сополимер ММА-МАК (8,5% мас. МАК), который по характеристикам сопоставим с зарубежным аналогом. Дополнительно получен ряд сополимеров с различным содержанием МАК.

На основе синтезированных сополимеров приготовлены резистные композиции в этиллактате. Проведены литографические испытания методом электронно-лучевого экспонирования. Получены кривые дозового клина для определения чувствительности резистов. Установлено, что чувствительность резистов возрастает с увеличением массовой доли МАК в составе сополимера. Однако для композиций с повышенным содержанием МАК наблюдалось нежелательное частичное растворение неэкспонированных участков пленки в используемом проявителе. Для минимизации этого явления и обеспечения стабильности неэкспонированного слоя необходим подбор оптимальных условий предварительной сушки (температура,

продолжительность), при которых в сополимере будут образовываться циклические структуры, способствующие снижению растворимости.

Работа выполнена по теме Государственного задания № FFSG-2024-0017 с использованием оборудования Аналитического центра коллективного пользования ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

УДК 53.083.98

Дозовые характеристики электронно-лучевых резистов на основе сополимеров метилметакрилата и метакриловой кислоты

Князев М. А.[1], Бороздина А. А.[2], Курбатов В. Г.[2]
[1] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
maleksak@iptm.ru
[2] Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1

Получены дозовые характеристики электронно-лучевых резистов на основе сополимеров метилметакрилата и метакриловой кислоты для разных проявителей. Проанализировано, в каких случаях применения тот или иной проявитель является оптимальным для проявления исследуемых резистов.
Ключевые слова: электронно-лучевая литография; сополимер ММА-МАК; дозовые характеристики; тонкие пленки.

Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) применяется в микроэлектронной отрасли при создании наноразмерных элементов. Электронно-лучевые резисты являются ключевым материалом для ЭЛЛ. Поэтому разработка новых российских резистов и их исследование необходимы для развития ЭЛЛ.

Чувствительность и контрастность являются ключевыми характеристиками резистов для ЭЛЛ. Следовательно, для новых резистов необходимо определить эти характеристики. Кроме того, чувствительность и контрастность резиста зависят не только от его состава, но и от состава проявителя, условий проявления, условий сушки резиста, энергии электронов и типа подложки.

В рамках исследования новых резистов для ЭЛЛ на основе сополимеров метилметакрилата и метакриловой кислоты были получены дозовые кривые резистов в проявителях, часто используемых при проявлении такого типа резистов. Из дозовых кривых были получены чувствительность и контрастность исследуемых резистов. Анализ полученных результатов позволил установить, для каких случаев применение того или иного резиста и проявителя для него является оптимальным.

Моделирование траекторий электронов с учетом образования каскадов и дискретности взаимодействия

Свинцов А. А., Зайцев С. И.
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

В электронной литографии важно понимание пространственного распределения поглощенной дозы (плотности поглощенной энергии), которая определяет скорость растворения резиста после облучения. Такие важные характеристики, как шероховатость края, также определяются пространственными флутуациями поглощенной дозы. Для моделирования, распределения и флуктуаций поглощенной дозы применяется исключительно метод Монте-Карло.

МК-моделирование имеет довольно долгую историю, и многие элементы моделирования хорошо отработаны и проверены. Так, эти схемы моделирования хорошо описывают вероятность обратного отражения электрона в зависимости от атомного номера мишени и энергии электрона.

Исторически наиболее распространенным является подход, использующий приближение непрерывных потерь. В нем рассматриваются взаимодействия электронов только с ядрами вещества, а взаимодействие с электронами учитывается в приближении непрерывных потерь как усредненная сила торможения.

В настоящей работе мы развиваем более точный подход, в котором рассматриваются дискретные взаимодействия как с ядрами, так и с электронами. Вторым важным и принципиальным отличием является прослеживание движения траекторий вторичных электронов, которые могу уносить энергию от места взаимодействия, передавать ее в виде поглощенной дозы далеко от места соударения электронов. Таким образом, в моделировании рассматривается не отдельная траектория первичного электрона, а целый каскад ветвящихся траекторий. В процессе моделирования используются знания о сечениях взаимодействия электронов с ядрами и другими электронами.

Наиболее яркие отличия наблюдаются в спектрах прошедших, рис. 1, и отраженных электронов, рис. 2 и 3. На рис. 1 видно, что в спектре прошедших через тонкую пластинку электронов в случае приближения непрерывных потерь наблюдается очень узкий пик с вертикальным правым краем. Учет дискретного взаимодействия нашего подхода показывает широкий пик, хорошо совпадающий с экспериментальными измерениями. Столь же значительными являются различия в спектрах отраженных электронов, моделирование в приближении непрерывных потерь предсказывает конечный скачок в области первичной энергии, в то время как наши результаты показывают яркую сингулярность в этой области, рис. 3.

Наблюдаются также отличия в пространственном распределении поглощенной энергии, коэффициенте отражения в параметрах функции близости. Эти отличия подробно обсуждаются.

Мы полагаем, что развитый подход позволит более точно предсказывать практически очень важные параметры функции близости.

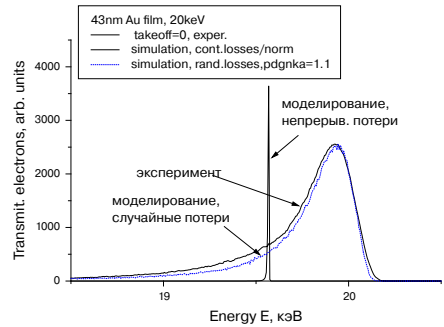


Рис. 1

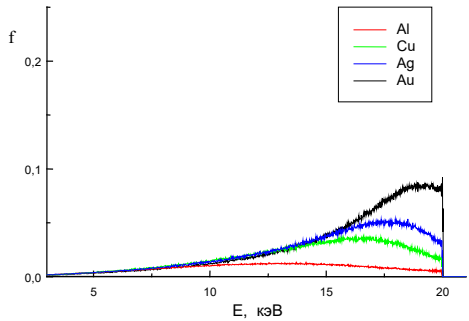


Рис. 2

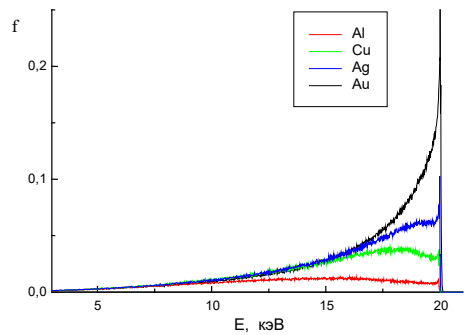


Рис. 3

УДК 66.095.26-922.2

Технология производства ПАВ для безметального проявителя

Тарасов А. Е.[1], к. х. н., Курбатов В. Г.[1], к. х. н., Пугачева Т. А.[1], Подвальная Ю. В.[1], к. х. н., Ершов А. А.[1], Варламов Д. А.[2], Сенченко Н. С.[2], Бадамшина Э. Р.[1], д. х. н.

[1] Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
atarasov@icp.ac.ru
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Разработана технология получения ПАВ для безметального проявителя, оптимизированы условия получения сополимера окиси этилена с окисью пропилена катионной полимеризацией и разработаны комплекты конструкторской и технологической документации на установку и процесс получения ПАВ для безметального проявителя.

Ключевые слова: поверхностно-активное вещество; безметальный проявитель; сополимер окиси этилена с окисью пропилена; катионная полимеризация.

Поверхностно-активное вещество является важной частью безметального проявителя. Небольшие добавки ПАВ в безметальный проявитель (водный раствор тетраметиламмоний гидроксида) улучшают смачиваемость гидрофобной поверхности фоторезиста, увеличивают скорость проявления, способствуют получению дорожек с лучшими показателями по стабильности размеров, воспроизводимости, что в итоге приводит к уменьшению брака на производстве, т.е. улучшается технологичность процесса. Для изготовления микросхем с топологией менее 300 нм требуется использование реагентов со степенью чистоты до 50 ppb ($5 \cdot 10^{-6}$ масс.%) по содержанию каждой из более десяти контролируемых примесей катионов и с регламентированным содержанием частиц размером >50 нм.

Разработана технология получения неионогенного поверхностно-активного вещества для безметального проявителя, представляющего собой сополимер окиси этилена с окисью пропилена. Проведены исследования по подбору оптимального количества катализатора, сокатализатора и соотношения компонентов для получения олигомерного ПАВ с необходимыми свойствами (структура, молекулярно-массовые параметры, поверхностное натяжение). Увеличение концентрации катализатора при сохранении постоянными концентраций остальных реагентов приводит к закономерному снижению молекулярной массы образующихся сополимеров. Увеличение концентрации катализатора до соотношения катализатор/сокатализатор, равного единице, приводит к снижению содержания окиси этилена примерно в три раза, а при дальнейшем увеличении концентрации катализатора содержание окиси этилена в сополимере снижается слабо. Увеличение концентрации катализатора в 50 раз приводит к снижению среднечисловой молекулярной массы примерно в три раза. Таким образом, видно, что варьирование концентрации катализатора — это эффективный способ изменения молекулярной массы получаемого продукта. Увеличение концентрации сокатализатора при сохранении постоянными концентраций остальных реагентов приводит к постепенному повышению

значений молекулярной массы образующихся сополимеров. Изменение температуры полимеризации и скорости дозирования мономеров не приводит к значительному изменению молекулярной массы получаемого продукта, однако изменением этих параметров можно регулировать выход как окиси этилена, так и окиси пропилена в результате синтеза. Показано, что увеличение содержания окиси этилена в составе ПАВ приводит к снижению как статического, так и динамического поверхностного натяжения безметального проявителя. Разработаны комплекты конструкторской и технологической документации на установку и процесс получения ПАВ для безметального проявителя.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-91-01015.

УДК 678.744.3:544.022:[543.4+543.5]

Разработка и серийное освоение производства материалов для корпусирования микросхем в многовыводные полимерные корпуса

Пахомов К. С.[1], Малков Г. В.[1], Курбатов В. Г.[1], Пугачёва Т. А.[1], Бадамшина Э. Р.[1], Прудскова Т. Н.[2], Вертянов Д. В.[3]

[1] Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
pahotovks@icp.ac.ru
[2] Институт пластмасс имени Г. С. Петрова
111024, г. Москва, Перовский проезд, 35
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Проведены работы по созданию отечественных материалов, предназначенных для корпусирования микросхем с применением технологии flip-chip. На основе результатов анализа составов импортных образцов созданы рецептуры отечественных материалов для корпусирования микросхем в многовыводные полимерные корпуса. Созданы опытные производства для серийного изготовления материалов для корпусирования микросхем.

Ключевые слова: корпусирование микросхем; многовыводные полимерные корпуса; flip-chip; underfill; серийное производство материалов.

Разработку рецептур материалов для корпусирования в многовыводные полимерные корпуса проводили на основании результатов анализа импортных образцов-аналогов и на основании литературных данных по представленной тематике.

В рамках выполнения второго этапа СЧ ОКР «Т-корпус-П-Герм» были получены следующие результаты: разработаны рецептуры материалов З-001, Г-001, С-001, О-001, показаны возможности регулирования свойств данных материалов за счет изменения их составов, что потенциально может позволить использовать разработанные материалы в качестве базы под корпуса другого вида, разработаны КД и ТД, изготовлены и испытаны экспериментальные и опытные образцы, а также опытные партии материалов З-001, Г-001, С-001, О-001.

Серийное освоение производства материалов для корпусирования микросхем завершается в ходе выполняемого в данный момент третьего этапа СЧ ОКР. В настоящее время введены в эксплуатацию четыре опытно-промышленных участка по производству новых отечественных материалов, также разработанные материалы проходят апробацию на ведущих предприятиях — производителях электроники и вычислительной техники.

УДК 537.312.7

Исследование процесса плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения тонких пленок оксида тантала для применения их в качестве активных слоев элементов хранения резистивной памяти

Ганыкина Е. А.[1,2], Резванов А. А.[1,2], Зюзин С. С.[1,2], Резник А. А.[1,2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
eganykina@niime.ru

В настоящей работе исследуется процесс атомно-слоевого осаждения оксида тантала, а также рассматривается возможность применения данных тонких пленок в качестве активных слоев элементов хранения резистивной энергонезависимой памяти.

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение; резистивная память; элемент хранения; оксид тантала; резистивное переключение.

В настоящее время перспективным направлением развития микро- и наноэлектроники является разработка и внедрение новых видов энергонезависимой памяти, которые позволяют повысить скорость доступа к данным, тем самым увеличивая эффективность обработки информации. Среди альтернативных видов энергонезависимой памяти, основанных на новых принципах (PCRAM, FeRAM, MRAM), резистивная память ReRAM вызывает наибольший интерес благодаря хорошей масштабируемости, низкому энергопотреблению, высокой скорости работы, низким напряжениям переключения, а также возможности реализации многоуровневых состояний [1].

Несмотря на разнообразие материалов, которые могут быть использованы в качестве активного слоя элемента хранения резистивной памяти, наибольший интерес для внедрения в КМОП-технологию представляют элементы хранения на основе оксидов переходных металлов. В частности, проводятся тщательные исследования структур на основе оксидов гафния и тантала, так как данные оксиды обладают существенным преимуществом — являясь high-к-диэлектриками, они уже применяются в КМОП-технологии в качестве подзатворных оксидов полевых транзисторов [2].

Для того чтобы иметь возможность конкурировать с Vertical-NAND-памятью в части плотности размещения ячеек памяти на кристалле, необходимо использовать аналогичную технологию Vertical-ReRAM, где изолятор расположен между несколькими горизонтальными электродами и общим вертикальным электродом [3]. Данная технология позволяет обеспечить максимально плотное размещение ячеек памяти ввиду того, что эффективная плотность ячейки составляет $4F^2/n$, где F — разрешающая способность литографии, а n — количество горизонтальных электродов [4]. Однако технология Vertical-ReRAM требует высокой конформности осаждаемых металлических и диэлектрических слоев на подложки с высоким

аспектным соотношением, что может быть успешно реализовано с помощью такого метода, как атомно-слоевое осаждение (АСО), который базируется на использовании последовательных поверхностных реакций, имеющих механизм самоограничения. Процесс АСО состоит в общем случае из повторяющихся циклов химических реакций двух прекурсоров — металлоорганического (носителя целевого элемента вещества) и окислителя/восстановителя (пары воды, кислород, водород и др.), адсорбированных на подложку последовательно. Также стоит выделить такую разновидность процесса, как плазмостимулированное атомно-слоевое осаждение. Во втором полуцикле процесса создается разряд в окисляющем/восстанавливающем газе (O_2, H_2 и др.) [5]. Реакционная способность повышается за счет создания химически более активных ионов и радикалов, что позволяет снизить температуру процесса примерно на 100–200 °C [5].

В данной работе продемонстрирована оптимизация процесса атомно-слоевого осаждения оксида тантала для применения в качестве активного слоя в элементах хранения резистивной памяти. В качестве прекурсоров использовались этоксид тантала $Ta(OC_2H_5)_5$ и плазма кислорода. С помощью методов рентгеновской дифракции и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии исследовались кристаллическая структура и элементный состав осаждаемых пленок. Электрофизические параметры образцов элементов хранения на основе оксида тантала исследовались на зондовой станции с использованием анализатора полупроводниковых приборов. Все изготовленные образцы элементов хранения продемонстрировали наличие стабильного резистивного переключения. Также показаны токовые изображения поверхности пленки оксида тантала после формирования отдельных проводящих филаментов в разных состояниях, полученные при помощи атомно-силового микроскопа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06003, https://rscf.ru/project/23-91-06003.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4 (177). — С. 60–64. EDN RRMEYN.
2. Zahoor F. et al. Resistive random access memory: introduction to device mechanism, materials and application to neuromorphic computing // Discover Nano, 2023. Vol. 18. № 1. 36 p. DOI: 10.1186/s11671-023-03775-y.
3. Baek I. G., Park C. J., Ju H. et al. Realization of vertical resistive memory (VRRAM) using cost effective 3D process // 2011 International Electron Devices Meeting (IEDM). Washington, DC, USA, 2011. P. 31.8.1–31.8.4. DOI: 10.1109/IEDM.2011.6131654.
4. Hudec B. et al. 3D resistive RAM cell design for high-density storage class memory—a review // Science China Information Sciences, 2016. Vol. 59. № 6. P. 1–21.
5. Seidel T. E. Atomic layer deposition // Handbook of semiconductor manufacturing technology. CRC Press, 2017 P. 14-1–14-37. DOI: 10.1201/9781420017663-14.

УДК 004.3'142

Оптимизация микроструктуры и свойств глубокопрокаленного глинозема для металлокерамических корпусов интегральных схем

Егошин В. А.[1,2,3], Жуков И. А.[2], Ахметгалиев Р. Ш.[1,2], Ермолаев Е. В.[1,3], Шугаепов Ш. Н.[1,2,3]

[1] АО «Завод полупроводниковых приборов»
424003, г. Йошкар-Ола, ул. Суворова, 2б
vaegoshin@zpp12.ru, rshahmetgaliev@zpp12.ru, ermolaev_ev@zpp12.ru, shnshugaepov@zpp12.ru
[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36
[3] Марийский государственный университет
424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1

Представлены результаты исследований по оптимизации микроструктуры и свойств глинозема глубокой прокалки при различных способах его изготовления. Выделены важнейшие свойства глинозема, отражающиеся на технологии и характеристиках МКК для ИС.

Ключевые слова: глинозем; керамика; микроструктура; гранулометрический состав; измельчаемость; усадка; МКК; ИС.

Использование глинозема в виде глубокопрокаленного (кальцинированного) материала — ключевой метод получения высококачественной керамики для электронной техники по бесспековой технологии. Его преимущества связаны с высокой химической стабильностью, низким содержанием примесей (щелочей ≤ 0,1 %) и контролируемой величиной усадки, что критично для достижения требуемых механических и электрофизических характеристик керамики.

Дальнейшее развитие производства корпусов для микросборок, включая многослойные металлокерамические корпуса (МКК) для интегральных схем (ИС) с уменьшенным шагом выводов и решения для flip-chip-монтажа, требует точного управления микроструктурой материала. Это обусловлено следующими факторами:

- гранулометрический состав (90–95 % монокристаллов размером 0–6 мкм, максимум до 12 мкм) определяет плотность упаковки частиц и равномерность усадки керамического материала, что влияет на повторяемость геометрии и позиционирование топологических элементов в объеме корпусов микросхем;
- анизотропия усадки керамической ленты (различие в продольном и поперечном направлениях) провоцирует остаточные напряжения, снижающие механическую прочность МКК для ИС;.
- совместимость (температурная согласованность) с металлизацией: для формирования проводящих слоев используются вольфрамовые пасты, чьи адгезионные и реологические свойства зависят от размера частиц порошка. При этом согласованность гранулометрии вольфрама и глинозема минимизирует деформацию плат при совместном спекании.

В работе проведены исследования методов синтеза α-глинозема с варьированием:

- минерализаторов (фторид алюминия, борная кислота);
- исходных форм глинозема (гидроксид алюминия, γ-глинозем с 20–45% α-фазы);
- способов очистки от щелочей (промывка водой, варьирование борной кислоты, слабой H_2SO_4).

Установлено, что введение фторида алюминия на стадии гидроксида не обеспечивает требуемого распределения частиц, а снижение активности исходного материала (например, за счет увеличения доли γ-фазы) позволяет снизить рост кристаллов и достичь заданной усадки.

Результаты работы включают рекомендации по получению мелкозернистого низкощелочного глинозема и критерии выбора его параметров для технической керамики МКК для ИС.

Литература

1. Егошин В.А., Шугаепов Ш.Н., Ахметгалиев Р.Ш., Ермолаев Е.В., Мазуренко А.А., Чернышева Ю.А. Применение отечественного глинозема глубокой прокалки для производства металлокерамических корпусов // Электроника НТБ, 2024. — № 10 (00241). — С. 86–89.
2. Шугаепов Ш.Н., Ермолаев Е.В., Егошин В.А., Ахметгалиев Р.Ш., Мазуренко А.А. Технологическое оборудование и материалы, применяемые для изготовления металлокерамических корпусов // Электроника НТБ, 2022. — № 5 (00216). — С. 1–4.
3. Шугаепов Ш.Н., Ермолаев Е.В., Егошин В.А. Особенности производства многовыводных корпусов с использованием тонких керамических лент // Электроника НТБ, 2022. — № 6 (00214). — С. 142–144.

УДК 53.08

Применение синхротронного излучения для диагностики акустоэлектронных устройств

Рощупкин Д. В., Фахртдинов Р. Р., Иржак Д. В., Пундиков К. С.
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
rochtch@iptm.ru

Современные источники синхротронного излучения третьего поколения и выше обладают пространственно-временной когерентностью рентгеновского излучения и экстремально малой расходимостью, что позволяет проводить уникальные исследования в области рентгеновской микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. В докладе рассмотрены вопросы исследования процесса распространения акустических волновых полей в пьезоэлектрических кристаллах, включая процесс визуализации поверхностных акустических волн на поверхности кристаллов с использованием эффекта Тальбота.

Ключевые слова: рентгеновская дифрактометрия; рентгеновская топография; эффект Тальбота.

Развитие современной акустоэлектроники требует поиска новых пьезоэлектрических материалов с высокими значениями пьезомодулей и методов диагностики распространения акустических волновых полей в твердых телах. Наиболее перспективными методами исследования являются методы рентгеновской дифрактометрии [1] и рентгеновской топографии [2], которые позволяют не только определять амплитуды акустических волн, затухание волновых процессов и снос потока акустической энергии, но и визуализировать акустические волновые поля на поверхности кристаллов в режиме реального времени.

Для проведения исследований могут быть использованы как лабораторные, так и синхротронные источники рентгеновского излучения, но последние обладают рядом преимуществ, связанных с высокой интенсивностью и экстремально малой расходимостью излучения. Пространственно-временная когерентность излучения на синхротронных источниках позволяет визуализировать акустические волновые поля в кристаллах в режим реального времени, визуализировать дифракционные явления в акустических пучках, исследовать искривление волновых фронтов и снос потока акустической энергии, то есть отклонение направления распространения акустической энергии от направления волнового вектора акустических волн.

На рис. 1 представлены кривые качания кристалла $La_3Ga_5SiO_{14}$, промодулированного поверхностной акустической волной с длиной волны $\Lambda = 4$ мкм. Возбуждение ПАВ с амплитудой h~8 Å приводит к появлению дифракционных сателлитов на кривой качания.

Метод рентгеновской топографии в условиях эффекта Тальбота позволяет визуализировать ПАВ на поверхности кристалла. На рис. 2 приведено изображение бегущей ПАВ с длиной волны $\Lambda = 10$ мкм на поверхности кристалла $La_3Ga_5SiO_{14}$. На поверхности можно наблюдать как изображение ПАВ, так и полосы роста, характерные для кристаллов, выращенных методом Чохральского.

Таким образом, в докладе представлены возможности рентгеновских методов для исследования процесса распространения акустических волновых полей в пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических кристаллах.

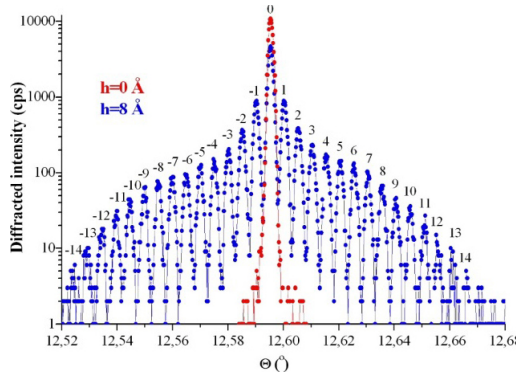


Рис. 1. Кривые качания кристалла $La_3Ga_5SiO_{14}$, длина волны ПАВ Λ = 4 мкм, длина волны рентгеновского излучения λ = 1,1 Å, амплитуда ПАВ *h* ~ 8 Å

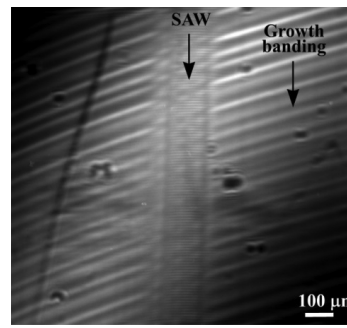


Рис. 2. Рентгеновская топограмма изображения бегущей ПАВ с длиной волны Λ = 10 мкм на поверхности кристалла $La_3Ga_5SiO_{14}$

Исследования выполнены в рамках проекта Российского научного фонда № 25-72-20016.

Литература

1. Roshchupkin D., Ortega L., Plotitcyna O., Zizak I., Vadilonga S., Irzhak D., Emelin E. X-ray diffraction by surface acoustic waves // J. Appl. Cryst., 2021. Vol. 54. P. 180–194.
2. Roshchupkin D., Ortega L., Snigirev A., Snigireva I. X-ray imaging of the surface acoustic wave propagation in $La_3Ga_5SiO_{14}$ crystal // Appl. Phys. Lett., 2013. Vol. 103. P. 154101.

УДК 52-624

Диагностика материалов и устройств микроэлектроники с использованием синхротронного излучения

Солдатов А. В.
Южный федеральный университет
344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Андрея Сладкова, 178/24
soldatov@sfedu.ru

Проведен обзор применения современных источников синхротронного излучения для диагностики атомной и электронной структур материалов микроэлектроники, в том числе их преобразования в режиме operando. Особое внимание уделяется возможностям прецизионного определения параметров наноразмерной локальной атомной и электронной структур материалов в режиме реального времени.

Ключевые слова: operando-диагностика; материалы для микроэлектроники; наноразмерная локальная атомная структура; синхротронное излучение; технологии искусственного интеллекта.

Обзор применения источников синхротронного излучения показывает высокую перспективность использования высокоинтенсивного рентгеновского излучения, генерируемого на таких источниках для экспресс -диагностики материалов и устройств микроэлектроники, в том числе в режиме *operando.* Особое внимание уделяется возможностям прецизионного определения параметров наноразмерной локальной атомной и электронной структур материалов. Основным вектором развития использования установок мегасайенс в области применения синхротронного излучения является переход от исследования статических интегральных характеристик материалов к прецизионной диагностике динамики изменения локальных параметров материалов в ходе процессов, в том числе при реальных технологических условиях и с высоким временным разрешением. Это приводит, с одной стороны, к существенному усложнению проведения измерений, в частности к необходимости управления сразу несколькими независимыми параметрами эксперимента. С другой стороны, в ходе эксперимента генерируются большие данные, для анализа которых зачастую требуется несколько месяцев интенсивной работы с привлечением суперкомпьютерных вычислений.

Представлено детальное описание применения методов машинного обучения для анализа больших данных в спектроскопии рентгеновского поглощения в области предкрая, в области XANES и в области EXAFS для определения параметров наноразмерной атомной структуры материалов на основе теоретического анализа экспериментальных спектров. Особенность такого подхода заключается в том, что он позволяет с высокой точностью (до 0,002 нанометра) определять не только межатомные расстояния (функцию радиального распределения), но и угловое распределение атомов, то есть важнейшие параметры 3D локальной атомной структуры любых материалов, включая возможность применения для изучения зависящих от времени процессов и, в частности, исследование изменения параметров наноразмерной атомной структуры материалов в ходе химических реакции (в том числе изучать характеристики интермедиатов, возникающих в ходе химических реакций) или изучать преобразование материалов в ходе процессов фотовозбуждения.

Кроме того, методика позволяет в режиме реального времени контролировать такие параметры электронной структуры материалов, как зарядовое состояние атомов (ионов), распределение плотности электронных состояний в зоне проводимости.

Реализация такой методики имеет важное значение не только для расширения фундаментальных знаний, но и для последующего практического использования. На основе разработанного прецизионного подхода к диагностике материалов можно создать метрологическую методику определения параметров наноразмерной локальной атомной и электронной структур материалов с анализом больших данных в режиме реального времени, в том числе в ходе технологически важных процессов (operando-режим) и практически без участия человека. Разработка методики рентгеноспектральной нанометрологии крайне важна для решения задач ускоренного создания новых перспективных материалов и реинжиниринга стратегически важных материалов, необходимых для обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации.

Работа выполнена в рамках программы «Приоритет-2030» ЮФУ.

УДК 621.315.592:546.28

Применение вакуумного ультрафиолетового излучения в микро- и наноэлектронике

Бокарев В. П., д. т. н., Красников Г. Я., академик РАН
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
vbokarev@niime.ru

Рассмотрены области применения вакуумного ультрафиолетового излучения (ВУФ) в технологических процессах изготовления СБИС и для изготовления технологического и аналитического оборудования, а также основные причины, препятствующие внедрению таких технологических процессов.
Ключевые слова: вакуумное ультрафиолетовое излучение (ВУФ); технология СБИС.

К вакуумному ультрафиолетовому излучению (ВУФ) относится излучение с длиной волны менее 200 нм. Излучение с такой длиной волны активно поглощается атмосферой и большинством материалов. Оно является химически активным, в этом заключаются его недостатки и преимущества одновременно. Необходимость изоляции источника ВУФ-излучения от атмосферы требует наличия вакуумированной рабочей камеры, как и большинство технологического оборудования для проведения операций нанесения и травления технологических слоев, но это гарантирует отсутствие загрязнений, привносимых из окружающей среды.

Ранее были изучены процессы травления слоев SiO_2 и Si в C_2F_6 с азотом и в SF_6 с аргоном под воздействием ВУФ-излучения [1]. Эксперименты проводились на разработанной установке [2]. Показано, что скорость травления SiO_2 в смеси газов N_2–C_2F_6 составляла 6 нм/мин при комнатной температуре и давлении в камере, близком к атмосферному [3]. Скорость травления SiO_2 в смеси газов Ar–SF_6 оказалась выше и составляла 34 нм/мин при травлении через Al-маску и 15 нм/мин при травлении через фоторезистовую маску. Скорость травления Si в смеси газов Ar–SF_6 через фоторезистовую маску составляла 13 нм/мин [4].

Так как процесс фотолитического травления SiO_2 в смеси газов Ar–SF_6 происходит при комнатной температуре с заметной скоростью (34 нм/мин), то он может быть использован для очистки поверхности пластин от остаточного окисла в едином вакуумном цикле, например, с процессом вскрытия контактных окон. Кроме того, данный процесс может быть использован для прецизионного травления поликремниевых затворов и подзатворного диэлектрика при изготовлении приборов с повышенной воспроизводимостью электрофизических параметров, а также для глубокой очистки поверхности перед проведением технологических операций эпитаксии и нанесения технологических слоев в едином с ними вакуумном цикле [5].

Также была исследована селективность процессов фотолитического травления основных материалов микроэлектроники: Si_3N_4, Si и SiO_2. Обнаружено, что, изменяя параметры процесса ВУФ-травления, можно проводить селективное травление SiO_2 по отношению к Si_3N_4. Причем селективность такого процесса превышает 200:1. Кроме того, под воздействием ВУФ-излучения можно проводить селективное травление Si по отношению к Si_3N_4 с селективностью, превышающей 100:1 [6].

В отличие от традиционных процессов ПХТ, исследованные фотолитические процессы имеют обратную им селективность. Так, для РИТ в гексафториде серы характерны более высокие скорости травления кремния и нитрида кремния по сравнению со скоростью травления двуокиси кремния. Более того, до недавнего времени РИТ поликремния в смесях на основе гексафторида серы являлся базовым процессом сухого травления поликремния.

Процессы фотолитического травления под воздействием ВУФ-излучения могут быть использованы в технологии микроэлектроники и микромеханики для травления тонких слоев Si и SiO_2 с высокой прецизионностью и селективностью по отношению к нитриду кремния, а также для проведения процессов атомарно-слоевого нанесения и травления материалов микро- и наноэлектроники [6, 7].

Источники ВУФ-излучения необходимы для изготовления спектрофотометров ВУФ-диапазона, отсутствие которых в РФ приводит к невозможности разработки оптических систем для фотолитографических установок ВУФ-диапазона на основе новых материалов, а также для контроля объектива и материала фотошаблонов степперов на 193 нм. Кроме того, на основе разработанных в настоящее время источников ВУФ-излучения можно создать современную фотолитографическую установку с длиной волны 158 нм при замене кварцевой оптики на оптику из монокристаллов MgF_2, CaF_2 или LiF. Но для создания такого фотолитографического оборудования и производства шаблонов, прозрачных в ВУФ-диапазоне, необходимо наладить изготовление высокочистых монокристаллов фторидов щелочноземельных металлов и лития.

Литература

1. Бокарев В. П., Красников Г. Я. Использование ультрафиолетового излучения в технологии микро- и наноэлектроники // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 3 (163). — С. 58–62.
2. Бокарев В. П., Вахрушев М. Ю. Гизатуллин М. Р., Гребеньков В. С., Попов А. П. Установка для обработки излучением вакуумного ультрафиолета (115–165 нм) // РАН. Приборы и техника эксперимента, 1993. — № 3. — С. 8.
3. Бокарев В. П., Гущин О. П., Зайцев Н. А. Глубокий ультрафиолет и его применение в субмикронной технологии // Сборник трудов 1-й научно-технической конференции АООТ «НИИМЭ и МИКРОН». — М.:МИКРОН-ПРИНТ, 1998. — С. 189–191.
4. Бокарев В. П., Гущин О. П., Макаревич В. Н., Просий А. Д., Трусов А. А., Волк Ч. П. Исследование процесса травления Si и SiO_2 во фторсодержащих газах под воздействием ВУФ излучения // Микросистемная техника, 2001. — № 11. — С. 29–31.
5. Бокарев В. П., Гущин О. П., Макаревич В. Н., Трусов А. А., Волк Ч. П. Использование вакуумного ультрафиолетового излучения в нанотехнологии // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Микро- и наноэлектроника 2001». — Т. 2. — Звенигород, 2001. — С. 1–56.
6. Бокарев В. П., Гущин О. П., Трусов А. А. Высокоселективное по отношению к Si_3N_4 травление Si и SiO_2 под воздействием ВУФ излучения // Сборник трудов 5й научно-технической конференции АООТ «НИИМЭ-МИКРОН». — М.: МИКРОН-2002. — С. 71–72.
7. Бокарев В. П., Гущин О. П., Трусов А. А. Способ фотолитического селективного травления двуокиси кремния / Патент России № 2257641 от 29.05.2003 г.

УДК 532.64

Динамический краевой угол как мера смачиваемости материалов

Лоскутов В. В.
Марийский государственный университет
424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1
val_losk@rambler.ru

Проведен анализ процесса смачивания поверхностей пастами сослоения для МКК ИС. Получена зависимость краевого угла от времени. Предложено уравнение, описывающее динамику краевого угла. Показано, что метод позволяет получить значения параметров, которые являются значимыми для описания свойств пасты сослоения.

Ключевые слова: краевой угол; смачивание; паста сослоения; металлокерамический корпус.

После помещения капли жидкости на поверхность происходит ее растекание, в ходе которого изменяются скорость движения линии контакта капли, ее форма и краевой угол смачивания. Эти динамические параметры играют очень важную роль в целом ряде технологий, как, например, нанесение упрочняющих покрытий поливом, окунание, полиграфическая печать, процессы смазки и пропитки.

В данной работе рассматриваются процессы смачивания различных поверхностей трехкомпонентным раствором, состоящим из производных целлюлозы, растворителя и пластификатора. Подобные растворы используются в качестве пасты сослоения для многослойных металлокерамических корпусов для интегральных микросхем. В качестве подложки были использованы поверхности стекла, алюминия и необожженной керамики. Для начальных сравнительных характеристик были выбраны два раствора, используемые в качестве пасты сослоения: оригинал импортного производства и отечественный аналог.

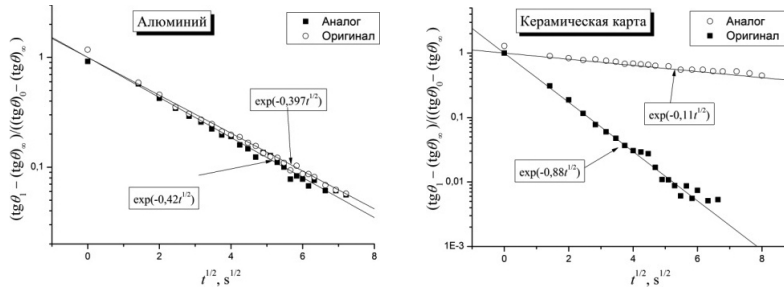
На первом этапе были проведены измерения коэффициента поверхностного натяжения, плотности и вязкости, которые показали практически идентичные значения измеренных величин для оригинала и аналога. Однако качественный анализ растекания растворов по поверхности керамической ленты, в частности анализ кроющей способности, показал существенное различие во взаимодействии раствора с поверхностью материала.

Анализ поведения капли проводился с помощью видеосъемки с последующим кадрированием. Измеряемой величиной являлся краевой угол θ, который определялся полуугловым методом. Для зависимости значения краевого угла θ от времени t было получено эмпирическое уравнение

$$\theta(t) = \theta_0 \exp(-\alpha\sqrt{t}) + \theta_\infty ,$$

где θ_0 — начальный краевой угол(при $t = 0$), θ_∞ — равновесный краевой угол, значение которого достигается при больших временах (при $t \to \infty$) и α — некоторый эмпирический параметр взаимодействия, физический смысл которого требует дальнейших исследований. Таким образом, зависимость $\theta(t)$ может быть линеаризована в координатах $\left\{\ln(\theta(t)); \sqrt{t}\right\}$, что показано на рисунке, который явно демонстрирует разницу в поведении паст сослоения на поверхности алюминия (*а*) и необожженной

керамики (*б*). Т.е. можно заключить, что значимыми параметрами, определяющими функциональные свойства пасты сослоения на поверхности конкретного материала, являются параметр взаимодействия α и равновесный краевой угол θ_∞.



а *б*

Рис. 1. Нормированное значение зависимости значения краевого угла от времени для оригинальной пасты сослоения и ее аналога на поверхности алюминия (*а*) и необожженной керамики (*б*)

УДК 53.087.04: 621.793.1: 546.1/681

Силовые эпитаксиальные структуры 4H-SiC диаметром до 150 мм

Артюшенко М. Н.[1], Федотов С. Д.[1], Стаценко В. Н.[1], Яковлев Е. В.[2], Смирновский А. А.[2], Базаревский Д. С.[2]

[1] АО «Эпиэл»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 2

info@epiel.ru

[2] ООО «Софт-Импакт»

194044, г. Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский просп., 64Е

В настоящей работе представлены результаты отечественной разработки базовой технологии роста 4H-SiC на подложках диаметром до 150 мм с высокой степенью однородности легирования и толщины автоэпитаксиального слоя. В качестве подложек были использованы пластины 4H-SiC N-типа ориентацией (0001) со смещением оси на 4° в направлении (11$\bar{2}$0). Отработаны технологические подходы химического газофазного осаждения силовых эпитаксиальных структур 4H-SiC для дискретных приборов с пробивным напряжением более 1200 В. Методами контактной CV-профилометрии и ИК-фурье-спектроскопии были проведены измерения параметров качества опытных образцов. Согласно полученным данным, неоднородность легирования не превышала 8% и толщины 5% по площади, что соответствует требованиям, предъявляемым к силовым эпитаксиальным структурам 4H-SiC мирового уровня.

Ключевые слова: газофазная эпитаксия; ГФЭ; карбид кремния; 4H-SiC; SiC; диоды Шоттки; DMOSFET; MOSFET.

В условиях глобальной экономической нестабильности и мировой политической конъюнктуры одной из наиболее перспективных задач для укрепления технологического суверенитета России в области микроэлектроники является разработка отечественных технологий производства эпитаксиальных структур на основе карбида кремния (4H-SiC).

Карбид кремния — материал силовой электроники, получивший широкое распространение по всему миру. Нарастающий интерес к этому материалу в России обусловлен возможностью создания на его основе высокоэффективных дискретных силовых приборов: DMOSFET с низкими потерями проводимости [1–2], PIN-диодов с высокой скоростью восстановления [3] и диодов Шоттки с минимальными обратными токами [4]. Такие устройства демонстрируют высокие скорости переключения (до 1 МГц) и напряжение пробоя до 15 кВ [5]. Мировой рынок SiC показывает стабильный рост на 30% ежегодно, достигнув $1,8 млрд в 2023 году [6]. Развитие отечественных эпитаксиальных технологий на основе 4H-SiC в перспективе послужит катализатором для полной локализации производства силовой электроники, создания конкурентоспособных продуктов на ее основе, а также для улучшения и развития энергоэффективной инфраструктуры Российской Федерации.

Получение качественных автоэпитаксиальных структур SiC является сложной технической задачей. Ярко выраженное явление полиморфизма (политипизма) кристалла карбида кремния, гомогенное разложение кремниевых прекурсоров,

образование застойного слоя, образование адсорбирующих примесь депозитов в камере реактора и другие технологические проблемы, сопровождающие процесс формирования 4H-SiC, оказывают прямое влияние на качество получаемых слоев. Относительно невысокая скорость роста слоя увеличивает себестоимость процесса производства, что сдерживает разработку и внедрение новых электронных устройств.

В АО «Эпиэл» были разработаны базовые технологические режимы, позволяющие получить скорость роста эпитаксиального слоя 4H-SiC около 50 мкм/час. В данном случае продолжительность стандартного процессе изготовления силовой структуры 4H-SiC не превышает 1,5 ч. Согласно полученным данным, неоднородность легирования не превышала 8% (CV-профилометрия) и толщины 5% (FTIR) по площади, что соответствует требованиям, предъявляемым к силовым эпитаксиальным структурам 4H-SiC мирового уровня. Среднеквадратичная шероховатость поверхности выращенных слоев не превышала 0,3 нм. Плотность киллер-дефектов, измеренная на оптической сканирующей системе AK Optics 3500, составила менее 1 $см^{-2}$.

Литература

1. Kimoto T. Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices, and applications. Singapore: Wiley, 2014. 550 p.
2. Baliga B.J. Silicon carbide power devices. Singapore: World Scientific, 2005. 468 p.
3. Lendenmann H. et al. High-power PiN diodes in 4H-SiC // Materials Science Forum, 2018. Vol. 924. P. 887–890.
4. She X. et al. Design and demonstration of 1.2 kV SiC Schottky diodes // IEEE Transactions on Electron Devices, 2020. Vol. 67. № 3. P. 1124–1131.
5. Agarwal A. et al. 10 kV, 5A 4H-SiC power DMOSFETs // Journal of Electronic Materials, 2021. Vol. 50. № 4. P. 2530–2537.
6. MarketsandMarkets. SiC power electronics market report 2023. URL: https://www.marketsandmarkets.com (дата обращения: 15.05.2025).

УДК 538.975

Влияние размерных факторов на свойства ультратонких металлических пленок, полученных методом магнетронного напылении, для серийного производства МЭМС

Божко С. А.[1], к. т. н., Темирова Т. И.[1], Иванова О. К.[1,2]
[1] ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
sergey.bozhko@mapperllc.ru
[2] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Исследованы структура, фазовое состояние и морфология ультратонких пленок, полученных методом магнетронного осаждения толщиной менее 100 нм. Методами высокоразрешающей электронной микроскопии и спектрометрии описано поведение пленок при окислении и отжигах в области порогового значения толщины.

Ключевые слова: магнетронное осаждение; структура ультратонких пленок; фазовый состав; ПЭМ; РФЭС.

Применение ультратонких металлических слоев при разработке чувствительных элементов (ЧЭ), изготавливаемых по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), связано с трудностями воспроизведения характеристик пленок, необходимых для корректной работы МЭМС-устройств. В осажденных пленках толщиной менее 100 нм возникают размерные эффекты, оказывающие значительное влияние на их физические свойства, а также фазовые переходы, что обусловлено ростом отношения площади поверхности к объему и наличием дефектов, соразмерных толщине пленки [1]. Так как рост пленки контролируется процессами атомарного масштаба и зависит от ряда факторов, включая температурные режимы осаждения, качество мишени, подложку, поведение оснастки оборудования, а также параметры материалов (теплоемкость, температурный коэффициент расширения и др.), в условиях серийного производства ЧЭ МЭМС-устройств важную роль играют применяемые методы контроля получаемых покрытий.

Для металлических пленок, полученных магнетронным напылением, разработана методика определения предельных значений толщины, ниже которых дальнейшее прогнозирование изменений электрофизических свойств покрытия становится практически невозможным. Показано, что для пленок с толщиной ниже критической при выбранном режиме напыления свойства главным образом контролируются структурным фактором, а не изменениями фазового состава. При этом структурные различия имеют случайное распределение по всей площади кремниевой пластины, что при заданных параметрах напыления на производстве может служить критерием для изменения условия осаждения или применяемого типа оборудования.

Литература

1. Маскаева Л. Н., Федорова Е. А., Марков В. Ф. Технология тонких пленок и покрытий: учеб. пособие. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 236 с.

УДК 621.793:546.26

Изолирующие теплоотводящие основания из поликристаллического алмаза для приемо-передающих модулей СВЧ

Ларина П. М., Смирнова А. К., Щёголев С. А.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»
141190, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

Разработан технологический маршрут изготовления изолирующих теплоотводящих оснований из поликристаллического алмаза для приемо-передающих модулей СВЧ. Приведены выходные характеристики модулей с алмазными теплоотводами.

Ключевые слова: поликристаллический алмаз; электрическая изоляция; алмазный теплоотвод; выходные характеристики.

В настоящее время перспективным и эффективным материалом для создания теплоотводящих оснований для изделий микроэлектроники является искусственный поликристаллический CVD-алмаз благодаря его уникальным физическим свойствам, в том числе высокой теплопроводности [1].

В условиях современных требований к СВЧ-электронике на предприятии АО «НПП «Исток» им. Шокина» возникла необходимость изготовления таких теплоотводящих оснований для приемо-передающих модулей (ППМ) в целях поддержания стабильности работы, повышения эффективности и надежности изделий, а также для улучшения их тепловых и мощностных характеристик за счет эффективного отвода тепла от активных элементов модуля.

Данный тип оснований, помимо тепловой эффективности, должен обладать электрической изоляцией изделий СВЧ от корпуса. Поэтому был разработан технологический маршрут для изготовления изолирующих теплоотводящих оснований, который включает в себя:

1) лазерную резку пластин алмаза на заготовки необходимого размера с последующим удалением графитизированного слоя в растворе кислот;
2) термическую обработку алмазной поверхности в целях утонения и получения необходимой шероховатости;
3) напыление кремния и ионное легирование данного слоя в целях получения адгезионного слоя;
4) напыление через трафарет на кремний металлизационных слоев;
5) гальваническое покрытие золотом;
6) измерение проводимости.

Для напыления металлизации на основания с определенным размером ячеек и только на одну сторону была разработана соответствующая оправка, исключающая запыление теплоотводов металлами с торцевых сторон и образование проводимости.

По итогам работы показано, что применение основания из поликристаллического алмаза (в совокупности со всеми технологическими и конструктивными разработками ППМ) в составе модуля позволило увеличить мощность, эффективность

и надежность изделия, а также обеспечить стабильные СВЧ-параметры передающего канала при различных режимах работы.

Литература

1. Ратникова А. К. Теплоотводящие подложки на основе поликристаллического CVD-алмаза // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника, 2011. — Вып. 3. (510). — С. 76–86.

УДК 538.911: 621.793.1

III-N-гетероструктуры диаметром до 150 мм для СВЧ-транзисторов

д. ф.-м. н. Цацульников А. Ф.[1], к. ф.-м. н. Сахаров А. В.[1,2], Николаев А. Е.[1,2], к. ф.-м. н. Заварин Е. Е.[1,2], Родин С. Н.[1,2], к. ф.-м. н. Лундин В. В.[2], Артеев Д. С.[1,2]

[1] НТЦ микроэлектроники РАН,
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
andrew@beam.ioffe.ru
[2] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

С использованием отечественных установок ГФЭ МОС выращены III-N-гетероструктуры для HEMT транзисторов на подложках карбида кремния и кремния с максимальным диаметром подложек 150 мм. Изготовлены СВЧ-транзисторы с параметрами, соответствующими текущему коммерческому уровню.
Ключевые слова: ГФЭ МОС; нитрид галлия; транзистор; HEMT; Si; SiC.

Проведена разработка семейства установок газофазной эпитаксии из металлорганических соединений гетероструктур (ГФЭ МОС) на основе нитрида галлия с максимальным размером подложки до 200 мм. С использованием данного оборудования была разработана технология выращивания различных типов приборных гетероструктур на подложках карбида кремния и кремния диаметром до 150 мм для приборов СВЧ и силовой электроники.

Была разработана конструкция гетероструктур на основе барьерных слоев InAlGaN с различным содержанием Al и толщиной барьерного слоя. Из выращенных AlGaN/AlN/GaN-гетероструктур с классическим дизайном активной области (содержание Al 23–25%, толщина барьера 23–27 нм) на подложках карбида кремния в АО НПП «Исток» им. Шокина», ФГУП «РНИИРС», АО «ОКБ Планета», АО «Светлана-Рост» были изготовлены СВЧ-транзисторы. На таких транзисторах были достигнуты: плотность тока до ~1 А/мм, плотность мощности более 5 Вт/мм (при V_{ds} = 28 В), КПД > 60% и крутизна передаточной характеристики ~300 мСм/мм. Выращены и исследованы гетероструктуры со сверхтонкими барьерными слоями AlGaN высокого состава (до ~50–60% и толщиной 3–5 нм) и InAlN (с содержанием In~17% и толщиной ~3–6 нм) [1]. В таких структурах была достигнута концентрация носителей в двумерном канале до $1{,}5–1{,}7 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$. За счет уменьшения толщины барьерного слоя и увеличения концентрации электронов в AlGaN/GaN-структурах на подложках карбида кремния в АО НПП «Исток» им. Шокина» были достигнуты: плотность тока до ~1,35 А/мм, плотность мощности более 7 Вт/мм, крутизна передаточной характеристики ~910 мСм/мм.

Апробируется технология эпитаксиального роста AlGaN/GaN-гетероструктур для HEMT-транзисторов на подложках кремния. Из выращенных гетероструктур на подложках диаметром 76,2 мм в НИУ МИЭТ и диаметром 100 мм в НИЦ «Курчатовский институт» изготовлены СВЧ-транзисторы. В транзисторах, изготовленных в НИУ МИЭТ, достигнута выходная мощность >50 Вт (>4,15 Вт/мм, V_{ds} = 40 В) и КПД >50%, в НИЦ «Курчатовский институт» — плотность мощности 8,9 Вт/мм (V_{ds} = 40 В). Разрабатывается технология роста AlGaN/GaN-гетероструктур для

нормально-открытых HEMT-транзисторов на подложках кремния диаметром до 150 мм для ЗАО «ЗНТЦ». На подложках кремния 200 мм освоен рост всех слоев, составляющих гетероструктуру транзистора. Электрофизические параметры, измеренные на прототипе HEMT AlGaN/GaN-гетероструктуры, не отличаются от аналогичных, измеренных на структурах на подложках меньшего диаметра.

Литература

1. Артеев Д. С., Сахаров А. В., Николаев А. Е., Черкашин Н. А., Цацульников А. Ф. Гетероструктуры с двумерным электронным газом на основе GaN с InAlN/AlGaN-барьером // Физика и техника полупроводников, 2024. — Т. 58. — № 10. — С. 582–585.

УДК 62-175

Адаптация мирового опыта применения алмаза для отечественной микроэлектроники в контексте укрепления технологического суверенитета Российской Федерации

Городецкий Э. Р.[1], Туев Д. В.[1], Панкратов А. А.[2], Теплова Т. Б.[2]
[1] АО «Диатек»
171505, г. Кимры, ул. 50 лет ВЛКСМ, 11, пом. 3
[2] ГАПОУ КП № 11
125438, г. Москва, ул. Онежская, 3

В докладе рассматриваются области применения алмазных пластин разного типа для изделий микроэлектроники, представлен обзор областей применения алмаза и структур на его основе, обозначен рынок производителей и потребителей готовой продукции.
Ключевые слова: поликристаллический алмаз; композиционный материал; теплоотвод; термохимическая обработка; тепловое сопротивление; CVD; монокристаллический алмаз; характеризация морфологии поверхности; формирование вжигаемых контактов; плазмохимическое травление.

Первая часть доклада описывает алмазные пластины thermal grade: теплоотводящие элементы (с металлизацией и без, монокристаллические, поликристаллические и металлоалмазные композитные пластины. Описаны интерпозеры с металлизацией и отверстиями, основания с металлизаций и отверстиями и «крышка» для интегральных схем, а также поликристаллические алмазные покрытия чипов / интегральных схем.

Рассмотрены различные варианты интеграции алмазных компонентов в полуфабрикаты для производства ЭКБ и в приборы на более поздних этапах производства, такие как, поликристаллический алмазный слой в составе гетероструктуры (EPI-Ready подложка Si, SiC, GaN с алмазным теплоотводящим слоем), теплоотводы поверхностного монтажа, технология бондинга алмазных теплоотводов.

Во второй части доклада представлен обзор областей применений алмаза и структур на его основе:

1. СВЧ электроника: СВЧ-транзисторы, диоды Ганна, мощные чип-резисторы на основе алмаза, алмазные интерпозеры и основания. Данные приборы применяются в усилителях, радиомодулях 5G, радарах, в системах спутниковой и наземной связи, АФАР, системах контроля воздушного пространства и др., в частности в приборах на основе GaN, GaAs, Ga_2O_3, AlN;
2. Силовая электроника: MESFET, диоды Шоттки, инверторы, блоки питания для оборудования и электромобилей, серверов, оптоэлектронные коммутаторы;
3. Светотехника: оптоэлектроника, лазерные диоды и светодиодные матрицы.

В третьей, завершающей части проводится обобщение российского и международного опыта и современных тенденций в технологиях. Показан современный уровень развития технологий производства алмаза на примере мировых лидеров

(Huawei, Diamond foundry, Akash Systems, Taiwan Semiconductor Manufacturing Co., Ltd., Sumitomo Electric Industries, Ltd., Samsung Electronics Co., Ltd.). Отдельно рассмотрен прогресс технологий на примере АО «Диатек» (монокристаллические пластины до 25×25 мм, Ra 0,1 нм, поликристаллические пластины до 6″, Ra 2 нм).

Выводы: алмазные теплоотводы уже нашли свое применение у крупнейших мировых производителей электроники, особенно эффективно показывают себя в высокомощных СВЧ-приборах, в частности на основе GaN. С учетом современного статуса технологий синтеза и обработки алмаза преимущества в характеристиках готовых приборов оправдывают стоимостные и технологические барьеры внедрения алмаза. Ускорение реализации потенциала российского рынка алмазной продукции для электроники нового поколения может быть обеспечено широкой кооперацией и реализацией мер поддержки.

Литература

1. Martin H. et al. Heterogeneous Integration of Diamond Heat Spreaders for Power Electronics Application // 2023 IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, USA, 2023. P. 118–125. DOI: 10.1109/ECTC51909.2023.00029.
2. Han Z., Bayram C. Diamond p-Type Lateral Schottky Barrier Diodes With High Breakdown Voltage (4612 V at 0,01 mA/Mm) // IEEE Electron Device Letters, Oct. 2023. Vol. 44. № 10. P. 1692–1695. DOI: 10.1109/LED.2023.3310910.
3. Kazior T. E., Jones G. M., Woodruff S. M. Heterogeneous heterostructures: A path to next generation high performance compound semiconductor devices // Proc. CS MANTECH Conf., 2022. P. 1–4.
4. Логинов Б. А., Логинов П. Б., Логинов В. Б., Логинов А. Б. Зондовая микроскопия: применения и рекомендации по разработке // Наноиндустрия, 2019. — Т. 12. — № 6 (92). — С. 352–365.
5. Колесанов А. Ф., Лаптев А. И., Логинов Б. А., Логинов В. Б., Панкратов А. А., Полушин Н. И. Финишная полировка пластины алмаза в разработанном механическом держателе с контролем качества полировки сканирующими зондовыми микроскопами // Станкоинструмент, 2024. — № 3 (036). DOI: 10.22184/2499-9407.2024.36.3.34.39.
6. Дерябкин А. В., Куликов Е. Н., Фёдоров Ю. Ю., Гордеев С. К., Корчагина С. Б. Исследование процесса термохимической обработки поверхности композиционного материала алмаз — карбид кремния — кремний // Сборник докладов XII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2023. — С. 398–401.
7. Дерябкин А. В., Духновский М. П., Куликов Е. Н., Федоров Ю. Ю. Исследование процессов планаризации поверхности поликристаллического алмаза методом термического растворения в системе алмаз-металл // Материалы XXI-II Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», 2019. — Т. 2. — С. 663–664.
8. Вяхирев В. Б. Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов // Технологии в электронной промышленности, 2013. — № 3.
9. Ральченко В., Конов В. CVD-алмазы. Применение в электронике // Электроника: наука, технология, бизнес, 2007. — № 4. — С. 58–67.

УДК 621.3.083.2

Автоматизированный измерительный комплекс на основе улучшенной конструкции щелевого резонатора для измерения диэлектрических свойств подложек в СВЧ-диапазоне

Фасхудинова В. А., Зинченко И., Чуб А., Шеерман Ф. И., к. т. н.
[1] *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
[2] *ООО «ТУСУР-Электроника»*
634045, г. Томск, ул. 19-й Гвардейской Дивизии, 15, 64

Разработана модернизированная конструкция щелевого цилиндрического резонатора (ЩР) для проведения высокоточных измерений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков в СВЧ-диапазоне частот. Выполнены проектирование и изготовление прототипа резонатора. Представлены экспериментальные данные, полученные при измерении тестовых образцов, а также проведен сравнительный анализ характеристик с предыдущей версией ЩР, демонстрирующий улучшенные измеряемые характеристики новой конструкции.

Ключевые слова: щелевой резонатор; цилиндрическая полость; волноводная мода; диэлектрическая проницаемость; резонансная частота; добротность; потери.

На сегодняшний день резонансные методы являются одними из наиболее точных подходов к измерению диэлектрических характеристик твердых материалов в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) [1–2]. Они особенно эффективны для оценки подложек, используемых в радиоэлектронной аппаратуре: антеннах, фильтрах, модулях и других СВЧ-компонентах. Одним из наиболее универсальных инструментов для таких измерений является щелевой цилиндрический резонатор (ЩР) [2–3].

Ключевые преимущества резонансного метода:

- высокая добротность резонатора, позволяющая измерять материалы с малыми потерями ($\mathrm{tg}\,\delta < 10^{-4}$);
- возможность точного определения диэлектрической проницаемости ε_r по сдвигу резонансной частоты f_0;
- высокая стабильность измерений к внешним воздействиям за счет концентрации электромагнитной энергии внутри закрытого объема [4–7].

Однако применение базовых моделей ЩР (ГОСТР 8.623-2015 [8]) в диапазоне 8–12 ГГц осложнено высокой плотностью резонансных мод и возможными модовыми перекрытиями, что затрудняет интерпретацию спектров и снижает точность измерений [9–10].

В рамках работ по модернизации измерительных систем были достигнуты следующие результаты:

- предложена усовершенствованная конструкция щелевого СВЧ-резонатора с кольцевыми канавками на торцах, что позволяет подавлять паразитные моды, повышая селективность резонансного пика АЧХ при процедуре измерения;

- выполнены расчеты резонансных частот для типов колебаний $H_{01}p$ и $E_{11}p$, а также проведено частотное моделирование конструкции, подтверждающее, что введение кольцевых канавок позволяет эффективно разделить частотные положения этих мод и подавить паразитные резонансы;
- оптимизированы параметры резонатора (радиус, длина, соотношение l/a) под целевую частоту 8,45 ГГц для колебания H_{011}, обеспечивающие требуемую добротность и устойчивость основной моды;
- изготовлен опытный образец усовершенствованного резонатора и проведены экспериментальные измерения его характеристик;
- реализована система точной настройки и позиционирования петель связи с использованием шаговых двигателей и координатных столиков для минимизации ошибок настройки и автоматизации измерительного процесса;
- проведены экспериментальные исследования различных диэлектрических материалов для подтверждения работоспособности комплекса;
- разработанное устройство позволяет проводить измерение диэлектрических подложек, имеющих значения диэлектрической проницаемости от 2 до 18.

Данная работы выполнялась специалистами ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» при поддержке Минобрнауки России (проект молодежных лабораторий, уникальный идентификатор FEWM-2025-0004).

Литература

1. Lee C.-K., McGhee J., Tsipogiannis C., Zhang S., Cadman D., Goulas A., Whittaker T., Gheisari R., Engstrom D., Vardaxoglou J. et al. Evaluation of Microwave Characterization Methods for Additively Manufactured Materials // Designs, 2019. № 3. Vol. 47. DOI: https://doi.org/10.3390/designs3040047.
2. Егоров В. Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на С.В.Ч. (обзор) // Приборы и техника эксперимента, 2007. — № 2. — С. 5–38.
3. Egorov V. N., Masalov V. L., Nefyodov Y. A., Shevchun A. F., Trunin M. R., Zhitomirsky V., McLean M. Measuring Dielectric Properties and Surface Resistance of microwave PCBs in the K-band // Review Of Scientific Instruments, 2004. Vol. 75. DOI: 10.1063/1.1791315.
4. Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials, Application note. Keysight technologies.
5. Зайцев К. А., Захаров П. Н., Королев А. Ф., Савин В. Л., Сухоруков А. П., Цилиндрический резонатор сантиметрового диапазона длин волн / Описание к задаче спецпрактикума, кафедра фотоники и физики микроволн. — Москва, 2012.
6. Нонг Куок Куанг, Разработка установки и исследование диэлектрических свойств материалов в диапазоне частот до 178 ГГц. — Иркутск, 2014.
7. Григорьев А. Д., Янкевич В. Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. — М.: Радио и связь, 1984. — 248 с.
8. ГОСТР 8.623-2015. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики измерений в диапазоне сверхвысоких частот. — М.: Стандартинформ, 2019. — 34 с.

9. Zinal S., Arz U. An extended mode-matching model for improved relative permittivity measurements using a split-cylinder resonator // Adv. Radio Sci., 2014. № 12. P. 267–272. DOI: 10.5194/ars-12-267-2014.
10. Takashi Shimizu, Zhewang Ma, Yoshio Kobayashi. Design of a Grooved Circular Cavity for Dielectric Substrate Measurements in Millimeter Wave Region // Special Issue on Microwave and Millimeter Wave Technology. IEICE TRANS. ELECTRON, 2003. Vol. 86. № 8.

УДК 621.319.45

Электрохимическая емкость композитных электродов на основе пористого кремния, углерода и оксида марганца (IV)

Коротицкая-Седловец Д. М.[1], Ульянова В. В.[1,2], Старков В. В.[1]
[1] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
sedlovets@iptm.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Оптимизирована технология формирования оксида марганца в пористом кремниевом электроде с углеродным покрытием для достижения увеличения электрохимической емкости композитного материала.
Ключевые слова: пористый кремний; углеродное покрытие; оксид марганца (IV); электрохимическая емкость.

В настоящее время кремниевые технологии являются наиболее развитыми и востребованными для применения в микроэлектронике. В связи с растущей потребностью в портативном электронном оборудовании особенный интерес представляет возможность непосредственной интеграции компонент микроэлектроники (например, компактных накопителей энергии) на кремниевой платформе [1]. В связи с этим актуальной представляется задача создания эффективных планарных микроконденсаторов (МК), встроенных в кремниевую подложку [2]. Пористый кремний (ПК) является перспективным материалом для создания электродов планарных МК [3].

Ранее нами было показано, что покрытие стенок графеновым материалом приводит к улучшению эксплуатационных характеристик пористых кремниевых электродов (увеличению емкости и циклической стабильности по сравнению с исходным ПК [4]); дальнейшее повышение емкости было достигнуто за счет осаждения в пористой структуре углеродной пленки, легированной азотом [5]. Настоящая работа является продолжением цикла и посвящена осаждению дополнительного слоя в структуру ПК с углеродным покрытием.

В ходе выполнения работы была оптимизирована технология формирования MnO_2 в структуре ПК — углерод в результате реакции

$$4KMnO_4 + 3C + H_2O \rightarrow 4MnO_2 + K_2CO_3 + 2KHCO_3. \quad (1)$$

В результате работы:

- определено оптимальное время реакции 1 и концентрация $KMnO_4$ для получения композитного углерода ПК/С/MnO_2 с наилучшими электрохимическими характеристиками;
- с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния определена кристаллическая структура осажденного оксида марганца;
- показано увеличение электрохимической емкости пористого кремниевого электрода с углеродным покрытием после нанесения дополнительного слоя MnO_2.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 24-29-00545.

Литература

1. Pech D. et al. Ultrahigh-power micrometre-sized supercapacitors based on onion-like carbon // Nature nanotechnology, 2010. Vol. 5. P. 651–654.
2. Yoo J. J., Balakrishnan K., Huang J., Meunier V., Sumpter B. G., Srivastava A., Conway M., Mohana A. L. Reddy J. Yu, Vajtai R. Ultrathin planar graphene supercapacitors // Nano letters, 2011. Vol. 11. P. 1423–1427.
3. Wu Z. et al. Review on Cutting Edge Technologies of Silicon-Based Supercapacitors // Journal of Nanomaterials, 2021. Vol. 2021. P. 6650131.
4. Sedlovets D. M. et al. Nanoporous Silicon with Graphene-like Coating for Pseudocapacitor Application // Nanomaterials, 2021. Vol. 12. P. 2191.
5. Sedlovets D. M., Starkov V. V., Ulianova V. V. N-doped graphene-like coating for improved microcapacitance of nanoporous silicon // Materials Science in Semiconductor Processing, 2025. Vol. 198. P. 109741.

УДК 538.97 539.216.2 539.23

Композитные материалы на основе многостенных углеродных нанотрубок и полифталоцианинов для применения в гибких портативных источниках энергии

Митина А. А., Руднева Т. Н.
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
alena@iptm.ru

Изучена возможность создания композитных материалов на основе многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) и проводящих полимеров полифталоцианинов (MePPc). Исследована зависимость удельной емкости материала от способа осаждения и координирующего металла в структуре полимера (Fe, Co, Cu).

Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки; полифталоцианин; суперконденсатор.

Развитие современной энергетики невозможно без использования экологически чистых возобновляемых источников энергии. Синтез проводящих углеродных материалов непосредственно на поверхности токосъемника позволяет получать гибкие электроды с высокой удельной площадью поверхности. Использование таких материалов для создания композитов с псевдоемкостными материалами позволяет добиться увеличения удельной емкости электрода без потери устойчивости к циклированию. Полифталоцианины являются широко используемыми псевдоемкостными материалами для электрохимического накопления энергии. Композитные материалы на основе МУНТ и полифталоционинов проявляют синергетический эффект электрических и механических преимуществ МУНТ с большой псевдоемкостью полимеров.

Формирование материала МУНТ/Al проводили в кварцевом реакторе проточного типа. В качестве источника углерода использовали этанол. В качестве подложки использовали алюминиевую фольгу толщиной 50 мкм. Для придания каталитических свойств полоски алюминиевой фольги обрабатывали в водном растворе нитрата никеля. Температура синтеза составляла 600 °C, а расход этанола — 5–7 мл/час. Масса активного материала электрода составляла 1,5–2 мг.

Подход к синтезу композитного материала с полифталоцианином был осуществлен двумя способами: осаждением из газовой фазы и жидкофазным синтезом.

В процессе осаждения из газовой фазы образец МУНТ/Al обрабатывали в 0,05 М растворе хлорида кобальта в метаноле. Далее пластину помещали в кварцевый реактор и нагревали до 440 °C в токе инертного газа, впрыскивая в реактор со скоростью 0,125 мл/мин 0,025 М метанольный раствор 1,2,4,5-тетрацианобензола (ТЦБ), m_k = 2,85 мг.

Жидкофазное осаждение полимера проводили несколькими способами.

а) CoPPc

В 5 мл этанола растворяли 65 мг хлорида кобальта. В полученном растворе вымачивали материал МУНТ/Al в течение суток. Далее помещали в тигель со смесью

178 мг ТЦБ и 5 г докозана. Тигель нагревали до расплавления докозана, затем через образовавшуюся суспензию пропускали ток инертного газа. При температуре около 250 °C в реакционную смесь вводили 1 каплю 1,8-диазабицикло[5,4,0]ундец-7-ена и повышали до температуры кипения. Время процесса составляло 5 часов. Тигель охлаждали и пластину замачивали в четыреххлористом углероде. Образец отжигали в вакууме при 400 °C, $m_к$ = 16,3 мг.

б) FePPc

Материал МУНТ/Al на 48 часов помещали в смесь, состоящую из 100 мл раствора ДМСО с олигомерами FePPc (12 %). Затем пластину промывали и высушивали. Полученный материал отжигали при температуре 350 °C, $m_к$ = 5,1 мг.

в) CuPPc

Материал МУНТ/Al пропитывали раствором из 25 мг ТЦБ и 12 мг хлорида меди в 5 мл метанола. Полученный материал отжигали в кварцевом реакторе в токе инертного газа в течение трех часов. Температура отжига — 460 °C, $m_к$ = 1,8 мг.

Исследование электрохимических характеристик проводили методом циклической вольт-амперометрии. Для материала CoPPc/МУНТ/Al, полученного методом осаждения из газовой фазы, значения удельной емкости составили 25 Ф/г и 17 мФ/см^2 соответственно. Из материалов, полученных методом жидкофазного синтеза, наименьшее значение удельной емкости имеет образец CoPPc/МУНТ/Al (8 Ф/г и 12 мФ/см^2), а наибольшее — CuPPc/МУНТ/Al (95 Ф/г и 27 мФ/см^2). С другой стороны, композитный материал FePPc/МУНТ/Al показал высокие значения удельной емкости, рассчитанной из площади электрода (35 мФ/см^2). При этом удельная емкость материала МУНТ/Al в среднем не превышает 5–8 мФ/см^2.

Таким образом, изучена возможность синтеза композитного материала на основе МУНТ, выращенных на поверхности алюминиевой фольги и полифталоцианинов. Были изготовлены композитные материалы МУНТ/Al с кобальтовыми, железными и медными полифталоцианинами. Изучена зависимость удельной емкости от состава и массы полимера, а также способа его формирования. Из полученных результатов можно сделать вывод, что удельная емкость композитных материалов существенно зависит как от способа осаждения, так и координирующего металла в структуре полимера.

УДК 621.3.049.77

Разработка пьезоэлектрического преобразователя энергии на основе вертикально ориентированных углеродных нанотрубок, легированных азотом

Ильин О. И., к. т. н., Рудык Н. Н., к. т. н., Полывянова М. Р., Хомленко Д. Н., Ильина М. В., к. т. н.
Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологии, электроники и приборостроения
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е
oiilin@sfedu.ru

Разработан и изготовлен макет пьезоэлектрического преобразователя энергии с верхним плоским электродом и чувствительным элементом на основе легированных азотом вертикально ориентированных углеродных нанотрубок. Определены ряд технологических режимов и ограничений при создании макета. Проведено исследование его выходных характеристик и сравнение с изготовленным ранее макетом с верхним профилированным электродом. Показана перспективность применения разработанного макета в качестве преобразователя механической энергии как в качестве наногенератора для питания устройств носимой электроники, так и в качестве высокочувствительного сенсора деформации для сейсмочувствительных сенсоров, датчиков деформации и микрофонов.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; пьезоэлектрический эффект; преобразователи энергии; легирование азотом.

В настоящее время поиск устойчивого и надежного источника питания, а также создание различных энергоэффективных сенсоров для носимых или имплантируемых электронных устройств становится все более актуальным [1]. Однако существующие на сегодняшний день решения преимущественно используют аккумулятор и требуют ежедневной подзарядки из-за ограниченной емкости. Поиск и разработка портативных преобразователей энергии делают актуальными исследования в данном направлении.

Среди различных внешних воздействий наиболее часто встречаются механические колебания, которые вызывают силы сжатия или растяжения. Ввиду этого перспективно создание новых преобразователей энергии, способных эффективно преобразовывать вибрации окружающего мира (ветра, воды, звука, температуры) и деятельности человека (ходьбы, сгибания мышц, биения сердца и т. п.) в электрический сигнал. Ранее было показано [2], что применение легированных азотом углеродных нанотрубок (N-УНТ) делает их перспективным материалом для создания преобразователей энергии. Цель данного исследования — разработка конструкции и изготовление макета преобразователя энергии с верхним гибким электродом и чувствительным элементом на основе легированных азотом вертикально ориентированных углеродных нанотрубок по технологии, совместимой с кремниевой.

В ходе работы была разработана конструкция и отработана технология изготовления макета преобразователя механической энергии с верхним плоским электродом на основе вывешенной перфорированной мембраны из поликремния.

Определены параметры технологических режимов формирования верхнего и нижнего электродов макета, позволяющие сформировать мембрану с заданными топологическими размерами и диаметром микроотверстий, отделенную от нижнего электрода полостью заданной высоты. Определены параметры технологических режимов роста УНТ с заданными параметрами в области между верхним и нижним электродами наногенератора с учетом технологических особенностей, связанных с влиянием предшествующих литографических операций и процессов селективного травления на последующий рост УНТ. Установлено, что процессы формирования и удаления жертвенного слоя SiOx в плавиковой кислоте не оказывают значительного воздействия на каталитическую способность никеля и позволяют получать локальные массивы N-УНТ. Установлено, что для при выращивании N-УНТ целесообразно использовать температуру роста 550 °С, обеспечивающую концентрацию легирующей примеси азота до 12 %. Изготовлен гибкий электрод, покрытый проводящей пленкой молибдена.

Установлена зависимость выходных параметров макета преобразователя от амплитуды и частоты внешнего механического воздействия. Показано, что с увеличением амплитуды раскачки динамика от 3,5 до 95 мкм происходит увеличение выходного напряжения VPP от 0,14 до 248 мВ. С увеличением частоты вибрации динамика от 15 до 120 Гц не наблюдается явной зависимости выходного напряжения, величина которого составляла 152 ± 23 мВ. При этом увеличение прижима гибкого электрода позволило значительно снизить резонансную частоту колебаний N-УНТ, что привило к уменьшению выходного напряжения от 375 до 141 мВ с увеличением частоты от 15 до 120 Гц. Максимально достигнутая мощность макета составила ~0,3 мкВт (напряжение 0,550 В, ток 550 нА) при воздействии внешних колебаний частотой 15 Гц и амплитудой ±1,0 В. Энергоэффективность работы макета составила ~28 % (0,275 В к 1,0 В).

Показана перспективность применения разработанного макета в качестве преобразователя механической энергии в электрический сигнал для питания устройств носимой электроники, а также в качестве сенсоров деформации (сейсмочувствительных сенсоров, датчиков деформации и микрофонов).

Изготовление гибкого электрода выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-10302, https://rscf.ru/project/25-79-10302, в Южном федеральном университете.

Литература

1. Li Xu, Quan kun Zhang, Zhenglong Hu, Chunbo Hua et al. Fully biodegradable piezoelectric nanogenerator based on cellulose/PLLA electrospun fibers with high-performance for mechanical energy harvesting // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025. Vol. 706. P. 135813.
2. Il'ina M.V., Soboleva O.I., Khubezov S.A., Smirnov V.A., Il'in O.I. Study of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes for Creation of Piezoelectric Nanogenerator // Journal of Low Power Electronics Applications, 2023. Vol. 13. № 1. Iss. 11. P. 1–11.

УДК 621.382.323

Микроплоттерная печать полевых транзисторов на углеродных нанотрубках

Лизунова А. А., к. т. н., Власов И. А., Волков И. А., Керечанина М. Ф., Каменева Е. И., Новосёлов А. К., Лошкарёв А. А., Иванов В. В., д. ф.-м. н.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
lizunova.aa@mipt.ru

Разработаны методики получения полевых транзисторов методом микроплоттерной печати из чернил, состоящих из одностенных углеродных нанотрубок. Исследовано влияние концентрации и вида углеродных нанотрубок, дизайна транзистора, режимов печати и условий постобработки на электрические характеристики полевых транзисторов.

Ключевые слова: микроплоттерная печать; транзисторы; углеродные нанотрубки; печатная электроника.

Однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ) считаются одним из перспективных полупроводниковых материалов для создания функциональных каналов транзисторов в гибкой и печатной электронике благодаря своим превосходным электрическим и механическим свойствам [1]. Технологии печатной электроники, основанные на нанесении ОУНТ из растворов, обладают серьезными преимуществами перед методами формирования транзисторов путем переноса ориентированных ОУНТ, выращенных химическим осаждением из газовой фазы. К их достоинствам относятся простота масштабирования и экономическая эффективность. Процентное содержание полупроводниковой фракции нанотрубок в чернилах считается ключевым параметром, влияющим на оптоэлектронные свойства устройств на ОУНТ, полученных печатными методами [2].

В данной работе получены наборы транзисторов с активным полупроводниковым каналом из пучков одностенных углеродных нанотрубок, напечатанные микроплоттерным осаждением на транзисторные заготовки с золотыми контактами на оксидированном кремнии. Чернила ОУНТ изготавливались из двух видов исходных материалов: коммерческих чернил NanoIntegris Isosol-100, а также из порошка OcSiAl. В ходе работы исследовали влияние скорости печати, диаметра капилляра, концентрации и вида нанотрубок в чернилах на вольт-амперные и передаточные характеристики транзисторов, а также на микроструктуру и упорядоченность нанотрубок в канале.

В результате работы установлена оптимальная концентрация ОУНТ в чернилах, отработана воспроизводимая методика печати, позволяющая стабильно получать транзисторы с отношением тока включения к току выключения $(2–6) \cdot 10^4$ из коммерческих чернил NanoIntegris с управляющим напряжением от 1 до 5 В.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-560.

Литература

1. Hills G., Lau C., Wright A. et al. Modern microprocessor built from complementary carbon nanotube transistors // Nature, 2019. Vol. 572. P. 595–602.
2. Park S., Vosguerichian M., Bao Z. A review of fabrication and applications of carbon nanotube film-based flexible electronics // Nanoscale, 2013. Vol. 7. № 5 (5). P. 1727–52.

Перспективы применения углеродных наноструктур в экстремальной электронике и медицинских малоинвазивных устройствах

Мордкович В. З.
НИЦ «Курчатовский институт» — ТИСНУМ
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Центральная, 7а
mordkovich@tisnum.ru

Углеродные материалы уже сегодня занимают важную нишу в нашей технологической среде. Из наиболее заметных современных примеров можно назвать высокопрочные композиты на основе углеродного волокна для авиации, разнообразные графитовые электроды для дуговых и электролизных печей в металлургии, а также аноды на основе сферического графита для литий-ионных аккумуляторов. Нельзя забывать и об исторических углеродных материалах: графитовых грифелях для карандашей, адсорбентах из активированного угля и т. д.

Новые подходы в конструировании углеродных и композитных материалов связаны с осознанным управлением структурой, пористостью и поверхностью, то есть с созданием т.н. углеродных наноструктур. Такие наноструктуры могут быть построены как на простейшем для понимания принципе расщепления графита на сверхтонкие графеновые чешуйки, так и на принципе комбинирования полиэдрических фуллеренов. Углеродные наноструктуры могут придавать материалам самые неожиданные свойства, недостижимые для традиционных видов углерода. Эти свойства оказываются важными для будущих технологий конструкционных материалов, специальных покрытий, химических источников тока, нефтехимии и пр.

НИЦ «Курчатовский институт» — ТИСНУМ в сотрудничестве с другими подразделениями и организациями НИЦ «Курчатовский институт», с Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова, с институтами РАН ведет обещающие разработки в нескольких направлениях прорывных технологий, касающихся как получения специфических углеродных наноструктур, так и применения их в различных направлениях. В частности, на этапе опытных испытаний или демонстраторов технологии выведены:

- технология непрерывного роста сверхдлинных углеродных нанотрубок (до 16 км длиной);
- технология жаро- и морозостойких суперконденсаторов на основе безопорных электродов из сверхдлинных углеродных нанотрубок, весьма важная в качестве долгосрочных миниатюрных накопителей в экстремальной электронике;
- технология композитных катализаторов энергонапряженных процессов химии и нефтехимии, в частности процесса получения синтетических топлив;
- технология получения легких всепогодных широкополосных покрытий для снижения радиозаметности и заметности в тепловом диапазоне;

- технология повышения эффективности литий-ионных аккумуляторов за счет модификации наноструктурированными покрытиями;
- технология получения гибких углеродных сенсоров для медицинских малоинвазивных устройств.

Применение этих технологий, а также находящихся на более раннем этапе разработок мембран топливных элементов, высокоэлектропроводных безметаллических кабелей и иного дает новый импульс технологическому развитию в областях экстремальной электроники и медицинских малоинвазивных устройств.

УДК 621.383:538.9

Современные методы исследований и диагностики материалов элементов ЭКБ с резистивным переключением

Дудин А. А., Рудаков Г. А., Теплов Г. С.
Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН
119334, г. Москва, ул. Ленинский просп., 32А
dudin.a@inme-ras.ru

Проведен обзор современных методов анализа и диагностики материалов, используемых в технологиях элементов ЭКБ с резистивным переключением. Определены области применения и роли различных аналитических исследований, а также электрических и электрофизических измерений в развитии технологий резистивной оперативной памяти ReRAM. В работе изучены различные методики, используемые при описании свойств ReRAM, и показано, как они способствуют повышению качества и надежности устройств энергонезависимой памяти на фазовых переходах.

Ключевые слова: аналитические исследования; материалы с резистивным переключением; методы диагностики элементов памяти; тонкие пленки.

Резистивная оперативная память (ReRAM) привлекает значительное внимание исследователей и разработчиков благодаря своим уникальным свойствам энергонезависимости, быстродействию и долговечности. Развитие технологий ReRAM требует глубокого понимания физических явлений и процессов, происходящих в материалах ячеек памяти. В работе представлен обзор современных аналитических методов анализа, используемых для разработки и совершенствования технологии ReRAM.

Для всестороннего изучения и описания свойств материалов ReRAM, обеспечения точного понимания ее структуры, механизмов переключения и эксплуатационных качеств применяются разнообразные физические и химические аналитические методы исследований. Среди наиболее распространенных методов исследований можно выделить методы структурного анализа, элементного и химического анализа, электрофизические измерения и другие специальные методы.

Структурные методы анализа, такие как сканирующая электронная микроскопия (SEM) и просвечивающая электронная микроскопия (TEM), позволяют визуализировать морфологию поверхности, толщину слоев и качество интерфейсов. TEM в сочетании с электронной дифракцией обеспечивает атомарное разрешение, необходимое для подробного изучения ультратонких пленок и деталей их микроструктуры [1]. Рентгеноструктурные и рентгенофазовые анализы (XRD/GIXRD) позволяют качественно идентифицировать кристаллическую структуру и фазовый состав, определять степень аморфности осаждаемых материалов [2]. Рентгеновская рефлектометрия (XRR) дает точные сведения о толщинах слоев и границах раздела в многокомпонентных структурах. Спектроскопия комбинационного рассеяния (Raman) позволяет быстро диагностировать фазовый состав и структурные изменения в пленках.

Элементный и химический анализ, проведенный с использованием энергодисперсионной спектроскопии (EDS), позволяет определить элементный состав и распределение элементов в слоях [3]. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

(XPS) позволяет провести анализ химического состояния элементов, включая степени окисления и наличие кислородных вакансий (V_o) [4, 5]. Вторично-ионная масс-спектрометрия (SIMS) является сверхчувствительным методом регистрации распределения элементов по глубине материала и незаменима для обнаружения легких элементов, таких как водород.

Электрофизические измерения, такие как вольт-амперные характеристики, импедансная спектроскопия и циклические тесты, обеспечивают критически важные данные о рабочих характеристиках и механизмах резистивного переключения в ReRAM. Электрофизические измерения связывают структурные свойства материалов с функциональностью устройств и позволяют определять механизмы переключения, проводить оценку надежности и деградации материалов [6].

Такие методы, как атомно-силовая микроскопия (AFM), спектроскопия характеристических потерь (EELS), фотоэмиссионная электронная микроскопия (PEEM), позволяют проводить локальные исследования электрофизических свойств материалов [7, 8].

Современные аналитические методы, такие как XRD, SEM/TEM, XPS и электрофизические измерения, обеспечивают всестороннюю характеристику материалов ReRAM. Их совместное использование позволяет комплексно охарактеризовать свойства материалов ReRAM, обеспечить разработку оптимальных технологических решений и улучшение эксплуатационных характеристик устройств. Дальнейшее развитие методов *in situ* диагностики и высокого разрешения будет способствовать прогрессу в области резистивной памяти [6, 7].

Данная работа выполняется по проекту № 23-91-06000 — выполнение ориентированных и прикладных научных исследований в рамках стратегических инициатив президента Российской Федерации в научно-технологической сфере в области производства интегральных схем по направлению «микроэлектроника».

Литература

1. Saleh M. N., Venkatachalam D. K., Elliman R. G. Effect of crystallization on the reliability of unipolar resistive-switching in HfO_2-based dielectrics // Curr. Appl. Phys. Elsevier B.V., 2014. Vol. 14. № SUPPL. 1. P. S88–S92.
2. Vinuesa G. et al. Effective control of filament efficiency by means of spacer HfAlOx layers and growth temperature in HfO_2 based ReRAM devices // Solid. State. Electron., 2021. Vol. 183. № May. P. 2–5.
3. Alsaiari M. A. et al. Growth of amorphous, anatase and rutile phase TiO_2 thin films on $Pt/TiO_2/SiO_2/Si$ (SSTOP) substrate for resistive random-access memory (ReRAM) device application // Ceram. Int. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2020. Vol. 46. № 10. P. 16310–16320.
4. Jiang R., Han Z., Du X. Reliability/Uniformity improvement induced by an ultrathin TiO_2 insertion in $Ti/HfO_2/Pt$ resistive switching memories // Microelectron. Reliab. Elsevier Ltd, 2016. Vol. 63. P. 37–41.
5. Ismail M. et al. Resistive switching characteristics and mechanism of bilayer HfO_2/ZrO_2 structure deposited by radio-frequency sputtering for nonvolatile memory // Results Phys. Elsevier, 2020. Vol. 18. № April. P. 103275.

6. Stabrawa I. et al. Characterization of the morphology of titanium and titanium (IV) oxide nanolayers deposited on different substrates by application of grazing incidence X-ray diffraction and X-ray reflectometry techniques // Thin Solid Films, 2019. Vol. 671. № December 2018. P. 103–110.
7. Knabe J. et al. Dual-Mode Operation of Epitaxial $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$: Ferroelectric and Filamentary-Type Resistive Switching // Phys. status solidi, 2023. Vol. 2300409.
8. Heisig T. et al. Antiphase Boundaries Constitute Fast Cation Diffusion Paths in $SrTiO_3$ Memristive Devices // Adv. Funct. Mater., 2020. Vol. 30. № 48. P. 1–8.

УДК 001.895

Синхротронные и нейтронные исследования в России: текущий статус и перспективы

Марченков Н. В., Благов А. Е., Ковальчук М. В.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
marchenkov_nv@mail.ru

Рассмотрены стратегические направления создания и развития национальной сети исследовательской инфраструктуры класса «мегасайенс» в Российской Федерации в рамках реализации Указа Президента РФ № 356 от 25 июля 2019 года и Федеральной научно-технической программы до 2030 года. Основной целью инициативы является обеспечение технологического суверенитета и лидерства России в области синхротронных и нейтронных исследований за счет создания уникальных исследовательских установок мирового уровня. В числе ключевых проектов — источник «СИЛА» в Протвино, нейтронный центр на реакторе «ПИК» в Гатчине, «СКИФ» в Кольцово, синхротрон «РИФ» на о. Русский и технологический комплекс «Зеленоград». Отдельное внимание уделено модернизации существующих установок и подготовке кадров. Программа направлена на комплексное научно-техническое и пространственное развитие страны, создание условий для разработки прорывных технологий, их внедрение в промышленность и социальную сферу, а также трансфер знаний в регионы. В докладе представлены как текущие научные достижения, в частности в области материаловедения для микроэлектроники, так и перспективы мегапроектов, включая развитие рентгеновской литографии и метрологии в рамках проекта «Зеленоград».

Ключевые слова: мегасайенс; синхротронные исследования; нейтронные исследования; исследовательская инфраструктура.

Указом Президента Российской Федерации от 25 июля 2019 года № 356 «О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации» и Федеральной научно-технической программой развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на период до 2030 года и дальнейшую перспективу предусмотрено создание на территории Российской Федерации национальной сети исследовательской инфраструктуры класса «мегасайенс». Головной научной организацией программы определен НИЦ «Курчатовский институт».

Программой предусмотрено создание уникального источника синхротронного излучения четвертого поколения с лазером на свободных электронах «СИЛА» в г. Протвине, международного центра нейтронных исследований на базе высокопоточного реактора «ПИК» в г. Гатчине, источника синхротронного излучения поколения 4+ «СКИФ» в р. п. Кольцово, а также синхротрона «РИФ» в Дальневосточном регионе на о. Русский. В рамках программы будет существенно модернизирован источник синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов» и запуск технологического накопительного кольца «Зеленоград» в г. Москве. В качестве пилотного проекта на базе протонного ускорителя У-70 будет создан безреакторный источник нейтронов для структурных исследований «ОМЕГА» в г. Протвине.

Цель создания национальной сети исследовательской инфраструктуры класса «мегасайенс» — комплексное решение задач ускоренного развития синхротронных и нейтронных исследований, необходимых для создания прорывных технологий, а также обеспечение создания и развития передовой исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации.

Задачи, на решение которых направлено создание национальной сети мегаустановок, включают:

- формирование научно-технической базы для реализации Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации;
- пространственное развитие страны за счет создания распределенной по ее территории сети центров синхротронных и нейтронных исследований мирового уровня;
- консолидация научного потенциала нации, ускоренное развитие научно-технологического уровня регионов за счет создания передовой инфраструктуры и трансфера компетенций и знаний в региональные научные центры;
- обеспечение лидерства России в сфере синхротронных и нейтронных исследований, создание условий для привлечения мирового научного потенциала на территорию России за счет создания инфраструктуры «мегасайенс», превосходящей мировой уровень;
- создание условий для формирования целостной национальной инновационной системы, разработки прорывных технологий и их ускоренного трансфера в экономику и социальную сферу;
- обеспечение создания и эксплуатации установок класса «мегасайенс» на основе отечественных технологий, оборудования и систем, в том числе за счет модернизации и развития опытно-производственной базы, развиваемой на базе НИЦ «Курчатовский институт» и Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН;
- подготовка высококвалифицированных кадров как в области создания и эксплуатации установок класса «мегасайенс», так и в области проведения структурных исследований веществ и материалов.

Рис. 1. Национальная сеть синхротронных и нейтронных исследований

С учетом мирового опыта в рамках национальной сети исследовательской инфраструктуры класса «мегасайенс» создаются взаимодополняющие уникальные установки класса «мегасайенс», имеющие разную специализацию и обеспечивающие в комплексе непрерывный процесс исследований, разработок и трансфера результатов в экономику и социальную сферу. Технические характеристики объектов создаваемой инфраструктуры определяются тем, что они должны обеспечить на горизонте трех лет создание самых передовых технологий «сегодняшнего дня» и одновременно с этим проведение исследований, необходимых для разработки перспективных технологий, которые будут созданы на горизонте 5–7 лет, а также заложить основы для создания принципиально новых прорывных материалов и технологий на горизонте 10–15 лет.

Создаваемая сеть исследовательских установок класса «мегасайенс» обеспечит максимальное вовлечение всех научных, образовательных и промышленных организаций в реализацию приоритетов Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, получение результатов, превосходящих мировой уровень, ускоренный трансфер полученных результатов в экономику страны.

В докладе будут представлены научные результаты, в том числе уже получаемые в области материаловедения в интересах микроэлектроники на существующих мегаустановках, а также перспективы развития проектов мегасайенс в России. Так, отдельное внимание будет уделено проекту запуска технологического накопительного комплекса «Зеленоград». Этот синхротронный источник ориентирован на решение задач научных и индустриальных предприятий в области микроэлектроники, в частности на развитие технологий рентгеновской литографии, изучение новых материалов для микро- и наноэлектронных технологий, метрологический контроль создаваемых электронных систем и технологий.

Зондовые и оптические технологии в задачах метрологии и инспекции современной микроэлектронной промышленности

Козодаев Д. А., Трусов М. А., к. ф.-м. н.
ООО «Активная Фотоника»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10
info@active-photon.com

В докладе рассмотрены передовые разработки компании «Активная Фотоника» для решения задач метрологии и инспекции в современной микроэлектронной промышленности. Подробно рассказано о новых технических решениях с использованием зондовых и оптических методик, проанализированы вопросы обработки и квалификации получаемых данных, проведено сравнение с зарубежными аналогами.

Ключевые слова: инспекция; метрология; профилометрия; критические размеры; лазерная техника; спектроскопия; микроскопия.

Непрерывное развитие технологий современной микроэлектроники, экспоненциальный рост сложности архитектур современных вычислительных процессоров и плотности размещения элементов интегральных схем на кристаллах требует разработки, производства и внедрения все более технически сложных и высокоточных инструментов для контроля качества на каждом этапе производства чипов, инспекции получаемых готовых изделий, решения сопутствующих задач обеспечения единства измерений, основанных на новейших достижениях современной физики и техники.

Коллектив компании «Активная Фотоника» (входит в группу компаний «НТ-МДТ») имеет очень большой опыт в разработке, производстве, поставках и обслуживании сложного научного оборудования для различных исследовательских групп в ведущих научных институтах и университетах России и странах Таможенного Союза. Исторически мы занимались разработкой и производством сканирующих зондовых микроскопов различных классов и более сложных нанотехнологических комплексов на их базе.

В настоящее время компания «Активная Фотоника» плотно занимается оборудованием для задач оптики и фотоники. Запущено производство собственных охлаждаемых твердотельных лазерных источников видимого диапазона для оптико-спектральных исследований, стабилизированных по мощности, с высоким качеством пучка гауссова профиля. Компания производит монохроматоры-спектрографы высокого оптического разрешения с построением изображения входной апертуры, рамановские и фотолюминесцентные микроспектрометры.

С недавних пор компания «Активная Фотоника» целенаправленно работает в области применения и развития своих перспективных разработок для решения задач метрологии и инспекции в современной микроэлектронной промышленности. Зондовые и оптические технологии в этой области контрольно-измерительной техники применяются за рубежом давно и вполне успешно, и мы готовы предложить наши решения для подобных задач, ни в чем не уступающие западным аналогам.

Нами разработан и серийно производится сканирующий конфокальный рамановский и фотолюминесцентный спектрометр, позволяющий проводить локальный химический анализ образца с трехмерным сканированием и строить карты распределения локальных дефектов и напряжений, например, в кремниевых пластинах. Разработан и серийно производится высокоточный многокоординатный стол на линейных электромагнитных двигателях для позиционирования инспектируемых образцов большого размера (пластин диаметром до 300 мм) с вакуумным удержанием.

В рамках развития микроэлектронного направления разработана оптическая инспекционная станция для поиска, обнаружения и квалификации дефектов изделий микроэлектроники с анализом изображений методами искусственного интеллекта, работающая в видимом и ультрафиолетовом оптическом диапазонах, в светлом и темном поле с высоким оптическим разрешением.

Разработаны прототипы оптического интерференционного профилометра по схеме Линника (белого света) и стилусного профилометра для построения карт топографии поверхности образцов, расчета шероховатости и неплоскостности поверхности. На завершающей стадии находится разработка сканирующего атомно-силового микроскопа для измерения «критических размеров» микроэлектронных структур (3D CD AFM) с возможностью работы со структурами сложного профиля. Также в области измерительных инструментов на базе технологий оптической интерферометрии ведутся разработки альтернативного варианта оптического профилометра и многоосевого высокоточного широкодиапазонного измерителя перемещений на основе схемы Майкельсона.

Ведется разработка визуализирующего эллипсометра широкого спектрального диапазона на основе принципа нуль-эллипсометрии для анализа локальных оптических свойств поверхностей, построения карт параметров Стокса, элементов матрицы Мюллера, определения толщин многослойных тонкопленочных покрытий.

Ведется разработка многофункциональной измерительной установки для комплексного выявления локальных дефектов в электрических цепях интегральных схем методами локального оптического воздействия на инспектируемый образец лазерным излучением и локального измерения оптических и излучательных характеристик, в том числе с временным разрешением (методы PEM, OBIC, LIVA, LADA, OBIRCH, TIVA, SEI).

УДК 661.13

Новая технология германия оптического, микроэлектронного и детекторного качества

д. х. н. Корнев Р. А.
Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девятых РАН
603951, г. Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49
romanakornev@gmail.com

На основе процесса прямого плазмохимического выделения германия из тетрафторида германия разработана новая технология получения высокочистого монокристаллического германия. Данная технология позволяет получать германий оптического, микроэлектронного и детекторного качества, в том числе со смещенным изотопным составом.
Ключевые слова: германий монокристаллический; германий для ИК-оптики; германий изотопный.

Высокочистый монокристаллический германий — важнейший материал современной оптики и электроники.

Он находит применение при изготовлении защитных окон, линз, акустооптических элементов, детекторов ионизирующих излучений, а также мощных выпрямителей и диодов, работающих в СВЧ-диапазоне [1, 2].

Известными методами получения высокочистого монокристаллического германия являются хлоридный [3] и гидридный [4] методы, в которых в качестве германийсодержащих прекурсоров используются $GeCl_4$ и GeH_4. Данные методы характеризуются многостадийностью и высокими невозвратными потерями, что ограничивает их возможности при получении высокочистого монокристаллического германия, в том числе и со смещенным изотопным составом, интерес к которому сильно возрос в последнее время. Наиболее перспективным при разработке новых технологий получения высокочистого монокристаллического изотопно-модифицированного германия является использование в виде германий содержащего прекурсора тетрафторида германия, который имеет высокую степень химической и изотопной чистоты после обработки в газовых центрифугах.

В данной работе представлена технологическая схема получения высокочистого монокристаллического изотопно-обогащенного Ge, в которой основной стадией является одностадийное выделение германия из изотопно-модифицированного тетрафторида германия плазмохимическим водородным восстановлением с выходом более 95%. Использование в дальнейшем методов зонной перекристаллизации и выращивания монокристалла методом Чохральского позволило довести качество германия более чем до 8N. Остаточная концентрация носителей заряда составляла $<10^{11}$ см$^{-3}$, а удельное сопротивление $\rho = 49–50$ Ом·см.

Литература

1. Houssa M., Satta A., Simoen E., Jaeger B. De., Caymax M. Germanium-Based Technologies: From Materials to Devices // Elsevier:Oxford, 2007. 480 p.
2. Raudorf T. W., Trammel R. C., Darken L. S. N-tipe high purity germanium coaxial detectors // IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1979. Vol. 26. P. 297–302.

3. Claeys C., Simoen E. Germanium-Based Technologies: From Materials to Devices // Oxford: Elsevier Science, 2007. 480 p.
4. Churbanov M. F., Gavva V. A., Bulanov A. D., Abrosimov N. V., Kozyrev E. A., Andryushchenko I. A. et al. Production of germanium stable isotopes single crystals // Crystal Research and Technology, 2017. Vol. 52. P. 1700026 (6).

УДК 544.6.018

Мониторинг состава электролита в ванне для электрохимического осаждения меди в технологии формирования межсоединений

Кирюшина И. В., к. т. н.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
ikiryushina@niime.ru

Разработаны технические требования для создания отечественных устройств мониторинга состава электролита в электрохимической ванне для создания медных межсоединений. Приведены характеристики аналогового и цифрового типов систем, указаны методы для определения концентрации добавок в электролите.

Ключевые слова: медный электролит; медная металлизация; добавки к электролиту; мониторинг состава электролита.

На сегодняшний день существует два основных способа мониторинга состава электролита в ванне: аналоговый (автоматический отбор пробы, транспортировка ее к измерительному модулю, проведение измерений, корректировка концентрации добавок) и цифровой (использование специализированного датчика внутри ванны, настроенного по требуемому составу электролита, с помощью которого периодически проводится анализ реального электролита и по результатам сравнения с моделью осуществляется корректировка электролита в ванне).

Методы, используемые для анализа состава электролита [1] аналоговым способом:

- циклическая инверсионная вольт-амперометрия (Cyclic Voltammetry Stripping — CVS): определение содержания ингибитора проводится методом титрования с последовательным разбавлением (Dilution Titration — DT); содержание катализатора определяется с помощью модифицированного метода линейной аппроксимации (Modified Linear Approximation Technique — MLAT); определение выравнивателя осуществляется методом DT, когда в титруемом электролите уже находятся ингибитор и катализатор;
- концентрация ионов хлора определяется методом безреагентного электрохимического анализа (Non-reagent Electrochemical Analysis — NREC);
- концентрация меди измеряется с помощью метода безреагентной спектроскопии (Non-reagent Spectroscopic Analysis of Copper — NRS);
- концентрация кислоты определяется методом безреагентного электрохимического анализа (Non-reagent Electrochemical Analysis of Acid — NREA).

Методы, используемые для анализа состава электролита [2] в электрохимической ванне цифровым способом:

- циклическая вольт-амперометрия на постоянном и переменном токе с применением статистического (хемометрического) подхода для анализа данных.

Одним из факторов, сдерживающих разработку отечественного оборудования электрохимического осаждения меди, является отсутствие автоматической системы мониторинга электролита в ванне, являющейся составной частью этого технологического оборудования. Основываясь на опыте работы с лучшими образцами зарубежного оборудования, рекомендуется следующие аналитические последовательности для системы аналогового типа:

- анализ стандартного раствора → анализ реального электрохимического раствора;
- для органической ячейки: анализ ингибитора → анализ катализатора → анализ выравнивателя → анализ концентрации ионов хлора; в неорганической ячейке: содержание кислоты → концентрация меди.

Данными системами мониторинга типа Quali-Line компании ECI Technology, как правило, комплектуются все установки электрохимического осаждения типа SABRE производства LAM Research, поставляемые в основном на предприятия Европы и США. Цифровыми системами типа RTA производства Technic комплектуются установки типа Raider компании AMAT, поставляемые в Юго-Восточную Азию. Отечественное оборудование электрохимического осаждения меди требует отечественной системы мониторинга электролита в ванне.

Аналоговая система должна комплектоваться двумя ячейками. Органическая — с электродами сравнения, платиновым и вспомогательным. Неорганическая — с мешалкой, электродом для безреагентного измерения содержания кислоты и связью с потоковой диаграммой со спектральной ячейкой для анализа меди. Анализируемый и стандартные растворы должны подаваться через систему шприцев. В системе должна быть предусмотрена система сливов.

Литература

1. Кирюшина И. В. Методика подбора системы добавок к электролиту для электрохимического осаждения меди методом двойного дамасцена // Российский форум «Микроэлектроника-2024» / 10-я научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». — Сборник тезисов: Научно-технологический университет «Сириус», 23–28 сентября 2024 г. — М.: Техносфера, 2024. — С. 933–936.
2. Jaworski A., Wikiel H., Wikiel K. Temperature Compensation by Embedded Temperature Variation Method for an AC Voltammetric Analyzer of Electroplating Baths // Electroanalysis, February 2019. Vol. 31. Issue 2 / Special Issue: ESEAC Conference 2018. P. 318–328.

УДК 538.975

Метод оценки стабильности термической обработки тонкопленочных алюминиевых структур, осажденных методом магнетронного распыления

Темирова Т. И., Бикаев Р. И., Божко С. А., к. т. н.
ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
tamara.temirova@mapperllc.ru

Проведено исследование для оптимизации метода контроля работы вакуумной печи на основе измерения сопротивления алюминиевых пленок после процесса термообработки. Подобран режим, обеспечивающий стабильное изменение параметров без появления дефектов.

Ключевые слова: тонкие пленки; алюминий; магнетронное напыление; PVD; термический отжиг; структурно-фазовые превращения; электросопротивление.

Контроль стабильности термических процессов играет важную роль в технологии получения тонкопленочных структур, особенно в условиях массового производства, где требуется высокая воспроизводимость и повторяемость параметров. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью надежной верификации режимов термообработки [1], влияющих на свойства материалов и работу конечных устройств. Кроме того, термическая стабильность оборудования напрямую влияет на допуски в технологиях микроэлектроники, где незначительные отклонения температуры могут привести к браку или изменению характеристик готовых элементов. В данной работе основное внимание уделено экспериментальной проверке стабильности работы вакуумной печи на основе анализа изменения сопротивления алюминиевых пленок, нанесенных методом магнетронного распыления.

В качестве подложки использовался SiO_2, нанесенный на стандартные кремниевые пластины методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD). На него методом магнетронного распыления наносились алюминиевые пленки толщиной порядка 50 нм. Геометрия алюминиевых элементов имела форму меандра, сформированную напылением через маску на магнетроне, что обеспечило возможность прямого измерения сопротивления пленки методом двухзондового контакта.

После формирования пленки проводилось первичное измерение сопротивления при комнатной температуре. Далее образцы подвергались термической обработке в вакуумной печи при температуре 575 °C в течение 1 часа. После отжига сопротивление элементов измерялось повторно. Анализ проводился на выборке из нескольких десятков пластин.

В результате термического воздействия наблюдалось стабильное увеличение сопротивления алюминиевых пленок. Изменение сопротивления (ΔR) оставалось практически одинаковым для всех исследованных образцов, что указывает на высокую степень воспроизводимости процессов в используемой термической установке. Это подтверждает точность поддержания заданной температуры и равномерность нагрева во всем объеме печи.

Ранее проводились аналогичные эксперименты при температуре 600 °C. Однако в этом случае на поверхности алюминиевых дорожек наблюдалось образование микроскопических дефектов, что, вероятно, связано с локальным плавлением алюминия или нарушением адгезии пленки к подложке. Снижение температуры до 575 °C позволило избежать подобных дефектов, сохранив при этом чувствительность метода к термическому воздействию, выраженную в изменении сопротивления.

Проведенное исследование показало, что термический отжиг при 575 °C вызывает воспроизводимое увеличение сопротивления алюминиевых пленок, осажденных методом PVD. Это изменение может быть связано как с ростом зерен алюминия, так и с релаксацией остаточных напряжений в пленке. Полученные результаты позволяют использовать данную методику для контроля корректности работы вакуумной печи и стабильности процесса отжига, что важно для обеспечения качества и повторяемости технологических операций при производстве тонкопленочных структур.

Литература

1. Naikan V. N. A., Krishna B. Misra Statistical Process Control // Handbook of Performability Engineering, 2008. P. 187–201.

УДК 616.314-089.23 (076)

Разработка полимерной основы для негативного резиста

Букреева К. С., Курбатов В. Г.
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
bukreevaks@icp.ac.ru

Проанализирован состав промышленно выпускаемого негативного резиста. Определен состав летучей части и полимерной основы негативного резиста. Разработана методика синтеза полимерной основы для негативного резиста. Определены условия синтеза, влияющие на свойства полимерной основы негативного резиста.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография; полимерная основа; бисфенол-А; негативный резист.

С ростом спроса на портативную электронную продукцию, такую как мобильные телефоны, компьютеры, портативное медицинское оборудование и т. д., технология микро- и нанообработки получила больше внимания в современных производствах. Для данной продукции необходимы высокопроизводительные интегральные схемы, панели, дисплеи, высокоточные компоненты. Примерами технологий микронанообработки являются технологии 3D-печати, фотолитографии и технологии наноимпринта. Отсутствие отечественных разработок материалов для литографических процессов ставит Россию в зависимость от импорта, что особенно критично в условиях текущих санкций, запрещающих поставки необходимых материалов. Разработка собственных резистов, включая негативные, приобретает первостепенное значение для обеспечения технологической независимости страны. Несмотря на меньшую распространенность негативных резистов по сравнению с позитивными, их создание представляет собой важную задачу, решение которой позволит диверсифицировать доступные технологии и снизить зависимость от импортных аналогов.

В рамках работы был выполнен анализ промышленно выпускаемого негативного резиста. С помощью спектральных методов (ИК- и ЯМР-спектроскопия) был определен качественный и количественный состав летучей части. Результаты анализа выделенной полимерной основы показали, что в качестве основного пленкообразующего компонента используется эпоксидированный фенол-формальдегидный олигомер. Применение пиролитической газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектором подтвердило состав растворителя и состав полимерной основы.

Исходя из результатов анализа полимерной основы была предпринята попытка разработки технологии синтеза аналогичного продукта. Было проведено систематическое исследование влияния условий синтеза, таких как температура, время реакции, соотношение реагентов, тип катализатора и его количество, на структуру образующихся фенол-формальдегидных и эпоксидных олигомеров и их молекулярно-массовые характеристики. Определены закономерности процесса образования эпоксидного олигомера из фенол-формальдегидного олигомера. Установлено, что изменение условий синтеза оказывает существенное влияние на молекулярную

массу получаемых олигомеров, а также на показатель полидисперсности, что в свою очередь влияет на реологические свойства резиста и качество формируемых пленок. Полученные результаты открывают перспективы для разработки отечественной технологии производства негативных резистов и снижения зависимости от импортных поставок.

Работа выполнена по теме № FFSG-2024-0017 государственного задания с использованием оборудования аналитического центра коллективного пользования ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

УДК 538.91

Влияние морфологии самоорганизованных массивов Ag-наночастиц на эффективность усиления сигнала ГКР

Гришин Т. С.[1,2], Волкова Л. С.[1,2], Дудин А. А.[1], Меденков Г. А.[2], Дубков С. В.[2], Громов Д. Г.[2]

[1] Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН
119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлено систематическое исследование морфологической эволюции и оптических свойств массивов Ag-наночастиц, сформированных с помощью магнетронного распыления и последующего отжига исходного металлического слоя (80–300 °C). Показано, что радиус r ≈ 15 нм и межчастичное расстояние d ≈ 20 нм обеспечивают коэффициент усиления ГКР ~$2 \cdot 10^5$.

Ключевые слова: металлические наночастицы; плазмонный резонанс; чувствительные слои; гигантское комбинационное рассеяние; самоорганизация; магнетронное напыление.

Массивы Ag-наночастиц на твердотельных подложках широко востребованы в сенсорике, каталитике, фотонике и оптоэлектронике благодаря явлению локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР). Это явление лежит в основе перспективного метода — спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР), которая обеспечивает детектирование следовых концентраций веществ. Ключевым элементом данного метода являются подложки с массивами плазмонных наночастиц, которые обеспечивают локальное усиление электрического поля. При этом спектроскопия ГКР не ограничивается аналитическими применениями — на ее основе могут быть разработаны компактные сенсорные устройства для детектирования сверхнизких концентраций веществ.

Для эффективного усиления сигнала критически важны геометрические параметры наночастиц — радиус, межчастичное расстояние и степень покрытия поверхности, поскольку именно они определяют плотность «горячих точек». Актуальной задачей остается разработка технологически простого и воспроизводимого способа получения массивов Ag-наночастиц с заранее заданной морфологией, совместимого с CMOS-технологией.

В работе использован метод магнетронного напыления Ag-пленок эквивалентной толщиной 2–12 нм на подложку Si/SiO_2, за которым следовал низкотемпературный отжиг (80–300 °C, атмосфера N_2, 10 мин). Исходные слои представляли собой островковые структуры различной плотности. Морфология сформированных массивов исследована с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ), а количественные морфологические параметры — радиус наночастиц, межчастичное расстояние, степень покрытия, сферичность — определены с использованием специально разработанного программного обеспечения. Полученные данные позволили проследить основные этапы термической эволюции: разрыв исходной структуры, рост наночастиц за счет освальдовского созревания, коалесценцию, перераспределение материала внутри наночастицы. На основе этого установлены

границы температурных режимов, соответствующих тем или иным стадиям перестройки структуры.

Установлено, что разрушение исходной структуры начинается при ~80 °C, активный рост наночастиц — при >100 °C, а насыщение размеров — около 300 °C. Корреляция морфологии с коэффициентом усиления ГКР позволила выделить оптимальную конфигурацию массива: радиус частиц $r = 15 \pm 3$ нм, межчастичное расстояние $d \approx 20$ нм, покрытие $FF \approx 40\%$ и сферичность $S > 0{,}8$. В этой области возникает плотная сеть «горячих точек», обеспечивающая воспроизводимый коэффициент усиления $\sim 2 \cdot 10^5$.

Литература

1. Grishin T. S. et al. Evolution of morphological parameters in self-assembled Ag nanoparticle arrays for high-performance SERS // Optical Materials, 2025. Vol. 167. P. 117260.

УДК 538.91

Самоочищающиеся гибридные структуры на основе наностолбиков TiO_2 и Ag/Cu-наночастиц для автономных ГКР-сенсоров

Волкова Л. С.[1,2], Гришин Т. С.[1,2], Дудин А. А.[1], Латипов Е. В.[1], Назаркина Ю. В.[2], Дубков С. В.[2], Громов Д. Г.[2]

[1] Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН
119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработаны самоочищающиеся ГКР-подложки на основе массивов наностолбиков TiO_2, декорированных Ag- и Cu-наночастицами. Сформированные структуры демонстрируют коэффициент усиления ГКР до 10^6 и полное фотокаталитическое разложение аналита под УФ-облучением, обеспечивая многократное повторное использование. Предлагаемый подход перспективен для создания автономных ГКР-сенсоров.

Ключевые слова: наностолбики TiO_2; наночастицы; фотокатализ; гигантское комбинационное рассеяние; самоочистка; сенсоры; плазмонный резонанс.

Перспективным направлением развития сенсорики является разработка автономных детекторов сверхмалых концентраций веществ на основе явления гигантского комбинационного рассеяния света. В качестве чувствительных элементов таких устройств используются металлические наноструктуры, обладающие выраженными плазмонными свойствами [1]. Для автономных сенсоров важна возможность многократного использования, однако традиционные ГКР-подложки являются одноразовыми. Сверхвысокая чувствительность спектроскопии ГКР — ее главное достоинство, позволяющее регистрировать ультранизкие концентрации веществ, одновременно оборачивается существенным ограничением: даже после очистки на подложке могут оставаться следовые количества аналита, продолжающие давать сигнал. Для преодоления указанных ограничений разработаны самоочищающиеся плазмонно-фотокаталитические структуры на основе наностолбиков TiO_2 с наночастицами Ag и Cu [2].

Вертикально ориентированные наностолбики TiO_2 формировались методом двухстадийного анодирования на Si/SiO_2-подложках с предварительно нанесенными слоями TiN/Al. Декорирование наностолбиков наночастицами Ag, Cu осуществлялось магнетронным распылением соответствующих мишеней в среде Ar. С учетом различий в морфологической эволюции наночастиц данных металлов Ag не подвергался последующему отжигу, изначально формировался плотный массив наночастиц непосредственно на боковых гранях наностолбиков. Для Cu, напротив, применялся низкотемпературный отжиг (300 °C, Ar), необходимый для агрегации исходного слоя в дискретные наночастицы, которые преимущественно локализовались на вершинах наностолбиков.

Разработанные подложки обеспечивают одновременно высокую ГКР-активность и способность к фотокаталитическому разложению остатков аналита под действием УФ-излучения. Максимальный коэффициент усиления сигнала

комбинационного рассеяния составил $EF \approx 10^6$. При этом по завершении фотокаталитического цикла подложка полностью восстанавливает свою чувствительность, демонстрируя воспроизводимый сигнал при повторных измерениях. Таким образом, полученные гибридные структуры представляют собой платформу для создания компактных автономных сенсорных устройств, сочетающих в себе высокую чувствительность и надежный механизм самоочистки.

Литература

1. Grishin T. S. et al. Evolution of morphological parameters in self-assembled Ag nanoparticle arrays for high-performance SERS // Optical Materials, 2025. Vol. 167. P. 117260.
2. Savchuk T. P. et al. Synthesis and investigation of multifunctional TiO_2 photocatalysts modified by metal nanoparticles // Catalysis Communications, 2024. Vol. 187. P. 106907.

УДК 539.2:620.3

Разработка биосовместимых нанокомпозитов на основе ОУНТ и n-бутилбороновой кислоты для сенсорных приложений

Едельбекова П. А.[1,2], к. ф.-м. н. Шаман Ю. П.[1,3], д. т. н. Герасименко А. Ю.[1], д. т. н. Гаврилов С. А.[2]

[1] Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук
119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А
edelbekova.p@inme-ras.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] НПК «Технологический центр»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

Предложен метод иммобилизации *n*-бутилбороновой кислоты на ОУНТ с контролем степени окисления и подбором растворителя. Термический и спектральный анализ подтвердил эффективность подхода для разработки биосенсорных материалов.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; *n*-бутилбороновая кислота; функционализация; иммобилизация; биосенсорные материалы.

Создание высокочувствительных биосенсоров нового поколения требует разработки функциональных композитных материалов, сочетающих молекулярное распознавание с улучшенными электрофизическими характеристиками. Углеродные нанотрубки (УНТ), обладая уникальной электропроводностью (10^2–10^6 См/см), высокой удельной поверхностью вплоть до 1500 $м^2$/г и исключительной химической стабильностью при нормальных условиях, служат идеальной основой для таких систем [1]. Функционализация одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) бороновой кислотой (и ее производными) открывает перспективы создания сенсоров для детекции гликированного гемоглобина (HbA1c) — ключевого маркера долговременного контроля гликемии. В отличие от традиционного мониторинга глюкозы, измерение HbA1c отражает средний уровень сахара за 2–3 месяца [2], что исключает влияние кратковременных колебаний и существенно повышает диагностическую ценность.

В рамках данного исследования была осуществлена успешная функционализация ОУНТ *n*-бутилбороновой кислотой (n-ББК). Предварительным этапом работ являлся процесс окисления ОУНТ для формирования карбоксильных (-COOH) функциональных групп на поверхности, необходимых для иммобилизации молекул бороновой кислоты. Используемые кислоты и длительность воздействия варьировались в целях изучения влияния предварительной кислотной обработки на успешность последующей функционализации УНТ. Полученные в результате окисления ОУНТ диспергировались в различных условиях. Оценивалась возможность использования фосфатно-солевого буфера (PBS, pH = 7,4) с добавлением 0,1 % дезоксихолата натрия (ДХН) и водных растворов с добавлением смеси ПАВ (холата натрия (ХН) и ДХН) в качестве растворителя. В дальнейшем в полученную суспензию добавлялись бороновая кислота и 1-этил-3-(3-диметиламинопропил) карбодиимид (ЕДК) в качестве активатора карбоксильных групп окисленных ОУНТ. Наличие иммобилизованных на поверхности УНТ групп *n*-бутилбороновой

кислоты подтверждается термогравиметрическим анализом, наличие пиков B-O-C на ИК-спектрах свидетельствует об образовании сложноэфирной связи между n-ББК и ОУНТ, что также подтверждает успешность функционализации.

В данной работе было проанализировано влияние технологического процесса предварительного окисления ОУНТ на эффективность иммобилизации n-ББК, оценена целесообразность использования приближенных к физиологическим условиям буферных растворов в качестве растворителя, определены составы растворителя, обеспечивающие стабильность иммобилизации *n*-бутилбороновой кислоты и биосовместимость комплекса n-ББК-ОУНТ и предотвращающие агрегацию УНТ. Для контроля и подтверждения результатов использовались методы термического анализа, спектроскопия комбинационного рассеяния света и ИК-фурье-спектроскопия.

Литература

1. Advancements in carbon nanotube-polymer composites: Enhancing properties and applications through advanced manufacturing techniques/ ErmiasWubeteFenta, BerihunAbebawMebratie.// Heliyon,2022 — Vol. 10, Issue 16, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36490
2. Zhan Z., Li Y., Zhao Y., Zhang H., Wang Z., Fu B., Li W.J. A Review of Electrochemical Sensors for the Detection of Glycated Hemoglobin // Biosensors, 2022. № 12 (4). P. 221. URL: https://doi.org/10.3390/bios12040221.

УДК 667.6

Разработка технологии синтеза эпоксидных олигомеров на основе замещенного бифенила

Давыдова Е. С., Митрофанова Е. В., Курбатов В. Г.
Федеральный исследовательский центр
проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
kurbatovvg@list.ru

Разработана технология синтеза эпоксидной смолы на основе замещенного бифенила. Показано влияние условий синтеза на температуры размягчения и молекулярно-массовые характеристики эпоксидных олигомеров. На образце синтезированной смолы получен образец герметизирующего материала, не уступающий по свойства промышленно выпускаемому.

Ключевые слова: микроэлектроника; герметизация микросхем; пресс-материалы; эпоксидная смола.

Пластмассовые корпуса для микросхем в настоящее время используются практически во всех электронных устройствах: ноутбуках, смартфонах, телевизорах и др. Одним из основных компонентов для данного процесса являются герметизирующие пресс-материалы. В их состав входят эпоксидсодержащие и фенолформальдегидные смолы, а также диоксид кремния в качестве наполнителя. В связи с поверхностным монтажом полупроводниковых корпусов в последнее время возрастает потребность в эпоксидных формовочных компаундах с низким водопоглощением, хорошей совместимостью с другими наполнителями, высокой химической стойкостью, хорошей текучестью, при которой требуется меньшее давление при литье. Поэтому широко используются порошковые эпоксидные смолы с бифенольной структурой, технология синтеза которых разрабатывалась в данной работе.

По разработанной методике получаются образцы со свойствами, близкими к ранее проанализированному импортному аналогу. В ней исходный продукт, катализатор и ЭХГ перемешивают в течение 3 часов при постоянной температуре, остаточный ЭХГ выпаривают на роторном испарителе и добавляю толуол, затем постепенно в смесь вводят раствор щелочи и выдерживают определенное время при постоянной температуре. После окончания раствор расслаивается и органический слой промывают дистиллированной водой и сушат в вакуумном шкафу сутки. Полученный образец имеет желтоватую порошкообразную структуру.

Эпоксидные олигомеры были получены из 3,3',5,5'-тетраметилбифенол-4,4'-диола (ТМБФ) и эпихлоргидрина (ЭХГ) на двух различных катализаторах: тетрабутиламмоний бромид и тетраэтиламмоний бромид. Изготовленные образцы были проанализированы с помощью ЯМР-, ИК-спектроскопии, а также гель-проникающей хроматографии.

Анализируя протонные спектры синтезированных смол и заводского аналога, можно сделать вывод, что они идентичны. Наблюдаются характерные полосы для эпоксидных смол: 4,1 мд характерны для протонов в бензольных кольцах, 3,6 и 3,35 мд — метиленовая группа вблизи эпоксидного кольца, 2,82 и 2,66 мл — CH и CH_2 группы соответственно в эпоксидном кольце, 2,3 мд — метиленовые группы,

замещенные в бензольных кольцах. Рассчитанная по спектрам чистота составляет более 95,8 %.

Был проведен сравнительный анализ эпоксидных олигомеров, синтезированных при двух различных катазизаторах, при уменьшении количества катализатора, при изменении времени синтеза, при уменьшении количества ЭХГ и при увеличении объема синтеза примерно в пять раз. На данных спектрах видны изменения формы пиков, характерных для метиленовой группы вблизи эпоксидного кольца, что связано с различной природой олигомеров при изменении параметров синтеза.

Работа выполнена по теме № FFSG-2024-0017 государственного задания с использованием оборудования аналитического центра коллективного пользования ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

УДК 537.226.4

Расчет зонной структуры сегнетоэлектрического $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$ для определения механизма токового транспорта

Марголин И. Г., Савичев И. А., Чуприк А. А.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
ilyamarholin2618@gmail.com

С помощью теории функционала плотности мы рассчитали зонные структуры различных структурных фаз оксида гафния. Это позволило установить доминирующую роль границ зерен в проводимости сегнетоэлектрических пленок $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$.

Ключевые слова: сегнетоэлектрический оксид гафния; сегнетоэлектрическая память; токовый транспорт.

Сообщение о сегнетоэлектрических свойствах тонких пленок на основе HfO_2, опубликованное в 2011 году [1], привело к тому, что этот материал стал весьма перспективным кандидатом для использования в устройствах энергонезависимой памяти следующего поколения. Два существенных преимущества отличают оксид гафния от множества других сегнетоэлектрических материалов: его совместимость с современными кремниевыми технологиями [2] и возможность уменьшения толщины сегнетоэлектрических пленок до нескольких нанометров. Это последнее свойство делает устройства на основе оксида гафния исключительно миниатюрными по сравнению с классическими сегнетоэлектриками на основе перовскита.

Однако функциональные свойства структур памяти меняются с изменением толщины. Предыдущие исследования показали, что уменьшение толщины приводит к снижению тока утечек, что, в свою очередь, приводит к двум важным последствиям. Во-первых, это приводит к увеличению энергопотребления сегнетоэлектрических запоминающих устройств, поскольку возрастает энергия, необходимая для записи одного бита. Во-вторых, повышенный ток утечкек отрицательно сказывается на производительности памяти. Например, в FTJ и FeFET это значительно увеличивает вклад паразитного тока, который не модулируется поляризацией. В FRAM заряд от тока утечек суммируется с зарядом от поляризации, что приводит к ухудшению дифференциации зарядов для 0 и 1 бита. Поэтому необходим тщательный поиск оптимального баланса между сегнетоэлектрическими свойствами и токами утечек. Однако точное происхождение тока утечек в сегнетоэлектрических пленках оксида гафния все еще остается предметом дискуссий.

Чтобы выявить вклад структурно-фазового полиморфизма в электронные и транспортные свойства пленок $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$, рассчитали зонные структуры различных фаз оксида гафния, присутствующих в этих пленках, используя теорию функционала плотности. Полученные значения ширины запрещенной зоны составляют 5,58, 5,64 и 5,16 эВ для полярной ромбической $Pca2_1$, тетрагональной $P4_2/nmc$ и моноклинной $P2_1/c$ структурных фаз соответственно. Проанализировав экспериментальные и теоретические результаты, установили, что границы зерен играют доминирующую роль в проводимости сегнетоэлектрических пленок $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$, что объясняет ограниченную функциональность этого материала для

ряда применений. Полученные результаты демонстрируют важность определения размера зерен в сегнетоэлектрических пленках оксида гафния для разработки высокоэффективных электронных устройств с низким энергопотреблением.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-00493).

Литература

1. Böscke T. S., Muller J., Braeuhaus D, Schröder U., Böttger U. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films // Appl. Phys. Lett., 2011. Vol. 99. P. 102903.
2. Bohr M. T., Chau R. S., Ghani T., Mistry K. The high-k solution // IEEE Spectr., 2007. Vol. 44. P. 29–35.

УДК 621.382.323

Экспериментальное исследование HEMT-транзисторов на основе гетероэпитаксиальных соединений нитридов III группы

Цунваза Д. М., Рыжук Р. В., к. т. н., Гусев А. С., Захарченко Р. В., к. т. н., Каргин Н. И., д. т. н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
DTsunvaza@mephi.ru

Представлены результаты экспериментального исследования активных компонентов МИС на основе нитрида галлия. Измерены статические вольт-амперные характеристики GaN HEMT-транзисторов и их S-параметры в диапазоне частот до 50 ГГц в различных областях пластины.
Ключевые слова: GaN HEMT; силовая электроника; СВЧ-электроника; библиотека элементов.

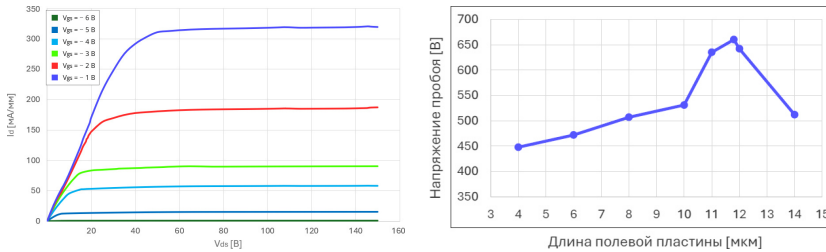
Транзисторы на основе гетероструктур нитридов III группы имеют большой потенциал в области силовой и СВЧ-электроники [1–2]. Силовые GaN-устройства находят применение в преобразователях энергии, импульсных источниках питания, а также в автомобильной промышленности для обеспечения стабильной работы компонентов при высоких значениях напряжения. В области СВЧ-электроники GaN HEMT-транзисторы используются в радиолокационных системах, усилителях мощности, системах спутниковой связи и базовых станциях 5G.

В данной работе проводится комплексное исследование HEMT-структур на основе гетероэпитаксиальных соединений нитридов III группы. В качестве экспериментальных образцов использовались GaN/SiC- и GaN/Al_2O_3-транзисторы с различным расстоянием затвор-сток и с различной шириной затворных секций (от 30 до 90 мкм), изготовленные по технологическому маршруту Центра радиофотоники и СВЧ-технологий НИЯУ МИФИ.

Топологический проект библиотеки элементов состоял из 17 технологических слоев и был разработан на основе предварительного расчета частотных и статических характеристик исследуемых устройств с использованием ПО САПР Silvaco Atlas и AWR Design Environment (рис. 1). В проект включены наборы активных и пассивных компонентов, тестовых структур для проведения контроля утечки мезаизоляции, тонкопленочных резисторов, сопротивления металлизации и др., а также тестовые транзисторы. Технологический процесс изготовления тестового модуля включал в себя следующие основные операции:

1) формирование мезаизоляции и мезарезисторов;
2) формирование омических контактов;
3) формирование затворов транзисторов методом фотолитографии (0,8 мкм) или методом электронно-лучевой литографии (0,25 мкм);
4) формирование пассивации-1 Si_3N_4 методом PECVD;
5) формирование тонкопленочных резисторов;
6) формирование металлизации первого уровня;
7) формирование пассивации-2 Si_3N_4 методом PECVD (конденсаторов);

8) формирование металлизации второго уровня и воздушных мостов.



а *б*

Рис. 1. Предварительный расчет: *а*) ВАХ силового GaN HEMT-транзистора; *б*) зависимости напряжения пробоя от длины полевой пластины [2]

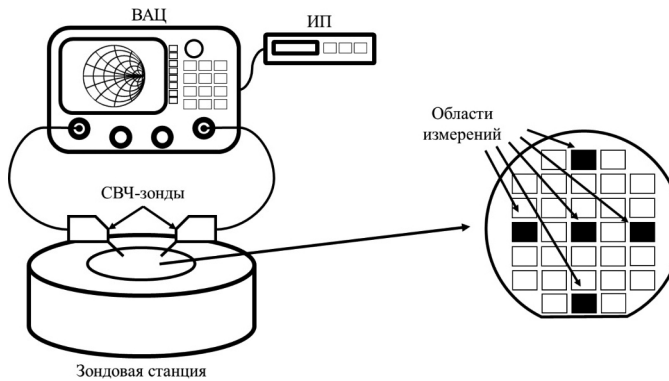


Рис. 2. Схема измерительного стенда с указанием областей измерения на пластине

Измерения экспериментальных образцов проводились с использованием зондовой станции MPI TS200-IFE, векторного анализатора цепей PNA-X в частотном диапазоне от 0,01 до 50 ГГц и мощности СВЧ-сигнала –10 дБм. Характеристики силовых транзисторов исследовались с помощью анализатора полупроводниковых приборов Keysight B1500. Для оценки воспроизводимости технологического процесса и разброса параметров по пластине измерения проводились в пяти контрольных областях (рис. 2).

Экспериментально установлено, что плотность тока насыщения транзисторов составила порядка 400 мА/мм. Измерения показали, что транзисторы с расстоянием затвор-сток 10 мкм способны коммутировать сигнал с частотой до единиц ГГц (при L_g = 0,8 мкм), а отклонение характеристик от среднего значения не превышало единиц процентов во всем исследуемом диапазоне частот.

Результаты работы открывают возможности для проектирования МИС на основе соединений нитридов III группы для использования в СВЧ- и силовой

электронике. В частности, на основе текущего исследования будет создана и внедрена в современные САПР библиотека элементов GaN-устройств.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра радиофотоники и СВЧ-технологий НИЯУ МИФИ в рамках проекта № FSWU-2025-0011.

Литература

1. Neininger P. et al. Advances in GaN Devices and Circuits at Higher mm-Wave Frequencies // e-Prime — Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2023. Vol. 4. P. 1–16.
2. Teo K. H. et al. Emerging GaN technologies for power RF digital and quantum computing applications: Recent advances and prospects, 2021 // J. Appl. Phys. Vol. 130 (16).
3. Неволина Т. Н. и др. Особенности моделирования HEMT-транзистора на основе гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN со спейсерным слоем AlN // 10-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули»: Сб. тезисов, 2024. — С. 1211–1212.

Технологические решения для достижения высокого отношения ON/OFF в транзисторах на основе двухслойного графена

Домарацкий И. К., Кащенко М. А., Титова Е. И., Мыльников Д. А., Свинцов Д. А.
Центр фотоники и двумерных материалов, МФТИ
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
domaratskij.ik@phystech.edu

Бурное развитие двумерной электроники в последнее десятилетие привлекает внимание исследователей к фундаментальным проблемам управления электронными свойствами атомарно тонких материалов, решение которых может кардинально изменить посткремниевую наноэлектронику.

Однослойный графен демонстрирует рекордную подвижность носителей заряда и высокое быстродействие, однако его практическое применение в электронике ограничено нулевой запрещенной зоной, что исключает применение в устройствах цифровой логики. Двухслойный графен (ДСГ) сохраняет высокое быстродействие, характерное для однослойного графена, но при этом позволяет формировать запрещенную зону, регулируемую за счет приложения перпендикулярного электрического поля. Это открывает перспективы создания энергоэффективных графеновых транзисторов с переключаемым состоянием, сочетающих быстродействие полуметаллов и управляемость полупроводниковых материалов.

Тем не менее в большинстве предыдущих работ экспериментальные проявления открытой запрещенной зоны в транспортных характеристиках ДСГ оставались слабовыраженными, что затрудняло их практическое применение [1]. В трудах описываются устройства с каналами, полученными из графена путем химического травления. В модифицированных краях графена возникают паразитные токи, за счет которых достижение высоких сопротивлений закрытого состояния становится невозможным [2].

Мы предлагаем принципиально новый подход, используя устройства с естественным (ненарушенным) краем канала, что позволяет полностью устранить паразитные токи [3]. Результат измерений оказался схожим с данными, полученными с образцов с геометрией Корбино, исключающей влияние краевых токов [2]. Дальнейшее применение high-k подзатворного диэлектрика HfO_2 с диэлектрической проницаемостью на порядок выше, чем у использовавшегося ранее hBN, в сочетании с природной морфологей края позволяет достичь высоких значений индуцированной запрещенной зоны [4]. На описанных в работе образцах была достигнута ширина запрещенной зоны в 100 meV и получено соотношение Ion/Ioff = 10^6.

Данная технология позволит использовать ДСГ в логических транзисторах, процессорах, радиочастотных усилителях 5G/6G, терагерцевых детекторах, гибкой и прозрачной электронике, аналого-цифровых преобразователях и фотонных интегральных схемах.

Литература

1. Oostinga J. B., Heersche H. B., Liu X., Morpurgo A. F., Vandersypen L. M. K. Gate-induced insulating state in bilayer graphene devices // Nat. Mater., 2008. Vol. 7. № 2. P. 151–157. DOI: 10.1038/nmat2082.
2. Zhu M. J. et al. Edge currents shunt the insulating bulk in gapped graphene // Nat. Commun., 2017. Vol. 8. № 1. P. 14552. DOI: 10.1038/ncomms14552.
3. Domaratskiy I. K., Kashchenko M. A., Semkin V. A., Mylnikov D. A., Titova E. I., Svintsov D. A. Natural Edge Bilayer Graphene Transistor // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № 1. P. S2–S5. DOI: 10.1134/S1063739723600541.
4. Titova E. I. et al. Non-Saturated Performance Scaling of Graphene Bilayer Sub-Terahertz Detectors at Large Induced Bandgap // Adv. Opt. Mater., Mar. 2025 P. 2500167. DOI: https://doi.org/10.1002/adom.202500167.

УДК 725.41

Технология промышленной чистоты и современное полупроводниковое производство

Александров П. А., Калечиц В. И., Ковбасюк И. Е., Хозяшева С. Е., Шахов М. Н., Весёлый Л. В., Макавеев П. Ю.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
msha@bk.ru

Обеспечение технологической чистоты — неотъемлемая часть любого современного высокотехнологического производства. В НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается программа создания учебной базы для подготовки специалистов в области технологической чистоты, включая экспериментальную базу и центр коллективного пользования.

Ключевые слова: чистые помещения; микроэлектроника; технологическая чистота.

Обеспечение технологической чистоты является неотъемлемой частью любого современного высокотехнологического производства, и полупроводниковая промышленность является лидером в этом направлении [1]. Исторически именно Курчатовский институт является одной из основных движущих сил в развитии этой отрасли. Еще в конце 80-х гг. XX века Курчатовский институт был назначен научным руководителем программы создания отечественной промышленности чистых производственных помещений (ЧПП).

Основными задачами для разработки были определены основы фильтрации и тонкой очистки воздуха, методики и приборы для определения эффективности воздушных фильтров, конструкция и технология изготовления фильтров тонкой очистки воздуха, конструкции ЧПП в целом и технология их изготовления.

Программа была успешно реализована. В стране было организовано производство элементной базы для создания ЧПП: отечественные стеновые ограждения, потолки, двери, шлюзы, фильтры, фильтровальные ячейки, фильтровентиляционные модули, датчики температуры, влажности, светильники, кондиционеры, скрубберы, специальная технологическая одежда и многое другое.

Создаваемая в стране преимущественно для производства микроэлектроники, технология чистых производственных помещений сразу же нашла широкое применение и фармацевтической промышленности, где она является краеугольным камнем, лежащим в основе производства лекарственных средств. Не менее важным потребителем чистых помещений является аэрокосмическая промышленость. Все операции по сборке и подготовке спутников и других космических аппаратов выполняются в чистых помещениях. Востребована технология чистоты и в точной механике, оптике, биотехнологиях, пищевой промышленности, практической медицине.

Одной из актуальных задач сейчас является грамотное использование созданных разработок, а для этого необходимы обучение нового поколения специалистов и переподготовка уже работающих в отрасли. В НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается программа создания учебной базы для подготовки специалистов в области технологической чистоты, включая экспериментальную базу и центр

коллективного пользования. В нее входят планы разработанного учебного курса технологической чистоты и физики аэрозолей, планы лабораторных работ по теме. Часть из упомянутого уже была успешно опробована в программе обучения студентов МФТИ. Подготовлены учебные пособия, включая переводы самых распространенных в мире книг по технологии чистоты.

Понимание того, что никакое высокотехнологичное производство и никакое качество его продукции немыслимы без обеспечения чистоты производственной среды пришло в современную промышленность. Технология промышленной чистоты продолжает свое развитие вместе с прогрессом всего мирового производства.

Литература

1. Уайт В. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытания и эксплуатации. — М.: НПЦ «Клинрум Инструментс», 2023. — 348 с.

УДК 539.25, 537.533.35

Радиационная стойкость. Об отказоустойчивых системах управления

Беклемишева А. В., Александров П. А., Макавеев П. Ю., Шемардов С. Г., Васильев А. Л., Беклемишев В. Н., Макавеев П. Ю.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
Annabekl@ya.ru

Радиационная нагрузка электронной компонентной базы создается за счет эффекта дозы, и эффекта отдельных частиц (тяжелых заряженных частиц и нейтронов высоких энергий). Методики радиационной стойкости должны быть обеспечены за счет технологических методов, например, создания структур кремний на изоляторе [1] и резервирования [2], создания дублирования, либо троирования ведущих узлов электронной компонентной базы.
Ключевые слова: микроэлектроника; отказоустойчивость; сбоеустойчивость; кремний на изоляторе; электронная компонентная база; радиационная стойкостью

Исследование работоспособности электронной компонентной базы (ЭКБ) под воздействием облучения уже давно представляет большой интерес для атомной, космической промышленности, а также для научных исследований, не говоря тем более о военных применениях. Это очень многофакторная задача, так как помимо техногенных источников излучения существует и природная компонента. Воздействие на ЭКБ может быть временным; приводящим к неправильному срабатыванию транзистора, и работа может со временем восстановиться, выдавая, впрочем, неправильный результат расчетов. Такое явление называется сбоем в работе ЭКБ, и характерные времена восстановления работоспособности ЭКБ связаны с временем диффузии носителей зарядов на расстояние в размер транзистора. Также радиация может вызывать и отказы, окончательный уход параметров транзистора, связанный с появлением дефектов в полупроводнике.

Более ранними теоретическими исследованиями было показано, что нейтрон, попадая в микросхему, может столкнуться с атомом кремния (основной элемент микросхемы) давая первично выбитый атом, который тормозится, продуцируя электрон-дырочные пары, а они уже заряжают характерные для транзистора конденсаторы. Когда напряжение на них будет сравнимо с напряжением питания, может произойти сбой. Понятно, что это явление пороговое по энергии нейтронов, и порог составляет около 5 МэВ.

В качестве вариантов решения обеспечения безопасной работы ведущих узлов ЭКБ, можно предложить для каждого транзисторного логического элемента установку идентичного ему дублирующего логического элемента, в качестве дублирующих элементов использовать логические элементы, не имеющие памяти, располагая дублирующие друг друга логические элементы на расстоянии между ними, превышающем размер области повреждения микросхемы от одной частицой излучения. Каждый входящий в дублирующие логические элементы транзистор выполняют в виде квадрированного транзистора, представляющего четверку соединенных между собой параллельно и последовательно одиночных транзисторов.

Литература

1. Александров П. А., Емельянова О. В., Шемардов С. Г., Хмеленин Д. Н., Васильев А. Л. Проблемы высокодозной ионной имплантации ионов гелия в кремний // Кристаллография, 2024. — Т. 69. — № 3. — С. 494–504.
2. Александров П. А., Беклемишева А. В., Макавеев П. Ю., Уксусов Е. И., Фанченко С. С., Ефименко Е. В. Исследования сбоеустойчивости электронных компонентов под действием отдельных частиц // Вестник НИЯУ МИФИ, 2025. — № 14 (1). — С. 85–90.

УДК 539.25, 537.533.35

Разработка имплантационной технологии изготовления структур «кремний на изоляторе»

Беклемишева А. В., Шемардов С. Г., Беклемишев В. Н., Александров П. А.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
Annabekl@ya.ru

Работа посвящена повышению отказоустойчивости управляющих систем ядерных и термоядерных установок, а также космических аппаратов, функционирующих в условиях воздействия интенсивного ионизирующего излучения. Наряду со схемотехническими методами, такими как резервирование, рассматривается технологический подход, основанный на применении структур типа «кремний на изоляторе» (SOI), отличающихся высокой радиационной стойкостью. Предлагается использовать эффект формирования изоляционного слоя имплантацией ионов гелия в кремний с последующим отжигом и окислением, позволяющий создать изолирующий слой, аналогичного SOI-структурам. Такой подход обеспечивает улучшенные характеристики микросхем — увеличение плотности размещения, повышение быстродействия и расширение температурного диапазона работы, что делает возможным их использование вблизи источников сильного излучения.

Ключевые слова: микроэлектроника; кремний на изоляторе; микросхемы; имплантационная технология.

Функционирование компактных ядерных и термоядерных установок так же, как и функционирование искусственных спутников Земли и космических аппаратов, сопряжено с необходимостью решения проблемы повышения отказоустойчивости управляющих систем, работающих в условиях облучения высокоэнергетическими нейтронами и тяжелыми частицами и воздействия фоновой радиации, которая решается на схемотехническом и технологическом уровне. К схемотехническим методам относится в основном резервирование, которое для случая действия отдельных частиц дает хорошие результаты. Увеличение дозы облучения обычно вызывает дрейф параметров транзисторов, что может приводить к неверным результатам расчета. В этом случае целесообразно применять технологические методы повышения отказоустойчивости, а именно использовать в качестве исходных структур пластины со структурой «кремний на изоляторе», представляющие собой трехслойный пакет, состоящий из кремниевой пластины, прослойки диэлектрика и размещенного на нем тонкого приборного слоя кремния. Для изготовления таких структур используется технология ионной имплантации и плазменной инженерии поверхности. Использование таких структур обеспечивает отсутствие электрической связи между соседними транзисторами, что позволяет увеличить плотность их размещения, обеспечивает повышенное быстродействие и расширяет диапазон рабочих температур, а также увеличивает радиационную стойкость, что должно позволить размещать микросхемы, изготовленные на основе таких модифицированных подложек, в непосредственной близости от источников ионизирующего излучения: термоядерных установок, ядерных энергетических установок.

В настоящей работе для достижения поставленной цели предлагается использовать явление образования слоя газонаполненных пузырей при имплантации ионов гелия в кремний и последующего отжига. Дальнейшее высокотемпературное окисление подложек, подвергнутых такой обработке, должно позволить получить захороненный слой пузырей с окисленными стенками, что и является аналогом структуры «кремний на изоляторе». Для обеспечения минимальной проводимости изолирующего слоя необходимо иметь достаточную концентрацию пузырей, что обеспечивается высокой дозой имплантации гелия.

УДК 621.382.3+681.3.06+621.3.049.77

Стохастическая составляющая ошибки позиционирования при формировании фотолитографического изображения

Шарапов А. А.[1,2], Горнев Е. С.[1], академик РАН
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
asharapov@niime.ru
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Представлена модель литографического процесса с учетом стохастической составляющей ошибки позиционирования края (EPE), связанной с флуктуациями химических свойств фоторезиста. Подход позволяет оценивать влияние неровности края линии на точность формирования критических структур.
Ключевые слова: неровность края; шероховатость; ошибка позиционирования края; наноразмерные структуры.

Современное производство интегральных схем представляет собой последовательность строго контролируемых этапов, где по мере уменьшения критических размеров накопление ошибок между стадиями требует все более жестких допусков и высокой точности на каждом шаге [1]. Особенно это актуально для этапа формирования изображения в фотолитографии, где накопленные отклонения могут существенно повлиять на точность переноса и характеристики получаемых структур. В этой связи особое внимание уделяется ошибке позиционирования края (Edge Placement Error, EPE) — отклонению фактического положения границ элементов, таких как линии или контакты, от их проектного положения [2]. Накопление ошибки позиционирования края обусловлено как систематическими (аберрации оптической системы, нелинейный отклик фоторезиста, ошибки совмещения масок и деформации подложки и др.), так и стохастическими факторами (флуктуации компонентов фоторезиста, их диффузия, статистика деблокирования и проявления, фотонный шум и др.). Одной из составляющих ошибки позиционирования края, связанной с влиянием стохастических факторов, является неровность края линии (Line Edge Roughness, LER).

С развитием технологий и уменьшением критических размеров структур, влияние неровности края возрастает [3]. В условиях, когда допустимая погрешность составляет единицы нанометров, даже минимальные вариации края становятся критичными. Данные эффекты могут приводить к образованию коротких замыканий и функциональных дефектов в интегральных микросхемах.

В этой связи возникает необходимость в построении моделей литографического процесса, способных учитывать стохастическую природу неровности края линии как ключевого фактора, формирующего ошибку позиционирования. Это особенно актуально при переходе к проектным нормам 180–90 нм и ниже, где становится критичным влияние флуктуаций, обусловленных как составом фоторезиста, так и стохастикой процессов экспонирования и проявления. В процессе разработки новых резистных материалов необходимо оценивать влияние стохастических эффектов на позиционирование элементов, не прибегая к многократным

производственным экспериментам. Увеличение числа таких итераций приводит к росту простоев дорогостоящего литографического оборудования, что делает задачу предсказательного моделирования с учетом стохастических факторов особенно актуальной.

Для анализа ошибки позиционирования края могут использоваться два типа моделей — полные стохастические и компактные. Первые обеспечивают высокую точность, включая статистические флуктуации на уровне отдельных молекул, но требуют значительных вычислительных ресурсов. Компактные модели применимы для оценки поведения на уровне чипа, но обладают ограниченной физической интерпретируемостью: их параметры калибруются для конкретного процесса и не переносятся на другие режимы. Кроме того, такие модели, как правило, не позволяют исследовать вклад отдельных стохастических механизмов в общую ошибку позиционирования. Это ограничивает их применение при разработке новых материалов и переходе к другим технологическим окнам.

В данной работе предлагается промежуточный подход, сочетающий физическую обоснованность и необходимость относительно небольшого объема экспериментальных данных о составе фоторезиста с учетом стохастической составляющей, связанной с неровностью края линии. Разработанная модель описывает скорость проявления фоторезиста как функцию от интегрированного кислотного изображения с варьирующимся химическим контрастом, отражающим стохастические флуктуации.

Модель позволяет учитывать влияние ключевых технологических параметров на формирование профиля и оценивать вклад стохастических процессов в ошибку позиционирования. Калибровка выполнена по экспериментальным данным, полученным методом сканирующей электронной микроскопии, на резистах, предназначенных для работы на длинах волн 248 и 193 нм.

Литература

1. Горнев Е. С. Обеспечение надежности современных интегральных микросхем. Часть 2. Насущные проблемы // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2023. — № 2 (194). — С. 121–135.
2. Mack C. A., Adel M. Overlay and Edge Placement Error Metrology in the Era of Stochastics // Proc. SPIE 12496, Metrology, Inspection, and Process Control XXXVII, 2023. 1249609.
3. Brunner T. A. et al. Line-edge roughness performance targets for EUV lithography // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering, 2017.
4. Hansen S. G. Photoresist and stochastic modeling // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2018. Vol. 17. № 01. P. 1.
5. Харченко Е. Л., Соколова Е. В., Горнев Е. С. Развитие и применение компактных моделей фоторезистивной маски // Наноиндустрия, 2023. — Т. 16. — № S9-2 (119). — С. 508–511.

УДК 621.3.049.77

Новый метод и устройство измерения теплового сопротивления керамических корпусов для интегральных микросхем

Лоскутов В. В.
Марийский государственный университет
424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1
val_losk@rambler.ru

Разработана новая методика и конструкция измерительной установки для определения внутреннего теплового сопротивления металлокерамических корпусов для интегральных микросхем.
Ключевые слова: тепловое сопротивление; металлокерамический корпус.

Целью выполнения данной работы является разработка методик, основанных на ГОСТ РВ 5901-004-2010 [1] и ОСТ 11 073.011-83 «Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Часть 7. Контроль электрических параметров», позволяющая определить тепловое сопротивление металлокерамических корпусов более рациональным способом. Кроме того, в рамках данной работы необходимо спроектировать и сконструировать измерительные установки, которые могут быть использованы в качестве оснастки при проведении контрольных измерений внутреннего теплового сопротивления конкретных моделей металлокерамических корпусов.

В ходе проведения данного исследования были сконструированы и апробированы измерительные установки для определения внутреннего теплового сопротивления металлокерамических корпусов. Были разработаны методики определения внутреннего теплового сопротивления металлокерамических корпусов. В работе предложены две методики определения внутреннего теплового сопротивления. Первая методика названа «трех-температурная», поскольку для получения результата необходимы значения температур в трех точках исследуемой системы: 1) переход «нагреватель — теплопроводник»; 2) переход «теплопроводник — монтажная площадка; 3) переход «основание корпуса — теплоотвод». Вторая методика, названная «двух-температурной» предполагает получение значения температуры только в двух точках исследуемой теплопроводящей системы: 1) переход «нагреватель — теплопроводник»; 2) переход «основание корпуса — теплоотвод». Преимуществом данной методики является то, что она может быть использована для любого типа корпусов при наличии необходимой оснастки, определяемой геометрией конкретного корпуса.

Литература

1. ГОСТ РВ 5901-004-2010. Изделия электронной техники военного назначения. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Корпуса. Общие технические условия. — Введ. 2011-07-01. — М.: Стандартинформ, 2011.

УДК 621.384.6+ 681.6-32

Новый подход формирования элементов микроэлектроники методом сухой аэрозольной печати

Иванов В. В.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
ivanov.vv@mipt.ru

Обсуждается развитие нового подхода формирования элементов микроэлектроники методом сухой аэрозольной печати. Представлено описание принципов работы созданного принтера сухой аэрозольной печати и дана характеристика основных направлений его применений.
Ключевые слова: аддитивные технологии; сухая аэрозольная печать; печатная микроэлектроника; элементы микроэлектроники; плазмонные наноструктуры.

Растущие потребности в качестве и разнообразии устройств микроэлектроники требуют инновационных подходов для проектирования и создания высокоточных компонентов, что связано с усложнением архитектуры устройств и миниатюризацией элементов. Аддитивные методы формирования микроразмерных структур, включая аэрозольную печать, становятся перспективным дополнением и в микронном диапазоне размеров альтернативой традиционной фотолитографии благодаря снижению затрат и гибкости процессов. Разработан новый подход и создан принтер сухой аэрозольной печати, основанный на синтезе наночастиц в импульсном газовом разряде, их транспортировке в газовом потоке, фокусированном осаждении и спекании лазерным излучением, что исключает использование растворителей и функциональных добавок. Это обеспечивает создание чистых микроструктур без постобработки, что открывает широкие возможности для интеграции сухой аэрозольной печати в технологические маршруты микроэлектроники.

Использование данного подхода для печати сухими наночастицами опирается на физические принципы процессов аэродинамической фокусировки потоков квазисферических наночастиц металлов, что обеспечивает при средних размерах наночастиц более 70 нм незначительные отклонения их траекторий от оси потока, не превышающие 1 мкм. С применением аэрозольной печати сухими наночастицами металлов квазисферической формы реализовано формирование массивов в виде линий шириной до 30 мкм и с достаточно плотной укладкой наночастиц. Одновременное лазерное спекание массивов наночастиц обеспечивает формирование монолитных высокопроводящих микроструктур с достаточно низким удельным сопротивлением, в частности, для Ag превышающим всего в два раза удельное сопротивление объемного серебра.

Метод актуален для формирования пассивных проводящих элементов микроэлектроники на различных подложках (межсоединения, электродные структуры, индуктивные и резистивные элементы), плазмонных слоев оптоэлектронных устройств с заданными размерами наночастиц, что способно обеспечивать многократное усиление оптического отклика в оптоэлектронных устройствах (матрицах

фотоприемных устройств, дисплеях, источниках света), микросенсорах, геттерах и каталитических структурах. Состав материала изделия задается материалами, из которых изготовлены электроды генератора аэрозолей.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-560.

УДК 621.3

Цифровые двойники в микроэлектронном производстве

Петросянц К. О., д. т. н.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
kpetrosyants@hse.ru

В работе представлены цифровые двойники электронных полупроводниковых приборов, базовых технологических процессов, контрольно-измерительного оборудования и приборов в составе САПР с учетом внешних воздействующих факторов.

Ключевые слова: цифровые двойники; микроэлектроника; ЭКБ; TCAD; SPICE.

Применение средств САПР и информационных технологий в электронном производстве без связи с реальным технологическим процессом и оборудованием не дает желаемых результатов. Опыт ведущих мировых компаний показывает, что наиболее эффективным способом решения проблемы является использование цифровых двойников (ЦД), поддерживаемых программно-аппаратными комплексами на всех этапах разработки: от исходных материалов до готовых изделий.

В настоящей работе представлены ЦД для описания: 1) электрофизических параметров полупроводниковых и диэлектрических слоев и элементов структуры прибора, металлизации и др.; 2) базовых технологических процессов и технологического и контрольно-измерительного оборудования; 3) конструкций изготовленных полупроводниковых приборов; 4) систем параметризации и аттестации полупроводниковых приборов в соответствии с требованиями технического задания; 5) приборов в составе САПР РЭА с учетом реальных условий эксплуатации.

Перечисленные виды ЦД эффективно используются в процессе производства при поддержке программно-аппаратных комплексов, выполняющих следующие основные функции:

1) проведение измерений электрофизических параметров материалов и приборных структур в процессе их изготовления;

2) контроль и измерение электрических характеристик приборов в процессе их изготовления и после изготовления;

3) верификация TCAD, SPICE и ЦД всех уровней по экспериментальным результатам пп. 1 и 2;

4) включение верифицированных TCAD- и SPICE-моделейполупроводниковых приборов и ЦД в САПР различного уровня для расчета РЭА на их основе в реальных условиях эксплуатации (в том числе с учетом внешних воздействующих факторов, таких как температура, радиация и старение).

Приведены примеры использования ЦД в процессе производства отечественной ЭКБ.

УДК 621.3.049

Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы в фотонике

Большаков А. Д.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
bolshakov@live.com

Полупроводниковые нанопровода — уникальные наноструктуры с замечательными свойствами, которые делают их привлекательными для фотонных приложений. Возможность формировать на их основе сложные гетероструктуры, такие как «ядро — оболочка», позволяет точно контролировать их оптические и электронные характеристики. В этом докладе мы рассмотрим эти отличительные свойства и обсудим их потенциал для развития интегральной фотоники. В частности, мы обсудим, как полупроводниковые нанопровода могут служить оптическими волноводами, высококачественными оптическими резонаторами и эффективными источниками света, обеспечивая компактность и масштабируемость фотонных приложений. На нескольких наглядных примерах мы демонстрируем их работу в интегрированных оптических системах. Эта работа дает представление об универсальности нанопроводов и их многообещающей роли в будущих технологиях оптоэлектроники.

Ключевые слова: нанопровода; нитевидные кристаллы; фотоника; оптоэлектроника; фотонные интегральные схемы.

УДК 621.3.049.77

Перспективы развития и применений МЭМС-технологий при создании приборов фотоники

Лысенко И. Е.
ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
igor.lysenko@mapperllc.ru

Рассмотрены основные этапы развития МЭМС-технологий, области их применения и перспективы развития при создании приборов фотоники.
Ключевые слова: МЭМС; фотоника; болометр; микрозеркало.

Принято считать, что микроэлектромеханические системы (МЭМС) как отдельное направление микроэлектроники получили свое официальное название и начали свой независимый путь с публикации статьи К. Петерсона в 1982 году в Proceeding of the IEEE [1]. В данной статье были представлены основные успехи в области создания МЭМС и показаны конструкторско-технологические решения для датчиков давления, микромеханических переключателей, микромеханических зеркал, пороговых акселерометров и интерферометров. Важно отметить, что конструкторско-технологические решения для интерферометров, микромеханических переключателей и пороговых акселерометров очень схожи и имеют минимальные отличия. Этим подчеркивается важное свойство МЭМС — мультипликативность проверенных решений в различных областях применения. В статье за монокристаллическим и поликристаллическим кремнием, а также золотом и алюминием фактически закреплено звание основных конструктивных материалов МЭМС. Также в статье дается четкое понимание отличия МЭМС от традиционной микроэлектроники: когда последняя сохраняет тенденцию к миниатюризации и уходу в субмикронную область, МЭМС остаются достаточно «большими» (более 100 мкм). В ряде видов МЭМС это остается до сих пор.

На мой взгляд, достаточно наглядно этапы развития МЭМС показывает анализ производителей МЭМС, проведенный фирмой Yole Developpment. В нем показано три волны развития: первая волна — датчики давления как флагманы развития МЭМС (с 80-х годов прошлого века); вторая — их сменяют микромеханические гироскопы и акселерометры (с конца 90-х годов прошлого века), и третья — фотоника (с 2020-х годов). В первом случае датчики давления уже развиты как одно из направлений микроэлектроники, но имеют специфичные для традиционной микроэлектроники требование по микропрофилированию кремния для создания мембран. Микромеханические акселерометры и гироскопы являются более сложными устройствами МЭМС. Они более миниатюрные по сравнению со своими аналогами, работающими на других принципах, более требовательны к среде, в которой работают, и интегральным схемам (ИС) съема и обработки сигналов. Также достаточно высоки требования к технологии изготовления чувствительных элементов. Интересно, что требования к материалам остаются теми же и кремний сохраняет свои позиции как основной структурный материал МЭМС.

Третья волна начинается с развития микромеханических зеркал для управления различными электромагнитными излучениями. Далее трансформируется в цифровые микрозеркальные матрицы (ЦММ). Развитие ЦММ связано

с возможностью их использования в оптических проекторах, где они под управлением электростатических полей изменяют направление света и тем самым формируют изображение. В настоящее время данная технологическая волна дополняется микроболометрическими матрицами. Развитие же последних характеризуется постоянным ростом рынка неохлаждаемых ИК-камер для гражданских и специальных применений. И вот в этот период уже происходят самые существенные изменения в области МЭМС:

- уход от «больших» конструкций (один пиксель микрозеркальной матрицы имеет характерные размеры от 5,4м до 7,6 мкм [2], а один пиксель микроболометрической матрицы — от 12 до 17 мкм [3]);
- использование титана в качестве основного структурного материала;
- появляются специфические требования по соединению МЭМС с ИС.

Таким образом, фотоника предъявляет новые требования к технологиям изготовления МЭМС и открывает новый этап их развития.

Литература

1. Peterson K. E. Silicon as a mechanical material // Proceeding of the IEEE, 1982. Vol. 70. № 5. P. 420–457.
2. Digital micromirror device with reduced stiction // Patent US 2023/0055809, 2023.
3. Кульчицкий Н., Наумов А., Старцев В. Рынок неохлаждаемых микроболометров для ИК-камер: тенденции и перспективы // Электроника (Наука, Технология, Бизнес), 2019. — № 1. — С. 1–7.

УДК 536.37

Система теплоотвода приемо-передающего модуля СВЧ-диапазона на принципе адиабатического расширения газа

Пяточкин М. Д., к. т. н., Баранов Г. В., Болгов С. Ю., Панасенко П. В., д. т. н.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
mpyatochkin@niime.ru, gbaranov@niime.ru,
sbolgov@niime.ru, ppanasenko@niime.ru

Рассмотрены особенности теплоотвода для различных конструктивов приемо-передающих модулей (ППМ). Предложена система теплоотвода СВЧ-модуля, основанная на принципе адиабатического расширения газа в расширяющемся канале внутри металлического основания СВЧ-модуля и обладающая сравнимой эффективностью по отношению к системам с циркуляцией охлаждающей жидкости при площади основания не более 400 мм^2, но отличающаяся простотой реализации и компактностью.
Ключевые слова: СВЧ приемо-передающий модуль; кремниевая коммутационная плата; TSV-интерпозер; адиабатическое расширение газа.

Работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям особенностей протекания тепловых процессов в многокристальных модулях СВЧ-диапазона на основе кремниевого интерпозера. Вопросы генерации тепла и его эффективного отвода за границы электронных блоков являются злободневными для различной аппаратуры, но особо остро стоят для электроники СВЧ-диапазона, где мощность выходных каскадов усилителей на основе GaAs или GaN может составлять до 100 Вт и даже выше, а коэффициент полезного действия — порядка 20–50 % [1]. Конструктивно-технологический базис СВЧ-модулей на основе кремниевого интерпозера позволяет кратно снизить габариты СВЧ-модуля для возможности повышения диапазона рабочих частот в интересах развития современных телекоммуникационных и радиолокационных приложений, а кроме того, предоставляет гибкость в реализации конструктивных решений систем теплоотвода, требования к которым возрастают в таких малогабаритных изделиях, что безусловно требует тщательных исследований.

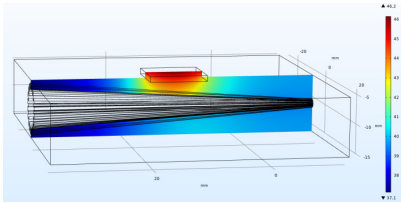
В работе выполнен комплексный анализ современного состояния и тенденций развития конструкций и технологий создания систем теплоотводов в многокристальных 2.5- и 3D-модулях и микросборках, который позволяет выработать подходы к разработке модулей, обосновать конструктивно-технологические принципы построения их систем теплоотвода.

Основные системы теплоотвода в ППМ включают пассивные и активные решения. К пассивным относятся теплопроводящие металлические основания, термоинтерфейсы, тепловые стоки в низкотемпературной совместно обжигаемой керамике (LTCC), их теплоотвод ограничен количеством теплостоков и имеет неудовлетворительные характеристики [2]. Активные системы включают принудительное воздушное охлаждение с использованием вентиляторов, жидкостное охлаждение с циркуляцией хладагента. Одним из альтернативных подходов к организации систем теплоотвода, предложенным в данной работе, является охлаждение

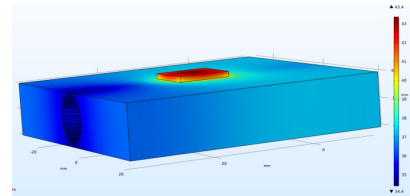
ППМ за счет адиабатического расширения газа, протекающего в объеме Si интерпозера или металлического основания.

В табл. 1 приведены результаты сравнительного моделирования системы теплоотвода СВЧ-модуля на принципе адиабатического расширения газа и системы с циркуляцией охлаждающей жидкости при выделении 12 Вт тепловой мощности, имеющие равные площади боковой поверхности.

Таблица 1. Результаты сравнительного моделирования системы теплоотвода СВЧ-модуля, основанной на принципе адиабатического расширения газа, и системы с циркуляцией охлаждающей жидкости



Модель 1. Охлаждение с помощью адиабатического расширения газа, $T_{max} = 46{,}2\,^{\circ}C$



Модель 2. Водяное охлаждение, $T_{max} = 43{,}4\,^{\circ}C$

Предложена система теплоотвода СВЧ-модуля, основанная на принципе адиабатического расширения газа в расширяющемся канале внутри металлического основания СВЧ-модуля, позволяющая уменьшить нагрев модуля до 30% и обладающая сравнимой эффективностью по отношению к системам с циркуляцией охлаждающей жидкости, но отличающаяся простотой реализации и компактностью.

Литература

1. Красников Г. Я., Панасенко П. В., Волосов А. В. Конструктивно-технологические принципы создания СВЧ-элементной базы нового поколения на основе объемных технологий современной кремниевой микроэлектроники // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2016. — № 3 (163). — С. 10–22.
2. Панасенко П. В., Волосов А. В., Ионов А. С., Красников Г. Я., Петров А. В. Малогабаритные мощные приемо-передающие модули X-диапазона для АФАР // Наноиндустрия. Спецвыпуск 4s. — Т. 13 (99). — С. 404–406.

УДК 537.622.4

Особенности распространения спиновых волн под действием спинового тока в бислоях типа магнитный материал / тяжелый металл

Лобанов Н. Д., Морозова М. А.
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
410071, г. Саратов, ул. Астраханская, 83
nl_17@mail.ru

Проведен анализ распространения спиновых волн в структурах типа магнитный материал / тяжелый металл. Анализ проводился по результатам, полученным из микромагнитного моделирования. Было показано влияние спинового тока на дисперсию спиновых волн в различных бислоях.
Ключевые слова: спиновая волна; спиновый ток; тяжелый металл; магнитный материал.

Современные технологии хранения и обработки информации все чаще опираются на спинтронику — область, изучающую использование спина электронов в электронных устройствах, и магнонику, которая исследует передачу данных посредством спиновых волн (магнонов). Эти направления открывают путь к созданию энергоэффективных и высокопроизводительных устройств, преодолевая ограничения классической электроники. Однако ключевым вызовом остается эффективное управление намагниченностью. Традиционные методы, такие как спиновый момент передачи (spin-transfer torque, STT) [1], требуют высоких плотностей тока и страдают от деградации материалов. В этом контексте спин-орбитальный момент (spin-orbit torque, SOT) [2] представляется революционным подходом, использующим спин-орбитальные взаимодействия для создания спиновых токов в немагнитных материалах, таких как тяжелые металлы или топологические изоляторы. Это позволяет переключать намагниченность без прямого протекания тока через магнитные слои, значительно снижая энергопотребление и повышая надежность устройств. SOT демонстрирует потенциал для применения в магниторезистивной оперативной памяти (MRAM) [3] и высокоскоростных логических устройствах, а также в магнонике для возбуждения и управления спиновыми волнами [4].

В данной работе показывается влияние спинового тока на спиновою волну, возникающую в слое магнитного материала из-за прецессии намагниченности. Спиновый ток в свою очередь возникает благодаря спин-орбитальному взаимодействию и рассеянию носителей заряда, а это механизмы спинового эффекта Холла.

На рис. 1 проиллюстрированы дисперсионные характеристики спиновых волн для структуры Py/Pt, также к структуре прикладывается напряжение 1 В, вследствие чего возникает спиновый ток, который оказывает действие на спиновую волну в слое пермаллоя. Красные пунктирные кривые взяты из теории Калиникоса и Славина для одиночного магнитного слоя [5] в приближении малого диполь-дипольного взаимодействия для качественной оценки смещения мод спин-волновых резонансов. Из рис. 1 видно, что есть прямые (область положительных волновых чисел, +k) и обратные (область отрицательных волновых чисел, −k) волны, причем

теория и практика говорят о том, что в одиночном слое должна наблюдаться симметрия прямых и обратных ветвей. Очевидно, что из-за влияния спинового тока происходит нарушение симметрии, то есть появляется эффект невзаимности прямых и обратных волн.

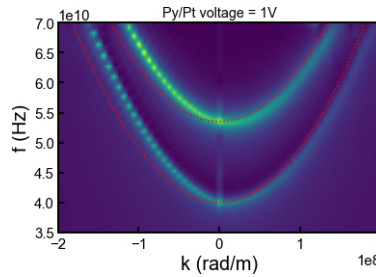


Рис. 1. Дисперсионные характеристики для бислоя пермаллой/платина (Py/Pt) при напряжении 1 В; красные пунктирные кривые — спин-волновые моды, посчитанные по аналитической формуле для пермаллоя

Обстоятельства, описанные выше, могут послужить основой для моделирования и проектирования мультифизики в логических устройствах и элементах памяти, базирующейся на магнонике и спинтронике.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-30027).

Литература

1. Wang K. L., Alzate J. G., Amiri P. K. Low-power non-volatile spintronic memory: STT-RAM and beyond // Journal of Physics D: Applied Physics, 2013. Vol 46. № 7. P. 074003.
2. Shao Q. et al. Roadmap of spin–orbit torques // IEEE transactions on magnetics, 2021. Vol. 57. № 7. P. 1–39.
3. Natsui M. et al. Dual-port field-free SOT-MRAM achieving 90-MHz read and 60-MHz write operations under 55-nm CMOS technology and 1.2-V supply voltage // 2020 IEEE Symposium on VLSI Circuits. IEEE, 2020. P. 1–2.
4. Peng S. et al. Modulation of heavy metal/ferromagnetic metal interface for high-performance spintronic devices // Advanced Electronic Materials, 2019. Vol. 5. № 8. P. 1900134.
5. Kalinikos B. A., Slavin A. N. Theory of dipole-exchange spin wave spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions // Journal of Physics C: Solid State Physics, 1986. Vol. 19. № 35. P. 7013.

УДК 537.622.4

Атомистическое моделирование магнитного поведения нанопленок α-Fe различной толщины

Саломатина А. Ю.[1,2], Федотов А. Ю.[1,2], д. т. н., Северюхина О. Ю.[1,2], к. ф.-м. н.
[1] Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34
[2] Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7
salomatinaau@yandex.ru

Исследованы магнитные свойства тонких пленок Fe при изменении толщины с помощью метода молекулярной динамики и модели спиновой динамики частиц. Использован модифицированный метод погруженного атома. Эксперимент проведен при T = 300 K и B = 0 Тл.
Ключевые слова: спинтроника; математическое моделирование; спиновая динамика; спиновый клапан; скирмионы.

Тонкие пленки активно применяются в микроэлектронике и биомедицине благодаря возможности изменения их физических и химических характеристик. В микроэлектронике металлические пленки важны для интегральных схем и оптоэлектронных устройств. Спинтроника использует спин электрона для записи и чтения данных, предлагая альтернативу традиционной электронике, разрабатывая новые виды памяти и логические элементы.

Железо с ферромагнитными свойствами является ключевым материалом. Оно применяется в магниторезистивной памяти, устройствах хранения данных и сверхпроводниковых системах, таких как контакты Джозефсона [1], где создает π-контакты с уникальными характеристиками. Это открывает перспективы для квантовых компьютеров и высокочувствительных магнитометров.

В исследовании используется математическая модель, объединяющая метод молекулярной динамики и модель спиновой динамики. Метод молекулярной динамики описывает движение атомов, а модель спиновой динамики учитывает магнитные взаимодействия и спиновые эффекты. Это позволяет исследовать магнитоупругие явления и влияние дефектов на магнитные свойства материалов.

Динамика релаксационных процессов моделируется уравнениями Ланжевена [2] и Ландау — Лифшица — Гилберта [3]. Потенциал основан на методе погруженного атома (MEAM) [4], учитывающем многочастичные взаимодействия и подходящем для металлических систем. Моделирование проведено в программном комплексе LAMMPS [5] с дополнительным пакетом LAMMPS SPIN [6].

Цель эксперимента — исследование влияния толщины тонкой пленки железа (α-Fe) на ее магнитных свойств. Актуальность связана с разработкой материалов с заданными магнитными свойствами для спинтронных устройств. Моделирование проводится при температуре T = 300 K, магнитном поле B = 0 Тл и толщине пленки от 2 до 20 атомных слоев. Зависимые параметры — намагниченность и магнитная энергия, измеряемые на атомарном уровне. Временной интервал — 10 пс с шагом 0,1 пс.

Результаты показывают скачкообразный характер намагниченности с ростом толщины, связанный с возникновением магнитных доменов и их стенок. Исследование зависимости магнитных свойств тонких пленок железа различной толщины выявило снижение магнитной энергии с увеличением толщины. Это может быть связано с уменьшением влияния поверхностных атомов и приближением системы к объемному материалу с ростом количества кристаллических слоев.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FUUE-2025-0001 «Моделирование и экспериментальные исследования структуры и магнитных параметров контакта Джозефсона из многослойной наноструктуры», № гос. регистрации 125020501412-9).

Литература

1. Bobkova I. V., Bobkov A. M., Silaev M. A. Magnetoelectric effects in Josephson junctions // Journal of Physics: Condensed Matter., 2022. Vol. 34. № 35. P. 353001.
2. Paquet E., Viktor H. L. Molecular Dynamics, Monte Carlo Simulations, and Langevin Dynamics: A Computational Review // BioMed Research International, 2015. Vol. 2015. P. 183918.1-18. DOI: 10.1155/2015/183918.
3. Antropov V. P., Katsnelson M. I., Van Schilfgaarde M., Harmon B. N. Ab Initio Spin Dynamics in Magnets // Physical Review Letters, 1995. Vol. 75. P. 729–732. DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.729.
4. Baskes M. I. Modified embedded-atom potentials for cubic materials and impurities // Phys. Rev. B, 1992. Vol. 46. № 5. P. 2727–2742. DOI: 10.1103/PhysRevB.46.2727.
5. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics // Journal of Computational Physics, 1995. Vol. 117. № 1. P. 1–19. DOI: 10.1006/jcph.1995.1039.
6. Tranchida J., Plimpton S. J., Thibaudeau P., Thompson A. P. Massively parallel symplectic algorithm for coupled magnetic spin dynamics and molecular dynamics // Journal of Computational Physics, 2018. Vol. 372. P. 406–425. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.06.042.

УДК 62.311.2:535.3

Разработка конструкции пьезоэлектрического наногенератора на основе массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок

Полывянова М. Р., Хомленко Д. Н., Ильина М. В., Ильин О. И.
[1] Южный федеральный университет,
научно-исследовательская лаборатория
технологии функциональных наноматериалов
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е
[2] Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е
polyvianova@sfedu.ru

Предложена конструкция пьезоэлектрического наногенератора (ПЭНГ) на основе массива вертикально ориентированных углеродных нанотрубок с верхним перфорированным электродом. Представлены результаты моделирования конструкции ПЭНГ в целях определения оптимальной толщины мембраны верхнего перфорированного электрода.

Ключевые слова: пьезоэлектрический наногенератор; N-УНТ; конструкция.

Современные мобильные устройства существенно зависят от внешних источников питания, ограничивающих их время работы. Концепция автономного питания представляет собой привлекательное решение для обеспечения постоянного электроснабжения таких устройств [1]. Одним из решений по разработке источников автономного питания являются пьезоэлектрические наногенераторы (ПЭНГ), которые преобразовывают механическую энергию окружающей среды в электрическую [2]. Ранее нами было выявлено, что легированные азотом углеродные нанотрубки (N-УНТ) обладают аномальными пьезоэлектрическими свойствами за счет встраивания азота пиррольного типа в структуру нанотрубки с образованием «бамбукообразных перемычек», что делает их перспективным материалом для создания ПЭНГ [3, 4]. Целью данной работы является разработка конструкции ПЭНГ на основе массива вертикально ориентированных N-УНТ.

Разработанная конструкция ПЭНГ состоит из подложки Si, на поверхности которой сформирован проводящий слой из Mo — 110 нм. Далее формируется каталитический слой Ni — 15 нм. Затем для формирования жертвенного слоя в целях последующего формирования вывешенной мембраны верхнего электрода (ВЭ) и создания диэлектрических упоров, разделяющих ВЭ и нижний электрод, осаждается слой оксида кремния SiOx — 4 мкм. После формируются пленки высоколегированного поликристаллического кремния Si^* (0,6 мкм) и металлического ВЭ (0,6 мкм). Затем в Si* селективно травятся перфорированные отверстия и после травления жертвенного слоя в пространстве между электродами выращиваются N-УНТ методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. В результате одна часть N-УНТ упирается вершинами в ВЭ, другая часть прорастает через перфорированные отверстия, что позволяет сформировать в N-УНТ продольные деформации под прижимом ВЭ и сохранить возможность деформации N-УНТ под действием внешних механических воздействий в области перфорированных отверстий.

Для оптимизации конструкции ПЭНГ проводилось моделирование влияния толщины ВЭ от 0,2 до 1,2 мкм на прогиб мембраны ВЭ (рис. 1). Моделирование конструкции ПЭНГ проводилось в пакете COMSOL Multiphysics с использованием модуля MEMS в интерфейсах Solid Mechanics.

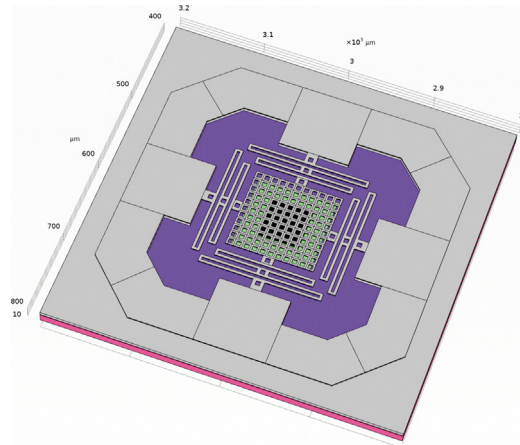


Рис. 1. Конструкция ПЭНГ на основе массива N-УНТ (вид сверху)

Анализ результатов исследования показал, что прогиб мембраны нелинейно уменьшается от 1,4 до 0,04 нм с увеличением толщины слоя Si* от 0,2 до 1,2 мкм (рис. 2). Анализ полученной зависимости позволил определить оптимальное значение толщины мембраны ВЭ, равное около 0,6 мкм, что позволяет обеспечить равномерную деформацию N-УНТ под прижимом верхнего электрода по всей площади ячейки.

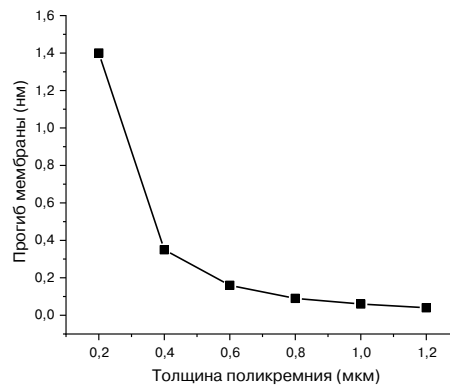


Рис. 2. Зависимость величины прогиба мембраны ВЭ от его толщины

В данной работе были представлены конструкция ПЭНГ на основе N-УНТ и зависимость прогиба мембраны ВЭ от его толщины. Полученные результаты могут быть использованы при создании ПЭНГ на основе массива вертикально ориентированных N-УНТ.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 25-79-10302 в Южном федеральном университете.

Литература

1. Cao X. et al. Piezoelectric Nanogenerators Derived Self-Powered Sensors for Multifunctional Applications and Artificial Intelligence // Adv. Funct. Mater., 2021. Vol. 31. № 33.
2. Xu Q., Wen J., Qin Y. Development and outlook of high output piezoelectric nanogenerators // Nano Energy, 2021. Vol. 86. P. 106080.
3. Il'ina M. V. et al. Anomalous piezoelectricity and conductivity in aligned carbon nanotubes // J. Mater. Chem. C, 2021. Vol. 9. № 18. P. 6014–6021.
4. Il'ina M. V. et al. Study of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes for Creation of Piezoelectric Nanogenerator // J. Low Power Electron. Appl., 2023. Vol. 13. P. 11.

УДК 546.26 — 537.226.86

Моделирование конструктивных особенностей верхнего электрода пьезоэлектрического наногенератора на основе углеродных нанотрубок

Хомленко Д. Н.[1], Ильин О. И.[1], к. т. н., Ильина М. В.[2], д. ф.-м. н.

[1] Южный федеральный университет, научно-исследовательская лаборатория технологии функциональных наноматериалов
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
osotova@sfedu.ru
[2] Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2

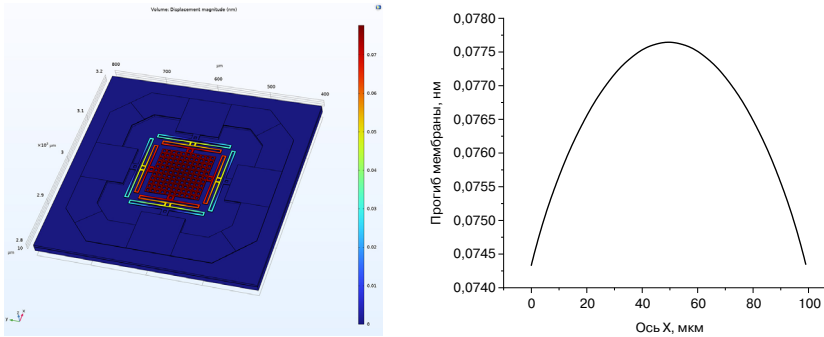
В данной работе представлены результаты моделирования прогиба верхнего электрода пьезоэлектрического наногенератора на основе легированных азотом углеродных нанотрубок (N-УНТ) в зависимости от площади и типа перфорации электрода, представляющего собой мембрану, вывешенную над вершинами N-УНТ.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; легирование азотом; пьезоэлектричество.

В последние годы пьезоэлектрические наногенераторы (ПЭНГ) получили особое значение в сфере автономных источников питания для маломощной электроники и сенсорных систем [1, 2]. Мы разработали макет ПЭНГ на основе углеродных нанотрубок, легированных азотом, для которого необходимо исследовать геометрию конструкции, чтобы улучшить ее эффективность и прочность. В данной работе методом моделирования изучается зависимость прогиба мембраны от площади перфорационных отверстий в ней.

Численное моделирование прогиба мембраны осуществлялось в программном пакете COMSOL Multiphysics посредством модуля MEMS и интерфейса Solid Mechanics. В качестве внешней нагрузки учитывалась сила тяжести, при этом для поликремния (Si*) и алюминия (Al) были приняты плотности 2320 и 2699 кг/м^3 соответственно. В разработанной модели структуры были использованы слои с фиксированными толщинами: подложка Si — 450 мкм, Mo — 110 нм, каталитический слой Ni — 15 нм, SiOx — 4 мкм, Si* — 0,6 мкм, Al — 0,6 мкм. В ходе расчетов рассматривалось четыре конфигурации мембраны с массивом перфорированных квадратных ячеек 11×11, 12×12, 16×16 и 24×24, при этом площадь каждой перфорированной ячейки принималась соответственно 5, 4, 3 и 2 мкм^2. Все варианты исследовались в одинаковых условиях.

Результаты моделирования зависимости величины прогиба мембраны верхнего электрода от площади и распределения перфорационных отверстий (рис. 1) показали, что при перфорации как в центральной зоне мембраны, так и в рессорах максимальный прогиб достигает около 0,0776 нм (отверстия 5 мкм^2), 0,1056 нм (4 мкм^2), 0,0786 нм (3 мкм^2) и 0,1158 нм (2 мкм^2). Если центральная часть остается без отверстий, величина прогиба возрастает до ~0,1348 нм (при отверстиях 2 мкм^2), что связано с большей массой цельной центральной области.



а *б*

Рис. 1. Иллюстрация прогиба мембраны с толщиной Si* 0,6 мкм, Al 0,6 мкм с массивом перфорированных ячеек 11×11 (*а*); график зависимости прогиба мембраны вдоль горизонтального сечения, проходящего через всю длину мембраны (ось X) (*б*)

Согласно анализу полученных данных, в обоих случаях уменьшение площади отверстий и соответствующий рост их числа снижает эффективную жесткость и увеличивает прогиб, причем основную роль в этом играет именно перфорация в рессорах. Сама же перфорация в центральной зоне преимущественно нужна для технологического доступа газов при росте N-УНТ и не вносит решающего вклада в общую деформацию мембраны.

Таким образом, установлено, что повышение степени перфорации (плотности отверстий меньшего размера) в рессорах ведет к увеличению прогиба мембраны за счет снижения ее жесткости. При этом перфорация в центральной части, хотя и несущественно влияет на прогиб, остается важным технологическим параметром, необходимым для роста углеродных нанотрубок. Полученные закономерности могут быть использованы для оптимизации конструкции верхнего электрода и достижения требуемого соотношения между механической жесткостью и технологической эффективностью ПЭНГ.

Работа выполнена за счет гранта РНФ № 22-79-10163 в Южном федеральном университете.

Литература

1. He Q., Briscoe J. Piezoelectric Energy Harvester Technologies: Synthesis, Mechanisms, and Multifunctional Applications // ACS Appl. Mater. Interfaces, 2024. Vol. 16. № 23. P. 29491–29520.
2. Xu Q., Wen J., Qin Y. Development and outlook of high output piezoelectric nanogenerators // Nano Energy, April 2021. Vol. 86.

УДК 519.688:004.032.26

Атомистическое моделирование работы элементов энергонезависимой памяти на основе технологии FeRAM

Павлишин К. Ю.[1], Абгарян К. К.[2], д. ф.-м. н.

[1] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
kirill1999super15@gmail.com
[2] Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
kristal83@mail.ru

Для построения блока теоретического моделирования работы элементов энергонезависимой памяти FeRAM на основе HfO_2 и $HfZrO_2$ применен атомистический поход. Он базируется на построении динамической системы, в которой в качестве фазовых переменных выступают смещения атомов. Силы, действующие на атомы, вычисляются на основе эффективного гамильтониана, компоненты которого рассчитываются с использованием квантово-механического моделирования. В результате атомистического моделирования поляризационной динамики на основе квантово-механического подхода определяется векторное поле поляризации в активном слое элемента FeRAM в различные моменты времени, после чего определяются осредненный вектор поляризации и плотность электрического тока как функции времени.

Ключевые слова: математическое моделирование; энергонезависимая память; технология FeRAM; эффективный гамильтониан; атомистическое моделирование.

Подходы к теоретическому моделированию элементов, основанных на сегнетоэлектрических эффектах, можно разделить на два больших класса. К первому классу относится вариант построения модели с использованием термодинамической теории, согласно которой состояние равновесной сегнетоэлектрической системы может быть задано фиксированным набором величин, таких как поляризация, электрическое поле, температура, механические деформации и напряжения.

Ко второму классу относится подход, основанный на атомистическом моделировании. Строится динамическая система, в которой в качестве фазовых переменных выступают смещения атомов. Силы, действующие на атомы, вычисляются на основе эффективного гамильтониана, компоненты которого рассчитываются с использованием квантово-механического моделирования. Этот подход описан в работах [1, 2] и реализован в известном программном коде FeRAM [3]. Отметим, что в вышеупомянутых работах рассматриваются многоосные сегнетоэлектрики, такие как титанат бария $BaTiO_3$. В настоящей работе атомистический подход взят за основу для построения блока теоретического моделирования работы элементов энергонезависимой памяти FeRAM на основе HfO_2 и $HfZrO_2$.

В рамках данного блока на первом этапе проводится квантово-механическое моделирование, в ходе которого последовательно рассчитываются эффективная масса диполя, эффективный заряд Борна, оптическая диэлектрическая постоянная, собственное значение мягкой моды, коэффициенты связи между смещениями

и деформациями, матрица ближнего взаимодействия, константы упругости, коэффициенты связи.

Эта информация передается на следующий, наномасштабный, уровень, где выполняется моделирование динамики поляризации в элементе FeRAM. На данном этапе используется математическая модель, основанная на уравнениях динамики смещений атомов в оксидном слое, параметризованных амплитудой мягкой моды. В правую часть уравнений включаются факторы, воздействующие на динамику: собственная энергия локальной моды, дальнодействующее диполь-дипольное взаимодействие, ближнее взаимодействие между мягкими модами, упругая энергия, взаимодействие между локальными модами и локальной деформацией. Расчет компонент правой части осуществляется путем дифференцирования эффективного гамильтониана по локальному вектору смещений. В результате атомистического моделирования поляризационной динамики на основе квантово-механического подхода определяется векторное поле поляризации в активном слое элемента FeRAM в различные моменты времени, после чего определяются осредненный вектор поляризации и плотность электрического тока как функции времени.

В рамках работы производится программная реализация этой модели на языке программирования C++ с использованием технологий распараллеливания, а также ее адаптация под моделирование ферроэлектрических пленок на основе оксида гафния и оксида гафния-циркония. Процесс адаптации заключается в получении параметров модели из первопринципных расчетов для оксида гафния и оксида гафния-циркония [4, 5]. Реализация модели позволит более точно предсказывать ферроэлектрические свойства оксида гафния и оксида гафния-циркония, что существенно улучшит понимание физических процессов, проходящих при работе элементов памяти на основе технологии FeRAM. Это в свою очередь позволит оптимизировать характеристики памяти, повысить ее долговечность и энергоэффективность, а также ускорить разработку новых устройств. Программная реализация модели с использованием технологий распараллеливания обеспечит возможность масштабных вычислений, необходимых для дальнейшего совершенствования FeRAM и ее интеграции в современные электронные системы.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-01012).

Литература

1. Tianyuan Z., Liyang M., Shiqing D., Shi L. Progress in computational understanding of ferroelectric mechanisms in HfO_2 // npj Comput Mater., 2024. Vol. 10. A. 188.
2. Schroede U., Park M. H., Mikolajick T., Hwang C. S. The fundamentals and applications of ferroelectric HfO_2 // Nat. Rev. Mater., 2022. Vol. 7. P. 653–669.
3. Nishimatsu T., Waghmare U. V., Kawazoe Y., Vanderbilt D. Fast molecular-dynamics simulation for ferroelectric thin-film capacitors using a first-principles effective Hamiltonian // PhysRevB.78.104104, 2008.
4. Программа для первопринципных расчетов «ABINIT». — URL: https://abinit.github.io/abinit_web.
5. Программа для первопринципных расчетов Quantum Espresso. — URL: https://www.quantum-espresso.org.

УДК 537.312.7:004.332.3

Физико-математическая модель MIM-селектора ReRAM для САПР TCAD

Курьянов А. О.[1,2], Федотов М. И.[1,2,3], Теплов Г. С.[1,2], к. ф.-м. н.
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
[2] *АО «НИИМЭ» 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1*
[3] *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6*

В работе выполнено моделирование селектора ReRAM на основе MIM-диода. Применялись физические модели прямого туннелирования и Фаулера — Нордгейма. Проведена апробация модели на основе аналитического расчета.

Ключевые слова: энергонезависимая память; ReRAM; моделирование; селектор; MIM-диод.

Одной из ключевых характеристик устройства памяти является его объем данных. Увеличения плотности хранения данных добиваются путем уменьшения площади ячейки памяти [1]. Новые технологии памяти разрабатываются в целях решения этой задачи, а также снижения энергопотребления устройства. Одной из исследуемых технологий памяти является резистивная память с произвольным доступом (ReRAM) — это вид энергонезависимой памяти, которая работает за счет изменения состояния проводимости между высокорезистивным (HRS) и низкорезистивным состоянием (LRS) [2] под действием внешнего электрического поля. Элементы хранения ReRAM обладают высокой масштабируемостью, низким рабочим напряжением и высокой скоростью работы.

Добиваться повышенной плотности хранения данных позволяет применение архитектуры Crossbar. Ячейка памяти, содержащая один бит информации, образуется в местах пересечения словарной и битовой линии, которые соответствуют i-му и i+1-му уровням металлизации. Благодаря наличию большого числа уровней металлизации в 3D-структуре такой подход к созданию матриц запоминающего устройства позволяет значительно увеличивать плотность хранения данных.

Применение PN-диода в ячейке типа 1D1R допускает только униполярное переключение в элементе хранения, что сужает область доступных для него материалов. Использование транзисторной схемы доступа делает невозможным создание 3D-структур Crossbar. Наиболее перспективным является использование селектора в ячейке 1S1R. При записи логической «1» в ячейку массива может происходить появление токов утечки через невыбранные ячейки с низким сопротивлением. Ячейки, соседствующие по словарной или битовой линии с выбранной для записи ячейкой, смещаются на половину напряжения записи, что может вызывать перезапись ячеек с низким сопротивлением. Селектор контролирует нежелательные токи утечки, осуществляя функцию доступа к ячейке.

Материалы функционального слоя селекторов типов MIEC и FAST [3] не разглашаются. Для селекторов Мотта и OTS используются материалы, недоступные в производстве. В связи с этим наиболее технологически реализуемым является MIM-селектор, который представляет собой тонкопленочную конденсаторную структуру, в которой электроны из первого металла могут туннелировать через пленку диэлектрика и коллектироваться на втором металле.

Моделирование селектора выполнено в САПР TCAD. В работе [4] представлено обобщение формул для электрического туннельного эффекта между одинаковыми электродами, разделенными тонкой изолирующей пленкой. Наиболее подходящей для моделирования туннелирования в MIM-структуре в области низких напряжений, не превосходящих высоту потенциального барьера ($V < \varphi/e$), среди доступных в среде TCAD-моделей туннелирования является Direct Tunneling. Для случая $V > \varphi/e$ используется модель Fowler-Nordheim Tunneling. В связи с тем что корректное применение моделей туннелирования возможно только для контактов диэлектрик/полупроводник, металл TiN задавался как PolySilicon с нулевой шириной запрещенной зоны.

Проведена апробация модели на основе аналитического расчета структуры. По результатам верификации модели выявлена возможность ее применения при проектировании ячеек памяти ReRAM.

Литература

1. Meena J. S. et al. Overview of Emerging Nonvolatile Memory Technologies // Nanoscale Res. Lett., 2014. Vol. 9. P. 1–33.
2. Теплов Г. С., Горнев Е. С. Модель на языке VERILOG-A многоуровневого биполярного мемристора с учетом девиаций параметров переключения // Микроэлектроника, 2019. — Т. 48. — № 3. — С. 163–175.
3. Aluguri R., Tseng T. Y. Overview of selector devices for 3-D stackable cross point RRAM arrays // IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2016. Vol. 4. № 5. P. 294–306.
4. Simmons J. G. Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film // J. Appl. Phys., 1963. Vol. 34. № 6. P. 1793–1803.

УДК 544.723

Взаимодействие молекул H_2O, NH_3 и HCl с поверхностью нитевидных нанокристаллов кремния: DFT-моделирование и эксперимент

Свинкин Н. А.[1,2], Кондратьев В. М.[1,2], д. ф.-м. н., Полозков Р. Г.[2,3], д. ф.-м. н., Большаков А. Д.[1,2,4]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
svinkin.na@mipt.ru
[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
[3] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. 8-я Советская, 54
[4] Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Экспериментально показано наличие резистивного отклика ННК Si на наличие аммиака и соляной кислоты в парах их водных растворов малых концентраций (0,125–1 ммоль/л). При помощи DFT-моделирования построена модель, объясняющая результаты эксперимента.

Ключевые слова: кремний; ННК; DFT; сенсорика; NH_3; HCl; адсорбция.

Работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процессов взаимодействия кремниевых нитевидных нанокристаллов (ННК) на подложке с золотыми контактами с молекулами аммиака и хлороводорода в свете возможности создания газовых сенсоров, имеющих потенциал использования в таких областях, как здравоохранение и природоведение. Показано наличие резистивного отклика кремниевых ННК на изменение концентрации паров NH_3 и HCl, что дает возможность для их качественного и количественного детектирования. Также изучена зависимость сопротивления образца от времени его экспозиции в парах аналита [1].

Методами вычислительной химии установлено (DFT wB97X-D3/6-31G), что при адсорбции происходит перераспределение электронной плотности между молекулами адсорбата и поверхностью кристалла. Таким образом, при адсорбции молекулы NH_3 и H_2O приобретают положительный заряд (0,320 e и 0,244 e соответственно), а молекула HCl заряжается отрицательно (-0,463 e) [2].

При помощи модели тока термоэлектронной эмиссии через обратно включенный контакт Шоттки показано влияние перенесенных с адсорбата дополнительных носителей заряда на резистивные характеристики изучаемой структуры [3]. Построена модель, способная объяснить резистивный отклик ННК кремния на пары водных растворов аммиака и соляной кислоты в малых концентрациях (0,125–1 ммоль/л).

Литература

1. Kondratev V. M., Vyacheslavova E. A., Shugabaev T., Kirilenko D. A., Kuznetsov A. et al. Si nanowire-based Schottky sensors for selective sensing of NH_3 and HCl via impedance spectroscopy // ACS Applied Nano Materials, 2023. Vol. 6. № 13. P. 11513–11523.
2. Svinkin N. A., Kondratiev V. M., Polozkov R. G., Bolshakov A. D. Interaction between a silicon nanowires surface and molecules of NH3 and HCl: DFT model and experiment // Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov, 2024. Vol. 58. № 10. P. 533–536.
3. Padovani F. A., Stratton R. Field and thermionic-field emission in Schottky barriers // Solid-State Electron, 1966. Vol. 9. № 7. P. 695–707.

УДК 004.896

Оптимизация рецептов плазмохимического травления кремния в среде SF_6/O_2 с использованием нейронных сетей

Кузьмин В. О.[1,2], Седунов С. М.[1], Шаманков Н. О.[1]
[1] ПАО «Сбербанк России»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1а, корп. 1

В данной работе предложен метод оптимизации рецептов при помощи нейросетевой модели плазмохимического травления Si в среде SF_6/O_2. Разработан метод обучения суррогатной нейросетевой модели травления с использованием алгоритма адаптированного семплирования, позволяющего существенно сократить обучающую выборку.

Ключевые слова: нейронная сеть; плазмохимическое травление; оптимизация рецепта; адаптивное семплирование.

Плазмохимическое травление (ПХТ) — важный процесс в полупроводниковой промышленности для создания микроструктур. Основная цель ПХТ — получение контролируемых профилей стенок микроскопических элементов [1]. Для получения требуемого профиля производится настройка параметров установки травления (или, иначе говоря, подбирается рецепт). Подбор рецепта может осуществляться вручную путем проведения множества экспериментов, но такой подход характеризуется высокой стоимостью и большими временными затратами. Поэтому для решения этих проблем в настоящее время широко применяется компьютерное моделирование, которое позволяет имитировать процесс травления.

Подбор нужного рецепта требует большого количества запусков модели. Точные физические модели, т. е. реализованные за счет построения строгой математической модели процесса, требуют больших вычислительных затрат, что делает их малопригодными для поиска параметров установки в многомерном пространстве, особенно при работе со сложными геометриями и свойствами материалов. Поэтому для замены дорогостоящих точных физических симуляторов строятся недорогие суррогатные модели. В качестве суррогатных моделей могут использоваться нейронные сети, так как они отличаются своей способностью моделировать нелинейные взаимосвязи в данных, что имеет решающее значение в сложных и требовательных процессах производства полупроводников.

Основным ограничением такого подхода является необходимость формирования репрезентативной обучающей выборки. Генерация данных требует многократного прогона ресурсоемких физических моделей, что делает процесс подготовки обучающего датасета крайне затратным.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- разработка адаптивного семплирования для сокращения обучающей выборки;
- применение нейросетевой модели травления для оптимизации рецепта.

Адаптивное семплирование подразумевает итеративное добавление новых точек, которые дают максимальный вклад в обучение суррогатной модели. Для отбора точек используется функция активного обучения, которая решает, какую точку из набора кандидатов добавить следующей в обучающую выборку [2].

В качестве моделируемого процесса было выбрано плазмохимическое травление SF_6/O_2. Для физического моделирования использовался открытый код симулятора ViennaPS, в котором реализован процесс травления [3]. При помощи данного симулятора генерировались синтетические данные для обучения нейронной сети. В качестве нейронных сетей использовались LSTM [4], GRU [5] и трансформер [6]. Обучение производилось при помощи разработанного метода адаптивного семплирования и сравнивалось с семплированием латинского гиперкуба. Полученные результаты представлены на рис. 1.

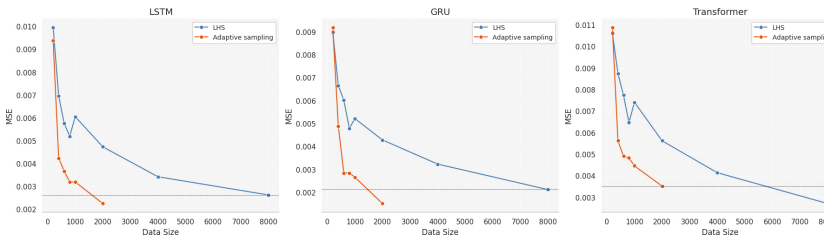


Рис. 1. Результаты сравнения метода адаптивного семплирования и семплирования латинского гиперкуба для задачи моделирования процесса ПХТ для разных архитектур

Также в данной работе были рассмотрены различные методы оптимизации рецепта и среди них был выбран лучший.

В результате удалось существенно уменьшить количество обучаемых данных для нейросетевой модели ПХТ, а также применить обученную модель к оптимизации рецептов.

Литература

1. Sukharev V. Multiscale modeling of plasma etch processing // Vacuum, 2002. Vol. 65 (3). P. 281–289.
2. Guo Y. et al. Active learning for adaptive surrogate model improvement in high-dimensional problems // Struct Multidisc Optim., 2024. Vol. 67 (7). P. 122.
3. Development repository for ViennaPS, a fully-fledged semiconductor fabrication process simulation library // GitHub: [Электронная платформа]. URL: https://github.com/ViennaTools/ViennaPS (дата обращения: 27.02.2025).
4. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural. Comput., 1997. Vol. 9 (8). P. 1735–1780.
5. Chung J. et al. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling // arXiv preprint, 2014. arXiv: 1412.3555.
6. Luong M. T., Pham H., Manning C. D. Effective approaches to attention-based neural machine translation // arXiv preprint, 2015. arXiv: 1508.04025.

УДК 538.911

Молекулярно-динамическое моделирование распыления монокристаллического кремния

Назаров А. А., Юнин П. А., Михайленко М. С., Пестов А. Е., Орлова А. Н.
Институт физики микроструктур РАН — филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»
603087, Нижегородская обл., Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, 7
nazarov.artem@ipmras.ru

Проведено молекулярно-динамическое моделирование процесса распыления монокристаллического кремния ускоренными (E = 200–1000 эВ) ионами аргона. Рассчитаны зависимости шероховатости и коэффициента распыления от энергии иона, приведено сравнение с результатами эксперимента. Приведены оценки толщины нарушенных слоев.

Ключевые слова: структурные дефекты; кристаллическая структура; молекулярная динамика; ионное распыление; взаимодействие ионов с поверхностью; суперкомпьютерное моделирование.

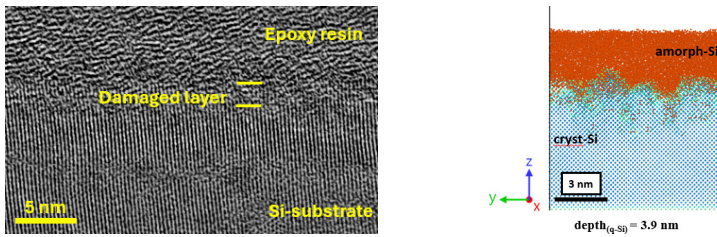
Одним из широко применяющихся методов модификации приповерхностных слоев различных материалов является метод ионно-пучковой обработки. Возможность варьирования энергии, угла падения, типа ионов и плотностей потока делает метод универсальным во многих технологических приложениях.

В общем случае задачу взаимодействия ионов с веществом можно разделить на три больших направления — ионное распыление ионами низких энергий, имплантацию ионов средних энергий и облучение быстрыми тяжелыми ионами. В диапазонах энергий от 0,1 до 1 кэВ характерно коллективное взаимодействие ускоренных ионов с атомами вещества, приводящее к тепловому разогреву и распылению приповерхностного слоя [1]. Так, при создании элементов многослойной и кристаллической рентгеновской оптики с заданной формой и значением шероховатости поверхности часто используется ионно-пучковая обработка [2]. Основной особенностью процесса является использование преимущественно ионов инертных газов с энергиями до 1 кэВ и высокими плотностями потоков. При этом основной задачей становится определение коэффициента распыления и динамики шероховатости поверхности, диагностика нарушенного слоя обрабатываемого материала. В данной работе приведено исследование процесса распыления монокристаллического Si ускоренными ионами Ar.

Эксперименты по распылению проведены на фрагментах (15×15×0,5 мм) коммерческих монокристаллических подложек Si с ориентацией (110). Энергия ускоренных ионов варьировалась от 0,1 до 1 кэВ, плотность тока составляла 0,7 мА ($\sim 8 \cdot 10^{18}$ 1/см^2). Для проведения молекулярно-динамического (МД) моделирования использовался код LAMMPS [3]. Для моделирования связи Ar-Ar использовался классический потенциал Леннарда — Джонса, связь Si-Si описывалась потенциалом Стиллинджера — Веббера [4], потенциал для связи Si-Ar состоял из двух частей — ZBL ($r < 2$ Å) [5] и классического потенциала Леннарда — Джонса ($r \geq 2$ Å).

Плотность потока ионов в процессе МД-моделирования соответствовала экспериментальной плотности тока ионов. Размер ячейки моделирования составлял $10\times10\times15$ нм^3.

С помощью МД-моделирования показано пороговое развитие шероховатости при увеличении энергии ускоренных ионов Ar, визуализирована морфология дефектов на поверхности монокристалла. Результаты МД-расчетов качественно согласуются с результатами эксперимента.



а *б*

Рис. 1. Сформированный при распылении нарушенный приповерхностный слой Si: *а*) эксперимент (распыление ионами Xe); *б*) МД-моделирование (распыление ионами Ar)

Данная работа выполнена в рамках государственного задания Института физики микроструктур РАН (FFUF-2024-0042). Молекулярно-динамическое моделирование проведено с использованием ресурсов суперкомпьютера «Лобачевский».

Литература

1. Бериш Р., Зигмунд П., Робинсон М. и др. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой Физ. распыление одноэлемент. твердых тел / под ред. Р. Бериша. — М.: Мир, 1984. — 336 с.
2. Чхало Н. И., Салащенко Н. Н. Многослойная изображающая рентгеновская оптика в ИФМ РАН // Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2019. — Т. 83. — № 2. — С. 150–157.
3. Thompson A. P., Aktulga H. M., Berger R., Bolintineanu D. S., Brown W. M., Crozier P. S., in 't Veld P. J., Kohlmeyer A., Moore S. G., Nguyen T. D., Shan R., Stevens M. J., Tranchida J., Trott C., Plimpton S. J. LAMMPS — a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales // Computer Physics Communications, 2022. Vol. 271. P. 108171.
4. Stillinger F. H., Weber T. A. Computer simulation of local order in condensed phases of silicon // Physical Review B, 1985. Vol. 31. Issue 8. P. 5262–5271.
5. Ziegler J. F. The stopping and range of ions in solids // Ion Implantation Science and Technology, 1988. P. 3–61.

УДК 621.3.049

Численное моделирование лазерного отжига кремниевых IGBT

Джавадов Р. Р.[1], Маринов Д. Л.[1], Ковалев А. С.[2]
[1] АО «Нанотроника»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский просп., 10, пом. 571
r.dzhavadov@nanotronica.ru, d.marinov@nanotronica.ru
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
kovalev.alexand@yandex.ru

Выполнено численное моделирование процессов, протекающих в кремнии при лазерном отжиге после ионной имплантации. Проанализировано влияние параметров лазера на глубину плавления и эффективность рекристаллизации.
Ключевые слова: лазерный отжиг; моделирование; ионная имплантация.

При изготовлении современных силовых полупроводниковых приборов, таких как силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и быстровосстанавливающися диоды (FRD), требуется проведение термических процессов отжига для активации примеси и для формирования омических контактов на обратной стороне пластины без нарушения структур, сформированных на лицевой стороне [2]. Стандартные методы инфракрасного нагрева, используемые в технологии быстрого термического отжига, не обладают достаточным быстродействием и локальностью, что приводит к нагреву пластины по всей толщине. Поэтому данные подходы неприменимы при изготовлении современных силовых приборов. Для решения указанной проблемы в мировой практике используется технология лазерного отжига [1], в которой нагрев обрабатываемой области происходит за счет энергии импульсного лазерного излучения. Суть технологии лазерного отжига состоит в обработке выделенных участков поверхности полупроводниковой пластины единичными субмикросекундными лазерными импульсами высокой мощности. Значительная плотность энергии обеспечивает высокую скорость нагрева вплоть до достижения точки плавления обрабатываемого материала. Кратковременность импульса препятствует диффузии примесей и дефектов за время нагрева и охлаждения. Локальность и высокая скорость нагрева обеспечивают сохранение низкой температуры пластины вне зоны нагрева, в том числе на обратной стороне пластины, что не достижимо при использовании классического быстрого термического отжига с инфракрасным нагревом. Целевые параметры лазерного излучения, такие как длина волны, частота, длительность и энергия импульсов, зависят от требований технологического процесса, а также от физико-химических свойств обрабатываемого материала. Для оптимального выбора режима обработки необходима количественная оценка влияния параметров лазерного воздействия на глубину расплава и эффективность рекристаллизации.

В настоящей работе проведено численное моделирование лазерного отжига кремния для задач обработки обратной стороны IGBT. Установлено, что глубина расплава зависит от длительности и формы лазерного импульса: сокращение длительности при фиксированной энергии способствует увеличению глубины плавления, однако сопровождается ростом температуры поверхности и риском повреждения слоя. Показано, что временной профиль импульса оказывает существенное

влияние на характеристики плавления: импульсы с экспоненциальным спадом обеспечивают меньшую глубину по сравнению с прямоугольными. Моделирование также указывает на эффект накопления тепла при многократных воздействиях, что открывает возможности для оптимизации режимов обработки. Полученные зависимости позволяют предсказать оптимальные условия лазерной обработки. Работа является основой для последующей верификации на экспериментальных данных и может быть использована при проектировании технологических процессов для полупроводниковой микро- и наноэлектроники.

Литература

1. Fortunato G. et al. Historical evolution of pulsed laser annealing for semiconductor processing // Laser Annealing Processes in Semiconductor Technology, 2021. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820255-5.00006-4.
2. Huet K. Laser annealing applications for semiconductor devices manufacturing // Laser Annealing Processes in Semiconductor Technology, 2021. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820255-5.00008-8.

УДК 537.533.2

Исследование влияние геометрии наноразмерной матричной полевой эмиссионной ячейки с лезвийными катодами на основе карбида кремния и графена на распределение напряженности электрического поля вблизи эмитирующей поверхности

Ковалец А. И., Путря М. Г., д. т. н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
koval_21@vk.com

Разработана конструкция матричной полевой эмиссионной ячейки с лезвийными катодами на основе карбида кремния и графена. Изучено влияние геометрических параметров полевой эмиссионной ячейки на распределение напряженности электрического поля. Приведены характеристики изученных структур.

Ключевые слова: холодные катоды; напряженность электрического поля; полевая эмиссия; графен; моделирование; карбид кремния.

Вакуумная микроэлектроника — перспективное направление в отрасли. Однако на пути ее развития стоят такие ограничивающие факторы, как создание наноразмерной электронной базы и интеграция с существующими технологиями микроэлектроники. Особенно актуальной является разработка катодных структур для полевой эмиссии.

Цель исследования — добиться равномерного распределения напряженности электрического поля между краями лезвий в матричной ячейке. Для этого необходимо исследовать влияние форм-фактора эмиттера на усиление поля и распределение напряженности электрического поля. Для достижения поставленных задач использовался метод физико-математического моделирования. Результаты моделирования показали, что:

- локальная напряженность поля на краевых эмиттерах однолезвийного катода увеличивается;
- при увеличении ширины лезвия и межэлектродного зазора напряженность поля уменьшается;
- оптимальные параметры — межэлектродное и межкатодное расстояние — 100 нм, ширина лезвия — 50 нм;
- напряженность поля в углах лезвий снижается до 3,5 раз, что способствует выравниванию локальных напряжений.

Моделирование однолезвийной ячейки позволило выявить следующие закономерности:

- ширина однородного участка поля (31,5 нм) максимальна при расстоянии между электродами 100 нм и ширине лезвия 100 нм;
- локальная напряженность электрического поля в точках эмиссии превышает значения в центральной области в шесть раз при ширине 10 нм.

Моделирование трехлезвийной конструкции показало, что:

- напряженность электрического поля в точке эмиссии превышает значения на краю центрального лезвия;

- увеличение расстояния между эмиттерами уменьшает разницу между значениями напряженности электрического поля на краю внешнего лезвия и в однородной области.

Влияние межкатодного и межэлектродного расстояний

Исследование влияния межкатодного и межэлектродного расстояний позволило установить, что:

- одинаковые значения напряженности электрического поля на крайних и центральных лопастях достигаются при межкатодном и межэлектродном расстояниях 100 нм при ширине лезвия 50 нм;
- напряженность электрического поля в углах внешних лезвий матрицы снижается до 3,5 раз;
- локальные напряжения в углах центральных и крайних лезвий выравниваются.

Таким образом, исследование позволило определить влияние параметров полевой эмиссионной ячейки с лезвийным катодом на распределение напряженности электрического поля. Были выявлены оптимальные параметры, обеспечивающие равномерность распределения напряженности в углах эмитирующей поверхности матричного катода.

Литература

1. Quancai Z., Zhen W., Li'an Z., Ye H., Yicong Y. et al. Study on field electron emission characteristics and microstructure corrosion of titanium dominated by crystal orientation // Materials & Design, 2025. Vol. 255. P. 114154.
2. Kumar A., Giubileo F., Faella E., Passacantando M., Kocaman Kabil F. et al. 3D porous laser-induced graphene coated sponges for field emission devices and temperature/pressure sensors // Diamond and Related Materials, 2025. Vol. 157. P. 112471.
3. Zhang Y., Ding H., Liu C., Zhang J., Wang C. et al. Regulating the aspect ratio of bulk few-layer graphene to improve the field emission performance // Diamond and Related Materials, 2024. Vol. 144. P. 110972.

УДК 004.942

Агрегированные цифровые двойники электронных модулей

Чашкин Л. Б.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
lbchashkin@edu.hse.ru

Разработана платформа для построения агрегированных цифровых двойников электронных модулей. Проведен эксперимент на базе электронного модуля транзисторного усилителя по схеме с общим эмиттером. Верифицированы параметры электронного модуля.

Ключевые слова: электронные модули; цифровые двойники; моделирование.

Цифровой двойник электронного модуля представляет собой систему, состоящую из цифровой модели устройства и двусторонних информационных связей с модулем или его составными частями [1]. Цифровые двойники представляют собой ключевой инструмент в современных инженерных разработках, позволяющий оптимизировать процессы проектирования, производства и эксплуатации электронных устройств. Их применение может охватывать все этапы жизненного цикла изделия. Основная проблема при построении цифровых двойников — повышение точности имитационных моделей.

В данной работе была разработана платформа для создания цифровых двойников электронных модулей. Основная уникальность данной платформы заключается в агрегации множества входных параметров, включая электрические и тепловые характеристики, что позволяет повысить точность имитационной модели.

Платформа состоит из четырех основных модулей:

1) модуль сбора данных — отвечает за сбор и сохранение измеряемых параметров с электронного модуля;
2) модуль верификации — производит верификацию модели на основе минимизации среднеквадратичной ошибки по ключевым параметрам;
3) модуль симуляции — осуществляет синхронное моделирование с учетом тепловых параметров в программном обеспечении LTspice на основе данных, получаемых с устройства в реальном времени;
4) модуль анализа результатов — позволяет сравнивать и оценивать разницу между выходными характеристиками реального модуля и его модели в LTspice.

Для тестирования платформы был разработан электронный модуль транзисторного усилителя по схеме с общим эмиттером. В качестве выходной характеристики рассматривалось напряжение на коллекторе. Электронный модуль тестировался при увеличении температуры от 30 до 80 °C. Проведена верификация данного модуля с учетом тепловых характеристик. В результате был сделан вывод, что основными параметрами, влияющими на выходную характеристику, для транзистора являются IS (ток насыщения), BF (коэффициент усиления тока) и XTB (температурный коэффициент).

Синхронные испытания электронного модуля показали точность работы модели не более 15 % на всем рассматриваемом диапазоне температур.

Таким образом, ключевыми преимуществами предложенного решения являются:

- автоматизация процессов верификации и оптимизации параметров модели, что сокращает время на доработки;
- синхронное тестирование физического и цифрового объекта, повышающее точность прогнозирования;
- гибкость и масштабируемость за счет модульной структуры;
- возможность комплексного анализа данных, включая электрические, тепловые характеристики.

Платформа позволяет создавать цифровые модели электронных модулей, проводить их верификацию и синхронные испытания с реальным объектом. Планируется проведение испытаний на более комплексных устройствах.

Данные, полученные с использованием разработанной платформы, в дальнейшем могут быть использованы для построения моделей машинного обучения в целях выявления предотказных состояний электронных модулей и создания интеллектуальных цифровых двойников.

В данной научной работе использованы результаты проекта №ФИ-2025-4, выполненного в рамках программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2025 году.

Литература

1. ГОСТ Р 57700.37-2001 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».

УДК 621.382.323

Моделирование электрических характеристик нанослойных полевых транзисторов с учетом температурных факторов

Бабурин А. И., к. т. н. Силкин Д. С., к. т. н. Попов Д. А.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
da.popov@hse.ru

В работе представлены результаты моделирования электрических характеристик многоуровневых нанослойных полевых NSFET с учетом температурных факторов. Исследуемые трехмерные структуры получены с помощью системы приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD.
Ключевые слова: NSFET; FinFET; TCAD; температурные факторы.

В настоящее время наблюдается быстрое развитие электроники и общий курс на миниатюризацию базовых электронных компонентов, которые привели к тому, что современные транзисторы приблизились к минимально возможным физическим пределам размеров структурных элементов. FinFET с длиной канала менее 10 нм начинают сталкиваться с серьезными ограничениями, поскольку становится трудно разместить больше ребер в стандартной ячейке [1–4]. В этой ситуации схемы, в которых транзисторы расположены не только на плоскости, но и друг над другом, становятся новым ключевым направлением в развитии.

Рассматриваемая оптимизированная трехмерная NSFET-структура [5] была расширена и адаптирована для возможности моделирования характеристик в отдельно взятых слоях транзистора. Доработанная модель пригодна для исследований характеристик в диапазоне от трех до восьми слоев (рис. 1). Проведена оценка влияния тепловых эффектов на полученные вольт-амперные характеристики при включении в трехмерную модель исследуемых структур дополнительных уровней. Проанализировано распределение плотности тока в различных многоуровневых NSFET-структурах. Проведена оценка влияния ширины стока и истока 3D-структуры на вольт-амперные характеристики и распределение температуры.

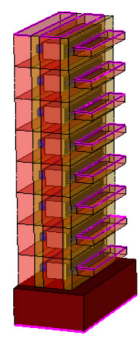


Рис. 1. Трехмерная модель восьмислойной NSFET-структуры

Работа выполнена в рамках проекта ФИ-2025-4 НИУ ВШЭ.

Литература

1. Jan C. H., Bhattacharya U., Brain R., Choi S. J., Curello G., Gupta G., Hafez W., Jang M., Kang M., Komeyli K., Leo T. A 22 nm SoC platform technology featuring 3-D tri-gate and high-k/metal gate, optimized for ultra low power, high performance and high density SoC applications // Tech. Dig.-Int. Electron Devices Meet. IEDM, 2012. https://doi.org/10.1109/IEDM.2012.6478969.
2. Sinha S., Yeric G., Chandra V., Cline B., Cao Y. Exploring sub-20 nm FinFET design with predictive technology models // Proc.-Des. Autom. Conf., 2012. P. 283–288. https://doi.org/10.1145/2228360.2228414.
3. Tayal S., Nandi A. Optimization of gate-stack in junctionless Si-nanotube FET for analog/RF applications // Mater. Sci. Semicond. Process, 2018. Vol. 80. P. 63–67. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.02.014.
4. Bardon M. G. et al. Extreme scaling enabled by 5 tracks cells: holis tic design-device co-optimization for FinFETs and lateral nanowires // Tech. Dig.-Int. Electron Devices Meet. IEDM, 2017. 28.2.1–28.228.2.4. https://doi.org/10.1109/IEDM.2016.7838497.
5. Petrosyants K. O., Silkin D. S., Popov D. A. TCAD Electrothermal Analysis of 3D GAAFET Structures for Future VLSI Circuits // Arai K. (eds). FTC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1156. Springer. P. 643–652.

УДК 621.382.323

Анализ различных Spice-симуляторов в части точности и скорости электротеплового расчета схем при работе с цифровыми двойниками электронных компонентов (ЭК)

Зубкова А. И., Харитонов И. А.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
Alex2000zu@yandex.ru

Работа посвящена сравнительному анализу эффективности симуляторов ngspice, ltspice, ngspice с использованием оболочки Python для электротеплового моделирования схем при работе с цифровыми двойниками компонентов электронных схем с учетом влияния на них внешней температуры. Проанализированы различия в смоделированных переходных характеристиках и затратах времени на моделирование для ряда схем перечисленных выше симуляторов с учетом разных методов вычисления.
Ключевые слова: цифровой двойник; электротепловая модель; Python SPICE; Ltspice; ngspice; МОПТ; переходные характеристики.

Введение

С помощью алгоритмов и возможностей интегрирования Python возможно повышать скорость моделирования процессов, в том числе таких, как анализ электротепловых (ЭТ) характеристик. Поэтому необходимо подобрать более точный и быстрый SPICE симулятор, который в интеграции с Python, сможет показывать лучшие результаты. Python SPICE использует ядро ngspice, что позволяет использовать Python для автоматизации, обработки данных и совмещения с машинным обучением [4]. Для сравнения были взяты еще такие симуляторы, как чистый ngspice и Ltspice.

Электротепловое моделирование схемы двухтактного преобразователя напряжения с использованием различных SPICE-симуляторов

Для анализа скорости моделирования симуляторов была промоделирована схема двухтактного преобразователя напряжения вместе с его тепловой цепью, представленная на рис. 1, с использованием указанных симуляторов.

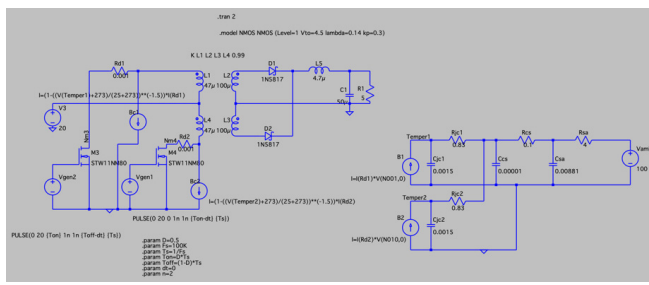
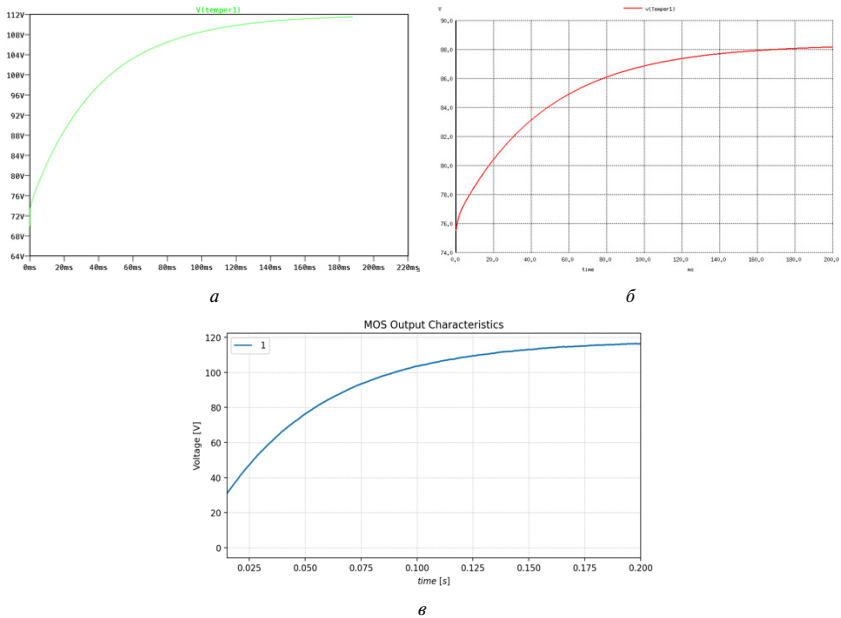


Рис. 1. Схема двухтактного преобразователя транзистора STW11NM80 в среде Ltspice

Схема работает на частоте 100 кГц. Пример результатов моделирования при температуре среды 70 °С с использованием различных SPICE-симуляторов можно видеть на рис. 2.



а *б*

в

Рис. 2. Смоделированные изменения во времени значений температуры транзистора STW11NM80 двухтактного преобразователя, Vamb = 70 °С, для Ltspice (*а*), ngspice (*б*), Python SPICE (*в*)

Время расчета схемы с уменьшенными в 100 раз тепловыми емкостями (для уменьшения затрат времени при сравнительных расчетах) в средах Ltspice, ngspice и Python SPICE с использованием цифрового двойника МОП-транзистора при температурах 27, 70 и 150 °С представлено в табл. 1. По результатам можно заметить, что при увеличении температуры среды увеличивается и время работы процессора.

Таблица 1. Затраты времени на расчет ЭТ-характеристик схемы двухтактного преобразователя

Температ. среды	***Ltspice***	***ngspice***	***Python SPICE***
Vamb = 27	5 ч 27 мин 13 сек	25 мин 43 сек	1 ч 53 мин 12 сек
Vamb = 70	9 ч 8 мин 35 сек	44 мин 22 сек	2 ч 14 мин 20 сек
Vamb = 100	3 дн 10 ч 27 мин 41 сек	1 ч 57 мин 36 сек	3 ч 51 мин 24 сек

Симулятор ngspice использует алгоритм решения уравнений с высокой оптимизацией, что уменьшает вычислительную нагрузку на процессор при расчете схем [2]. В Ltspice используется алгоритм с применением адаптивного шага, и ltspice

работает только в однопоточном режиме, а ngspice поддерживает многопоточные вычисления [3]. Вышеперечисленные условия влияют на скорость электротеплового моделирования Python SPICE.

Заключение

Проведенный сравнительный анализ симуляторов ngspice, ltspice, ngspice с использованием оболочки Python для электротеплового моделирования схем при работе с цифровыми двойниками ЭК показал следующее. При моделировании более времязатратных процессов использование Python SPICE предоставляет возможность проводить расчеты быстрее в несколько раз за счет использования ngspice, ООП и адаптации методов вычисления и построения зависимостей [5].

Исследование осуществлено в рамках программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2025 г., проект № ФИ-2025-4.

Литература

1. Andrei Velcescu. Using power MOSFETs in DC motor control applications [Электронный ресурс]. URL: https://www.nexperia.com/applications/interactive-app-notes/IAN50004_using-power-MOSFETs-in-DC-motor-control-applications (дата обращения 01.02.2025).
2. SPICE Differentiation. Michael Engelhardt [Электронный ресурс]. URL: https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/spice-differentiation.html (дата обращения: 21.03.2025).
3. Comparison Between SPICE Simulators [Электронный ресурс]. URL: https://electronics.stackexchange.com/questions/18760/comparison-between-spice-simulators (дата обращения: 15.05.2025).
4. Зубкова А. И. Харитонов И. А. Разработка цифровых двойников для мощных МОП-транзисторов // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов имени Е. В. Арменского — 2023.
5. Sergio Vinagrero Gutiérrez. Python Framework for Modular and Parametric SPICE Netlists Generation // Electronics, 2023. Vol. 12 (18). P. 3970.

УДК 621.382.32

Технологическое и приборное моделирование карбидокремниевого МОП-транзистора траншейного типа

Десятов Л. Д., Потапов М. А., Спутай Н. Р., Шевченко С. А., к. т. н.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
mapotapov@stud.etu.ru

В работе рассматриваются технологические процессы формирования траншейных транзисторных структур на основе карбида кремния с использованием ПО TCAD. Получена топология, обеспечивающая напряжение пробоя $U_{DS} = 1500$ В при сопротивлении во включенном состоянии $R_{DSon} = 80$ мОм и пороговом напряжении $V_{th} = 3{,}5$ В.

Ключевые слова: карбид кремния; TCAD; транзистор траншейного типа; trench MOSFET.

Карбидокремниевые транзисторы являются перспективными компонентами силовой электроники, обладающими высоким напряжением пробоя, малым тепловым сопротивлением, частотой переключения и повышенной надежностью по сравнению с традиционными ключами на основе кремния [1]. Эти преимущества делают их привлекательными для широкого спектра применений: в электромобилях, устройствах промышленной автоматики, возобновляемой энергетике и других областях, где предъявляются повышенные требования к энергоэффективности и массогабаритным параметрам. С развитием технологий изготовления SiC-приборов, включая травление, осаждение оксида и имплантацию примеси, появились МОП-транзисторы траншейного типа. В структурах такого типа несомненным преимуществом над планарными аналогами является повышенная подвижность носителей в канале и более высокая плотность размещения ячеек на кристалле [2].

Несмотря на то что силовые SiC МОП-транзисторы имеют множество преимуществ и широко применяются в областях средних и высоких напряжений, возникают проблемы надежности, поскольку плотность тока в канале и электрическое поле в подзатворном диэлектрике на практике оказываются значительно выше оценочных значений. Низкое качество интерфейса SiC/SiO_2 является одним из слабых мест прибора, способствующих раннему выходу из строя и деградации при воздействии электрического поля из-за разрыва связей в молекулярных дефектах. Для достижения характеристик структуры, пригодных к применению в силовой электронике ($U_{DS} = 1500$ В, $R_{DSon} < 80$ мОм), было предложено несколько вариантов структур MOSFET-транзисторов траншейного типа. В разрабатываемых структурах одной из наиболее важных стадий технологического процесса является ионная имплантация, применяемая в целях формирования экранирующих *p*-областей под заглубленным истоком транзистора. Неоднородность легирования отвесных стенок истоковых областей отрицательно сказывается на характеристиках прибора. Данная проблема решена подбором угла имплантации, при котором достигается оптимальный профиль легирования с равномерным распределением примеси вблизи интерфейса. Итоговое распределение примеси представлено на рис. 1.

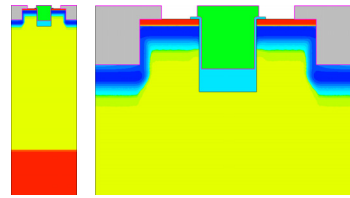


Рис. 1. Распределение примеси в структуре

Предложенная конструкция структуры MOSFET-транзистора траншейного типа отличается от аналогов [4] увеличенной в 10 раз толщиной подзатворного диэлектрика в области дна канавки, что положительно сказывается на распределении поля. Схематичное изображение структуры приведено на рис. 2.

Рис. 2. Моделируемая структура MOSFET-транзисторов траншейного типа

За счет изменения толщины диэлектрика можно добиться компромисса между сроком службы устройства и пороговым напряжением [3]. Увеличение толщины данного слоя позволяет увеличить напряжение пробоя за счет распределения поля. Также повышается пороговое напряжение ввиду снижения напряженности поля, создаваемой напряжением на затворе. В результате проведенного технологического и приборного моделирования была получена структура, обеспечивающая напряжение пробоя 1500 В и сопротивление во включенном состоянии 80 мОм при напряжении открытия 3,5 В. Проведен сравнительный анализ ВАХ усовершенствованного прибора с прототипом, что позволяет утверждать о перспективе внедрения предложенных изменений в конструкции.

Литература

1. Peters D. et al. Electrical performance of triple implanted vertical silicon carbide MOSFETs with low on-resistance // 11th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. ISPSD'99 Proceedings (Cat. № 99CH36312). IEEE, 1999. P. 103–106.
2. Chaturvedi M. et al. Comparison of commercial planar and trench SiC MOSFETs by electrical characterization of performance-degrading near-interface traps // IEEE Transactions on Electron Devices, 2022. Vol. 69. № 11. P. 6225–6230.
3. Kimoto T., Watanabe H. Defect engineering in SiC technology for high-voltage power devices // Applied Physics Express, 2020. Vol. 13. № 12. P. 120101.
4. Yang T., Wang Y., Yue R. SiC trench MOSFET with reduced switching loss and increased short-circuit capability // IEEE transactions on electron devices, 2020. Vol. 67. № 9. P. 3685–3690.

УДК 004.94

Моделирование процесса переключения элемента энергонезависимой памяти на основе технологии FeRAM

Журавлев А. А., д. ф.-м. н., Абгарян К. К., д. ф.-м. н., Ревизников Д. Л.
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2
zhuravlyow.andrei@gmail.com, kristal83@mail.ru, reviznikov@gmail.com

Для исследования процессов, происходящих в ходе переключения элемента FeRAM, предлагается математическая модель, основанная на термодинамической теории Ландау — Гинзбурга. Модель представляет собой систему уравнений движения подвижных ионов кислорода внутри элементарной ячейки кристалла HfO_2 (HZO). Эти сегнетоэлектрики являются одноосными, что позволяет рассматривать только одну общую компоненту смещения, не рассматривая отдельные смещения каждого иона. Таким образом, в качестве переменной состояния выступает общее смещение ионов в совокупности, что существенно упрощает задачу. Результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными. Сравнительный анализ показывает, что предлагаемая модель позволяет адекватно описывать переключательную динамику элементов FeRAM.

Ключевые слова: математическое моделирование; FeRAM; термодинамическая теория Ландау — Гинзбурга.

Одним из подходов к моделированию элементов памяти на основе сегнетоэлектрических эффектов является построение модели на основе термодинамической теории. Подробный обзор термодинамических моделей можно найти в монографии [1]. В данной работе мы используем термодинамический подход при построении компактной модели. В соответствии с этим подходом состояние системы можно описать небольшим набором величин. В случае сегнетоэлектрических систем этими величинами могут быть внутренние параметры, например поляризация и деформация, и внешние параметры, например механические напряжения, температура и прикладываемое электрическое поле. При этом зависимость внутренней энергии системы, как правило, аппроксимируется полиномом, коэффициенты которого определяются на основе квантово-механических расчетов либо доступных экспериментальных данных [1].

В данной работе для построения модели элемента памяти используется термодинамическая теория Ландау — Гинзбурга в сочетании с данными квантово-механического моделирования сегнетоэлектрического переключения в оксидном слое. Модель основывается на представлении элемента FeRAM как нелинейной динамической системы относительно смещения атомов кислорода в оксидном слое. Уравнения динамики для смещений записываются следующим образом:

$$\frac{ds}{dt} = v,$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{-1}{m}\frac{dE(s)}{ds} - \frac{V(t)q}{lm},$$

где s — осредненное смещение атомов кислорода в кристаллической ячейке, v — скорость смещения, m — эффективная масса кристаллической ячейки, V — прикладываемое напряжение, l — толщина активного слоя, q — эффективный заряд атомов кислорода, $E(s)$ — потенциальная энергия кристаллической ячейки, зависимость которой от смещения аппроксимируется полиномом четной степени.

Здесь используется тот факт, что для одноосного сегнетоэлектрика плотность свободной энергии можно разложить по степеням единственной компоненты поляризации [2], однако в отличие от традиционного подхода, в рамках которого внутренняя энергия системы описывается функциональной зависимостью от поляризации, мы используем смещение атомов в качестве свободного параметра, что упрощает использование результатов квантово-механических расчетов для извлечения параметров системы. При этом поляризация также связывается со смещением зависимостью, получаемой из квантово-механических расчетов [3], и используется для получения величины электрического тока.

В силу неидеальности физических элементов памяти, а именно наличия дефектов и присутствия различных фаз материала внутри элемента, необходимо внесение дополнительных калибровочных параметров, а также уточнение результатов квантово-механического моделирования на основе имеющихся экспериментальных данных. Параметры модели доопределяются путем минимизации отклонения расчетных вольт-амперных характеристик от наблюдаемых в экспериментах или полученных на основе прямого моделирования. Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных данных показал, что предлагаемая модель позволяет адекватно описывать переключательную динамику элементов FeRAM.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-01012).

Литература

1. Мороз Л. И., Масловская А. Г. Дробно-дифференциальные модели динамических откликов сегнетоэлектриков. — Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2022.
2. Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд / под ред. Рабе К. М., Анна Ч. Г., Трискона Ж.-М.; пер. с англ. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011.
3. Журавлёв А. А., Абгарян К. К., Ревизников Д. Л. Квантово-механическое моделирование переключения поляризации в кристаллах HfO_2 // Известия вузов. Материалы электронной техники, 2023. — Т. 26. — № 3. — С. 198–203.

УДК 621.311.29

Термофотоэлектрическая ячейка, работающая в ближнем поле с термоэмиссионным усилением

Простодушев А. О.[1], Захаров Ф. А.[2], к. т. н., Яшин М. С.[1]
[1] АО «НИИ НПО «ЛУЧ»
142103, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24
prostodushevao@sialuch.ru
[2] АО «ЦНИИмаш»
141070, г. Королёв, ул. Пионерская, 4

В работе представлено моделирование термофотоэлектрической (ТФЭ) ячейки, работающей в ближнем поле (ПБ) излучения температурного излучателя (ТИ), усиленной термоэлектронной эмиссией с его поверхности. В рамках модели рассмотрены традиционные для ТФЭ фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе InAs, GaSb и Ge в паре с Mo-Re ТИ с межэлектродным зазором 0,1–10 мкм и температурой ТИ 600 К.

Ключевые слова: термофотоэлектрическое преобразование; ближнее поле; прямое преобразование энергии.

ТФЭ-преобразование является одним из перспективных методов прямого преобразования энергии теплового излучения ТИ в полезную электрическую мощность посредством ФЭП. Однако плотность выходной электрической мощности ТФЭ-ячейки и ее эффективность напрямую зависят от температуры ТИ. На практике оправданно применение ТИ с температурой не ниже 1200 К, что накладывает значительные ограничения на область применения данных систем. Перенос ФЭП в зону ближнего поля излучения ТИ снимает ограничения, обусловленные законом теплового излучения Планка, и позволяет значительно интенсифицировать поток излучения, приходящего на ФЭП, а также значительно изменить энергетический состав излучения за счет затухающих электромагнитных волн в ближней зоне ТИ [1]. Переход в БП позволит значительно снизить температуру ТИ без потери эффективности и выходной электрической мощности преобразования такой ТФЭ-системы.

Основными проблемами БПТФЭ систем являются сложность обеспечения требуемого зазора между ФЭП и ТИ (менее 1 мкм) и значительные потери электрической мощности из-за поверхностного сопротивления ФЭП при столь высоких плотностях приходящего излучения. Предлагаемым решением этой проблемы может служить дополнительное применение механизма термоэмиссии при помощи использования тонких алмазных пленок с низкой работой выхода на поверхности ТИ и ФЭП. По сути, речь идет о комбинированной системе: БПТФЭ-преобразование совмещено с вакуумным термоэмиссионным преобразователем (ТЭП) с малым межэлектродным зазором (МЭЗ). Данное решение даст возможность увеличить расстояние зазора между ТИ и ФЭП без существенной потери выходной мощности, а также позволит нивелировать влияние поверхностного сопротивления за счет объемного электронного облака в МЭЗ [2].

В рамках данной работы представлена модель БПТФЭ-ячейки с термоэмиссионным усилением (структурная схема на рис. 1). В рамках данной модели рассматривались варианты БПТФЭ-ячейки с традиционными для ТФЭ-систем ФЭП на основе полярных полупроводников InAs, GaSb и неполярного Ge. В качестве эмиссионных

пленок выбраны тонкие легированные алмазные пленки (2 нм) с работой выхода 1,4 эВ *n*-типа и 0,9 эВ *p*-типа [3, 4] на подложке из тугоплавких металлов Mo, Re или сплава Mo-Re (47 %), одновременно выступающей в качестве ТИ с температурой 600 K. Величина зазора между ТИ и ФЭП находилась в промежутке 0,1–10 мкм.

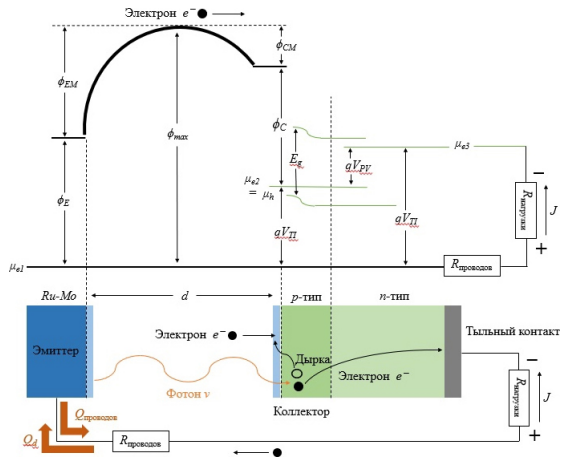


Рис. 1. Структурная схема предложенной БПТФЭ-системы [2]

В результате моделирования была определена термоэлектрическая эффективность преобразования и оценена характерная плотность выходной электрической мощности предложенной системы. Для этого для рассматриваемых комбинаций материалов методами флуктуационной электродинамики были получены спектральные характеристики переноса тепла излучением в ближнем поле. Для учета теплопереноса, вызванного потоком электронов термоэмиссии, и определения влияния объемного отрицательного заряда в МЭЗ решалось уравнение Пуассона. Насколько известно авторам, в данной работе впервые представлена модель, учитывающая распределение заряда в МЭЗ и включающая непосредственное моделирование вольт-амперной характеристики термоэмиссионной части в БПТФЭ-системе; также впервые рассмотрены излучатели на основе тугоплавких металлов Mo, Re и их сплава.

Литература

1. Волокитин А. И., Перссон Б. Н. Д. Радиационная передача тепла и бесконтактное трение между наноструктурами // Успехи физических наук, 2007. — Т. 177. — № 9. — С. 921–951.
2. Datas A., Vaillon R. Thermionic-enhanced near-field thermophotovoltaics for medium-grade heat sources // Applied Physics Letters, 2019. Vol. 114. № 13.
3. Koeck F. A. M., Nemanich R. J. Substrate-diamond interface considerations for enhanced thermionic electron emission from nitrogen doped diamond films // Journal of Applied Physics, 2012. Vol. 112. № 11.
4. Koeck F. A. M. et al. Thermionic electron emission from low work-function phosphorus doped diamond films // Diamond and related materials, 2009. Vol. 18. № 5–8. P. 789–791.

УДК 621.315.592

Пределы определения отклонения от стехиометрии в халькогенидах кадмия и цинка по составу равновесной паровой фазы

Стрельцов Н. А., Кобелева С. П.
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» 119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

Разработана программа численного решения системы уравнения электронейтральности и уравнения материального баланса для расчета состава равновесной паровой фазы при испарении соединения с известным отклонением от стехиометрии δ. На примере CdTe определены минимальные δ, которые можно определить по составу паровой фазы.

Ключевые слова: A^2B^6; область гомогенности; отклонение от стехиометрии; метод квазихимических реакций.

Введение

Электрические и оптические свойства соединений A^2B^6 в значительной степени определяются составом собственных точечных дефектов (СТД) в материале. Поэтому определение отклонения от стехиометрии δ является важной, но пока еще не решенной задачей в этом классе материалов [1]. При испарении материалов в паровой фазе они полностью разлагаются на атомы металла и двухатомные молекулы халькогена, причем при относительно небольших границах области гомогенности (до 10^{-4} атомных процентов) отношение парциальных давлений компонентов в равновесной паровой фазе изменяется на 6–10 порядков. На границах области гомогенности равновесная паровая фаза состоит преимущественно из избыточного компонента. Внутри области гомогенности имеется единственный состав, испаряющийся конгруэнтно, когда отношение γ парциальных давлений паров металла (P_A) и двухатомных молекул халькогена (P_{B2}) $\gamma = P_A/P_{B2}$ равно двум. Равновесное давление такого состава минимально ($P_{мин}$) и рассчитывается по величине константы испарения, которая для большинства материалов этого класса известна. Экспериментальное определение температурной зависимости состава равновесной паровой фазы можно использовать как для определения отклонения от стехиометрии соединения δ, так и уточнения модели дефектов и их характеристик в материале [2]. Целью данной работы является оценка минимальных значений δ, которые можно определить данным методом, на примере CdTe.

Описание методики расчета состава равновесной паровой фазы

Существенным для данного метода является требование испарения в минимально доступный экспериментально объем, так как испарение в большие объемы, используемые в случае анализа количества избыточного компонента, испарившегося из материала, приводит состав пара γ к двойке. Такие измерения используют для оценки δ на границах области гомогенности [1]. В предположении, что отношение объемов паровой и твердой фаз α меняется незначительно в процессе испарения, в [3] получено уравнение материального баланса:

$$\delta - \delta_0 + \frac{\alpha}{k_B T}\left(P_A - P_{B_2}\right) = 0, \qquad (1)$$

где δ_0 и δ — начальное отклонение от стехиометрии и отклонение от стехиометрии при температуре испарения Т. Величина δ определяется по сумме концентраций СТД, которые в свою очередь рассчитываются по методу квазихимических реакций и зависят от двух независимых переменных — концентрации электронов (дырок) и парциального давления одного из компонентов. Добавляя к уравнению (1) уравнение электронейтральности, компоненты которого определяются теми же независимыми переменными, получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными.

Система уравнений решалась с помощью метода Ньютона на языке C#. В качестве начального приближения использовались результаты расчетов состава P_{min} (n и P_A) разработанной ранее программы решения уравнения электронейтральности [4].

Заключение

Расчеты проведены с использованием модели дефектообразования [5]. Показано, что с использованием определения состава равновесной паровой фазы по оптической плотности паров можно определять отклонение от стехиометрии до 10^{12} см$^{-3}$ избытка по обоим компонентам.

Литература

1. Avetisov I., Mozhevitina E., Khomyakov A., Avetisov R. Nonstoichiometry of AIIBVI semiconductors // Crystal Research and Technology, 2015. Vol. 50 (1). P. 115–123. https://doi.org/10.1002/crat.201400215.
2. Кобелева С. П. Определение отклонения от стехиометрии в широкозонных полупроводниковых соединениях $A^{II}B^{VI}$ по составу равновесной паровой фазы // Известия вузов. Материалы электронной техники, 2022. — Т. 25. — № 2. — С. 107–114. DOI: 10.17073/1609-3577-2022-2-107-114.
3. Кобелева С. П. Влияние СТД на процессы испарения халькогенидов кадмия и цинка: дисс. канд. физ.-мат. наук. — Москва, 1982.
4. Кобелева С. П., Юрчук С. Ю. Программа моделирования высокотемпературного равновесия собственных точечных дефектов и паровой фазы CdTe: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2020610371.-2019.
5. Медведев С. А., Мартынов В. Н., Кобелева С. П. Собственные точечные дефекты в нелегированном CdTe // Кристаллография, 1983. — Т. 28. — № 3. — С. 556–561.

УДК 621.389

Исследование технических характеристик МЭМС-микрофонов

Разгуляева Н. Г., к. т. н., Малкин А. И., Чечеткин В. А.
УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
n.g.razguliaeva@at.urfu.ru, alexander.malkin@urfu.ru, v.a.chechetkin@urfu.ru

Проведены измерения диаграммы направленности и чувствительности МЭМС-микрофонов. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов с техническими характеристиками МЭМС и электретных микрофонов.
Ключевые слова: МЭМС; микрофон; диаграмма направленности; звуковое давление; чувствительность.

МЭМС-микрофон построен по типу конденсаторного микрофона, где в качестве подвижной обкладки используется подвижная мембрана, выращенная по технологии изготовления устройств микроэлектроники [1]. Такие микрофоны нашли широкое применение в самых различных областях промышленной и массовой электроники благодаря их компактности, устойчивости к температурным воздействиям и низкому энергопотреблению. На сегодняшний день существует множество видов МЭМС-микрофонов как зарубежного, так и отечественного производства.

Наиболее важным параметром микрофона является его чувствительность, измеряемая в дБ относительно 1 В на 1 Па [2]. Знание диаграммы направленности позволяет оценить возможность применения микрофона для решения конкретных задач, таких как регистрация или запись звуковых колебаний, а также минимизация нежелательных шумов.

Для измерения технических характеристик применяется схема, которая состоит из микрофона, установленного на стойке на высоте 1 м, источника питания, усилителя и осциллографа. Напротив микрофона на той же высоте на расстоянии 0,5 м устанавливается источник звука (динамик). Для измерения диаграммы направленности микрофона выходной сигнал в мВ регистрируется при каждом угле поворота с шагом 5 градусов по часовой оси относительно источника звука (рис. 1). Измерения проводятся в диапазоне звуковых частот от 1 до 10 кГц и при разных уровнях звукового давления. Этот подход позволяет получить полную картину направленности микрофона и оценить его чувствительность в зависимости от угла приема звука.

Для получения большей информации о технических возможностях МЭМС-микрофона также проводятся практические измерения чувствительности и диаграммы направленности электретного микрофона. Сравнительный анализ позволяет выделить достоинства и недостатки обоих микрофонов относительно друг друга и тем самым определить области их наиболее эффективного применения.

Результаты исследований позволяют оценить влияние внешних факторов на параметры микрофонов, оценить соответствие справочных технических характеристик МЭМС-микрофонов с реальными, а также являются основой для дальнейших исследований, особенно для моделирования и проектирования акустических систем.

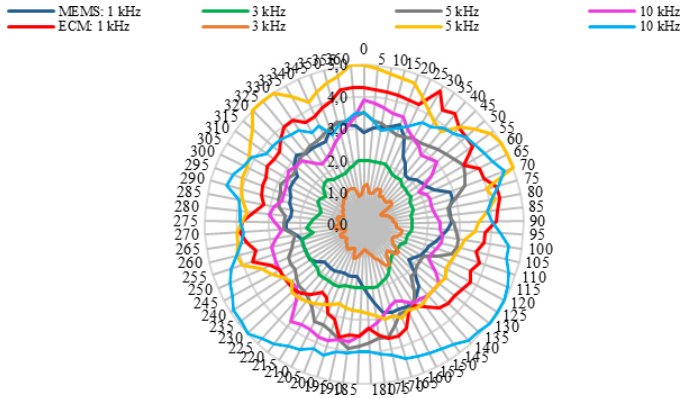


Рис. 1. Диаграмма направленности электретного и МЭМС-микрофонов

Литература

1. Shah M., Shah I., Lee D.-G. and Hur S. Design Approaches of MEMS Microphones for Enhanced Performance // Journal of Sensors, Mar. 2019. P. 1–26. DOI: 10.1155/2019/9294528.
2. Григорьев Д. М. и др. Конденсаторный МЭМС-микрофон // Микроэлектроника, 2020. — Т. 49. — № 1. — С. 40–45.

УДК 537.525

Исследование параметров и состава плазмы бромистого водорода и его смесей с кислородом

Цепкин М. В.[1,2], Ефремов А. М.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Проведены корректировки предыдущей работы, обеспечивающие адекватное описание плазмохимических процессов в бромистом водороде. Проведено исследование параметров состава плазмы в смеси $HBr+O_2$ с переменным соотношением компонентов. Установлены механизмы химических реакций, формирующих состав плазмы.

Ключевые слова: бромистый водород; кислород; индуктивно связанная плазма; реактивное ионное травление; диссоциация; ионизация.

Реактивное ионное травление (РИТ) — это технология удаления материала с поверхности подложки, основанная на совместном действии двух механизмов: химических реакций и физического распыления. Газовый разряд при низком давлении формирует химически активную плазму, состоящую из нейтральных и заряженных частиц. Разность потенциалов между плазмой и подложкой ускоряет ионы до энергий, значительно превышающих тепловые. При этом наблюдается синергия процессов: физическое распыление активирует поверхность, усиливая химические реакции, а те в свою очередь ослабляют межатомные связи, облегчая распыление [1].

Наличие направленной ионной составляющей скорости травления делает процессы РИТ незаменимыми для анизотропного травления структур с высоким аспектным соотношением. В частности, для создания областей щелевой изоляции элементов интегральных микросхем на кремниевых подложках используют плазмообразующие смеси, содержащие HBr и O_2 [2]. Анизотропия обеспечивается ионно-стимулированной реакцией $Si + xBr \rightarrow SiBr_x$ и пассивацией боковых стенок трудноиспаряемыми соединениями $SiBr_xO_y$. Эффективное управление процессом требует понимания связи параметров плазмы (давление, мощность, состав) с концентрацией активных частиц. Решение задачи осложнено слабой изученностью кинетики плазмохимических процессов в HBr и $HBr + O_2$. Цели работы: 1) разработка и верификация кинетической модели для плазмы HBr и $HBr + O_2$; 2) анализ влияния условий РИТ на концентрации активных частиц; 3) исследование механизма травления кремния в смесях с переменным составом.

Проведена корректировка описанной в предшествующих работах модели плазмы HBr [3] и $HBr + O_2$ [4] в части определения константы скорости гетерогенной гибели атомов брома и учета температуры газа. Целесообразность корректировки подтверждена лучшим согласием расчетных значений концентрации атомов водорода с экспериментальными, полученными методом оптической актинометрии.

Для плазмы чистого HBr: *а*) подтверждены особенности состава в ВЧ-разряде; *б*) исследовано влияние давления и мощности на параметры плазмы

и концентрации частиц; *в*) выявлены различия кинетики атомов Br и H, объясняющие поведение их концентраций при изменении давления.

Для плазмы смеси $HBr + O_2$: *а*) определены ключевые процессы, формирующие состав газовой фазы; *б*) рассчитаны плотности потоков активных частиц при содержании O_2 от 0 до 75%; *в*) установлено, что рост доли O_2 снижает вероятность реакции $Si + Br \rightarrow SiBr_x$ из-за образования труднолетучих оксидов $SiBr_xO_y$. Это связано с увеличением плотности потока атомов O, которые пассивируют поверхность, уменьшая число активных центров для адсорбции Br.

Полученные данные по составу плазмы для обоих объектов исследований имеют качественное (по тенденциям изменения) согласие с результатами работ [3, 4], но существенно отличаются по абсолютной величине, демонстрируя при этом лучшее согласие с результатом актинометрического эксперимента. Данный факт подтверждает целесообразность проведенных корректировок моделей плазмы, а также свидетельствует о высокой достоверности наших результатов.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
2. Miwa K., Mukai T. Influences of reaction products on etch rates and linewidths in a poly-si/oxide etching process using hbr/o 2 based inductively coupled plasma // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2002. Vol. 20. № 5. P. 2120–2125.
3. Efremov A. et al. Plasma parameters and active species kinetics in an inductively coupled HBr plasma // Journal of the Korean Physical Society, 2008. Vol. 52. № 1. P. 48–55.
4. Lim N., Efremov A., Kwon K. H. Comparative study of $Cl_2 + O_2$ and $HBr + O_2$ plasma chemistries in respect to silicon reactive-ion etching process // Vacuum, 2021. Vol. 186. P. 110043.

УДК 537.525

О влиянии управляющих параметров плазмохимического травления на пространственную однородность плазмы в реакторе

Захаров Ю. А.[1,2], Ефремов А. М.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Разработана двумерная модель, обеспечивающая самосогласованное описание электрофизических параметров и состава индуктивно связанной плазмы Ar/Cl_2. Проведено модельное исследование влияния расхода газа, его давления, вкладываемой мощности и начального состава смеси на абсолютные величины и пространственные распределения температуры электронов, а также концентраций заряженных частиц и атомов хлора. Результаты моделирования демонстрируют хорошее согласие с экспериментальными данными.

Ключевые слова: плазменные процессы; индуктивно связанная плазма; пространственная неоднородность.

Плазменные процессы на основе ВЧ-разряда (13,56 МГц) широко используются в микроэлектронике для осаждения и травления функциональных слоев [1, 3]. Их ключевое преимущество — раздельное управление потоками активных частиц и энергией ионов, что обеспечивает контроль скорости, селективности и анизотропии травления.

Основная технологическая проблема — достижение высокой равномерности (≥95%) при обработке крупногабаритных пластин, ограничиваемой пространственной неоднородностью концентрации активных частиц. Это обусловлено неоднородностью генерации частиц в электронных ударах (из-за распределения электромагнитного поля) и резким ростом скорости рекомбинации радикалов и ионов в пристеночной области при давлениях ниже 100 мТор.

Оптимизация ПХТ требует комплексного подхода из-за сложной взаимосвязи управляющих параметров (расход, давление, мощность, состав газа) и состояния плазмы.

Компьютерное моделирование позволяет создать цифровой двойник реактора, сократив затраты на эксперименты.

Цель работы — 2D-моделирование плазмы Ar в планарном реакторе с индуктором. Исследованы состав смеси, мощность, расход и давление. Модель верифицирована в COMSOL 6.2.

Результаты моделирования показали удовлетворительное согласие с экспериментальными данными по температуре и концентрации электронов при использовании кинетической схемы, рекомендованной в работе [2]. Основные закономерности пространственного распределения параметров плазмы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Рост давления газа (рис. 1) увеличивает неоднородность плазмы, вызывая резкое снижение концентрации электронов от оси к стенкам. Это обусловлено уменьшением длины свободного пробега и коэффициента диффузии электронов, что затрудняет их перенос из осевой зоны реактора (где имеют место максимальные скорости их генерации в процессах ионизации электронным ударом) к его стенкам. Температура электронов снижается из-за роста частоты их столкновений с частицами газа и увеличения энергетических потерь в упругих и неупругих процессах.

2. Увеличение скорости потока газа (рис. 2) оказывает эффект, аналогичный его давлению. Основное отличие здесь заключается в том, что резкое снижение концентрации электронов имеет место лишь в пристеночной области, при этом центральная зона реактора, соответствующая месту расположения пластины, остается относительно однородной.

3. Увеличение вкладываемой мощности (рис. 3) слабо влияет на пространственное распределение концентрации частиц, но приводит к росту абсолютных значений температуры и концентрации электронов в любой фиксированной точке. Причинами этих эффектов являются увеличение суммарной скорости ионизации, рост степени диссоциации молекул Cl_2 и снижение потерь энергии электронов из-за увеличения доли атомарных частиц. Для последних характерны только процессы электронного возбуждения, которые отличаются более высокими пороговыми энергиями по сравнению с колебательным и электронным возбуждением молекул Cl_2.

4. Рост доли аргона в плазмообразующей смеси (рис. 4) снижает однородность плазмы, устраняя участок постоянной концентрации электронов в рабочей зоне. Это вызвано снижением коэффициента диффузии электронов из-за изменения механизма диффузии от свободного (характерного для электроотрицательных газов) к амбиполярному (характерному для электроположительных газов). Снижение абсолютной концентрации электронов объясняется более высоким потенциалом ионизации Ar по сравнению с хлорсодержащими компонентами.

В заключение отметим, что все отмеченные нами тенденции хорошо согласуются с результатами экспериментов или расчетов других авторов. Это свидетельствует в пользу адекватности разработанной модели и определяет ее применимость для последующей оптимизации конструкции реактора.

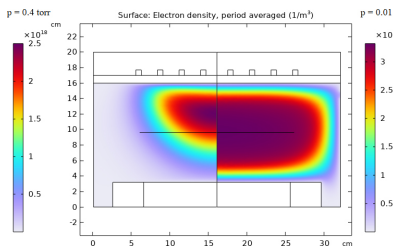


Рис. 1. Изменение концентрации электронов при варьировании давления газа в плазме 50 % Ar + 50 % Cl_2

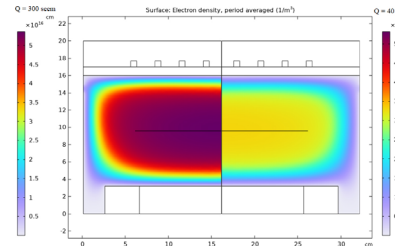


Рис. 2. Изменение концентрации электронов при варьировании скорости потока газа 50 % Ar + 50 % Cl_2

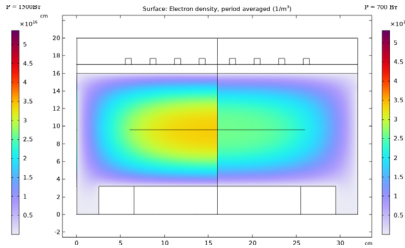


Рис. 3. Изменение концентрации электронов при варьировании вкладываемой мощности 50 % Ar + 50 % Cl_2

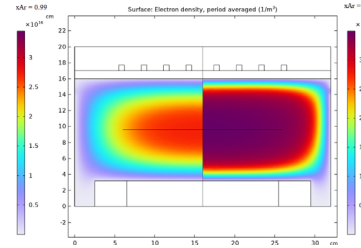


Рис. 4. Изменение концентрации электронов при варьировании состава смеси

Литература

1. Efremov A. M., Lee J., Kwon K.-H. A comparative study of CF_4, Cl_2 and HBr + Ar inductively coupled plasmas for dry etching applications // Thin Solid Films, 2017. Vol. 629. P. 39–48. DOI: 10.1016/j.tsf.2017.03.035.
2. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
3. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника. Часть 3: Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3. — С. 63–93.

УДК 533.922, 533.924, 533.932

Исследование влияния управляющих параметров на результат плазмохимического травления поликремния в индуктивно связанной плазме Cl_2/HBr/Ar

Оксаниченко Ф. В.[1,2], Ефремов А. М.[2], д. х. н.
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Предложена комплексная модель процесса плазмохимического травления (ПХТ), взаимосвязанно описывающая физико-химические свойства плазмы и кинетику процессов на обрабатываемой поверхности. Параметры и состав плазмы определяли с помощью самосогласованной 0-мерной модели в квазистационарном приближении. Расчет скорости и профиля травления проводился с помощью модели ячеек, учитывающей различные механизмы гетерогенного взаимодействия: физическое распыление, переосаждение продуктов, спонтанную и ионно-стимулированную химическую реакцию. Поведен модельный анализ влияния управляющих параметров ПХТ на результат травления поликремния в плазме HBr/Cl_2/Ar.

Ключевые слова: индуктивно связанная плазма; плазмохимическое травление; моделирование ПХТ.

Плазмохимическое травление (ПХТ) является одним из ключевых технологических процессов, используемых при производстве современных интегральных микросхем (ИМС) [1]. В отличие от методов жидкостного травления, ПХТ характеризуется высокой степенью анизотропии, а также большим количеством управляющих параметров (давление, вкладываемая мощность, состав плазмообразующей смеси), влияющих на конечный результат. Данная особенность является принципиально важной для удовлетворения все более возрастающих требований к критическим размерам элементов ИМС. Очевидно также, что оптимизация режимов ПХТ под цели конкретной технологической операции является сложной многофакторной задачей, решение которой чисто экспериментальным путем сопряжено с высокими временными и материальными затратами. Это обуславливает необходимость применения методов численного моделирования для анализа механизмов и прогнозирования результата ПХТ.

В рамках нашего предыдущего исследования [2] была разработана идея взаимосвязанной работы модулей расчета параметров плазмы и профиля травления, а также реализована комплексная модель ПХТ поликремния в смеси Cl_2/Ar. Последняя была выбрана в качестве тестовой системы из-за наличия большого числа экспериментальных данных и сбалансированной кинетической схемы. Целью данной работы является решение аналогичной задачи для смеси HBr/Cl_2/Ar, которая находит применение в реальных технологических процессах.

В результате выполнения работы предложена комплексная 0-мерная модель, обеспечивающая самосогласованное описание физико-химических параметров

плазмы и процессов взаимодействия активных частиц с поверхностью поликремния. При описании плазмы как источника активных частиц учитывались нейтральные атомы и молекулы (HBr, Cl_2, Ar, Cl, Br, H, Br_2, H_2, HCl, BrCl), положительные ионы (HBr^+, Cl_2^+, Ar^+, Cl^+, Br^+, H^+, Br_2^+, H_2^+, HCl^+, $BrCl^+$) и отрицательно заряженные частицы (e^-, Cl^- ,Br^-). Алгоритм расчета базировался на совместном решении уравнений химической кинетики, квазинейтральности плазмы и уравнения баланса вкладываемой мощности [2] методом итераций. Для расчета скоростей и формы профиля травления использовался метод ячеек, в котором с помощью метода Монте-Карло учитывались различные физические (физическое распыление, переосаждение продуктов) и химические (спонтанная химическая реакция, ионно-стимулированная химическая реакция) каналы гетерогенного взаимодействия. Показано, что изменение формы профиля при изменении вкладов физического и химического механизмов травления согласуется с литературными данными.

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — С. 177.
2. Оксаниченко Ф. В. Исследование параметров индуктивно связанной плазмы в процессе травления поликремниевого затвора // Ученые записки физического факультета московского университета, 2024. — Т. 1. — № 3. — С. 2431401.
3. Mahorowala A. P., Sawin H. H. Etching of polysilicon in inductively coupled Cl_2 and HBr discharges. II. Simulation of profile evolution using cellular representation of feature composition and Monte Carlo computation of flux and surface kinetics // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2002. Vol. 20. № 3. P. 1064.

УДК 539.213.2:004.85

Обучение межатомных потенциалов для молекулярного моделирования low-κ-диэлектрика на основе оксида кремния с добавлением бензольных и метильных групп

Кадыров А. Д.[1,2], Резник А. А.[1,2], Резванов А. А.[1,2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
akadyrov@niime.ru

Обучены межатомные потенциалы для моделирования low-κ-диэлектрика на основе пористого оксида кремния с добавлением бензольных колец и терминальных метильных групп с помощью классической молекулярной динамики, а также квантово-механических расчетов, на основе которых обучались новые машинообучаемые потенциалы.
Ключевые слова: low-κ-диэлектрик; молекулярная динамика; расчеты из первых принципов; машинообучаемые потенциалы.

Для увеличения быстродействия будущих интегральных схем необходимы low-κ-диэлектрики — диэлектрики с диэлектрической проницаемостью, меньшей, чем у оксида кремния. Однако, хоть и существует множество подобных материалов, возникают проблемы с интеграцией их в существующие технологические процессы [1]. Поэтому нужен новый low-κ-диэлектрик, удовлетворяющий требованиям микроэлектронной промышленности. В статье [2] был представлен перспективный low-κ-диэлектрик на основе пористого оксида кремния с добавлением бензольных мостиковых и терминальных метильных групп, которые позволяют как увеличить механическую прочность (за счет бензольных групп), так и улучшить гидрофобные свойства (за счет метильных групп). При этом наблюдается значительный рост модуля Юнга с ростом концентрации бензольных мостиковых групп. Однако эксперимент был проведен лишь в нескольких точках и отсутствует модель, позволяющая предсказать поведение механических свойств и диэлектрической проницаемости в более широком диапазоне. Поэтому целью данной работы является разработка межатомных потенциалов взаимодействия для молекулярного моделирования low-κ-диэлектрика на основе пористого оксида кремния с добавлением бензольных колец и терминальных метильных групп, на основе которых возможно уже моделирование диэлектрика, которое опишет данное поведение, а также иные свойства диэлектрика. В дальнейшем требуется решить оптимизационную задачу по подбору концентрации бензольных колец, для того чтобы увеличить модуль Юнга материала и при этом незначительно снизить диэлектрическую проницаемость.

Для моделирования материала был выбран подход классической молекулярной динамики. Так как материал новый и для него еще не существует потенциала взаимодействия между атомами, то был разработан новый потенциал взаимодействия на основе машинообучаемых потенциалов (MLIP) [3], которые обучаются

на результатах, полученных из квантово-механического моделирования на основе теории функционала плотности (DFT). Для верификации структурных и упругих свойств моделирование проводилось по этапам или же приближениям. Аморфный оксид кремния является нулевым приближением. Последующее добавление пор радиусом 1 нанометр уточняет модель. Также была решена оптимизационная задача по поиску типа псевдопотенциала для DFT-расчетов, которой хорошо описывает одновременно оксид кремния и бензольные кольца. После чего были разработаны потенциалы для каждой отдельной концентрации бензольных колец с последующим объединением их в один общий потенциал.

Работа выполнялась с использованием инфраструктуры центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика») ФИЦ ИУ РАН (г. Москва).

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 23-79-30016, https://rscf.ru/project/23-79-30016.

Литература

1. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128.
2. Rezvanov A. A. et al. Benzene bridged hybrid organosilicate films with improved stiffness and small pore size // Materials Chemistry and Physics, 2022. Vol. 290. P. 126571.
3. Novikov I. S. et al. The MLIP package: moment tensor potentials with MPI and active learning // Machine Learning: Science and Technology, 2020. Vol. 2 (2). P. 025002.

УДК 53.06

Рост алмазных покрытий методом PE CVD: моделирование и реализация

Лаврененко В. Д., Сухоцкий А. Е., Адамчук Д. В., Быченок Д. С., Демиденко М. И.
НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ
220006, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Бобруйская, 11
vlauranenka@gmail.com

Разработана установка для синтеза алмазных покрытий методом осаждения из газовой фазы, стимулированного плазменным СВЧ-разрядом (PE CVD). Приведены самосогласованная плазменная модель и модель с эффективной плазмой для объемного резонатора, работающего на резонансной моде TM_{013}, его основные характеристики и используемый техпроцесс синтеза.
Ключевые слова: PE CVD; алмазные покрытия; СВЧ-разряд.

В настоящее время существуют два основных промышленных метода синтеза кристаллов алмазов больших размеров: каталитический при высоком давлении и высоких температурах (HPHT) и осаждение из газовой фазы (CVD).

Метод HPHT связан с созданием области давлений 5,5–6 ГПа и температуры порядка 1400 градусов Цельсия в ростовой зоне. Обеспечение такого режима в течение нескольких недель синтеза требует наличия больших по своим габаритам прессов, устойчивых к сильному локальному разогреву.

В методе CVD рост происходит при достаточно низких давлениях (15 кПа) и более низких температурах подложки (1000 градусов Цельсия), что значительно уменьшает габариты установки. Для достижения разумных скоростей роста кристаллов на подложке, помещенной в проточную атмосферу метана и защитного газа водорода, данную смесь газов нужно привести в активное состояние, что проще всего сделать формированием газового разряда. Для обеспечения локального газового разряда вблизи подложки с затравками в плотной газовой среде было предложено использование мощного источника СВЧ-излучения, согласованного с объемным резонатором, работающим на резонансной моде TM_{013} [1, 2]. Сами же подложки находятся в пучности резонатора со специально подобранной под эти цели геометрией.

В процессе разработки установки были решены в том числе следующие инженерные задачи:

- формирование устойчивого газового разряда высокой мощности;
- контроль параметров и положения разряда в резонаторе;
- синхронизация резонатора с источником для минимизации отражения сигнала в источник;
- разработка системы подачи смеси газов.

На базе модели была собрана установка для PE CVD-синтеза алмазов из метана для физического факультета Белорусского государственного университета.

Литература

1. Orozco E. A., Tsygankov P., Barragan Y. F., Hernandez J. A., Martinez-Amariz A., Parada F. F. Computational study of a microwave plasma reactor based on TM112 mode for diamond deposition // Applied Physics A, 2023. 129. https://doi.org/10.1007/s00339-023-07056-4.
2. Silva F., Hassouni K., Bonnin X. and Gicquel A. Microwave engineering of plasma-assisted CVD reactors for diamond deposition // Journal of Physics: Condensed Matter, 2009. 21. https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/36/364202.

УДК 621.3.049

Моделирование элемента хранения резистивного переключения на основе HfO_2

Козлов А. К[1,2], Ганыкина Е. А.[1,2], Резванов А. А.[1,2], к. ф.-м. н.
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В данной работе описана и реализована физико-математическая модель резистивного переключения филаментарного типа на основе оксида гафния. Получены распределения основных характеристик элемента хранения ReRAM филаментарного типа переключения на основе HfO_2.
Ключевые слова: резистивная память; резистивное переключение; оксид гафния; SENTAURUS TCAD.

Существующие устройства памяти, такие как DRAM и флеш-память, не могут удовлетворить необходимым параметрам, требуемым для решения современных прикладных задач. Поэтому потребовалась разработка альтернативных видов памяти, таких как SCM — storage class memory, основанных на новых физических принципах (MRAM, FeRAM, PCAM, ReRAM) [1]. Резистивная память с произвольным доступом (ReRAM), основанная на явлении скачкообразного изменения проводимости в зависимости от подаваемого электрического сигнала [2], является наиболее перспективным вариантом ввиду своих основных преимуществ, а именно высокой масштабируемости, высокой скорости перезаписи (~нс), большого срока хранения информации и низкого энергопотребления (~10 пДж). В данной работе рассматривались элементы хранения ReRAM на основе оксида гафния, так как, во-первых, на их основе ранее уже была продемонстрирована возможность получения ячеек с необходимыми параметрами [3], а во-вторых, оксид гафния повсеместно используется в КМОП-производстве [4].

Для реализации модели элемента хранения ReRAM на основе переходных металлов была описана физико-математическая модель резистивного переключения филаментарного типа, характерная для данного материала функционального слоя. Физико-математическая модель данного типа переключения описывается явлением восстановления и разрыва проводящего канала в оксиде, то есть эволюцией концентрации катионов вакансий кислорода в активном слое в зависимости от прикладываемого напряжения. Математическая модель резистивного переключения филаментарного типа состоит из системы дифференциальных уравнений в частных производных, решениями которых являются распределение вакансий в оксиде (кинетическое уравнение), потенциала (уравнение Лапласа) и температуры (уравнение теплопроводности):

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla n - v n), \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \psi = 0, \tag{2}$$

$$\rho C\frac{\partial T}{\partial t}-\nabla\cdot k\nabla T=\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{E}=\sigma|\nabla\psi|^2, \quad (3)$$

где D — коэффициент диффузии вакансий, σ — проводимость, S — коэффициент термодиффузии, v — скорость дрейфа, C — коэффициент теплоемкости, k — коэффициент теплопроводности, ρ — плотность материала [5, 6].

Для моделирования использовалась САПР SENTAURUS TCAD, которая позволяет проектировать полупроводниковые приборы не только на основе уже имеющихся программных модулей, но и на основе своих моделей. Резистивное переключение описывалось на основе языка Alagator (A Layered Approach to Generating Advanced Technically Oriented Research).

По результатам проведенного моделирования были получены распределения вакансий в оксиде гафния в зависимости от поданного внешнего напряжения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06003, https://rscf.ru/project/23-91-06003.

Литература

1. Красников Г. Я., Орлов О. М., Макеев В. В. Исследование эффекта переключения и транспорта заряда в бесформовочном мемристоре на основе нитрида кремния с разными типами металла верхнего электрода // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2020. — № 1. — С. 42–46.
2. Резванов А. А. и др. Использование пористых материалов в качестве буферного слоя в мемристорных структурах // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. — № 1. — С. 69–86.
3. Govoreanu B. et al. 10×10 nm^2 Hf/HfO_x crossbar resistive RAM with excellent performance, reliability and low-energy operation // International Electron Devices Meeting, 2011. P. 31.
4. Егоров К. В. Резистивное переключение в структурах металл — изолятор — металл на основе оксида гафния и оксида тантала, формируемых атомно-слоевым осаждением: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2019.
5. Lee S. H. et al. Quantitative, dynamic TaO_x memristor resistive random access memory model // ACS Applied Electronic Materials, 2020. Vol. 2. № 3. P. 701–709.
6. Kim S. et al. Physical electro-thermal model of resistive switching in bi-layered resistance-change memory // Scientific reports, 2013. Vol. 3. № 1. P. 1680.

УДК 621.3.049

Вклад точечных дефектов в механизм резистивного переключения в тонких пленках титаната бария

Левичев М. В.[1], к. ф.-м. н. Вилков О. Ю.[2], д. ф.-м. н., Андреева Н. В.[1]
[1] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
kurchatovsci@gmail.com
[2] Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии изучена структура остовных уровней ионов тонких пленок титаната бария (ВТО) в составе мемристивной композиции. С применением теории функционала плотности показано, что дублет Ti 2p связан с недостатоком кислорода по отношению к титану, а дублеты Ba 4d, Ba 3d объясняются совокупным влиянием BaO-терминации поверхности и сегнетоэлектрической поляризации на электрофизические свойства ВТО-пленки.

Ключевые слова: ТФП; тонкие пленки; титанат бария; РФЭС.

Энергонезависимая перестройка резистивного состояния в тонких сегнетоэлектрических (СЭ) пленках титаната бария под действием внешнего электрического поля определяется совокупным вкладом точечных дефектов по анионной подрешетке, СЭ-поляризации и особенностей приэлектродных областей [1] в электрофизические свойства, отражаясь на электронной структуре ионов, из которых состоит пленка.

Экспериментально о наличии кислородных вакансий можно судить по сдвигу аналитических фотоэлектронных линий остовных уровней катионов, полученных методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Сопоставление экспериментальных данных с расчетами, полученными с использованием методов теории функционала плотности (ТФП), позволяет интерпретировать вклад кислородных вакансий, приэлектродных областей пленки и СЭ-поляризации в электронную структуру пленки.

В работе представлены результаты исследования РФЭ-спектров остовных уровней тонкой пленки титаната бария в составе мемристивной композиции $SrTiO_3$ (монокристаллическая подложка) / $La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$ (нижний электрод, 10 нм) / $BaTiO_3$ (~5 нм). Эпитаксиальная структура пленки подтверждалась результатами рентгеновской дифракции, толщина контролировалась методом рентгеновской рефлектометрии, сегнетоэлектрические свойства — данными, полученными с использованием методик атомно-силовой микроскопии пьезоотклика. Стехиометрия $BaTiO_3$-пленки определялась методом РФЭС, недостаток по кислороду относительно концентрации титана для исследуемой структуры составил ~10–15 %.

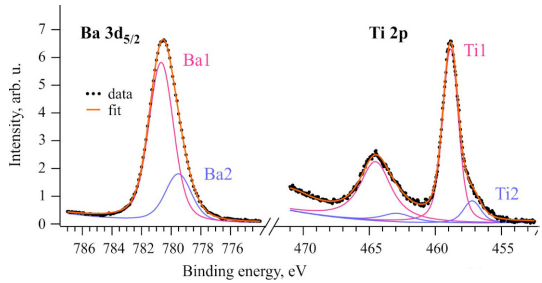


Рис. 1. РФЭС-спектры дублетов Ba3d и Ti2p

Для объяснения РФЭ-спектров были проведены расчеты электронной структуры модели BaTiO3 пленки с BaO- и TiO_2-терминацией в ПО WIEN2k [2]. Толщина моделируемых пленок составляла 5,2 нм, величина вакуумного зазора — 5 нм, использовался обменно-корреляционный функционал PBEsol. Для учета влияния точечных дефектов на электронную структуру рассматривалась суперъячейка 2×2×2 монокристаллической тетрагональной фазы титаната бария с кислородной вакансией. СЭ-поляризация рассчитывалась методом фазы Берри.

На основании сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования было установлено, что появление дополнительного дублета в спектрах Ba 3d (компоненты Ba1 и Ba2 на рис. 1) и Ba 4d может быть объяснено совокупным влиянием поверхностной BaO-терминации и сегнетоэлектрической поляризации пленки на ее электронную структуру. Наличие в пленке кислородных вакансий обуславливает уменьшение энергии связи 2p-электронов титана и, кроме того, приводит к частичному восстановлению ионов Ti до состояний Ti^{3+} (компонента Ti2 на рис. 1). Это подтверждается расчетами, полученными на модели суперъячейки 2×2×2 с кислородной вакансией в BaO-слое, что коррелирует с оценками, полученными методом РФЭС.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2025-0005.

Литература

1. Andreeva N. V., Ryndin E. A., Petukhov A. E., Vilkov O. Y. and Al-Saman A. A. // Adv. Electron. Mater., 2024. Vol. 10. P. 2300806.
2. Blaha P., Schwarz K., Tran F., Laskowski R., Madsen G. K. H. and Marks L. D. // J. Chem. Phys., 2020. Vol. 152. P. 074101.

УДК 621.376

Оптимизация электрооптического эффекта в структурах с квантовыми ямами на технологической платформе InP

Мустафин А. Д., Гришаков К. С., Васильевский И. С.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
anto.mustafin@yandex.ru

В модели, точно учитывающей экситонные эффекты и непараболичность закона дисперсии дырок, проведен расчет спектров поглощения и зависимостей показателя преломления от длины волны для различных значений постоянного напряжения в структурах с квантовыми ямами, в том числе при наличии в структуре механически напряженных нановставок GaAs, которые позволяют существенно увеличить электрооптический эффект.
Ключевые слова: электрооптический эффект; модулятор Маха — Цендера; технологическая платформа InP; квантовые ямы; экситоны; спектр поглощения; показатель преломления.

Современное развитие интегральной фотоники обусловлено растущей потребностью в компактных, эффективных и высокоскоростных устройствах для обработки и передачи информации. Одним из ключевых компонентов фотонных интегральных схем являются электрооптические модуляторы. Их эффективность и функциональные возможности во многом зависят от используемых материалов и конструктивных решений. Перспективным является использование полупроводниковых структур с квантовыми ямами. Задача оптимизации электрооптического эффекта состоит в том, чтобы при меньших значениях напряжения достигать большего изменения показателя преломления на рабочей длине волны, при которой поглощение мало. Большинство расчетных работ по данной теме используют вариационный принцип и связанные с ним приближения [1, 2]. Применение такого подхода для расчетов изменения спектров поглощения структур с туннельно-связанными квантовыми ямами под действием электрического поля приводит к невыполнению правила сумм [3]. При этом наблюдается существенное преобладание изменения коэффициента поглощения под действием электрического поля одного знака, что приводит в соответствии с интегральным соотношением Крамерса — Кронига к ошибочно сильному изменению показателя преломления. Известно также, что вариационный метод завышает силу осциллятора для одиночной квантовой ямы [4].

В данной работе нами использован точный метод, основанный на решении интегрального уравнения для экситонов в импульсном пространстве [4], а учет эффектов сильного смешивания состояний в валентной зоне проводится с использованием 4×4 kp-гамильтониана. Наряду с обычными квантовыми ямами, нами рассмотрены структуры, в которые вводятся напряженные нановставки GaAs и InAs. Причина рассмотрения подобных структур заключается в том, что механически напряженные нановставки оказывают сильное влияние на энергии и волновые функции, приводя к возможности раздельного управления состояниями легких и тяжелых дырок за счет варьирования толщины и положения нановставок в квантовой яме [5]. В результате расчетов было установлено, что использование

напряженных нановставок позволяет усилить электрооптический эффект примерно в два раза за счет реализации комбинированного экситонного пика коэффициента поглощения, формируемого из-за сближения уровней тяжелых и легких дырок.

Литература

1. Zolotarev V. V., Shashkin I. S., Golovin V. S., Soboleva O. S., Shamakhov V. V. et al. Enhancement of the refractive index modulation in a modulator based on GaAs/AlGaAs quantum wells // Semiconductor Science and Technology, 2019. Vol. 34. № 9. P. 095005.
2. Zhou P., Nakano Y., Tanemura T. Design of InGaAsP phase modulator with asymmetrically coupled quantum wells for efficient polarization modulation // Japanese Journal of Applied Physics, 2020. Vol. 59. № 8. P. 082004.
3. Xin C., Batty W., Earnshaw M. P., Allsopp D. W. E., Grey R. Electroabsorption in narrow coupled double quantum wells: Coulombic coupling effects // IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998. Vol. 34. № 7. P. 1180.
4. Chao C. Y.-P., Chuang S. L. Momentum-space solution of exciton excited states and heavy-hole–light-hole mixing in quantum wells // Physical Review B, 1993. Vol. 48. № 11. P. 8210.
5. Галиев Г. Б., Васильевский И. С., Климов Е. А., Клочков А. Н., Лаврухин Д. В. и др. Фотолюминесцентные свойства модулированно-легированных структур $In_xAl_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As/In_xAl_{1-x}As$ с напряженными нановставками InAs и GaAs в квантовой яме // Физика и техника полупроводников, 2015. — Т. 49. — № 9. — С. 1243.

УДК 004.94

Исследование влияния тепловых режимов на характеристики предфрактальных микросистем

Зинченко Л. А., д. т. н., Михайличенко С. С., Терехов В. В., к. т. н., Магомедов Г. А.
МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра ИУ4
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1

Работа посвящена исследованию влияния тепловых режимов на характеристики предфрактальных микроэлектромеханических систем при их применениях в космических миссиях. Моделирование тепловых режимов выполнено в программном комплексе ANSYS в диапазонах температур для различных околоземных орбит. Полученные результаты позволяют оценить влияние предфрактальной формы на характеристики микросистем.
Ключевые слова: МЭМС; акселерометр; фрактальная структура; ANSYS.

В настоящее время широкое применение в космической аппаратуре находят микроэлектромеханические системы (МЭМС) в связи с их крайне небольшими размерами и массой. При разработке аппаратуры для космических аппаратов особое внимание следует уделять воздействию на них различных эффектов, характерных для околоземного космического пространства, в том числе тепловым режимам работы аппаратуры [1]. Находясь в космическом пространстве, космические аппараты подвергаются воздействию экстремальных температур, перепад которых может достигать нескольких сотен градусов.

Существует несколько типов орбит, классифицируемых по расстоянию от поверхности Земли: низкая околоземная орбита (НОО, 200–2000 км), солнечно-синхронная орбита (ССО, 600–800 км), средняя околоземная орбита (СОО, 2000–35000 км), геостационарная орбита (ГСО, 35786 км) и высокоэллиптическая орбита (ВСО) [2]. Температурные условия на этих орбитах варьируются в широком диапазоне — от −200 °C в тени до +120 °C при солнечном облучении.

Для исследования воздействия различных температур, свойственных типовым орбитам околоземного пространства, был выбран МЭМС-акселерометр с использованием самоподобной фигуры, повторяющейся конечное число раз (предфрактала), на основе построения Коха. Это устройство представляет собой акселерометр с трехмерной обкладкой в виде трехмерной предфрактальной формы на основе построения Коха [3]. Микросистема [3] обладает повышенной радиационной стойкостью. Однако вопросы влияния тепловых режимов на характеристики предфрактальной МЭМС не были исследованы.

Моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS с использованием метода конечных элементов. Моделирование акселерометра в таких условиях является крайне важным, поскольку в космическом пространстве резкие перепады температур вызывают изменение геометрических размеров устройства. Это, в свою очередь, может привести к отклонениям в параметрах емкостных элементов, что критично для стабильной и точной работы системы навигации и ориентации космических аппаратов, т. к. изменяются характеристики используемых МЭМС-акселерометров из-за изменения значения емкости. Исследование включало анализ поведения устройства в диапазоне температур, характерных для околоземного

пространства, оценивались механические и электрические характеристики акселерометра: величина тепловых расширений и изменение показаний емкостных элементов.

Проведенное моделирование предфрактального МЭМС-акселерометра с условиями, характерными для типовых космических орбит околоземного пространства, позволило оценить его поведение в различных условиях эксплуатации и влияние применения предфрактала на основе построения Коха. Полученные результаты подтверждают важность учета температурных расширений для сохранения точности работы емкостных МЭМС в экстремальных условиях. Анализ механических и электрических характеристик устройства показал, что изменение размеров конструкции из-за температурных колебаний может существенно повлиять на стабильность показаний акселерометра, что критично для обеспечения надежности и функциональности космических аппаратов в реальных условиях космоса. Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что важным направлением исследований является поиск подходящих геометрических форм для обеспечения стабильности характеристик МЭМС в целях эксплуатации в космических миссиях.

Литература

1. Белоусов А. В. Методика анализа тепловых режимов электронных устройств космического аппарата // Известия Томского политехнического университета, 2007. — Т. 310. — № 3. — С. 95–98.
2. Козлов С. И. Типы орбит и их влияние на построение системы ориентации и стабилизации искусственных спутников Земли // Мировая наука, 2018. — № 4. — С. 324–330.
3. Шахнов В. А., Зинченко Л. А., Михайличенко С. С., Терехов В. В. и др. Конструкция микросистемы с повышенной радиационной стойкостью к воздействию одиночных заряженных части: Патент 2659623 С1 РФ, заявл. 06.03.2017; опубл. 03.07.2018, бюлл. № 19.

УДК 621.3.049.77

Разработка математической модели автоматического построения топологии микроэлектромеханического гироскопа RR-типа

Шалаев В. А.[1], Матишов В. С.[1], Лысенко И. Е.[2]
[1] *Южный федеральный университет*
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
vshalaev@sfedu.ru
[2] *ООО «Маппер»*
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
igor.lysenko@mapperllc.ru

Разработана параметрическая модель для выполнения расчетов и построения топологии упругого элемента МЭМС-гироскопа RR-типа с учетом технологических норм изготовления. Разработан программный продукт по созданию топологии МЭМС-устройства в топологическом редакторе L-Edit САПР Tanner Pro.

Ключевые слова: МЭМС; гироскоп; MUMPs; топология; модель.

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) представляют собой интеграцию механических элементов, сенсоров, актюаторов и электроники на одном полупроводниковом кристалле с использованием технологий микропроизводства [1]. Данная работа посвящена проектированию чувствительного элемента МЭМС-гироскопа.

Рассматриваемая конструкция реализует два взаимосвязанных режима:

- плоскостной режим обеспечивает противофазные вращательные колебания инерционных масс в плоскости устройства под действием электростатических сил;
- внеплоскостной режим обеспечивает смещение инерционных масс перпендикулярно плоскости под действием сил Кориолиса.

Дифференциальное детектирование основано на симметричном расположении инерционных масс и емкостных преобразователей перемещений. Противофазное движение в плоскостном режиме стабилизирует резонансную частоту, а противоположное смещение во внеплоскостном — усиливает полезный сигнал, подавляя паразитные колебания и шумы за счет двойной модуляции.

Для автоматизации проектирования разработан программный комплекс, основанный на параметризуемой математической модели, связывающий геометрические параметры чувствительного элемента с требуемыми характеристиками МЭМС-гироскопа.

Параметризуемая математическая модель реализована в виде макроса на языке C++ для редактора L-Edit САПР Tanner Pro. Макросы разработаны в соответствии с технологическими нормами PolyMUMPs (Polysilicon Multi-User MEMS Processes) — стандартизированного процесса изготовления МЭМС. Способ включает в себя нижний проводящий слой Poly0 (0,5 мкм), структурные слои Poly1 (2,0 мкм) и Poly2 (1,5 мкм), жертвенные оксиды Oxide1 (2,0 мкм) и Oxide2 (0,75 мкм) для формирования подвижных структур, изолирующий слой из нитрида кремния

(0,6 мкм), металлический слой (0,52 мкм) [1]. Макросы обеспечивают автоматическое преобразование входных геометрических параметров в топологию с соблюдением норм технологии PolyMUMPs.

Разработанная математическая модель и программный продукт на ее основе позволяют сократить время проектирования и снизить количество ручных операций, обеспечивая при этом возможность гибкого расчета и построения топологии устройства в зависимости от требуемых механических характеристик (жесткости, чувствительности). Полученные результаты интеллектуальной деятельности защищены свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ [2].

Литература

1. Лысенко И. Е., Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. — 103 с.
2. Лысенко И. Е., Шалаев В. А., Матишов В. С. Программа расчета и построения двумерной топологии упругого элемента микромеханического гироскопа камертонного типа на основе параметризуемой математической модели, свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ № 2025613039, 2025.

УДК 004.932.4

Снижение искажений на стыках расчетных областей при коррекции эффектов оптической близости в фотолитографии

Московцев А. Ф.[1,2], Клочкова Е. Л.[1], Капкин И. Д.[1,2], Иванов В. В.[1]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
amoskovtsev@niime.ru, eklochkova@niime.ru, ikapkin@niime.ru, vlaivanov@niime.ru

Разбиение топологического изображения на малые расчетные области (~1 мкм^2), меньшие оптического диаметра, вызывает рассогласование результатов моделирования, так как не учитывается влияние соседних элементов. Предложены и проанализированы пять методов устранения артефактов: усреднение валидных регионов, весовое наложение областей, смещенная сетка, многоуровневое разрешение и использование областей, близких к оптическому диаметру.

Ключевые слова: фотолитография; OpenILT; MB-OPC.

Вычислительная литография является одним из важнейших направлений исследований для дальнейшего масштабирования технологии производства путем улучшения точности переноса топологического дизайна с фотошаблона на пластину [1]. По мере уменьшения проектных норм достижение точного переноса элементов топологии становится все более сложной задачей из-за оптических эффектов близости [2]. Данные эффекты вызывают искажения элементов, получаемых в кремниевой пластине, что приводит к снижению производительности технологического процесса и уменьшению выхода годных. Коррекция эффектов оптической близости (Optical Proximity Correction — OPC) — важнейшая техника повышения разрешающей способности фотолитографии, используемая для предотвращения нежелательных оптических эффектов путем внесения преднамеренных изменений в геометрию фотошаблона для повышения точности формирования изображения в фоторезисте.

К числу основных решений в области OPC относятся коррекция на основе правил (rule-based OPC), коррекция на основе моделирования (model-based OPC), коррекция на основе метода инверсной литографии (Inverse Lithography Technique), а также методы на основе машинного и глубокого обучения [3, 4].

Современные методы OPC на основе глубокого обучения (deep learning — DL) демонстрируют высокую скорость предсказания коррекций, однако входные данные покрывают лишь небольшой участок реального дизайна топологии (~1–2 мкм) или представляют собой изображения тестовых структур. Дальнейшим этапом масштабирования DL-решения для OPC является сшивка результатов предсказаний, полученных моделью. Разбиение топологии на малые области может приводить к возникновению артефактов на границах разбиения из-за игнорирования оптического влияния соседних элементов. Наличие подобных артефактов является

критичным для проектных норм ниже 32 нм, где точность границ определяет качество технологии.

В качестве основного способа выполнения масочной коррекции было использовано решение на основе OpenILT [5], где применяется классический итерационный подход с литографическим моделированием и смещением сегментов на каждой итерации. Изначально топология делится на пересекающиеся регионы, для которых проводится литографическое моделирование. Далее к каждому региону применяется бинарная маска из весов, в результате чего извлекается только валидная центральная область. Затем регионы добавляются в соответствующие позиции на изображение, а значение в каждом пикселе нормируется на частоту встречаемости среди регионов. Описанный метод сшивки на основе усреднения валидных регионов (Valid Region Averaging, **VRA**) был выбран в качестве базового решения.

В работе предложены методы, позволяющие осуществить сшивку масочных коррекций с учетом влияния соседних элементов: весовое наложение областей (Weighted Overlapping, **WO**), смещенная сетка (Shifted Grid Averaging, **SGA**), многоуровневое разрешение (Multi-Resolution Processing, **MRP**), использование областей, размер которых близок к оптическому диаметру (Optical Scale Patching, **OSP**). Оценка полученных результатов на тестовом фрагменте топологического дизайна для 1-слоя металлизации показала, что применение метода **WO** позволяет добиться улучшения показателей точности и быстродействия 15 и 30 %, делая метод пригодным для дальнейшего применения.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3. — С. 63–93.
2. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // NanoRus, 2020. — Т. 13. — № 5s. — С. 13–19.
3. Zheng S. et al. LithoBench: Benchmarking AI Computational Lithography for Semiconductor Manufacturing // Advances in Neural Information Processing Systems / ed. Oh A. et al. Curran Associates, Inc., 2023. Vol. 36. P. 30243–30254.
4. Yang H., Ren H. Enabling Scalable AI Computational Lithography with Physics-Inspired Models // Proceedings of the 28th Asia and South Pacific Design Automation Conference. Tokyo Japan: ACM, 2023. P. 715–720.
5. Zheng S. et al. Model-based OPC Extension in OpenILT // 2024 2nd International Symposium of Electronics Design Automation (ISEDA). Xi'an, China: IEEE, 2024. P. 568–573.

УДК 621.3.049.77:004.942

Определение констант скоростей реакций фоторезистов с химическим усилением для этапа постэкспозиционной сушки

Литаврин М. В.[1], Фортунова Е. А.[1,2], Шишлянников А. В.[1,2], Шарапов А. А.[1,2], Горнев Е. С.[1,2], академик РАН

[1] АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

mlitavrin@niime.ru

[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Проведение полного литографического моделирования требует получения значений эмпирических параметров фоторезиста. С помощью эксперимента по экспонированию фоторезиста без топологии и последующей постэкспозиционной сушки при различных условиях были определены константы скоростей реакции фоторезиста.

Ключевые слова: моделирование процесса фотолитографии; фоторезисты с химическим усилением; константы скоростей реакций.

На сегодняшний день ведутся работы как по импортозамещению литографических материалов (фоторезистов и антиотражающих покрытий), так и по разработке полной модели поведения фоторезистов в процессе фотолитографии, включающей в себя учет физико-химических процессов, протекающих в пленке фоторезиста на этапах сушки после нанесения, экспонирования, постэкспозиционной сушки и проявления. Для упрощения подбора состава композиции фоторезиста и проведения дальнейшего виртуального эксперимента по оптимизации параметров моделирования необходимо провести экстракцию эмпирических параметров фоторезиста.

В данной работе исследовались разработанный отечественный фоторезист с химическим усилением ФР193-01, использующийся в технологии 90 нм ($\lambda = 193$ нм), а также фоторезист с химическим усилением DK1081B6, использующийся в технологии 180 нм ($\lambda = 248$ нм).

На этапе экспонирования в пленке химически усиленного фоторезиста образуется кислота. На этапе постэкспозиционной сушки эта кислота катализирует реакцию деблокирования полимера фоторезиста, вследствие чего происходит смена растворимости фоторезиста в проявителе. Помимо этого, могут также наблюдаться потери кислоты [1]. В случае проведения экспонирования без топологии вся область засвечивается равномерно, поэтому диффузионными процессами можно пренебречь (ввиду отсутствия градиента концентрации). Тогда процессы в пленке резиста можно представить в виде следующих реакций:

$$\begin{aligned} M + n \cdot H^+ &\xrightarrow{k_{amp}} X, \\ H^+ &\xrightarrow{k_{loss}} \varnothing, \end{aligned} \tag{1}$$

где M — блокированная группа в полимере резиста, X — деблокированная группа в полимере резиста, H^+ — молекула фотокислоты, n — порядок реакции усиления

по фотокислоте, k_{amp} — константа реакции деблокирования (или, иначе, реакции усиления), k_{loss} — константа реакции потери кислоты.

Обозначим относительную концентрацию кислоты как $h = H/G_0$ (где G_0 — начальная концентрация фотогенератора кислоты), а относительную концентрацию блокирующих групп как $m = M/M_0$. Тогда концентрации блокирующих групп и кислоты описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial m}{\partial t} &= -k_{amp} h^m, \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -k_{loss} h. \end{aligned} \tag{2}$$

Ее решением является выражение

$$m = \exp\left(-k_{amp} h_0^n \cdot \frac{1 - \exp(-n k_{loss} t)}{n k_{loss}} \right), \tag{3}$$

где h_0 — концентрация кислоты в начале этапа постэкспозиционной сушки.

При деблокировании фоторезиста его толщина уменьшается (из-за испарения продуктов реакции), причем это уменьшение толщины пропорционально количеству деблокированных групп. Поэтому степень деблокирования фоторезиста x можно рассчитать через измерение толщины пленки резиста после нанесения и после постэкспозиционной сушки [2, 3]. Она задается следующей формулой:

$$x(E) = \frac{\Delta(E) - \Delta(0)}{\Delta_{\max} - \Delta(0)}, \tag{4}$$

где $\Delta(0)$ — изменение толщины резиста в неэкспонированной области (вызванное испарением растворителя), $\Delta_{\max}$ — изменение толщины резиста при больших дозах (т. е. при его полном деблокировании), $\Delta(E)$ — изменение толщины резиста при дозе экспонирования E.

С учетом уравнений (3) и (4), а также того, что $x = 1 - m$, для расчета параметров реакций остается только определить величину h_0 — концентрацию кислоты после этапа экспонирования. Известно, что в пленках современных резистов с химическим усилением содержатся основания, поэтому при малых экспонирующих дозах вся образованная фотокислота нейтрализуется до того, как сумеет внести какой-либо вклад. Поэтому концентрацию кислоты после этапа экспонирования можно оценить как

$$\begin{aligned} h_0(E) &= (1 - b_0) - (1 - b_0)^{E/E_{th}} && \text{при } E > E_{th}, \\ h_0(E) &= 0 && \text{при } E \le E_t, \end{aligned} \tag{5}$$

где b_0 — относительная концентрация оснований до начала экспонирования, E — доза экспонирования, E_{th} — доза экспонирования, при которой все основания в пленке резиста будут нейтрализованы.

Нанесение резиста, его экспонирование (в режиме матрицы фокус — доза) и постэкспозиционная сушка проводились на литографических кластерах под соответствующую длину волны. Измерения толщины фоторезиста проводились с помощью методов рефрактометрии.

Полученные данные использовались для проведения регрессии с помощью уравнений (3)–(5). В качестве варьируемых параметров использовались k_{amp}, k_{loss}, n и E_{th}.

Работа выполнена в рамках гранта №24-91-18002 Российского научного фонда.

Литература

1. Mack C.A. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, 2007. 515 p.
2. Jakatdar N.H., Niu X., Spanos C.J. et al. Characterization of a positive chemically amplified photoresist for process control // Proc. SPIE, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XII, 1998. Vol. 3332. P. 262–270.
3. Литаврин М.В., Шарапов А.А., Шишлянников А.В., Горнев Е.С. Экстракция эмпирических констант экспонирования и постэкспозиционной сушки для фоторезистов с химическим усилением // Наноиндустрия, 2024. — Т. 17. — №S10-2 (128). — С. 710–718.

УДК 621.3.049.77:004.942

Определение констант скорости проявления для химически усиленных фоторезистов

Фортунова Е. А.[1,2], Литаврин М. В.[1], Шишлянников А. В.[1,2], Шарапов А. А.[1,2], Горнев Е. С.[1,2], Академик РАН
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
mlitavrin@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

С помощью эксперимента по экспонированию фоторезиста без топологии, постэкспозиционной сушки и последующего проявления фоторезиста были определены его константы проявления.

Ключевые слова: моделирование процесса фотолитографии; фоторезисты с химическим усилением; константы скорости проявления.

На сегодняшний день ведутся работы как по импортозамещению литографических материалов (фоторезистов и антиотражающих покрытий), так и по разработке комплексной модели поведения фоторезистов в процессе фотолитографии с учетом физико-химических процессов, протекающих в пленке фоторезиста на этапе сушки после нанесения, экспонирования, сушки после экспонирования и проявления. Для упрощения подбора состава композиции фоторезиста и проведения дальнейшего виртуального эксперимента по оптимизации параметров техпроцесса необходимо провести экстракцию эмпирических параметров фоторезиста.

В данной работе исследовались разработанный отечественный фоторезист с химическим усилением ФР193-01, использующийся в технологии 90 нм и чувствительный к излучению с длиной волны 193 нм, а также фоторезист с химическим усилением DK1081B6, чувствительный к излучению с длиной волны 248 нм.

Молекулы полимера у неэкспонированного фоторезиста содержат неполярные блокирующие группы, благодаря которым резист устойчив к воздействию полярного проявителя. В результате реакции деблокирования эти блокирующие группы заменяются на полярные группы –OH или –COOH, за счет чего растворимость резиста в проявителе резко увеличивается.

Будем считать, что для удаления одной молекулы полимера основы требуется убрать n блокирующих групп. Тогда зависимость скорости проявления R от концентрации блокирующих групп m можно задать с помощью основной модели Мака [1]:

$$R(m) = R_{max}\frac{(a+1)(1-m)^n}{a+(1-m)^n} + R_{min}, \quad (1)$$

где R_{max} — скорость проявления полностью деблокированного фоторезиста, R_{min} — скорость проявления полностью блокированного фоторезиста, a — параметр, характеризующий соотношение скоростей диффузии и реакции активного компонента проявителя.

При $a \gg 1$ уравнение (1) принимает еще более простой вид:

$$R(m) = R_{max}(1-m)^n + R_{min}. \quad (2)$$

Недостаток уравнения (1) заключается в том, что оно не учитывает ингибирующего воздействия, которое могут оказывать блокирующие группы и/или молекулы фотогенератора кислоты на проявление резиста. Это едва ли будет критично для фоторезистов под длину волны 248 нм, но может иметь значение для фоторезистов под длину волны 193 нм. Учесть этот фактор можно с помощью расширенной модели Мака [1]:

$$R(m) = R_{resin}\frac{1+k_{enh}\cdot(1-m)^n}{1+k_{inh}\cdot m^l} + R_{min}, \quad (3)$$

где R_{resin} — скорость проявления фоторезиста полностью, без учета ингибирования и усиления, k_{enh} — константа скорости реакции усиления растворения, n — порядок реакции усиления по концентрации деблокированных групп, k_{inh} — константа скорости реакции ингибирования, l — порядок реакции ингибирования по концентрации блокирующих групп.

Для расчета параметров скорости проявления проводился эксперимент по экспонированию резиста без топологии в большом диапазоне доз экспонирования и различных режимов (по температуре и длительности) постэкспозиционной сушки. Все литографические операции проводились на литографических кластерах под соответствующую длину волны экспонирующего излучения при заданных параметрах термообработки и экспонирования. Также с помощью методов рефрактометрии проводились измерения толщины фоторезиста после нанесения, постэкспозиционной сушки и проявления.

Значение скорости проявления фоторезиста $R(E)$ определялось через разность толщины резиста после нанесения и после проявления. Определение значения концентрации блокирующих групп $m(E)$ проводилось с помощью построения зависимости ухода толщины резиста при деблокировании от дозы экспонирования; процедура более подробно описана в работе [2]. На основании этих зависимостей далее строилась зависимость $R(m)$, после чего проводилась регрессия этой зависимости к уравнениям (1)–(3).

Работа выполнена в рамках гранта № 24-91-18002 Российского научного фонда.

Литература

1. Mack C. A. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, 2007. 515 p.
2. Литаврин М. В., Фортунова Е. А., Шишлянников А. В. и др. Определение констант скоростей реакций фоторезистов с химическим усилением для этапа постэкспозиционной сушки // Микроэлектроника-2025: 7-я Школа молодых ученых в рамках Российского форума «Микроэлектроника» (ФТ «Сириус», университет «Сириус», 15–23 сентября 2025) (в печати).

УДК 004.85

Исследование и разработка метода формирования нейро-операторов для программной платформы цифровых двойников

Вологжанин Н. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Институт системной и программной инженерии и информационных технологий (СПИНТех)
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработана численная модель фотолитографии, интегрирующая физические методы и машинное обучение (Fourier Neural Operator, персистентная гомология) для симуляции суб-10-нм узоров с учетом OPC и дефектов маски. Модель обеспечивает высокую точность (EPE 0,95–1,23 нм, Dice 0,92–0,94) и выявляет топологические дефекты с точностью 0,91. Байесовская оптимизация с Optuna улучшает воспроизведение узоров для EUV.

Ключевые слова: фотолитография; Fourier Neural Operator; персистентная гомология; оптическая коррекция близости; топологический анализ; машинное обучение; суб-10-нм узлы.

Процесс фотолитографии, ключевой для производства микроэлектронных устройств, сталкивается с вызовами при моделировании сложных физических явлений, таких как дифракция, интерференция, химическая кинетика и дефекты маски, особенно при переходе к суб-10-нм узлам [3, 5]. Традиционные физические модели, такие как модель Хопкинса, упрощают процессы, игнорируя эффекты стоячих волн и дефектов, что снижает точность симуляции [4, 5]. Использование методов машинного обучения, включая Fourier Neural Operator (FNO) [6] и топологический анализ на основе персистентной гомологии [1], позволяет повысить точность и эффективность моделирования литографических процессов. Разработанные подходы интегрируют физические модели с нейросетевыми алгоритмами для симуляции проекционной оптики, экспозиции, постэкспозиционной термообработки (PEB) и проявления фоторезиста, а также анализа топологических дефектов. Однако ограниченная доступность данных и высокая вычислительная сложность остаются препятствиями для масштабирования таких решений.

В данной работе представлена численная модель фотолитографического процесса, объединяющая традиционные методы, такие как быстрое преобразование Фурье [4] и метод конечных разностей, с нейросетевыми архитектурами, включая FNO, и топологическим анализом на основе персистентной гомологии. Исследование включает два подхода к симуляции: полную (end-to-end) и частичную. Полная симуляция охватывает весь процесс от маски до профиля резиста, тогда как частичная фокусируется на моделировании резиста на основе воздушного изображения. Для полной симуляции используется FNO для предсказания профилей резиста [6], а для анализа дефектов — персистентная гомология с последующей классификацией с помощью многослойного перцептрона (MLP). Тестирование проводилось на синтетическом датасете, включающем маски с элементами оптической коррекции близости (OPC) и случайными дефектами.

Сравнение с традиционными нейросетевыми архитектурами, такими как U-Net, показало, что FNO лучше моделирует диффузию и дифракцию, обеспечивая

среднюю ошибку размещения кромки (EPE) 1,23 ± 0,15 нм для DUV и 0,95 ± 0,12 нм для EUV, а также Dice-коэффициент 0,92–0,94. Персистентная гомология выявила топологические аномалии, такие как отверстия и разрывы, с точностью классификации 0,91 (F1-score 0,90), превосходя сверточные нейронные сети [1]. Качество анализа оценивается через классификацию изображений персистентности, дополняющую метрики EPE и Dice. Байесовская оптимизация с использованием Optuna [2] улучшила воспроизведение узоров, особенно для EUV, в сравнении с традиционными методами оптимизации гиперпараметров.

Дальнейшие исследования направлены на совершенствование интеграции FNO с физически обоснованными моделями для устранения топологических аномалий и повышения точности моделирования мелких узоров. Ожидается, что это улучшит традиционные метрики и контроль качества в суб-10-нм литографии.

Литература

1. Adams H. et al. Persistence Images: A Stable Vector Representation of Persistent Homology // JMLR, 2017. Vol. 18. № 8. P. 1–35. URL: http://jmlr.org/papers/v18/16-337.html.
2. Akiba T. et al. Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework // KDD, 2019. P. 2623–2631. DOI: 10.1145/3292500.3330701.
3. Born M., Wolf E. Principles of Optics. Cambridge UP, 1999. 957 p. ISBN 978-0-521-64222-4.
4. Goodman J. W. Introduction to Fourier Optics. — 4th ed. — New York: W. H. Freeman, 2017. 564 p. ISBN 978-1-319-15954-2.
5. Levinson H. J. Principles of Lithography. — 3rd ed. — Bellingham: SPIE Press, 2010. — 504 p. ISBN 978-0-8194-8324-9.
6. Li Z. et al. Fourier Neural Operator for Parametric Partial Differential Equations // ICLR, 2021. URL: https://arxiv.org/abs/2010.08895.

УДК 004.896

Разработка нейросетевого симулятора процесса формирования контура фоторезистивной маски

Кошлаков А. В.[1,2], Метельников А. А.[1], Соловьева В. Д.[1,2]
[1] ПАО «Сбербанк России»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Koshlakov.av@phystech.edu

В данной работе предложена архитектура нейронной сети для моделирования фоторезиста — одного из этапов процесса литографии. Также предложен подход выбора обучающего набора данных для разработанной модели, основанный на анализе распределения интенсивности на поверхности фоторезиста.
Ключевые слова: нейронная сеть; данные для обучения; физически информированные нейронные сети; модель резиста.

В настоящее время актуальна разработка симулятора литографии для оценки ожидаемого результата печати. Сегодня в работах рассматриваются различные категории симуляторов, такие как точные численные модели [1], приближенные компактные модели [2], а также нейросетевые модели [3–5]. Последние, в свою очередь, делятся на физически информированные (PINN) [3] и на классические [4, 5]. В связи с физическими ограничениями, заданными архитектурно, PINN потенциально способны обеспечить более точное моделирование, чем компактные модели, и сравнимую с ними скорость работы. Как правило, нейронные сети требуют порядка нескольких тысяч изображений для обучения [3]. Поскольку существуют ограничения для получения калибровочных данных [6], то актуальна задача разработки метода семплирования обучающей выборки, состоящей из малого, но при этом достаточного числа изображений для обучения нейронной сети.

В данной работе представлен нейросетевой симулятор процесса формирования контура фоторезистивной маски. Обучающий набор изображений выбран на основе анализа соответствующих им «воздушных изображений» (распределений интенсивности на поверхности фоторезиста) [2]. В разработанной архитектуре входное изображение дополняется тензорами, сформированными на основе соответствующих ему признаков «воздушного изображения», расчет которых проводился согласно подходу, описанному в [2]. Для интеграции этих изменений была модифицирована структура части слоев нейросети.

В качестве тестовых данных были рассмотрены два типа изображений структур: «полоски» и «лабиринты» (получены алгоритмом [7]). Для моделирования процесса литографии использовались открытые симуляторы [8] и [1]. В целях оценки качества предсказания использовалась классическая метрика для задач машинного обучения MSE и метрика EPE (Edge Placement Error), характеризующая ошибку размещения ребер фрагментов в смоделированном контуре.

В рамках данной работы было проведено сравнение:

- предложенной архитектуры с архитектурой DOINN;
- предложенного метода семплирования с равномерным семплированием.

Проведенные эксперименты показали, что предложенные метод семплирования и архитектура нейросети позволили увеличить точность моделирования контура ФРМ.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

1) подход по выбору обучающих данных нейронной сети DOINN на основе анализа распределения интенсивности на поверхности фоторезиста;
2) архитектура нейронной сети, которая учитывает признаки «воздушного изображения» при симуляции формирования контура фоторезистивной маски.

Литература

1. Wang Z. et al. TorchResist: Open-Source Differentiable Resist Simulator // 2025 10.48550/arXiv.2502.06838.
2. Randall J. et al. Variable-threshold resist models for lithography simulation // Proc. SPIE 3679, Optical Microlithography XII, 1999. DOI: 10.1117/12.354329.
3. Yang H. et al. Generic lithography modeling with dual-band optics-inspired neural networks // Proceedings of the 59th ACM/IEEE Design Automation Conference, 2022. P. 973–978. DOI: 10.1145/3489517.3530580.
4. Ye W. et al. LithoGAN: End-to-End Lithography Modeling with Generative Adversarial Networks // 2019 56th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC), 2019, P. 1–6.
5. Watanabe Y. et al. Accurate lithography simulation model based on convolutional neural networks // Proc. SPIE 10147, Optical Microlithography XXX, 101470K, 2017. DOI: 10.1117/12.2257871.
6. Иванов В. В. Исследование эффектов оптической близости и разработка методов их коррекции для критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 65 нм. — АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 2023.
7. Python-maze // GitHub [Электронная платформа]. URL: https://github.com/guofei9987/python-maze (дата обращения: 10.04.2025).
8. lithosim // GitHub [Электронная платформа]. URL: https://github.com/VLSIDA/lithosim (дата обращения: 10.04.2025).

УДК 621.384.4

Влияние состава масочного стека на формирование воздушного изображения в EUV-литографии

Скворцова А. А., Клочкова Е. Л.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
askvortsova@niime.ru, eklochkova@niime.ru

В работе рассмотрено влияние состава масочного стека на формирование воздушного изображения в EUV-литографии. Для этого проведена серия виртуальных экспериментов с использованием разных масочных стеков, подобранных с учетом длины волны актиничного излучения 13,5 нм.
Ключевые слова: вычислительная фотолитография; масочный стек; EUV; воздушное изображение; интерференция; компактное моделирование.

EUV является следующим поколением литографии, которое позволяет воспроизводить с заданной точностью топологические размеры 16 нм и менее. Эта технология требует изучения перспективных материалов, разработки оборудования и подбора настроек литографического процесса [1, 2]. Дифракционные эффекты вносят существенный вклад в итоговое формирование распределения интенсивности в плоскости фоторезиста. Для расчета воздушного изображения (ВИ) в EUV-литографии важно учитывать не только оптические параметры источника, литографический стек и дизайн топологии, но и состав масочного стека.

При переходе от DUV к EUV-литографии маска существенно усложняется [3]. Масочный стек в EUV-литографии представляет собой трехмерный набор слоев на подложке, который содержит чередование пар Si и Mo, защитные и буферные слои, абсорберы.

Маска вносит искажение за счет интерференции в многослойной структуре и рассеяния на границах изображения абсорбера, также наблюдаются дефекты, блики и теневые эффекты, которые влияют на формирование итогового изображения. Метод декомпозиции областей позволяет учесть дифракционные эффекты от граней масочных объектов, поглощение и преломление от подслоев [4]. Для применения этого метода необходимо точное описание состава масочных слоев.

В работе при помощи компактного моделирования проводится расчет ВИ на поверхности фоторезиста без учета бликов [5]. На основе литературных источников проведен поиск потенциально используемых материалов и параметров литографической установки [6–8]. В первую очередь проводилась оценка влияния структуры масочного стека на примере изолированных линий, затем на примере периодических линий с размерами 10–36 нм. Для оценки использовались следующие параметры:

- CtrRrms — среднеквадратичное отклонение размера, учитывающее расхождение заложенного размера от смоделированного в ВИ по заданному количеству элементов;
- NILS — нормализованный логарифмический наклон кривой интенсивности;
- Contrast — отношение разности максимальной и минимальной интенсивности к их сумме.

На основе полученных результатов пришли к выводу, что:

1) состав масочного стека вносит существенный вклад в формирование воздушного изображения, который можно предварительно оценить с помощью компактного моделирования;
2) ориентация тестовой структуры и используемая установка экспонирования влияют на формирование ВИ;
3) компактные модели не применимы в задаче определения оптимального количества чередующихся пар Si и Mo, так как в результате моделирования различие параметров ВИ по Contrast не превышает 0,009, по CtrRrms — 0,097 нм.

В рамках дальнейших работ планируется рассмотреть влияние модели бликов и модели затенения на распределение интенсивности.

Литература

1. Levinson H. J. Principles of lithography // SPIE press, 2005. Vol. 146.
2. Красников Г. Я. и др. Комплементарные методы усиления разрешения оптической литографии // Наноиндустрия, 2018. — № S. — С. 236–237.
3. Jonckheere R. et al. Full field EUV lithography turning into a reality at IMEC // Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XIV // SPIE, 2007. Vol. 6607. P. 136–150.
4. Lam M. C. et al. Accurate 3DEMF mask model for full-chip simulation // Optical Microlithography XXVI // SPIE, 2013. Vol. 8683. P. 449–457.
5. McIntyre G. et al. The trade-offs between thin and thick absorbers for EUV photomasks // Photomask Technology, 2011. SPIE, 2011. Vol. 8166. P. 995–1008.
6. Philipsen V. et al. Actinic characterization and modeling of the EUV mask stack // 29th European Mask and Lithography Conference. SPIE, 2013. Vol. 8886. P. 69–80.
7. Peeters R. et al. EUV lithography: NXE platform performance overview // Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V. SPIE, 2014. Vol. 9048. P. 379–396.
8. Deng Y. et al. Rigorous EM simulation of the influence of the structure of mask patterns on EUVL imaging // Emerging Lithographic Technologies VII. SPIE, 2003. Vol. 5037. P. 302–313.

УДК 004.4-621.382.2/.3

Проведение коррекции эффектов оптической близости для проектирования фотошаблонов в среде kLayout

Колупаев М. Е., Капкин И. Д.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В процессе фотолитографии могут возникнуть искажения рисунка, обусловленные эффектом оптической близости. Для его преодоления применяется коррекция, направленная на изменение рисунка ФШ. Составление правил коррекции оптической близости является важной задачей при проектировании фотошаблонов. В данной работе представлено решение данной задачи для среды проектирования kLayout.
Ключевые слова: коррекция оптической близости; критический размер; математическая модель.

Во время проведения фотолитографического процесса при производстве ИС могут возникать эффекты оптической близости. Этот эффект, обусловленный волновой природой света [1], приводит к искажениям рисунка на подложке и негативно влияет на характеристики готовых устройств [2]. Причиной возникновения такого явления могут послужить уменьшение критических размеров элементов устройства и близость стоящих рядом фигур на подложке.

Для преодоления искажений, вызванных эффектом, применяется коррекция оптической близости (OPC), которая заключается во внесении дополнительных фигур в рисунок фотошаблона. Для технологического уровня 180 нм применяется коррекция, основанная на правилах (Rule based OPC) [2]. Для ее осуществления могут применяться специальные скрипты с записанными правилами.

В работе представлен подход к автоматизации Rule-based OPC в среде kLayout через разработку транслятора, конвертирующего правила, написанные на языке SVRF (Mentor Graphics Calibre), в операторы API kLayout на Ruby. Это позволяет использовать существующие рецепты OPC в открытом ПО без модификаций, сохраняя функциональность операций: изменение размеров, усечение, булевы операции над слоями, сдвиг границ и другие. Решение обеспечивает совместимость с промышленными стандартами проектирования, снижая зависимость от проприетарных инструментов, и полную функциональную эквивалентность, что позволяет повторно применять промышленные рецепты OPC.

Алгоритм работы транслятора включает:

4) анализ SVRF-скриптов и выделение базовых операторов;
5) сопоставление с методами API kLayout (например, Layer#size, Layer#boolean);
6) генерацию Ruby-кода с сохранением логики исходного рецепта.

Этот подход устраняет необходимость ручного переписывания скриптов, сокращая время адаптации проектов к открытым САПР. Эксперименты подтвердили корректность выполнения операций, включая контроль критических размеров и геометрических параметров.

Разработанный инструмент расширяет возможности kLayout в области Rule-based OPC, обеспечивая совместимость с существующими промышленными решениями. Внедрение транслятора SVRF → Ruby-API способствует переходу

на открытое ПО без потери функциональности, что актуально для задач проектирования фотошаблонов в условиях миниатюризации технологических узлов [4].

Литература

1. Моро У. Микролитография. — М.: Мир, 1990. — 1240 с.
2. Красников Г. Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // NanoRus, 2020. Vol. 13. № 5s. P. 13–19.
3. Mack C. Fundamental principles of optical lithography: the science of microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.
4. KLayout Documentation [Электронный ресурс] // KLayout — Your Mask Layout Friend. URL: https://www.klayout.de/doc-qt5/klayout.pdf (дата обращения: 14.04.2025).

УДК 621.382.2

Кремниевый детектор электронов для интеграции в электронно-лучевой литограф

Григорьева Т. В.[1,2], Голубков С. А.[2], Петушков В. Л.[1,2], к. т. н., Лавренов В. А.[1]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
tanya.gri.02@mail.ru
[2] АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Разработан кремниевый детектор электронов, предназначенный для использования в электронно-лучевом литографе. Описаны конструктивные особенности и принципы работы детектора. Рассмотрены преимущества использования кремниевых детекторов, включая возможность интеграции с другими элементами системы.

Ключевые слова: кремниевый детектор электронов; электронно-лучевая литография; совмещение слоев; обратноотраженные электроны; точность совмещения.

На протяжении долгого времени электронно-лучевая литография является востребованным инструментом в микро- и наноэлектронике. Одно из преимуществ электронно-лучевой литографии перед другими видами литографии заключается в том, что топология формируется непосредственно электронным пучком, что позволяет не использовать фотошаблоны. Совмещение слоев топологии между собой осуществляется путем применения детектора электронов и обработки поступающего с него сигнала [1]. Удобство применения детектора заключается в том, что он может быть интегрирован в электронно-лучевую колонну, чтобы компактно располагаться непосредственно над обрабатываемой поверхностью. Такой же принцип расположения детектора электронов применяется в растровом электронном микроскопе [2].

Разработанный детектор электронов pin-диодного типа имеет четыре сегмента. При сканировании электронным пучком метки совмещения образуются обратноотраженные электроны, которые, в зависимости от топологии поверхности, по-разному распределяются по четырем сегментам. Исходя из полученного сигнала с каждого сегмента определяются координаты центра метки совмещения, после чего и происходит процедура совмещения слоев между собой.

Детектор был изготовлен по имплантационной технологии, которая обеспечила минимальные значения токов утечки (с одного сегмента в среднем 0,225 нА при напряжении 50 мВ). Уменьшение тока утечки снижает уровень шумов, что позволяет проводить совмещение с большей точностью. Также для формирования рабочей p+-области использовалась имплантация бора под углом, что расширило диапазон энергий регистрируемых обратноотраженных электронов.

Описанные решения позволили создать детектор электронов для электронно-лучевого литографа, не уступающий по характеристикам зарубежным аналогам.

Литература

1. Zhao M., Xu T., Chen B., Niu J. Technology of alignment mark in electron beam lithography // Proceedings of SPIE, 2014. Vol. 9285. P. 92850C.
2. Sakic A. et al. Versatile Silicon Photodiode Detector Technology for Scanning Electron Microscopy with High-Efficiency Sub-5 keV Electron Detection // 2010 International Electron Devices Meeting. IEEE, 2012. P. 31.4.1–31.4.4.

УДК 004.932.2

Реконструкция геометрии поверхности фоторезиста по снимку с электронного микроскопа

Семенова Ю. А.[1], Герасимов И. В.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] ПАО «Сбербанк России»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
semenova.iua@phystech.edu, IVladiGerasimov@sberbank.ru

Предложен метод оценки 3D-геометрии поверхности фоторезиста по изображениям сканирующего электронного микроскопа (SEM) с учетом искажений, вызванных взаимодействием электронного пучка с материалом. Задача сформулирована как оптимизация прямой инверсии физической модели формирования изображений. Проверка на синтетических и экспериментальных данных подтвердила применимость метода.

Ключевые слова: SEM; оптимизация; синтетические данные; реконструкция поверхности; обнаружение края.

В последнее время наблюдается прогрессирующее уменьшение размеров полупроводниковых структур, что делает критически важной разработку новых методов высокоточной метрологии для контроля их геометрических параметров. Снимки электронного микроскопа (Scanning electron microscope, SEM) поверхности фоторезиста содержат искажения, обусловленные физикой взаимодействия электронов с материалом фоторезиста. Из-за этого задача получения данных о рельефе поверхности по SEM-изображениям значительно затрудняется, становится актуальным поиск новых подходов к ее решению.

Целью данной работы является разработка методов оценки 3D-геометрии поверхности фоторезиста по SEM-изображениям с учетом искажений, возникающих в электронно-оптической системе.

Для калибровки и верификации исследуемых методов требуются эталонные данные, которые сложно получить для структур нанометрового масштаба из-за высокой стоимости и сложности проведения измерений. В условиях ограниченной доступности таких данных в работе используется численное моделирование методом Монте-Карло, позволяющее генерировать синтетические данные, воспроизводящие взаимодействие электронов с веществом [1].

Стохастическая природа методов Монте-Карло делает обратные задачи вычислительно трудоемкими. Вследствие этого большинство существующих подходов опирается на упрощенные модели, игнорирующие физические аспекты формирования SEM-изображений. Например, широко используется сглаживание изображения в сочетании с методами обнаружения краев, такими как пороговое обнаружение краев [3]. На данный момент эти методы с большим количеством исследований и усовершенствований оказались успешными в большинстве случаев. Однако с уменьшением характерных размеров структур и ужесточением требований к точности существующие методы могут оказаться недостаточно эффективными.

Предложенный метод формулирует задачу как прямую инверсию физической модели получения изображения, в чем заключается научная новизна работы. Благодаря использованию численного симулятора SEM задача приближения геометрии решается как задача оптимизации. В отличие от многих существующих методов данный подход обеспечивает физически обоснованный и точный результат.

В работе предложены различные подходы к постановке оптимизационной задачи восстановления геометрии поверхности фоторезиста по SEM-изображениям и приведено их сравнение на синтетических и реальных данных. Предложенные методы продемонстрировали применимость для анализа базовых линейных структур.

Литература

1. Van Kessel L., Hagen C. W. Nebula: Monte Carlo simulator of electron-matter interaction // SoftwareX, 2020. Vol. 12. P. 100605.
2. Houben T., Huisman T., Pisarenco M., van der Sommen F., de With P. Training procedure for scanning electron microscope 3D surface reconstruction using unsupervised domain adaptation with simulated data // Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2023. Vol. 22 (3). Article 031208. https://doi.org/10.1117/1.JMM.22.3.031208.
3. Villarrubia J. S., Vladár A. E. and Postek M. T. Simulation study of repeatability and bias in the critical dimension scanning electron microscope // J. Microlith. Microfab. Microsyst., Jul–Sep, 2005. Vol. 4 (3). P. 033002.
4. Houben T., Huisman T., Pisarenco M. et al. Depth estimation from a single SEM image using pixel-wise fine-tuning with multimodal data. Machine Vision and Applications, 2022. 33, 56. https://doi.org/10.1007/s00138-022-01314-w.

УДК 004.94

Точная симуляция распространения света в ближнем поле маски с использованием нейронной сети, основанной на уравнениях Максвелла (PINN)

Баянов И. В.[1,2], **Федоров И. Ю.**[1,2]
[1] *ПАО «Сбербанк России»*
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
[2] *Московский физико-технический институт*
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
baianov.iv@phystech.edu

Разработка строгих физических моделей экспонирования в литографии с использованием FDTD сопряжена с высокими требованиями к вычислительным ресурсам при сохранении точности, что обусловливает необходимость поиска альтернативных подходов. Настоящая работа направлена на создание нейросетевой модели PINN, предназначенной для симуляции распределения светового поля за фотошаблоном на основе решений уравнений Максвелла.
Ключевые слова: PINN; FDTD; литографическая симуляция.

Традиционные скалярные модели симуляции литографических процессов (методы Хопкинса — Аббе) [1, 2] обладают существенными ограничениями, связанными с игнорированием векторной природы электромагнитного поля. Это приводит к неточностям при расчете интенсивности в плоскости фоторезиста, особенно для субволновых структур, где критичны эффекты поляризации и интерференции. Последовательное моделирование процесса экспонирования с использованием векторных методов, таких как FDTD [3], учитывающих электромагнитную природу света, для моделирования распространения световой волны в зоне ближнего поля маски, частично решает проблему учета нелинейных явлений, но, в свою очередь, требует итерационных расчетов и значительных вычислительных ресурсов. Современным подходом являются нейросетевые модели и физически информированные нейронные сети (PINN) [4], которые интегрируют физические законы в архитектуру модели, сохраняя физическую строгость векторных методов и сокращая время симуляции за счет параллелизуемых вычислений. Кроме того, данные нейросетевые подходы позволяют генерировать обучающие данные для алгоритмов инверсной литографии (ILT) [5], обеспечивая их адаптацию к сложным топологиям масок и ускоряя процесс оптимизации фотошаблонов. Это особенно актуально в условиях роста требований к разрешению и миниатюризации микроэлектронных компонентов.

Соответственно, основной целью исследования стала разработка нейросетевой модели, имитирующей распространение электромагнитных волн на основе уравнений Максвелла. Для этого была выбрана архитектура U-Net [6], способная эффективно работать с пространственными данными, и модифицирована функция потерь, где стандартная метрика ошибки была дополнена соответствием распределения электромагнитного поля уравнению Гельмгольца. Обучение модели проводилось на синтетических данных, сгенерированных разработанным

FDTD-симулятором. Для оценки влияния физических ограничений были обучены две модели: с учетом уравнения Гельмгольца в функции потерь и со стандартной метрикой ошибки.

Основной вклад работы заключается в исследовании влияния уравнения Гельмгольца, интегрированного в функцию потерь нейросетевой модели, на динамику обучения и точность прогнозирования ближнего поля маски.

Экспериментально показано, что разработанная модель с физическим ограничением обучалась быстрее и обеспечила снижение ошибки прогнозирования распределения поля в ближней зоне фотошаблона. Интеграция уравнения Гельмгольца не только улучшила точность моделирования, но и повысила обобщающую способность разработанной модели. Это открывает перспективы для использования разработанной модели в алгоритмах ILT, где скорость и точность симуляции критичны для проектирования современных микроэлектронных компонентов.

Литература

1. Hopkins H. H. On the diffraction theory of optical images // Proc. of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1953. Vol. 217. № 1130. P. 408–432.
2. Evanschitzky P., Erdmann A., Fühner T. Extended Abbe approach for fast and accurate lithography imaging simulations // 25th European Mask and Lithography Conf., 2009. P. 1–11.
3. Yeung M. S., Barouch E. Application of the hybrid finite-difference time-domain method to modeling curved surfaces in three-dimensional lithography simulation // Optical Microlithography XII. SPIE, 1999. Vol. 3679. P. 1093–1103.
4. Lim J., Psaltis D. MaxwellNet: Physics-driven deep neural network training based on Maxwell's equations // Apl. Photonics, 2022. Vol. 7. № 1.
5. Pang L. Inverse lithography technology: 30 years from concept to practical, full-chip reality // J. of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2021. Vol. 20. № 3. P. 030901–030901.
6. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // MICCAI 2015: 18th international conference, 2015. P. 234–241.

УДК 004.896

Построение нейросетевого ILT-фреймворка на основе сверточных и физически информированных нейронных сетей

Николаев Я. Д.[1,2], Фёдоров И. Ю.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] ПАО «Сбербанк России»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
nikolaev.iad@phystech.edu

Разработан нейросетевой ILT-фреймворк, состоящий из симулятора литографа и оптимизатора топологических структур. В качестве симулятора применяются сеть DeepLabV3 и каскад физически обоснованных моделей Nitho-Doinn. Качество работы фреймворка исследовано с помощью пиксельных и топологических метрик.

Ключевые слова: нейронная сеть; ILT; физически информированные сети; вычислительная литография.

Процесс изготовления слоя микроэлектронного компонента посредством оптической литографии подвержен искажениям, вызванным оптической системой и фоторезистом, приводящим к нежелательным изменениям формы топологического элемента. В целях минимизации и/или компенсации данных эффектов применяются методы инверсной вычислительной литографии и алгоритмы коррекции оптической близости, для успешного применения которых необходимы точные и быстрые симуляторы процесса экспонирования. В условиях недостаточности данных для обучения нейросетевых моделей перспективным направлением является разработка методов симуляции процесса печати на основе физически информированных сетей (PINN).

В данной работе создан нейросетевой ILT-фреймворк, обеспечивающий симуляцию резиста на основе входного изображения маски и оптимизацию геометрии расположенных на маске структур для улучшения соответствия изображения резиста заданному чертежу. В качестве симулятора используются сеть DeepLabV3 [1] и каскад физически обоснованных моделей Nitho-Doinn [2, 3]. Исследована возможность внедрения подходов архитектуры DeepLabV3 в часть локального восприятия (local perception) модели Doinn в целях улучшения качества симуляции как на топологиях толщиной 30–50 пикселей, так и в целом. Для отслеживания корректности симуляции помимо пиксельных метрик (Dice, IoU) предложено использовать топологическую метрику — TopoMetric на основе характеристики Эйлера и изменения количества компонентов связности.

Авторы считают, что новизна работы заключается в исследовании внедрения подходов сверточной сети DeepLabV3 в специализированную PINN-модель Doinn, а также в применении TopoMetric для обнаружения топологических дефектов.

В результате с помощью метрики TopoMetric обнаружено, что сеть DeepLabV3 оказалась восприимчива к локальным деталям, продемонстрированы особенности работы нейросетевых архитектур в задаче симуляции этапа экспонирования фотолитографического процесса. Проведенное сравнение работы сети Doinn

с оригинальной частью локального восприятия и с внедренными особенностями архитектуры DeepLabV3 показало, что внедрение ASPP-модуля позволило улучшить качество симуляции на топологиях толщиной 30 пикселей на 2,4 % по метрике IoU, что демонстрирует потенциал для совершенствования этой архитектуры.

В дальнейшем планируется доработка нейросетевого оптимизатора, обучение которого производится на основе заранее обученного нейросетевого симулятора с замороженными весами, что позволит сохранить его физическую обоснованность и получить оперативную и потенциально наиболее точную оптимизацию маски.

Литература

1. Chen L. C. et al. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation // arXiv preprint, 2017. arXiv: 1706.05587.
2. Chen G. et al. Physics-informed optical kernel regression using complex-valued neural fields // 2023 60th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC). IEEE, 2023. P. 1–6.
3. Yang H. et al. Generic lithography modeling with dual-band optics-inspired neural networks // Proceedings of the 59th ACM/IEEE Design Automation Conference, 2022. P. 973–978.

УДК 004.896

Разработка алгоритма оптимизации топологических структур на основе обучения с подкреплением

Первунецких А. А.[1], Фёдоров И. Ю.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Pervunetskikh.aa@phystech.edu
[2] ПАО «Сбербанк России»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
IYUFedorov@sberbank.ru

Разработана нейросетевая модель для коррекции оптической близости на основе модифицированного алгоритма обучения с подкреплением DQN и компактного дифракционного симулятора литографа. Проведен анализ эффективности модели относительно известных алгоритмов контролируемой деформации.

Ключевые слова: нейронная сеть; вычислительная литография; коррекция оптической близости; обучение с подкреплением.

Для уменьшения геометрических размеров элементов топологии фотошаблона, размещаемых на слое кремниевой пластины, применяют техники повышения разрешения (RET). К одному из них относят методы коррекции оптической близости (OPC), которые обеспечивают высокую точность коррекции элементов топологии, но требуют значительных временных затрат [1]. Вследствие широкого распространения и развития вычислительных систем большой интерес представляет адаптация алгоритмов обучения с подкреплением (RL) к задачам, смежным с задачей оптимизации маски фотошаблона [2, 3]. В частности, RL нашел широкое применение в процессах контроля обучения нейросетевых моделей, а также для оптимизации геометрии структур на маске фотошаблона без изменения их формы, например квадратных периодических топологий наподобие контактных площадок.

В рамках дальнейшего развития алгоритмов оптимизации фотошаблонов целями данной работы являлись разработка и исследование существующих алгоритмов обучения с подкреплением применительно к коррекции оптической близости в условиях большей вариабельности геометрии рассматриваемых топологий. Были предложены и проанализированы методы оптимизации масок с использованием функции полезности состояний и на основе оптимизации стратегии действий агента.

Авторы считают, что новизна данной работы заключается в предложенных подходах улучшения маски фотошаблона в рамках коррекции оптической близости, что позволило расширить области применения рассматриваемой оптимизации для более сложных топологий.

В результате были модифицированы алгоритмы DQN (Deep Q-Network) и PPO (Proximal Policy Optimization) с использованием функции полезности и с оптимизацией стратегии соответственно. Созданные алгоритмы применены к оптимизации фотошаблонов с использованием симуляторов процесса экспонирования фотолитографии на основе метода Хопкинса [1]. Экспериментально показано, что

алгоритмы на основе функции полезности эффективны для решения данной задачи и позволяют приблизить контур экспонируемой симулятором маски к желаемому, снизив среднеквадратичную ошибку на 67 % по сравнению с вариантом без оптимизации.

Литература

1. Jiang B. et al. Neural-ILT: migrating ILT to neural networks for mask printability and complexity co-optimization // 2020 IEEE/ACM International Conference On Computer Aided Design (ICCAD), 2020. P. 1–9. DOI: 10.1145/3400302.3415704
2. Lin A. et al. A Meta-Learning Reinforcement Training Method for Machine Learning Image-To-Image Optical Proximity Correction // Preprint, 2023. DOI: 10.31224/3197.
3. Liang X. et al. RL-OPC: Mask optimization with deep reinforcement learning // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2023. PP(99):1-1. DOI: 10.1109/TCAD.2023.3309745.

УДК 681.513, 621.382

Метод статистической оценки основных составляющих дозовой погрешности проекционной фотолитографии

Балан Н. Н.[1,2], Васин А. А.[1,2], Иванов В. В.[1]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1а, корп. 1

Рассматривается метод оценки составляющих дозовой ошибки литографического процесса по сдвигу и изменению ширины функции плотности распределения размера в резисте при проходе по экспозиционной дозе и вариации размера на фотошаблоне. Для этого предлагается использовать функцию F, аппроксимирующую зависимость размера элемента рисунка на пластине от экспозиционной дозы, температуры и размера элемента рисунка на фотошаблоне.

Ключевые слова: дозовая ошибка литографического оборудования; фотошаблон; функция плотности распределения ошибки.

При определении требований к фотошаблону, необходимых для сохранения достаточного выхода годных, необходимо учитывать ошибки литографического процесса, вносимые литографическим оборудованием [1]. Оценка разброса параметров, влияющих на дозовую ошибку, а также чувствительности процесса к их изменению позволяет оценить требования к рисунку на фотошаблоне, необходимые для сохранения удовлетворительного качества фоторезистивной маски [2].

Для оценки основных составляющих дозовой ошибки, в частности ошибок экспозиционной дозы, температуры и размера элемента рисунка на ФШ, предлагается следующий подход.

Из-за несовершенства литографического процесса каждый из параметров имеет некоторый разброс, что приводит к изменению размеров в резисте в определенном диапазоне. Распределение значений каждого параметра описывается отдельной функцией плотности вероятности, при этом распределение размера в резисте связано с распределениями параметров. Для определения этой связи предлагается использовать функцию F, аппроксимирующую зависимость размера элемента рисунка на пластине от экспозиционной дозы, температуры и размера элемента рисунка на фотошаблоне [3]. Предполагается, что при небольших изменениях (в пределах 5–10 %) абсолютного значения одного из параметров форма его функции плотности вероятности остается неизменной, лишь сдвигаясь. Для получения функций плотности распределения предлагается выполнить проход по основным составляющим дозовой ошибки по методу, описанному в работе [4].

Таким образом, при сравнении функций плотности распределения размера в резисте при различных номинальных значениях параметров с помощью зависимости, описываемой функцией F, и статистических методов [5] становится возможной оценка составляющих литографической дозовой ошибки.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника. Часть 1: Уровни описания технологии // Электронная техника. Т. 3. Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
2. Балан Н. Н. и др. Система требований к фотошаблонам для проекционной фотолитографии, применяемым в производстве полупроводниковых изделий современных проектных норм // Российский форум «Микроэлектроника-2022», 2022. — С. 142–143.
3. Mack C. A. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, 2007.
4. Балан Н. Н. Васин А. А. Оценки дозовой ошибки литографической установки по наборам функций плотности распределения размера, получаемым при проходе по дозе // Российский форум «Микроэлектроника-2024», 2024. — С. 416–417.
5. Springer, Melvin Dale. The algebra of random variables. 1979.

УДК 621.3.049.77:004.942

Оптимизация толщины антиотражающего покрытия для улучшения окна процесса фотолитографии

Кирпичев Д. М.[1,2], Шишлянников А. В.[1,2], Литаврин М. В.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
dkirpichev@niime.ru

Исследовано влияние толщины слоя антиотражающего покрытия на ширину окна процесса фотолитографии для новых материалов литографического стека.

Ключевые слова: антиотражающее покрытие; окно процесса фотолитографии; матрица фокус — доза.

В современном литографическом производстве одной из основных проблем является возникновение стоячих волн в фоторезисте. Эти волны образуются в результате интерференции падающего и отраженного от подложки излучения, что приводит к зависимости размеров получаемых структур от толщины слоя резиста. Такая зависимость снижает стабильность и воспроизводимость процесса фотолитографии.

Для подавления стоячих волн в литографическом стеке широко применяются антиотражающие покрытия (АОП) [1], снижающие уровень отражения и, тем самым, минимизирующие интерференционные эффекты. Эффективность АОП в значительной степени определяется его толщиной: отражение в стеке зависит от этого параметра, и наилучшее подавление стоячих волн достигается в точках экстремума отражательной способности. В этих точках влияние технологических флуктуаций толщины слоя на оптические свойства оказывается минимальным.

Таким образом, при внедрении новых литографических материалов важно определить оптимальные параметры процесса, в частности толщину антиотражающего слоя.

В более ранней работе [2] было проведено исследование влияния толщин отечественных литографических материалов — фоторезиста ФР193-01 и антиотражающего покрытия ПА193-02 — на параметры окна процесса фотолитографии для слоя ACTIVE под технологическую норму 90 нм.

Оптические характеристики данных материалов (показатель преломления и коэффициент поглощения) были определены методом спектральной эллипсометрии. На основании полученных данных с использованием программного комплекса рассчитана зависимость отражения в литографическом стеке от толщины слоя АОП (см. рис. 1). Расчеты позволили выявить диапазоны толщин, обеспечивающие минимальное отражение и, соответственно, оптимальное подавление стоячих волн.

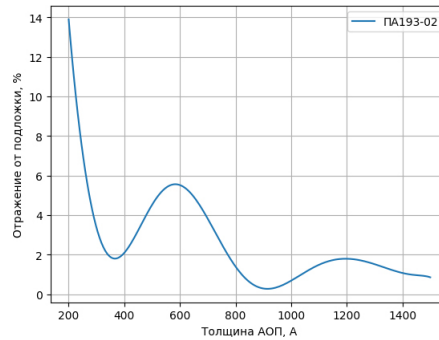


Рис. 1. График зависимости отражения от подложки от толщины АОП

Для анализа процесса экспонирования построены матрицы фокус — доза для различных толщин АОП. Зависимость размера в резисте от фокуса и дозы аппроксимировалась с помощью полинома [3]; далее окно процесса строилось с помощью специализированного ПО в области фотолитографии. Анализ полученных результатов показал следующее: при увеличении толщины АОП от 600 до 750 А происходит увеличение окна процесса, однако при дальнейшем увеличении толщины АОП значимого улучшения не происходит. Для обобщения полученного результата на произвольный литографический стек для данного процесса этот результат можно выразить в терминах отражения от подложки: для того чтобы отражение не влияло на процесс фотолитографии, оно не должно превышать 2,5 %.

Одна из проблем первого эксперимента заключалась в ограниченном количестве собранных экспериментальных данных, что делает полученные выводы по отражению в стеке менее надежными. Поэтому в данной работе проводится дополнительный эксперимент с толщинами АОП около 750 А для уточнения ранее сделанных выводов.

Литература

1. Mack C. A. Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication. John Wiley & Sons, 2007. 515 p.
2. Кирпичев Д. М., Шишлянников А. В., Литаврин М. В. Определение окна процесса фотолитографии для новых отечественных материалов: фоторезиста и антиотражающего покрытия // Материалы 67-й Всероссийской научной конференции МФТИ. — М.: МФТИ, 2025. — С.85.
3. Mack C. A., Byers J. D. New model for focus-exposure data analysis // Proc. SPIE 5038, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVII, 2003. Vol. 5038. P. 396–405.

УДК 538.91

Структурно-технологические неоднородности слоев оксида кремния, осаждаемых из газовой фазы

Евдокимов В. Л.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
vevdokimov@niime.ru

Рассмотрены механизмы образования примесности, полиморфности и неконформности как ростовых неоднородностей слоев, осаждаемых из газовой фазы. Сделана их количественная оценка на основе кинетики гомогенного и гетерогенного роста слоев оксида кремния с учетом теплоты адсорбции и энергии активации окисления реагента. Сделан анализ движения микрочастиц в пограничном газовом потоке как источника дефектности привнесенного характера при термической и плазменной активации процесса осаждения слоев.

Ключевые слова: примесность; полиморфность; неконформность; оксид кремния; осаждение из газовой фазы.

Введение

Технологические процессы химического осаждения из газовой фазы широко применяются при изготовлении интегральных микросхем. Слои должны иметь низкую примесность, низкую локальную дефектность и высокую конформность. Аномалии указанных характеристик определяются как химическая, структурная и топологическая неоднородности. В ряде работ, посвященных вопросам газофазного осаждения [1–5], рассмотрены отдельные вопросы кинетики роста слоев, однако механизмы формирования неоднородностей системно не исследованы.

1. Моделирование процесса газофазного осаждения слоев

1.1. Кинетическая схема процесса осаждения

Предлагаемая схема процесса осаждения слоя [6] отражает стадии диффузии, адсорбции, превращения реагента и образующихся основного и побочного продуктов реакции в ламинарном потоке у подложки в координатах «доставка — превращение».

По ветви 1 реагент **G** диффундирует к подложке со скоростью $\mathbf{f}_g$, адсорбируется на непрерывно обновляемой поверхности осаждения — $\mathbf{f}_{ga}$, диффундирует на ней — $\mathbf{f}_{gm}$, и превращается со скоростями $\mathbf{f}_s$ и $\mathbf{f}_i$ соответственно в основной продукт **S** и побочный продукт **I**. Побочный продукт, получая избыточную энергию экзотермической реакции, десорбируется и, релаксировав в столкновениях с молекулами газа-разбавителя, адсорбируется ($\mathbf{f}_{ia}$) в конкуренции с адсорбцией основного продукта — $\mathbf{f}_{sa}$. Часть побочного продукта диффундирует ($\mathbf{f}_{id}$) наружу пограничного газового потока.

По ветви 2 реагент **G** в пограничном потоке превращается также в основной продукт $\mathbf{S}_v$ и побочный продукт $\mathbf{I}_v$. Молекулы основного продукта диффундируют к подложке, пополняя слой параллельно с его ростом по 1-й ветви.

По ветви 3 на полярных молекулах воды как на центрах зародышеобразования формируются кластеры с концентрацией **C**. Кластеры за время диффузии к подложке в столкновениях с молекулярными продуктами вырастают до размера $\mathbf{d}_c$.

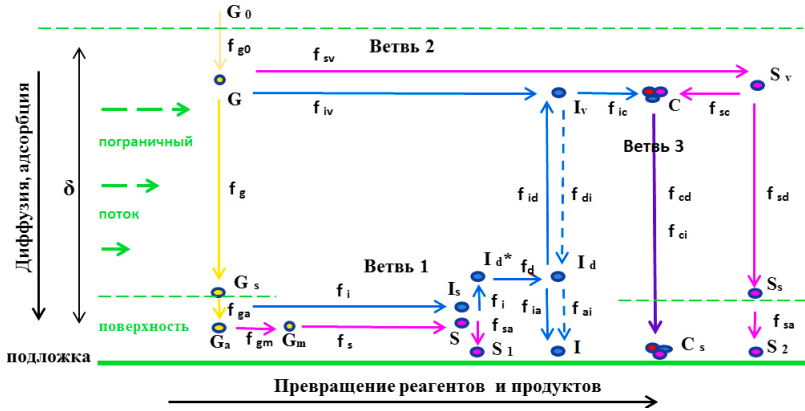


Рис. 1. Кинетическая схема стадий и ветвей газофазного осаждения слоя

1.2. Определение показателей неоднородностей

Примесность $\mathbf{K_i = f_{ia}/f}$ — доля побочного продукта в слое по ветви 1.

Полиморфность — $\mathbf{K_p = (f_{sd} + f_{cd})/f}$ — доля основного продукта и кластеров по ветвям 2 и 3.

Неконформность — $\mathbf{K_t = K1_{fs}/f + K_2 f_{ss}/f}$ — доля фактора поверхностной диффузии реагента ($\mathbf{K_1}$) и геометрического фактора доставки продуктов ($\mathbf{K_2}$) по ветвям 1 и 2 ($\mathbf{f_s}$ и $\mathbf{f_{ss}}$). Коэффициенты $\mathbf{K_1}$ и $\mathbf{K_2}$ рассчитываются отдельно [6]. Для определения скоростей, входящих в показатели неоднородности в установившемся процессе, из уравнений материального баланса вычисляются их равновесные значения.

Результаты расчетов неоднородностей на примере слоев SiO_2 приведены на рис. 2.

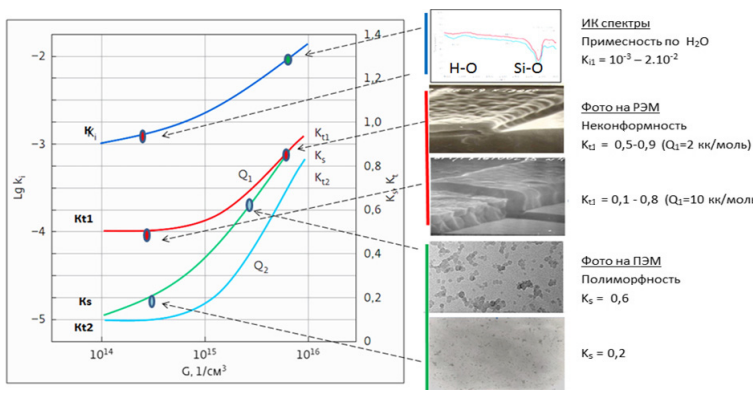


Рис. 2. Зависимость показателей неоднородности от концентрации G-реагента: *а*) примесность K_i, *б*) полиморфность K_s, *в*) неконформность K_{t1} (теплота адсорбции Q_1 = 2 ккал/моль) и K_{t2} (Q = 10 ккал/моль)

2. Неоднородность по частицам привнесенной природы

В случае осаждения с термической (не плазменной) активацией основной силой вытесняющей частицы из градиентного потока у подложки является сила электрофореза. При градиенте температуры $\Delta T = 10^2$ К/см, по сделанным оценкам, вытесняются микрочастицы размером до 1,5 мкм. При активации процесса осаждения в условиях высокочастотной плазмы и напряженности электрического поля автосмещения у подложки $\Delta U = 50$ В/см при заряде частицы, равном 10 зарядов электрона, основной силой является электростатическая. По оценкам она способна вытеснять частицы размером до 12 мкм.

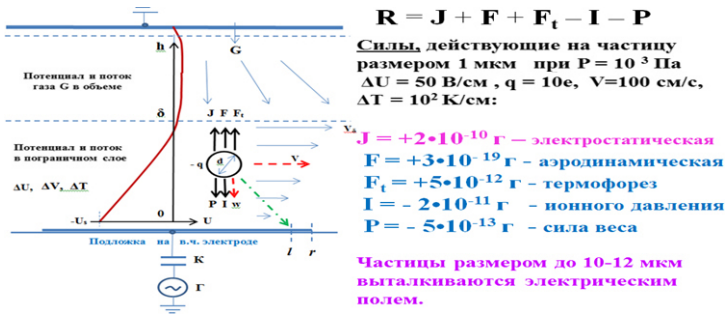


Рис. 3. Силы, действующие на микрочастицу в градиентном потоке

Заключение

1. Предложенная модель процесса газофазного осаждения позволяет оценивать и прогнозировать примесность, полиморфность и неконформность осаждаемых слоев. Указанные ростовые неоднородности определяются соотношением скоростей гомогенного и гетерогенного образования основного и побочного продуктов.
2. Снижение дефектности по микрочастицам привносимой природы достигается соответствующей подготовкой оборудования и обеспечением режима градиентного ламинарного потока у подложки.

Литература

1. Pierson H. O. Handbook of chemical vapor deposition. New Jersy, New Publications, 1992. P. 26–34.
2. Васильев В. Н., Репинский С. М. Осаждение диэлектрических слоев из газовой фазы // Успехи химии, 2005. — Т. 74. — С. 452–483.
3. Rosenberger F. Flow Dinamics and Modelling of CVD // Proc 10th Int Conf on CVD. Electrochem. Soc., Pennington, 1987. P. 193–203.
4. Cobianu C. A Theoretical Study of the Low-Temperature CVD of SiO_2 Films // J. Electrochem. Soc., 1983. Vol. 130. № 9. P. 1888–1893.
5. Aurora R. A Mathemathical Model For The Coupled Reaction Kinetics And Transport Processes in CVD Systems. Department of Chemical Engineering, University of Houston, 1987. P. 106–112.
6. Евдокимов В. Л. Неоднородности слоев оксида кремния, осаждаемых из газовой фазы. — М.: Книга-Мемуар, 2025.

УДК 621.382.3(073.75) + 677.5

Изготовление транзисторов на основе углеродных нанотрубок методом микроплоттерной печати

Керечанина М. Ф.[1], к. т. н. Лизунова А. А.[1], Власов И. С.[1], Каменева Е. И.[1], Лошкарев А. А.[1], Новосёлов А. К.[1], Костина Д. Е., к. ф.-м. н. Арутюнян Н. Р.[1,2], к. ф.-м. н. Образцова Е. Д.[1,2], д. ф.-м. н. Иванов В. В.[1]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

[2] Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Изготовлены тонкопленочные транзисторы методом микроплоттерной печати. В качестве чернил использовались жидкие водные дисперсии углеродных нанотрубок с различным соотношением металлических и полупроводниковых трубок. Исследованы электрические свойства полученных транзисторов.

Ключевые слова: микроплоттерная печать; одностенные углеродные нанотрубки; тонкопленочный транзистор.

Благодаря уникальным свойствам углеродных одностенных нанотрубок, таким как высокая плотность тока, превышающая 10^9 А/см^2 [1], отличная теплопроводность около 6600 Вт/м·К [2], высокая фотопрозрачность, которая может быть выше 90 % [3], суспензии на их основе являются перспективным материалом и активно применяются в самых различных аддитивных печатных технологиях, например, для создания тонкопленочных транзисторов. Центральной проблемой при изготовлении транзисторов на основе углеродных нанотрубок является необходимость исключения металлических нанотрубок. В нашем исследовании для отделения металлической фракции применяется метод водной двухфазной экстракции, который позволяет достигнуть содержания полупроводниковых нанотрубок более 98 %.

В данном исследовании транзисторные структуры изготавливались на основе кремниевой подложки с электродами, полученными методом литографии (рис. 1), поверх которых наносилась суспензия нанотрубок методом микроплоттерной печати с использованием специализированного микроплоттера SonoPlot GIX Microplotter II (SonoPlot, Middleton, USA) в контактном режиме.

На рис. 2 показаны изображения УНТ в канале транзистора, полученные методом растровой электронной микроскопии.

Измеряемыми электрическими параметрами при тестировании изготовленных транзисторов являются величина тока в направлении сток-исток, напряжение между контактами сток-исток и напряжение между стоком и затвором транзистора. Средством измерения величины тока служит зондовая станция Microtech Summit 11000B-M. Значение I_{on}/I_{off} рассчитывается по переходным характеристикам как отношение тока в области линейной зависимости при рабочем напряжении затвора к току в закрытом состоянии.

На рис. 3 представлены типичные вольт-амперные характеристики транзисторов на основе смеси полупроводниковых и металлических и выделенной фракции полупроводниковых нанотрубок. Выходные характеристики этих транзисторов, а именно зависимости тока стока от напряжения между затвором и истоком при заданном напряжении (±0,5 В) между стоком и истоком, представлены на рис. 3.

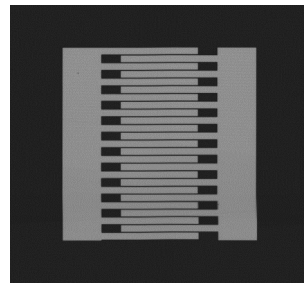


Рис. 1. Изображение транзисторной структуры,
полученное с помощью оптического профилометра

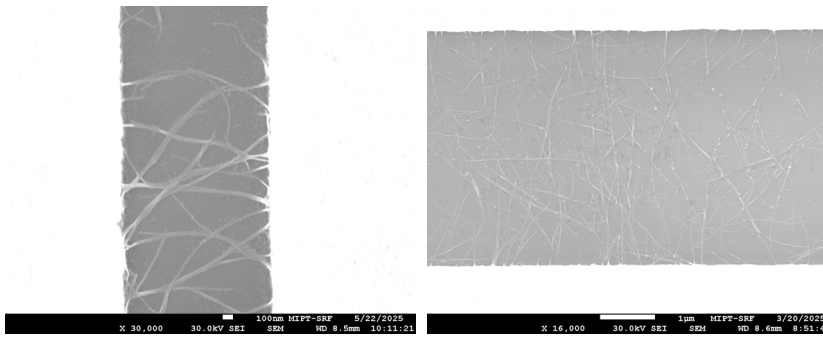


Рис. 2. Изображение канала транзистора с нанесенными ОУНТ,
полученное методом растровой электронной микроскопии, на основе
смеси полупроводниковых и металлических нанотрубок (слева) и на основе
отделенной фракции полупроводниковых нанотрубок (справа)

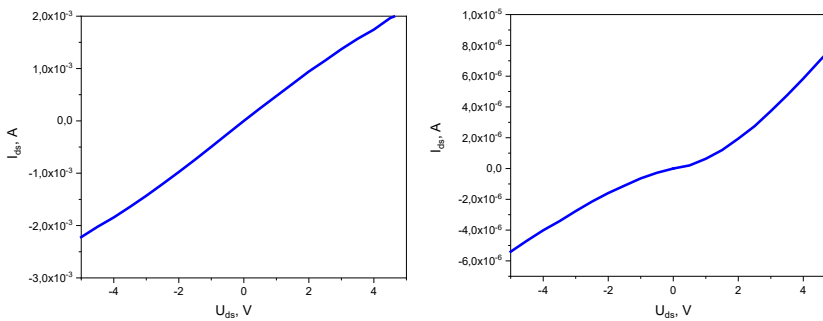


Рис. 3. Типичные вольт-амперные характеристики транзисторов на основе исходных
нанотрубок (слева) и полупроводниковых нанотрубок (справа), измеренные
при нулевом напряжении между затвором и истоком (U_{ds} = 0 В)

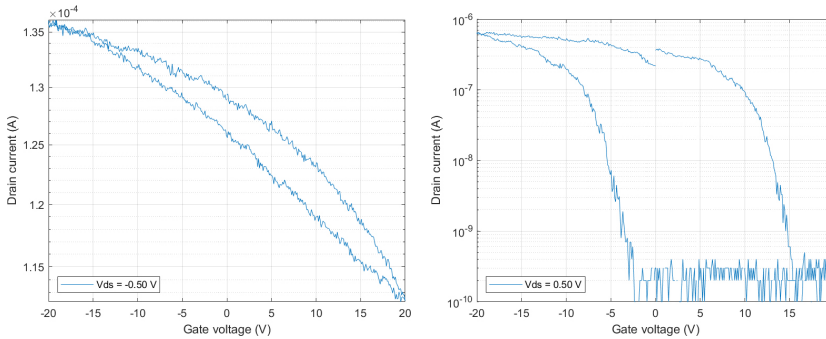


Рис. 4. Типичные переходные характеристики транзисторов для исходных нанотрубок (слева) и полупроводниковых нанотрубок (справа)

В результате по измеренным вольт-амперным и переходным характеристикам сделаны оценки отношения токов транзисторов в открытом и закрытом состоянии (I_{on}/I_{off}), проводимости полупроводниковых каналов и подвижности носителей заряда в них. Для смеси нанотрубок достигнуто значение I_{on}/I_{off}, равное 1,20, для полупроводниковых нанотрубок I_{on}/I_{off} составляет 4500, проводимость составила 0,30 мСм, и 2,20 мкСм соответственно.

Ключевой параметр, влияющий на отношение токов, — доля полупроводниковых УНТ среди нанотрубок в канале транзистора. При увеличении доли полупроводниковых УНТ с 99 до 99,9999 % отношение токов увеличивается со значения 10^2 до значения 10^5. В большинстве работ приводятся результаты, сопоставимые с нашим исследованием, соответствующие значениям отношения токов 10^3–10^4 [4].

В итоге показано, что разработка методок изготовления суспензий с высокой массовой долей полупроводниковых нанотрубок является обязательным условием создания печатных транзисторов на одностенных нанотрубках.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-560.

Литература

1. Yao Z., Kane C. L. and Dekker C. High-field electrical transport in single-wall carbon nanotubes // Physical Review Letters, 2000. Vol. 84. P. 2941–2944.
2. Berber S., Kwon Y.-K., Tománek D. Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes // Physical Review Letters, 2000. Vol. 84. № 20. P. 4613–4616.
3. Wu Z., Chen Z., Du X., Logan J. M., Sippel J., Nikolou M., Kamaras K., Reynolds J. R., Tanner D. B., Hebard A. F., Rinzler A. G. Transparent, conductive carbon nanotube films // Science, 2004. Vol. 305. № 5688. P. 1273–1276.
4. Islam A. E., Rogers J. A., Alam M. A. Recent Progress in Obtaining Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes for Transistor Applications // Advanced Materials, 2015. Vol. 27. № 48. P. 7908–7937.

УДК 544.034.24

Диффузия примеси меди в кристаллическом гексагональном рутении

Горохов С. А.[1,2], Резванов А. А.[1,2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
sgorohov@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследована диффузия меди в слое рутения, сформированном методом атомно-слоевого осаждения на сапфировой подложке. Полученные результаты сопоставлены с данными расчета из первых принципов коэффициента диффузии меди в объемном гексагональном рутении.

Ключевые слова: диффузия примеси; атомно-слоевое осаждение; теория функционала плотности; рутений; медь.

Одной из основных тенденций современной полупроводниковой микроэлектроники остается постоянное масштабирование элементов [1]. В частности, из-за уменьшения ширины медных проводников в системе металлизации и расстояния между ними активно ведутся исследования новых материалов в качестве диффузионных барьерных и адгезионных слоев для меди. Металлический рутений и его соединения рассматриваются в качестве потенциальных материалов для этого применения. Ru сочетает в себе как высокие барьерные свойства, препятствующие диффузии меди, так и хорошую адгезию к меди [2]. В последние годы было представлено значительное количество работ по созданию диффузионных барьеров на основе Ru. Однако используемые методы осаждения позволяют получать только поликристаллические пленки из Ru, в которых диффузия меди проходит вдоль границ зерен [3]. Следовательно, такие экспериментальные исследования не дают информации о скорости диффузии меди в объеме стабильной гексагональной фазы рутения. В данной работе проводится экспериментальное исследование диффузии примеси меди в объеме гексагонального рутения, результаты которого сопоставляются с данными расчетов на основе теории функционала плотности.

Для получения пленок рутения, наиболее приближенных к монокристаллическим, использовались полированные подложки из сапфира диаметром 100 мм ориентации (0001), обладающие минимальным рассогласованием в параметрах кристаллической решетки с гексагональным Ru. Для сравнения с диффузией по границам зерен также были подготовлены образцы со слоем рутения, осажденным на кремниевую подложку со слоем SiO_2. Пленки Ru толщиной 15 нм формировались методом плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения, обеспечивающим высокую конформность и прецизионный контроль толщины слоя. Для осаждения Ru применялся жидкий прекурсор $Ru(EtCp)_2$ и O_2-плазма. На сформированные пленки Ru методом магнетронного распыления наносился слой Cu толщиной 50 нм. Для определения скорости диффузии и соответствующих энергий активации полученный структуры Al_2O_3/Ru/Cu и Si/SiO_2/Ru/Cu подвергались отжигу при температуре от 300 до 900 °C.

Толщины тонких пленок Ru определялись методом спектральной эллипсометрии. Поверхностное сопротивление полученных структур было измерено четырехзондовым методом в зависимости от продолжительности отжига и его температуры. Фазовые характеристики полученных пленок Ru были исследованы с помощью метода рентгеновской дифрактометрии. Для микроструктурного анализа образцов и исследования областей диффузии примеси меди использовался просвечивающий электронный микроскоп с приставкой для энергодисперсионного рентгеновского анализа.

Расчеты из первых принципов температурных зависимостей коэффициентов диффузии примеси Cu в базальной плоскости гексагонального Ru и перпендикулярно ей проводились в рамках модели восьми частот, описывающей частоты «прыжков» примесного атома Cu и соседних атомов Ru, а также коэффициенты корреляции. Учитывался эффект теплового расширения объема кристаллической решетки Ru в квазигармоническом приближении.

Полученные экспериментальные данные по оценке коэффициентов диффузии Cu в гексагональном Ru хорошо согласуются с расчетными результатами и подтверждают эффективность рутения в качестве барьерного своя против диффузии меди. При этом качество пленки Ru с точки зрения наличия в ней дефектов, таких как границы зерен, имеет ключевое значение для обеспечения надежности барьера.

Литература

1. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7-8. — С. 124–128.
2. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015. — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
3. Bernasconi R., Magagnin L. Ruthenium as diffusion barrier layer in electronic interconnects: current literature with a focus on electrochemical deposition methods // Journal of the electrochemical society, 2018. Vol. 166. № 1. P. D3219.

УДК 621.793.162

Исследование элемента хранения резистивной энергонезависимой памяти на основе нитрида кремния, нанесенного методом атомно-слоевого осаждения

Резник А. А.[1,2], Резванов А. А.[1,2], к. ф.-м. н.
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
alreznik@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследуется процесс атомно-слоевого осаждения нитрида кремния для использования в резистивной энергонезависимой памяти. Для кремния использован прекурсор на основе аминодисилана.
Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение; прекурсор; нитрид кремния; резистивная память.

В настоящий момент ведутся разработки перспективных видов энергонезависимой памяти, которые по ряду своих характеристик, таких как скорость переключения, предельное количество циклов перезаписи и степень интеграции, превосходят существующие решения, например память с плавающим затвором (EEPROM) [1]. Одним из приеров памяти нового поколения является резистивная энергонезависимая память (ReRAM), работа которой основана на эффекте резистивного переключения. Этот эффект наблюдается в различных материалах, включая ферромагнетики и бинарные оксиды. Кроме того, резистивный эффект обнаружен в нитридах металлов, таких как AlN, ZrN, CoN, а также в SiN_x [2]. Возможность трехмерной интеграции памяти в интегральные микросхемы (ИС) с характерными толщинами функционального слоя 5–8 нм элемента хранения ReRAM накладывает требования на метод формирования тонких пленок: низкая температура осаждения, которая предотвращает термическое повреждение металлизации, высокая конформность и аспектное соотношение осаждаемых слоев. Таким требованиям удовлетворяет плазменно-стимулированное атомно-слоевое осаждение (ПАСО). Характеристики выращенной пленки будут зависеть от параметров ПАСО, а именно от используемых прекурсоров, температуры осаждения, времени продувки и других.

В данной работе формируется элемент хранения ReRAM на основе SiN_x методом ПАСО с использованием перспективного отечественного прекурсора кремния на основе аминодисилана. Данный прекурсор позволяет снизить температуру осаждения, сохранив при этом высокое качество пленок с низким содержанием примесей. Этот класс прекурсоров мало изучен в литературе. Таким образом, стоит задача исследовать процесс осаждения SiN_x с использованием прекурсора кремния и плазмы аммиака, а также определить характеристики элемента хранения ReRAM, где функциональный слой выращен с использованием метода АСО.

В данной работе на пластины диаметром 200 мм методом вакуумного напыления наносился нитрид титана (TiN) толщиной 50 нм, который выступал в роли

нижнего электрода. На TiN методом ПАСО с использованием установки АСО «Изофаз ТМ-200» [3] осаждались тонкие пленки SiN_x толщиной 5–10 нм при различных температурах осаждения (200–300 °C) и временах подачи прекурсоров. Верхний электрод TiN также наносился методом вакуумного напыления. Часть осажденных пленок подвергалась отжигу в целях кристаллизации. Толщины выращенных пленок и их показатель преломления определялись с помощью спектрального эллипсометра. Шероховатость поверхности пленок SiN_x была измерена атомно-силовым микроскопом в полуконтактном режиме. Кристаллическая структура пленок определялась методом рентгеновской дифракции, а элементный состав — с использованием рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Электрофизические параметры элемента хранения ReRAM на основе SiN_x, такие как количество циклов переключения и напряжения записи/стирания, исследовались на зондовой системе с полупроводниковым анализатором.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06003, https://rscf.ru/project/23-91-06003.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Красников А. Г. Современное состояние разработок в области энергонезависимой памяти // Нано- и микросистемная техника, 2015. — № 4. — С. 60–64.
2. Gismatulin A. A. et al. Charge transport mechanism in the metal–nitride–oxide–silicon forming-free memristor structure // Applied Physics Letters, 2020. Vol. 116. № 20.
3. Зюзин С. С. и др. Атомно-слоевое осаждение тонких пленок оксида гафния с использованием установки «Изофаз Т. 200-01» // Наноиндустрия, 2022. — Т. 15. — № S8-2. — С. 548–552.

УДК 621.3.049

Импульсное лазерное напыление тонких полупроводниковых пленок A^3B^5

Никулин Д. А.
Южный научный центр РАН
344006, г. Ростов-на-Дону, просп. Чехова, 41
dmitnikul@gmail.com

Представлены современные исследования полупроводниковых тонких пленок A^3B^5, полученные импульсным лазерным напылением (ИЛН) на различных подложках, с применением метода двухимпульсной абляции как.

Ключевые слова: тонкие пленки; импульсное лазерное напыление; оптоэлектроника; фотоника.

Метод ИЛН в настоящее время получает распространение как перспективный технологический подход для получения бинарных и многокомпонентных тонких пленок из элементов групп A^3B^5. Уже получены тонкие пленки как широкозонных полупроводников AlN [1] и GaN [2] на подложках лейкосапфира, так и узкозонных 4- и 5-компонентных (Ga, In, As, Sb, и Bi) на подложках GaP, GaAs и Si [3, 4].

В данных работах общим являются режимы ИЛН в виде абляции мишени в вакуумной камере с давлением не более $5 \cdot 10^{-4}$ Па лазерным излучением второй гармоники лазера YAG:Nd3+. Мишень получали изостатическим прессованием без нагрева при давлениях не менее 100 МПа с последующим отжигом в потоке водорода. Эпитаксиальный рост проводился не менее 60 минут при плотности энергии лазерного импульса 2–3 Дж/см^2, частоте повторения импульсов 15 Гц и длительности импульса 10 нс.

Для преодоления существующих ограничений широкого применения ИЛН в виде микрокапель на поверхности получаемых тонких пленок впервые применен метод двухимпульсной абляции. Для реализации этого метода разработан формирователь сдвоенных лазерных импульсов [5], а интеграция данного устройства в процесс импульсного лазерного напыления для получения тонких многокомпонентных полупроводниковых пленок позволила снизить плотность капель индийсодержащих микрокапель на два порядка.

Оценка получаемых тонких пленок современными методами материаловедения наносистем позволяет считать метод ИЛН перспективным подходом для получения тонких полупроводниковых пленок A^3B^5.

Работа проведена в молодежной лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники ЮНЦ РАН с использованием ресурсов центра коллективного пользования Северо-Кавказского федерального университета. Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2025 г., № гос. рег. 125011200142-7.

Литература

1. Девицкий О. В., Никулин Д. А., Сысоев И. А. Импульсное лазерное напыление тонких пленок нитрида алюминия на сапфировые подложки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2020. — Т. 20. — № 2. — С. 177–184. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-177-184. EDN GBHRLB.

2. Devitsky O. V., Nikulin D. A., Sysoev I. A. Pulsed laser deposition of gallium nitride thin films on sapphire substrates // AIP Conference Proceedings: 7, Ekaterinburg, 18–22 мая 2020 года. — Ekaterinburg, 2020. P. 030012. DOI: 10.1063/5.0032227. EDN YKRSNZ.
3. Pashchenko A. S., Devitsky O. V., Lunin L. S. et al. Structure and morphology of GaInAsP solid solutions on GaAs substrates grown by pulsed laser deposition // Thin Solid Films, 2022. Vol. 743. P. 139064. DOI: 10.1016/j.tsf.2021.139064. EDN GVMOAE.
4. Pashchenko A. S., Devitsky O. V., Lunina M. L., Danilina E. M., Pashchenko O. S., Ber B., Sakharov V. I. Epitaxial growth of GaInAsBi thin films on Si (001) substrate using pulsed laser deposition // Vacuum, 2024. Vol. 227. P. 113372. DOI: 10.1016/j.vacuum.2024.113372.
5. Патент на полезную модель № 232407 U1, Российская Федерация, МПК H01S 3/23. Устройство формирования сдвоенных лазерных импульсов на основе импульсных лазеров с внешним запуском: заявл. 18.12.2024: опубл. 11.03.2025 / Девицкий О. В., Никулин Д. А., Касьянов И. В.; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет». EDN WSMCEA.

УДК 544.228

Характеристики диодов Шоттки Au/n-Si, сформированных методом электрохимического осаждения

Вайсбеккер М. С.[1,2], Малаховский О. Ю.[1], к. т. н., Минин О. Н.[1,2], Бекезина Т. П.[1], Таловская А. А.[2]

[1] АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»
634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 99а
mariya_vaisbekker@mail.ru
[2] Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40

Методом электрохимического осаждения на кремниевых полупроводниковых структурах с толщиной эпитаксиального слоя 5 мкм и удельным сопротивлением 4 Ом·см были сформированы диоды Шоттки Au-Si. Рассчитанные значения показателя идеальности и высоты барьера увеличиваются с уменьшением диаметра контактов от 500 до 50 мкм и составляют соответственно 1,09–1,27 и 0,53–0,57 эВ.

Ключевые слова: диод Шоттки; Au-Si; электрохимическое осаждение; золото; вольт-амперные характеристики.

Золото, нанесенное на полупроводниковые кремниевые структуры, обладает рядом практически важных свойств. Наночастицы золота, осажденные на монокристаллический и пористый кремний, могут быть использованы как катализаторы [1]. Сплошные слои металла на кремнии являются важной частью полупроводниковых приборов: такая система металл — полупроводник может формировать омический (невыпрямляющий) контакт в случае, когда зависимость тока от подаваемого напряжения носит линейный характер, или барьерный контакт (барьер Шоттки, выпрямляющий контакт), характеризующийся экспоненциальной зависимостью тока от напряжения.

Нанесение золота на кремний может быть осуществлено физическими [2], химическими [3] и электрохимическими способами [4–6]. Обеспечение надежной адгезии и сплошности золотого покрытия на кремнии было достигнуто за счет запатентованной химической обработки перед проведением электрохимического осаждения [7].

Диоды для исследования вольт-амперных характеристик Au-Si формировали на полупроводниковых структурах 5КЭФ4/380ЭКЭС0,01. На эпитаксиальную сторону пластин пиролитически наносили 0,52 мкм оксида кремния. Затем на обратной стороне пластины формировали омический контакт: электрохимически осаждали NiAu и отжигали при 400 °С в течение 11 минут в атмосфере азота. Затем на лицевой стороне пластины методом жидкостного травления оксида кремния по маске фоторезиста получали окна различного диаметра. Электрохимическое осаждение золота проводили из фосфатного цианидного электролита. Основные электрофизические параметры контактов Au-Si с барьером Шоттки — измеряемую высоту барьера φ_{bm} и показатель идеальности n, определяли из вольт-амперных характеристик (ВАХ). Измерения ВАХ проводили на зондовой станции Cascade

Microtech M150 с использованием анализатора электрических характеристик полупроводниковых приборов Agilent B1500A (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Рассчитанные вольт-амперные характеристики диодов Au/n-Si

Рассчитанные вольт-амперные характеристики	Диаметр контактов, мкм			
	50	100	200	500
Высота барьера Шоттки, φ_{bm}	0,57	0,55	0,53	0,53
Показатель идеальности, n	1,27	1,27	1,20	1,09

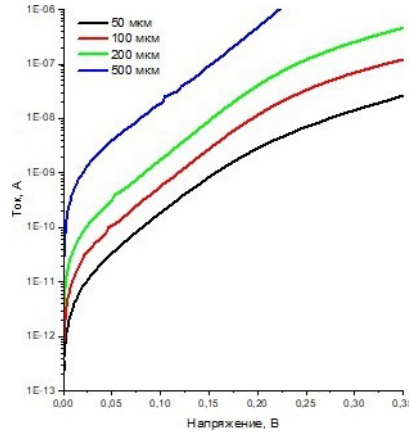


Рис. 1. Прямые вольт-амперные характеристики диодов Шоттки Au/n-Si для различных диаметров

Для диодов с диаметрами 500, 200, 100 и 50 мкм показатели идеальности возрастают с уменьшением диаметра контактов от 1,09 до 1,27. Рост показателя идеальности с уменьшением диаметра контактов сопровождается увеличением высоты барьера Шоттки от 0,53 до 0,57 эВ.

Рост показателя идеальности и высоты барьера Шоттки обусловлен, вероятнее всего, увеличением количества локальных неоднородностей при уменьшении диаметра окон. Такое увеличение локальных неоднородностей может быть следствием перераспределения тока при электрохимическом осаждении с изменением размера окон.

Полученные результаты подтверждают возможность формирования диодов Шоттки Au-Si методом электрохимического осаждения. Рассчитанные значения показателя идеальности и высоты барьера возрастают с уменьшением диаметра контактов от 500 до 50 мкм и составляют соответственно 1,09–1,27 и 0,53–0,57 эВ.

Результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2024-0008).

Литература

1. Mancini K. M., Khatib Y., Shahine L., O'Neil G. D. Photoelectrochemistry of Redox-Active Self-Assembled Monolayers Formed on n-Si/Au Nanoparticle Photoelectrodes // Langmuir, 2024. Vol. 40. № 33. P. 17536–17546. DOI: 10.1021/acs.langmuir.4c01751.
2. Yeganeh M. A., Rahmatollahpur Sh., Sadighi-Bonabi R., Mamedov R. Dependency of barrier height and ideality factor on identically produced small Au/p-Si Schottky barrier diodes // Physica B: Condensed Matter., 2010. Vol. 405. № 16. P. 3253–3258. DOI: 10.1016/j.physb.2010.04.055.
3. Gutés A., Carraro C., Maboudian R. Ultrasmooth Gold Thin Films by Self-Limiting Galvanic Displacement on Silicon // ACS Appl. Mater. Interfaces, 2011. Vol. 3. № 5. P. 1581–1584. DOI: 10.1021/am200144k.
4. Oskam G., van Heerden D., Searson P. C. Electrochemical fabrication of n-Si/Au Schottky junctions // Appl. Phys. Lett., 1998. Vol. 73. № 22. P. 3241–3243. DOI: 10.1063/1.122731.
5. Gamero M., Alonso C. Deposition of nanostructurated gold on n-doped silicon substrate by different electrochemical methods // J. Appl. Electrochem., 2010. Vol. 40. № 1. P. 175–190. DOI: 10.1007/s10800-009-9993-0.
6. Вайсбеккер М. С., Останина Т. Н. Влияние обработки кремниевой полупроводниковой структуры на электрохимическое осаждение золота из цианидного электролита // Сборник материалов IV Международной научной конференции молодых ученых. — Энгельс: Саратовский областной институт развития образования, 2020. — С. 74–79.
7. Вайсбеккер М. С., Бекезина Т. П., Останина Т. Н. Способ формирования на поверхности кремниевых полупроводниковых структур слоя золота, электрохимически осажденного из электролитов с pH = 6–7: пат. RU 2778998 C1. 2022. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49430216.

УДК 537.525

Оптимизация параметров процесса магнетронного распыления пленки алюминия 5 мкм с целью минимизировать нагрузку на оборудование

Малинина К. А., Кузин А. С.
АО «Микрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Представлены результаты исследования физических свойств пленок алюминия толщиной 5 мкм, полученных методом магнетронного распыления. Изучено влияние параметров процесса (мощность DC-генератора, поток инертного газа, время напыления) на свойства слоя металлизации. Получено, что при изменении параметров процесса магнетронного распыления нагрузка, приходящаяся на насосы в камере, уменьшается. При этом свойства получаемой пленки алюминия становятся не хуже.

Ключевые слова: магнетронное распыление; пленка алюминия; металлизация; устойчивость к электромиграции.

В настоящее время широко используются пленки, полученные нанесением в вакууме. Они характеризуются высоким качеством и отличной воспроизводимостью по электрофизическим параметрам слоев, используются в производстве полупроводниковых приборов. Применение вакуумных методов связано с проблемами технологического оборудования [1, 2]. Технические возможности имеющегося в нашем использовании оборудования изначально не были рассчитаны для нанесения толстых слоев металла. Первоначальной задачей было модифицировать имеющийся рецепт магнетронного напыления тонких пленок для нанесения толстых слоев алюминия 5 мкм путем изменения времени напыления. Данное изменение привело к проблеме, связанной с увеличением нагрузки на криогенные насосы. Физические возможности оборудования были ограничены, что служило поводом для увеличения вероятностей сбоев, быстрых износов комплектующих.

Цель работы заключалась в модифицировании рецепта магнетронного напыления толстых пленок алюминия для уменьшения нагрузки на оборудование, а именно на криогенные насосы, без потери качества свойств получаемой пленки.

Эксперименты проводились в камере магнетронного напыления. Объектом исследования являлась кремниевая подложка с нанесенным поверх слоем оксида. Перед магнетронным распылением слоя алюминия был нанесен слой титана, который обеспечивал кристаллографическую ориентацию зерен <111>.

В ходе эксперимента были модифицированы аттестационные рецепты напыления в целях проверки влияния параметров на свойства получаемой пленки алюминия. Проверили, что физические свойства пленки слабо зависят от используемой мощности / набора мощностей DC-генератора при ее формировании магнетронным распылением, а также от подачи газа под пластину. В случае с толстыми слоями из-за более длительного времени рецепта напыления пластина успевает прогреться дополнительно от плазмы, образующейся в камере.

Изначальный рецепт процесса магнетронного напыления тонких пленок алюминия состоит из набора шагов с различным набором мощностей DC-генератора

от большей к меньшей, происходит подача инертного газа под пластину для равномерного прогрева подложки. Первоначально был создан рецепт для толстых слоев, аналогичный имеющемуся. Увеличивая время напыления, получали нужную толщину. В результате столкнулись с проблемой: из-за длительности рецепта возросло использование инертного газа и из-за этого увеличилась нагрузка на криогенные насосы. Данный выбор рецепта напыления является неоптимальным.

Исходя из экспериментов о влиянии параметров рецепта на свойства пленки, были созданы несколько вариантов рецепта магнетронного напыления толстых пленок. Последний включал в себя следующие изменения:

1) основные и последние шаги напыления проходили на средней мощности, увеличенной на 55% по сравнению с изначальной версией, это помогло сократить время напыления;
2) убран поток газа, подаваемый под пластиной, что позволило сократить расход инертного газа и тем самым снизить нагрузку на криогенные насосы.

Внесенные изменения параметров магнетронного напыления позволили оптимизировать рецепт для более толстых слоев, при этом сократили нагрузку на оборудование.

Финальное решение по выбору варианта рабочего рецепта для напыления слоя алюминия будет приниматься на основе обратной связи от заказчика после проведения тестов на стороне заказчика.

Литература

1. Campbell S. A. Fabrication Engineering at the Micro and Nanoscale. 3rd ed. New York: Oxford University Press, 2008.
2. Достанко А. П., Грушецкий С. В., Киселевский Л. И. и др. Плазменная металлизация в вакууме. — Мн.: Наука и техника, 1983. — 279 с.

УДК 621.357.9

Технология получения эвтектического припоя AuSn на основе процессов фотолитографии и электрохимического осаждения

Шестериков А. Е., Шестерикова Д. А.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40

Представлена методика получения преформ на основе эвтектики AuSn , базирующейся на процессах фотолитографии и послойного электрохимического осаждения. Также исследована зависимость температуры плавления получаемых преформ от плотности слоев в структуре.
Ключевые слова: преформы; эвтектика AuSn; монтаж кристаллов; электрохимическое осаждение; дифференциальный термический анализ.

Ключевым этапом в сборке полупроводниковых приборов является процесс монтажа кристалла. Данная операция влияет на надежность всего изделия в целом. Наиболее надежным и качественным методом монтажа является вакуумная пайка с использованием преформ из эвтектики [1]. Самой часто используемой эвтектикой является двойной сплав Au80Sn20, т. к. он отлично сочетается с золотой металлизацией кристаллов и демонстрирует высочайшую надежность и стабильность. В настоящее время преформы изготавливаются методом штамповки из фольги [2]. Использование штампов при производстве преформ накладывает следующие ограничения: неэффективное использование дорогостоящих материалов, ограниченность возможной формы преформ, погрешность в дозировании припоя. Предлагаемое решение заключается в использовании фотолитографии и послойного электрохимического осаждения слоев золота и олова для формирования прецизионных преформ.

Осаждение слоев золота и олова производилось через маску из пленочного фоторезиста Ordyl FP 400 толщиной 20 мкм. Рецептура электролитов представлена в табл. 1. На рис. 1 представлена фазовая диаграмма системы золото — олово [3].

Таблица 1. Рецептуры электролитов

Электролит оловянирования		Электролит золочения	
Компонент	Содержание, г/л	Компонент	Содержание, г/л
$SnSO_4$	40	$K[Au(CN)_2]$	152
H_2SO_4	100	$(NH4)_2HPO_4$	60
Препарат ОС20	4	Na_2SO_4	2,4
		$TlNO_3$	0,015
Аноды — Sn; $T = T_{комн}$		Аноды — Pt; pH = 5,2 — 5,6; T = 68 °C	

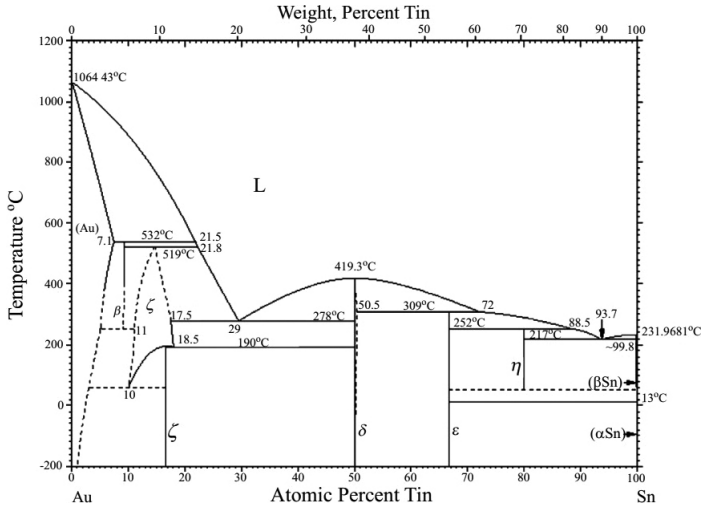


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы золото — олово

Отношение массы олова к общей массе соединения может быть определено по формуле (1), где ρ_{Sn}, ρ_{Au} — плотность олова и золота соответственно [г/см^3], $S_{эл}$ — площадь элементов на подложке [см^2], h_{Sn}, h_{Au} — суммарная толщина слоев олова и золота соответственно:

$$\gamma_{Sn} = \frac{\rho_{Sn} \cdot S_{эл} \cdot h_{Sn}}{\rho_{Sn} \cdot S_{эл} \cdot h_{Sn} + \rho_{Au} \cdot S_{эл} \cdot h_{Au}}. \quad (1)$$

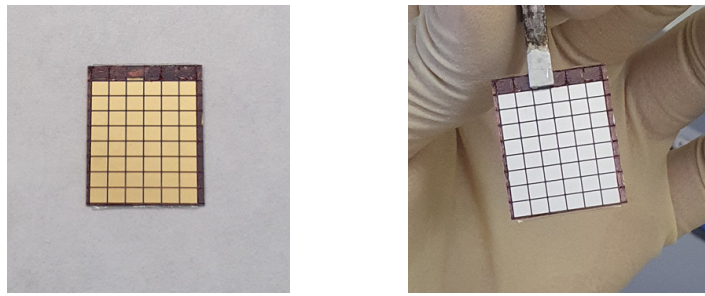
Если известна требуемая общая толщина эвтектики AuSn (h), то толщины слоев золота и олова могут быть записаны в виде

$$h_{Au} = h - h_{Sn} \Rightarrow h_{Sn} = \frac{\gamma_{Sn} \cdot \rho_{Au}}{\rho_{Sn} - \gamma_{Sn} \cdot \rho_{Sn} + \gamma_{Sn} \cdot \rho_{Au}} \cdot h. \quad (2)$$

Подставляя параметры эвтектики ($\gamma_{Sn} = 20\,\%$; $\rho_{Sn} = 7{,}3$ г/см^3; $\rho_{Au} = 19{,}3$ г/см^3) в соотношение (2), получаем толщину слоев Au и Sn:

$$h_{Sn} = 0{,}4 \cdot h/h_{Sn}; \quad h_{Au} = 0{,}6 \cdot h/h_{Au}. \quad (3)$$

При последовательном электрохимическом осаждении слоев Au и Sn необходимо, чтобы первым и последним слоем структуры являлось Au. Это предотвратит окисление Sn. В рамках эксперимента было получено три структуры с тремя, пятью и семью чередующимися слоями соответственно с общей толщиной h = 15 мкм. После осаждения структур производилось удаление фоторезистивной маски в ДМФА и стравливание подслоя меди в селективном травителе. Затем полученные преформы подвергались нагреву до температуры 350 °C. Для каждого образца фиксировалась температура начала плавления. На рис. 2 представлены образцы после осаждения золота (*а*) и олова (*б*) соответственно, а также вид преформ после проведения послойного электрохимического осаждения (*в*).

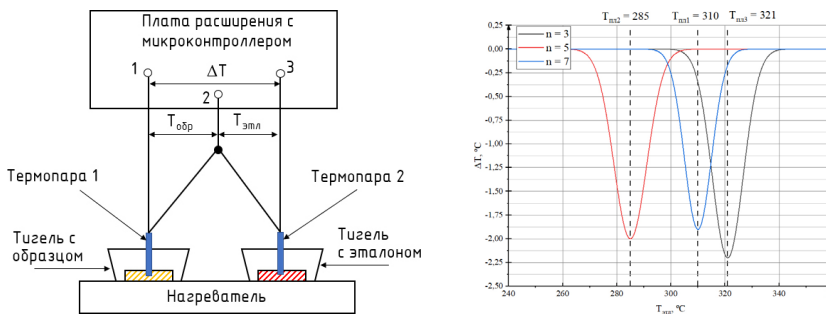


а *б*

в

Рис. 2. Вид преформ в процессе формирования методом послойного электрохимического осаждения: *а*) осаждение слоя золота; *б*) осаждение слоя олова; *в*) структура после проведения послойного электрохимического осаждения

Для определения температуры фазового перехода (температуры плавления) полученных структур был использован дифференциальный термический анализ (ДТА) [4]. Для данной задачи был изготовлен дериватограф по схеме, представленной на рис. 3*а*. На рис. 3*б* представлены температурные профили, полученные для образцов преформ с различным числом чередующихся слоев Au и Sn.



а *б*

Рис. 3. Схема дериватографа для проведения ДТА (*а*) и температурные профили образцов преформ (*б*)

Из рис. 3*б* можно увидеть, что ближе всего к эвтектической температуре (280 °C) температура плавления преформ достигается при пяти слоях в структуре ($\rho = 5/15 = 0{,}33$ мкм$^{-1}$). Дальнейшее увеличение температуры плавления может быть объяснено увеличением влияния оксида, который образуется между осаждением Sn и Au.

Таким образом, представленный в статье метод позволит формировать преформы 80Au20Sn любой формы и размеров в лабораторных условиях с использованием технологии фотолитографии и электрохимии, что значительно упрощает и удешевляет их производство.

Литература

1. Аносов В. С. и др. Исследование процессов пайки кремниевых кристаллов мощных транзисторов в их корпуса // Изв. высш. учеб. завед. Материалы электронной техники, 2018. — Т. 20. — № 1. — С. 51–59.
2. Liu K. et al. Stack electroplating AuSn20 eutectic solder for high accuracy assembly // 2022 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). IEEE, 2022. P. 1–5.
3. Vrublevskaya O. N. A review of developments in Au-Sn eutectic alloy electrodeposition // Innovations in Corrosion and Materials Science (Formerly Recent Patents on Corrosion Science), 2018. Vol. 8. № 1. P. 3–23.
4. Ahluwalia V. K. Differential Thermal Analysis // Instrumental Methods of Chemical Analysis. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. P. 91–96.

УДК 54-161:620.186.12:669-1:537.638.214

Разработка функциональных сплавов на основе переходных металлов с заданными свойствами

Рахматуллаев Т. Р., Саповский И. М., Пинчук К. Е., Крайнова Г. С., Пашев С. Р.
Дальневосточный федеральный университет
690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

Перспективные для практического применения в современной электронике аморфные металлические сплавы состава Co-Ni-Fe-Si-B получены методом быстрой закалки из расплава при разных параметрах спиннингования. Представлены результаты исследования физических характеристик быстрозакаленных сплавов и их зависимости от условий получения.
Ключевые слова: металлическое стекло; процесс фазообразования; ферромагнетик; магнитомягкий сплав; ренгенограммы.

Особенностью магнитомягких аморфных сплавов является большое (~20 %) содержание немагнитных элементов, например B, Si, P, наличие которых снижает максимальное значение индукции насыщения, увеличивает температурный коэффициент магнитных свойств, а также электросопротивление, твердость, прочность, коррозионную стойкость. Благодаря этому расширяются возможности практического применения аморфных сплавов: в качестве диффузионных барьеров на границе металл — полупроводник — для миниатюризации электронных устройств, для изготовления магнитных головок и датчиков, для создания малогабаритных трансформаторов и высокочувствительных сенсорных устройств, которые могут работать в сложных условиях в следствие высоких упругости, изотропности.

Одним из ключевых методов получения аморфных сплавов является спиннингование — высокоскоростная закалка расплава на вращающийся барабан. Параметры данного процесса — скорость охлаждения, ширина зазора между тиглем и барабаном, давление в камере и магистрали, температура расплава — влияют на скорость охлаждения и, следовательно, на аморфную структуру и физические свойства материала.

Целью настоящей работы является комплексное исследование взаимосвязи между составом, режимами спиннингования и структурой, а также магнитными параметрами быстрозакаленных сплавов. Полученные результаты позволят оптимизировать технологию получения аморфных сплавов с заданными служебными свойствами.

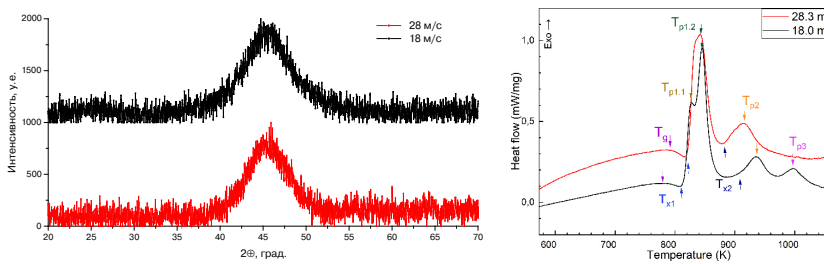
Для исследования выбран пятикомпонентный сплав $Co_{58}Ni_{10}Fe_5B_{11}Si_{16}$. Рассчитанные разница между размерами атомов $\delta \sim 9\,\%$, энтальпия смешения $\Delta H_{mix} = -24{,}7$ кДж/моль, энтропия смешения $\Delta S_{mix} = 10{,}2$ Дж/(К·моль),, показывают, что данный сплав обладает хорошей склонностью к стеклообразованию.

Образцы в соответствии с предложенными параметрами спиннингования, табл. 1, были получены на установке Melt Spinner SC.

Таблица 1. Параметры спиннингования сплава $Co_{58}Ni_{10}Fe_5B_{11}Si_{16}$: ν/V — частота / скорость вращения барабана-холодильника; t — толщина ленты; H — ширина ленты, T — температура, h — зазор между тиглем и медным барабаном, $P_К$ — давление в камере, PM — давление в газовой магистрали

№ плавки	T, °C	h, мм	ν, Гц / V, м/с	$P_К$, мбар	$P_М$, мбар	t, мкм	H, мм
1	1420±2	0,15	45/28,3±0,1	300±5	500±5	24±1	10
2	1420±2	0,15	28,66/18±0,1	300±5	500±5	28±1	10

Исследования структуры сплавов на атомном уровне проведены на рентгеновском дифрактометре Colibri («Буревестник») с использованием излучения CuKα1-Kα2 (40 кВ, 10 мА), λ = 1,5418 Å. Исследуемые сплавы рентгеноаморфны, рис. 1*а*. Для изучения структурной релаксации и склонности к стеклообразованию полученные ленты $Co_{58}Fe_5Ni_{10}Si_{11}B_{16}$ были подвергнуты отжигу при скорости нагрева HR = 20 К/мин, рис. 1*б*. Наличие на термокривых нескольких экзотермических пиков отражает многоэтапный процесс кристаллизации, один эндотермический пик характеризует область переохлажденной жидкости.

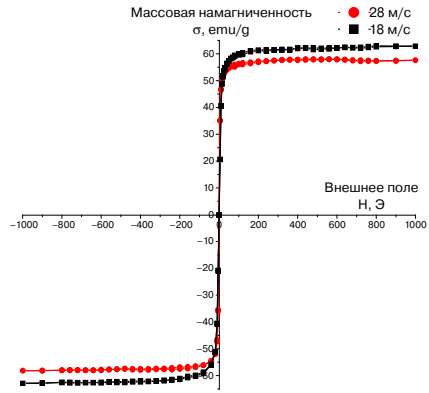


а *б*

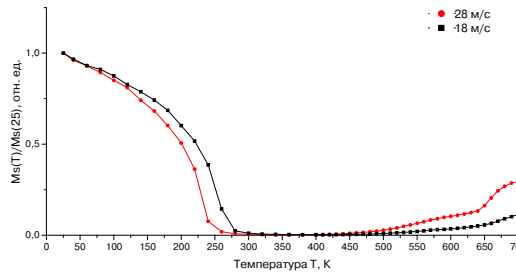
Рис. 1. Рентгеновская дифракция полученных лент (*а*); зависимость теплового потока от температуры для исследуемых образцов (*б*)

Исследование магнитных характеристик полученных сплавов проводилось методом индукционной вибромагнитометрии в диапазоне внешних магнитных полей до 1000 Э. Полученные результаты демонстрируют выраженные магнитомягкие свойства материалов, рис. 2*а*. Проведено температурное исследование намагниченности насыщения в интервале от 25 до 700 °С, что позволило определить критические температуры фазовых переходов, рис. 2*б*.

Расчеты стеклообразующей способности позволили определить состав и параметры спиннингования, варьирование которыми приводит к изменению структуры и служебных свойств металлических стекол, что расширяет возможности их практического применения.



а



б

Рис. 2. Петля магнитного гистерезиса (*а*); зависимость намагниченности насыщения от температуры для исследуемых образцов (*б*)

Литература

1. Silveyra J. M. et al. Soft magnetic materials for a sustainable and electrified world // Science, 2018. № 80. P. 362.

УДК 621.383

Оптимизация параметров измерительной установки для регистрации слабых сигналов электромагнитного излучения ближнего и средневолнового ИК-диапазонов с помощью фотосенсоров на основе ККТ

Сапцова О. А.[1], Яковлев В. О.[1], Короннов А. А.[1,2], Королева Т. В.[1], Хакимов К. Т.[1], Попов В. С.[1,3]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
saptsova.oa@phystech.edu
[2] Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
koronnov@inbox.ru
[3] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

Создана установка для исследования фотоэлектрических характеристик фотосенсоров на основе ККТ в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Определена пороговая чувствительность фоторезистора в зависимости от плотности мощности засветки.

Ключевые слова: фотосенсор; фотодетектор; фоторезистор; коллоидные квантовые точки; ИК-диапазон; неохлаждаемые фотодетекторы.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) — это передовой наноматериал, отличающийся уникальными свойствами. Фотодетекторы на основе ККТ способны поглощать излучение в широком спектральном диапазоне: от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного (ИК) диапазона, в зависимости от материала и размера частиц. Они эффективно функционируют при комнатной температуре, устраняя необходимость в громоздких системах охлаждения, характерных для традиционных ИК-детекторов, а также не требуют затратных и трудоемких технологических процессов производства [1–4]. Исследование фотодетекторов на основе ККТ вносит фундаментальный вклад в развитие фотоники.

Сокращение времени цикла изготовления-исследования лабораторных образцов фотосенсоров на новых материалах для ускорения процесса разработки является важной задачей. Для ее решения была разработана измерительная установка для исследования фотоэлектрических характеристик фотосенсоров, а также проведен поиск оптимальной методики их измерения. Исследована пороговая плотность мощности засветки, в результате чего определена пороговая чувствительность образцов, при которой возможно надежное обнаружение слабых сигналов на фоне шумов.

Методика была апробирована с использованием лазерного диода с длиной волны 1,55 мкм. На основании сопоставления спектральных характеристик и пороговой чувствительности на длине волны 1,55 мкм были определены требования к режиму засветки фоторизисторов на основе HgTe и HgSe в средневолновом ИК-диапазоне и рассчитана их пороговая чувствительность.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации проекта № FSMG-2025-0024.

Литература

1. Попов В. С., Пономаренко В. П. Новая фотосенсорика: 0D vs 2D: Научн. монография. — М.: МФТИ, Физтех, 2024.
2. Попов В. С., Миленкович Т., Хакимов К. Т., Королева Т. В., Сапцова О. А., Яковлев В. О., Шуклов И. А., Короннов А. А. и др. Чувствительность фоторезисторов на основе коллоидных квантовых точек HgTe в коротковолновом и средневолновом диапазонах инфракрасного спектра при комнатной температуре // Прикладная физика, 2024. — № 6. — С. 47–53. DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-47-53.
3. Васильев Р. Б., Дирин Д. Н., Гаськов А. М. Полупроводниковые наночастицы с пространственным разделением носителей заряда: синтез и оптические свойства // Успехи химии, 2011. — Т. 80. — № 12. — С. 1190–1210. DOI: 10.1070/RC2011v080n12ABEH004240.
4. Rogalski A. et al. Trends in Performance Limits of the HOT Infrared Photodetectors // Applied Sciences, 2021. 11 (2): 501. DOI: 10.3390/app11020501.

УДК 620.3

Использование роданид-содержащего комплекса ртути и ацетилацетоната ртути в качестве прекурсоров для синтеза коллоидных квантовых точек HgTe для фотосенсоров

Королева Т. В.[1], Хакимов К. Т.[1], Миленкович Т.[1], Сапцова О. А.[1], Яковлев В. О.[1], Попов В. С., к. х. н.[1,2]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

Синтезированы коллоидные квантовые точки теллурида ртути с использованием в качестве прекурсора металла роданидного комплекса ртути и комплекса ацетилацетоната ртути. Получены тонкие покрытия из ККТ HgTe и исследованы их фотосенсорные характеристики.

Ключевые слова: коллоидные квантовые точки; поглощение; фотосенсоры.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) широко исследуются, так как обладают гибко настраиваемой шириной запрещенной зоны в зависимости от их размера [1]. ККТ HgTe выделяются наиболее широким диапазоном поглощения среди остальных квантовых точек от видимого вплоть до дальнего инфракрасного диапазона. ККТ HgTe могут найти применение в качестве чувствительного слоя в инфракрасных фотодетекторах на средневолновый и длинноволновый ИК-диапазон [2]. Также ККТ отличаются простотой в производстве благодаря использованию жидкофазного метода синтеза горячей инжекции. Наиболее часто используемым прекурсором металла для синтеза ККТ HgTe является хлорид ртути $HgCl_2$. Хлорид ртути может координироваться с молекулами воды, что впоследствии может привести к появлению гидроксильных ловушек на поверхности синтезируемых ККТ [3]. Нежелательные поверхностные состояния, полученные во время синтеза ККТ, отрицательно сказываются на фотосенсорных свойствах получаемых из них покрытий.

В данной работе были использованы комплексные соединения ртути в качестве прекурсора металла — ацетилацетонат ртути и тиоционатный комплекс ртути. Координация роданидного и ацетилацетонатного лиганда в комплексных соединениях повышает экранирование центрального атома (Hg) и должна снизить вероятность его связывания с молекулами воды и ОН-группами, что будет способствовать снижению числа ловушек в процессе синтеза. В типичном синтезе в горячий раствор прекурсора ртути (хлорид ртути, тиоционатный комплекс ртути и ацетилацетонат ртути) в олеиламине быстро вводили прекурсор теллура (триоктилфосфин теллур, TOP-Te). Реакцию выдерживали в течение определенного времени и затем останавливали резким охлаждением на ледяной бане. Время и температура реакции оставались неизменными для всех синтезов. В синтезе с ацетилацетонатом ртути была использована олеиновая кислота для растворения комплекса. Были получены спектры поглощения синтезированных ККТ HgTe с помощью ИК-фурье-спектрометра (Spectrum 100, Perkin Elmer) с приставкой многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО). Пики поглощения для

ККТ, синтезированных из $HgCl_2$ и тиоционатного комплекса ртути, располагались в инфракрасной области спектра на 3 и 2,8 мкм соответственно. Для тиоционатного комплекса ртути также было характерно меньшее поглощение для С-Н-групп лигандной оболочки ККТ. ККТ HgTe, полученные из ацетилацетоната ртути, имели пик поглощения в видимой области на длине волны 585 мкм.

Для исследования фотосенсорных свойств полученные ККТ наносили на резистивную подложку методом спин-коатинга. Для улучшения проводимости слои ККТ обрабатывали 1,2-эандитиолом (ЭДТ) для замены длинных алкильных лиганд на короткие. ККТ, полученные из тиоционатного комплекса ртути и хлорида ртути, демонстрировали отклик на засветку лазером с длиной волны 1,5 мкм. Также проводились исследования фотосенсорных свойств с использованием фотодиода на 3,4 мкм. Отклик на засветку фотодиодом продемонстрировал образец с ККТ, полученных из тиоционатного комплекса ртути.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации проекта № FSMG-2025-0024.

Литература

1. Пономаренко В. П., Попов В. С., Шуклов И. А., Иванов В. В., Разумов В. Ф. Фотосенсоры на основе коллоидных квантовых точек // Успехи химии, 2024. — Т. 93. — RCR5113.
2. Xue X., Hao Q., Chen M. Very long wave infrared quantum dot photodetector up to 18 μm // Light: Science & Applications, 2024. Vol. 13. № 1. P. 89.
3. Wang C. et al. Precursor chemistry enables the surface ligand control of PbS quantum dots for efficient photovoltaics // Advanced Science, 2023. Vol. 10. № 4. P. 2204655.

УДК 620.3

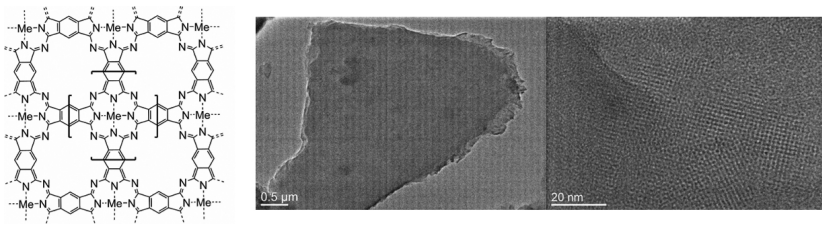
Двумерные полифталоцианины — перспективные материалы для печатной электроники

Рыжкова Г. Г., Курочкин И. Ю., Руднева Т. Н., Корепанов В. И.
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
gala.ryzhckova@yandex.ru

Разработана методика получения двумерных полифталоцианинов. Изучена структура и электрические свойства полученных материалов. Показано, что полимерные фталоцианины обладают лучшей проводимостью, чем их мономерные аналоги. Разработан метод получения чернил на основе суспензии полифталоцианинов для печати полупроводниковых устройств.

Ключевые слова: полифталоцианины; двумерные полимеры; органические полупроводники; печатная электроника.

Одним из наиболее перспективных классов материалов для производства микроэлектроники являются органические полупроводники. Их главными преимуществами перед неорганическими полупроводниковыми материалами являются простота изготовления, механическая гибкость и вариабельность характеристик [1]. Особый интерес представляют двумерные проводящие полимеры, такие как полифталоцианины (ПФЦ) (рис. 1*а*). Это металлсодержащие полимеры с полностью сопряженной π-электронной системой, которая обеспечивает высокую подвижность зарядов в материале [2]. Такие материалы наиболее перспективны для мемристоров и электрохимических электродов [3].



а *б*

Рис. 1. Структура ПФЦ (*а*); просвечивающая электронная микроскопия ПФЦ кобальта (*б*)

В данной работе методом твердофазного синтеза были получены ПФЦ различных металлов (в частности Cu, Ni, Co, Fe) и безметалловый ПФЦ. По данным ИК и КР спектроскопии было установлено, что полученный материал обладает высокой степенью полимеризации. С помощью просвечивающей электронной микроскопии подтверждена слоистая структура полимера и его кристалличность (рис. 1*б*). Была измерена зависимость сопротивления ПФЦ от температуры и оценена энергия активации переноса заряда (E_a). Для ПФЦ различных металлов E_a оказалась значительно ниже, чем у мономерных аналогов, что является еще одним

индикатором образования двумерной сопряженной электронной системы в макромолекулах ПФЦ. На основе полученных ПФЦ были сделаны чернила и изучены их характеристики. Суспензии продемонстрировали высокую стабильность в течение длительного времени.

Литература

1. Qian Y. et al. Stretchable organic semiconductor devices // Advanced Materials, 2016. Vol. 28. № 42. P. 9243–9265.
2. Zhang Y. et al. Conductive covalent organic frameworks of polymetallophthalocyanines as a tunable platform for electrocatalysis // Journal of the American Chemical Society, 2023. Vol. 145. № 44. P. 24230–24239.
3. Guo X. et al. Nonvolatile memory device based on copper polyphthalocyanine thin films // ACS omega, 2019. Vol. 4. № 6. P. 10419–10423.

УДК 621.383.526

Увеличение фотоотклика ультрафиолетовых фотодетекторов на основе GaN благодаря использованию Ag-нанонитей и Au-наночастиц

Синицкая О. А.[1], Шугабаев Т.[1], Кузнецов А.[1], к. ф.-м. н. Шубина К. Ю.[1], к. ф.-м. н. Гридчин В. О.[1], к. ф.-м. н. Мизеров А. М.[1], Уваров А. В.[1], к. ф.-м. н. Котляр К. П.[1], д. ф.-м. н. Большаков А. Д.[1], д. ф.-м. н. Цырлин Г. Э.[1], к. ф.-м. н. Никитина Е. В.[1,2]

[1] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
olesia-sova@mail.ru
[2] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

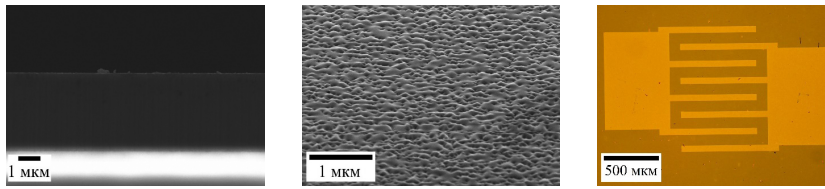
Установлено, что небольшое количество Ag-нанонитей на поверхности фотодетекторов на основе GaN/i-GaN/c-Al_2O_3 приводит к увеличению фотоотклика и к уменьшению эквивалентной мощности шума устройств. Показана тенденция улучшения этих параметров с ростом плотности Ag-наночастиц на поверхности образцов.

Ключевые слова: ультрафиолетовый фотодетектор; GaN; молекулярно-пучковая эпитаксия; Ag-нанонити; Ag-наночастицы; локализованный плазмонный резонанс.

В настоящее время узкополосные ультрафиолетовые фотодетекторы (УФ ФД) востребованы в системах оптической связи, биофотонике, датчиках пламени и т. д. Одни из наиболее подходящих материалов для изготовления таких устройств — полупроводники (Al)GaN. Известно, что поглощение света в определенном диапазоне длин волн можно усилить за счет использования металлических наноструктур благодаря поверхностному плазмонному резонансу [1]. Длина волны локализованного плазмонного резонанса Ag-наночастиц (НЧ) находится в УФ-области спектра [2], а энергия поверхностных плазмонов Au НЧ очень близка к энергии излучения дефектов в GaN [3], что позволяет использовать их для увеличения фотоотклика ФД на основе GaN. В данной работе было исследовано совместное влияние коллоидных Ag-нанонитей (НН) и Au НЧ на характеристики узкополосных УФ ФД на основе GaN.

Эпитаксиальные слои GaN толщиной 210 нм и с шероховатой морфологией поверхности были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота на темплейтах i-GaN/c-Al_2O_3 (рис. 1*а*,*б*). С помощью холловских измерений было обнаружено, что выращенные эпитаксиальные слои имеют проводимость n-типа, что характерно для III-N-материалов. Концентрация и подвижность носителей заряда составили $1{,}1 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ и 95 см^2/(В·с) соответственно.

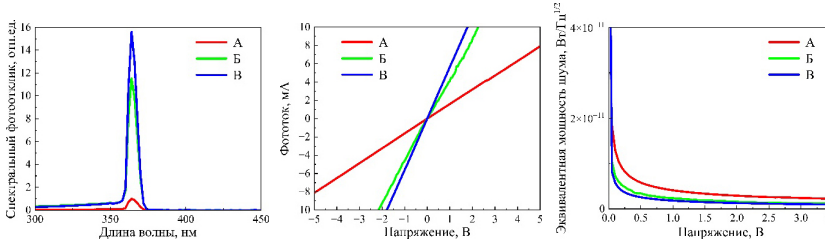
На основе полученных гетероструктур были изготовлены УФ ФД типа металл — полупроводник — металл со встречно-штыревыми контактами Ni/Au (5/10 нм) (рис. 1*в*). Для уменьшения темнового тока образцы отжигали при температуре 550 °C в атмосфере N_2.



а *б* *в*

Рис. 1. РЭМ-изображения гетероструктуры GaN/i-GaN/c-Al_2O_3: скол (*а*) и вид под углом к поверхности (*б*); изображение с оптического микроскопа сформированных ФД

Установлено, что полученные ФД (образец А) имеют узкополосную спектральную характеристику с максимумом на длине волны 365 нм и шириной на уровне половинной амплитуды спектра (FWHM) 11 нм (см. рис. 2*а*). При этом при 1 В фототок устройства составил 1,6 мА (рис. 2*б*), а эквивалентная мощность шума — $4{,}1 \cdot 10^{-12}$ Вт/Гц$^{1/2}$ (рис. 2*в*). На сформированные ФД были нанесены 10, 20 и 30 мкл раствора Ag НЧ. Покрытие образцов небольшим количеством Ag НЧ (образец Б) улучшило фотоотклик ФД в ~12 раз и уменьшило FWHM до 8 нм (см. рис. 2*а*). Значения фототока и эквивалентной мощности шума при 1 В — 4,1 мА и $2{,}4 \cdot 10^{-12}$ Вт/Гц$^{1/2}$ соответственно. Однако с дальнейшим увеличением количества НЧ фотоотклик устройств уменьшался вследствие эффекта затенения. На образец Б был нанесен раствор Au НЧ в объеме 10, 30 и 70 мкл. Образец с наибольшим количеством Au НЧ (образец В) имел спектральный фотоотклик в 15,5 раз больше, чем образец А. При этом фототок устройств возрос до 5,6 мА, а эквивалентная мощность шума уменьшилась до $1{,}8 \cdot 10^{-12}$ Вт/Гц$^{1/2}$.



а *б* *в*

Рис. 2. Спектральный фотоотклик (*а*) и зависимости фототока (*б*) и эквивалентной мощности шума (*в*) от напряжения сформированных устройств

Таким образом, небольшое количество Ag НЧ на поверхности ФД на основе GaN приводит к увеличению фотоотклика и к уменьшению эквивалентной мощности шума устройств. Также показана тенденция улучшения этих параметров устройств с ростом плотности Au НЧ на поверхности образца. Полученные результаты могут быть использованы для разработки дизайна и улучшения характеристик УФ ФД на основе GaN.

Работа поддержана Министерством образования и науки (гранты № FSRM-2023-0006 и № FSRM-2025-0001).

Литература

1. Ji Y. et al. Semiconductor plasmon enhanced monolayer upconversion nanoparticles for high performance narrowband near-infrared photodetection // Nano Energy, 2019. Vol. 61. P. 211–220.
2. Li J. et al. Ultra-high and fast ultraviolet response photodetectors based on lateral porous GaN/Ag nanowires composite nanostructure // Advanced Optical Materials, 2020. Vol. 8. № 8. P. 1902162.
3. Goswami L. et al. GaN nanotowers grown on Si (111) and functionalized with Au nanoparticles and ZnO nanorods for highly responsive UV photodetectors // ACS Applied Nano Materials, 2020. Vol. 3. № 8. P. 8104–8116.

УДК 537.312.7:004.332.3

Наследуемость шероховатости нижнего электрода функциональным слоем на основе HfO_2

Паймурзин Д. М.[1,2], Гришин Т. С.[3], Горячев А. В.[3], Теплов Г. С.[1,2], Рудаков Г. А.[3], Дудин А. А.[3]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН
119334, г. Москва, Ленинский просп., 32А

В работе представлены результаты исследования морфологии поверхностей нижнего электрода и функционального слоя HfO_2. Исследовались электроды TiN и TaN, полученные методом PVD. Функциональные слои на экспериментальных образцах получались методами ALD и PEALD. Сравнительный анализ морфологии электродов и функционального слоя проводился методами профилометрии и атомно-силовой микроскопии. Наследуемость шероховатости нижнего электрода проводилась на основе средней шероховатости и ее распределения.

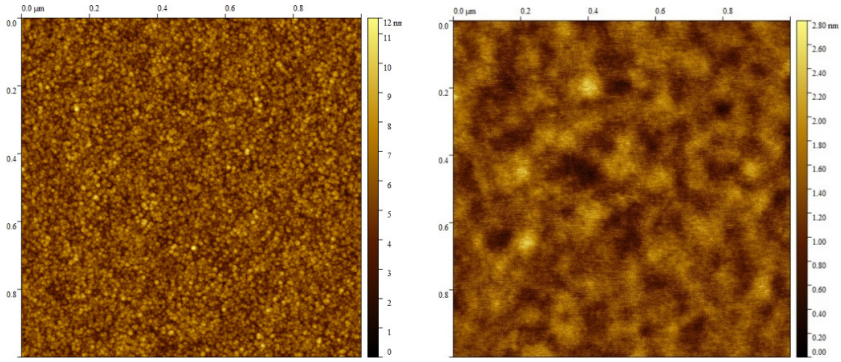
Ключевые слова: ReRAM; нижний электрод; функциональный слой; шероховатость; повторяемость; ток утечки; напряжение электроформовки.

ReRAM — тип энергонезависимой памяти, работа которого основана на переключении между высокоомным и низкоомным состояниями под действием электрического поля. Устройства памяти ReRAM отличаются высокой скоростью переключения, низким энергопотреблением и хорошей масштабируемостью, однако малой повторяемостью [1].

Устройство ReRAM представляет из себя сэндвич-структуру (электрод / функциональный слой / электрод), сопротивление которой определяется в основном функциональным слоем. Для его изготовления чаще всего используют бинарные оксиды, например HfO_2 [2]. Характеристики устройства ReRAM зависят от материалов слоев, а также от технологических параметров, в частности от шероховатости поверхности нижнего электрода. При увеличении шероховатости уменьшается напряжение электроформовки [3], но увеличивается ток утечки [4].

Методами магнетронного напыления на подложке из SiO_2 были получены пленки TiN и TaN толщинами ~50 нм. Далее на нитридные пленки были нанесены слои HfO_2 методами термического атомно-слоевого осаждения (ALD) и плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения (PEALD) толщинами ~10 нм.

На рис. 1 представлены результаты атомно-силовой микроскопии (АСМ) пластин с пленками TiN и TaN. В табл. 1 представлены значения шероховатостей соответствующих пленок. На рис. 2 приведены результаты исследования химического состава образцов. Можно заметить, что поверхность пленки TaN более гладкая, однако в ее объеме выделяется преимущественная металлическая фаза тантала, атомная доля которой больше 70%. Концентрация Ta, связанного с N, повторяет концентрацию N (рис. 2*б*), поэтому предполагается, что весь N в объеме данной

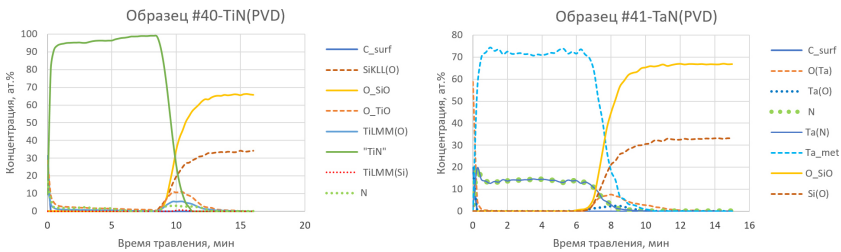


а *б*

Рис. 1. Результаты АСМ слоя TiN (*а*); результаты АСМ слоя TaN (*б*)

Таблица 1. Результаты измерения шероховатости

	Средняя шерохо-ватость по пла-стине, нм	Макси-мальная шерохо-ватость, нм	Средняя шерохо-ватость ALD слоя HfO_2, нм	Максимальная шерохо-ватость ALD слоя HfO_2, нм	Средняя ше-роховатость PEALD слоя HfO_2, нм	Максимальная шеро-ховатость PEALD слоя HfO_2, нм
TiN	0,835	9,534	0,935	11,170	0,805	9,006
TaN	0,251	2,766	0,342	4,754	0,304	4,867



а *б*

Рис. 2. Результаты оже-спектроскопии: *а*) для пленки TiN, здесь N — свободный азот; *б*) для пленки TaN, здесь N — азот, связанный с Ta, C_surf — поверхностный углерод, SiKLL(O) — кремний, связанный с кислородом, O_SiO — кислород из окисленного кремния, O_TiO — кислород из окисленного титана, TiLMM(O) — титан, связанный с кислородом, TiLMM(Si) — титан, связанный с кремнием, O_TaO — кислород из оксида тантала, Ta(O) — тантал, связанный с кислородом, Ta(N) — тантал, связанный с азотом в виде соединения TaN, Ta_met — тантал

пленки находится в соединении с Ta, таким образом, концентрация фазы TaN составляет 28 %. Пленка TiN, в свою очередь, обладает большей шероховатостью, но атомная концентрация TiN при этом составляет более 90 %, что делает электрод из TiN более подходящим для использования в устройствах ReRAM.

Результаты исследования шероховатости пленок HfO_2 представлены на рис. 3. Все полученные оксидные пленки имеют среднюю шероховатость, сопоставимую с шероховатостью нижних электродов. Слои HfO_2, полученные методами PEALD, оказались более гладкими, чем те, что получены с помощью ALD. По составу пленки HfO_2 у всех четырех образцов неоднородны и содержат избыточный кислород (рис. 4).

Представленные выше результаты позволяют сделать вывод о хорошей наследуемости шероховатости нижнего электрода функциональным слоем на основе HfO_2, образованным методами атомно-слоевого осаждения, а также о влиянии морфологии поверхности нижнего электрода на интерфейс верхнего электрода.

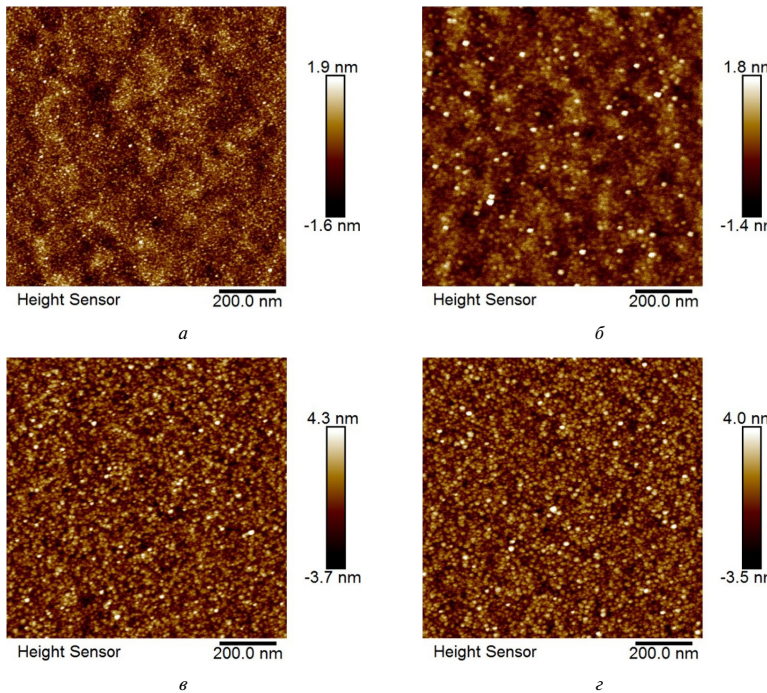


Рис. 3. Результаты АСМ слоя HfO_2 (ALD) на пленке TiN (*а*); результаты АСМ слоя HfO_2 (PEALD) на пленке TiN (*б*); результаты АСМ слоя HfO_2 (ALD) на пленке TaN (*в*); результаты АСМ слоя HfO_2 (PEALD) на пленке TaN (*г*)

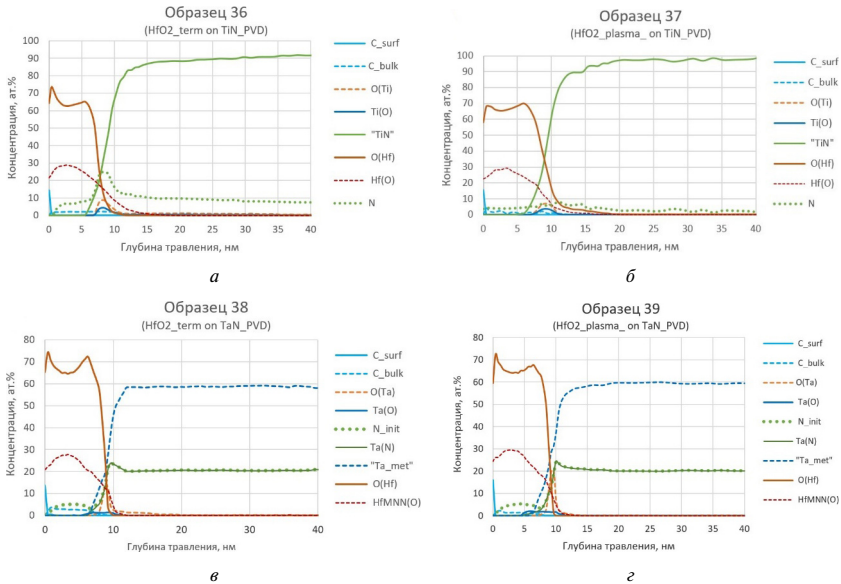


Рис. 4. Результаты оже-спектроскопии: *а*, *б*) пленки HfO_2 на TiN, здесь N — свободный азот; *в*, *г*) пленки HfO_2 на TaN, здесь N_init — азот, C_surf — поверхностный углерод, O(Ti) — кислород из окисленного титана, Ti(O) — титан, связанный с кислородом, Ta(O) — тантал, связанный с кислородом, Ta(N) — тантал, связанный с азотом в виде соединения TaN, Ta_met — тантал, O(Hf) — кислород из окисленного гафния, HfMNN(O) — гафний, связанный с кислородом

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-06000).

Литература

1. Pan F. et al. Nonvolatile resistive switching memories-characteristics, mechanisms and challenges // Progress in Natural Science: Materials International, 2010. Vol. 20. P. 1–15.
2. Feng W. et al. Investigation of switching mechanism in HfOx-ReRAM under low power and conventional operation modes // Scientific Reports, 2016. Vol. 1 (6). P. 39510.
3. Charpin-Nicolle C. et al. Impact of roughness of TiN bottom electrode on the forming voltage of HfO_2 based resistive memories // Microelectronic Engineering, 2020. Vol. 221. P. 111194.
4. Palasantzas G. et al. Surface-roughness effect on capacitance and leakage current of an insulating film // Physical review B, 1999. Vol. 60 (12). P. 9157.

УДК 621.793.162

Исследование влияния параметров образцов, полученных атомно-слоевым осаждением, на фазовый состав слоев оксидов металлов

Раводина А. М.[1,2], Зюзин С. С.[1,2], Резванов А. А.[1,2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
aravodina@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

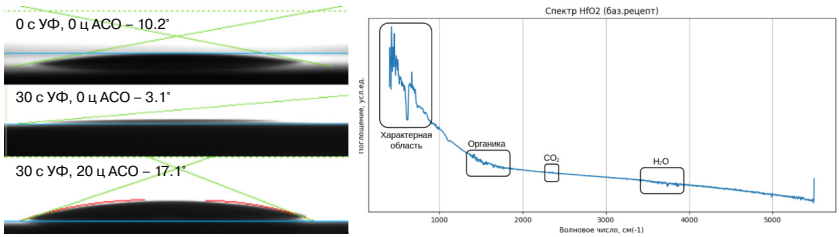
Исследовано влияние мощности плазмы, времени подачи реагентов и температуры столика на фазовый состав тонких пленок оксидов гафния и циркония, осажденных на кремниевой подложке методом АСО с учетом влияния предварительной УФ-обработки поверхности на свойства формируемого слоя. Приведены спектры образцов, полученные методом ИК-Фурье спектрометрии.
Ключевые слова: АСО; оксид гафния; оксид циркония; ИК-Фурье спектрометрия.

Одним из условий дальнейшего развития микроэлектроники является в первую очередь разработка технических приемов, позволяющих продолжить миниатюризацию электронных элементов [1]. Атомно-слоевое осаждение (сокращенно АСО) позволяет наносить на поверхности, в том числе с высоким аспектным соотношением, тонкие конформные пленки толщиной от нескольких Å до десятков нанометров, что помогает решать эту задачу.

В целях импортозамещения в области полупроводниковой промышленности появляются отечественные разработки как для производства образцов, так и для их анализа. В данной работе на поверхности кремниевых пластин, прошедших предварительную обработку, тонкие пленки оксидов металлов формируются с использованием диалкиламидных прекурсоров отечественного производства TEMAH и TEMAZ путем плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения на российской установке «Изофаз ТМ 200-01» [2], исследуются методом ИК-фурье-спектрометрии, а также анализируется контактный угол смачивания. Данные методы позволяют оперативно исследовать свойства слоя и контролировать качество образцов неразрушающим образом.

В данной работе исследованы образцы оксидов гафния и циркония, полученные методом плазмо-стимулированного атомно-слоевого осаждения в условии варьирования выбранных ключевых параметров процесса: мощности плазмы (250, 300, 500 Вт) на этапе подачи кислорода, времени подачи металлоорганического прекурсора (1, 2, 3 с) и температуры столика (250, 300, 350 °C). Перед осаждением образцы обрабатывались в УФ-озон-очистителе (от 0 до 60 с); было показано, что обработки в УФ на протяжении 30 с достаточно для образования сплошной пленки с первых циклов АСО (рис. 1*а*), и для дальнейших экспериментов было выбрано указанное время предварительной обработки поверхности. Спектры, полученные методом ИК-фурье-спектрометрии (рис. 1*б*), позволяют делать выводы о химическом

составе образца и о присутствующих типах связей. В результате анализа спектров получены следующие выводы: в пленках оксида гафния наблюдаются преимущественно моноклинная и тетрагональная фазы, в оксиде циркония — преимущественно кубическая. Данные наблюдения согласуются с другими работами в области АСО [3].



а *б*

Рис. 1. Анализ контактного угла смачивания поверхности, обработанной в УФ 0, 30, 30 с; прошедшей 0, 0, 20 циклов АСО *а*); полный ИК-фурье-спектр оксида гафния, полученный методом ИК-фурье-спектрометрии (*б*)

Литература

1. Алябьев А. Ю. Применение технологии атомно-слоевого осаждения оксида гафния в производстве элементов электронной компонентной базы // Информатика, телекоммуникации и управление, 2015. — № 4 (224). — С. 51–58.
2. Одиноков В. В. и др. Установка Изофаз ТМ 200-01 для термического и плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения Al_2O_3 // Электроника и микроэлектроника СВЧ, 2019. — Т. 1. — № 1. — С. 10–14.
3. Kersch A., Ganser R., Trien M. Simulation of XRD, Raman and IR spectrum for phase identification in doped HfO_2 and ZrO_2 (Supplementary Material) // Frontiers in Nanotechnology, 2022. Vol. 4. P. 1026286.

УДК 537.523.4

Исследование зависимости сопротивления проводящих никелевых дорожек от количества линий и от температуры

Санатулина А. Ф., Новоселов А. К., Лизунова А. А.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследованы проводящие свойства дорожек из наночастиц никеля, полученных методом сухой аэрозольной печати на подложках из стекла, в зависимости от количества наносимых слоев и от температуры спекания.
Ключевые слова: наночастицы никеля; сухая аэрозольная печать; проводящие дорожки; газовый разряд.

Благодаря широкой распространенности в природе никель является экономически выгодным материалом, а наночастицы никеля и его оксида имеют различные области применения, например, в суперконденсаторах, электродах литий-йонных батарей, катализаторах, биосенсорах [1]. Синтезировать такие наночастицы можно методом импульсно-периодического газового разряда, соединенного с установкой для сухой аэрозольной печати, что позволяет быстро получать дорожки из наночастиц на твердых и гибких подложках [2]. Поэтому целью данной работы является изучение зависимости сопротивления дорожек из наночастиц никеля, синтезированных в газовом разряде, от температуры и количества напечатанных слоев на дорожке.

В ходе работы был проведен синтез наночастиц с использованием газового разряда при таких условиях: поток газа 300 мл/мин; напряжение 1,5 кВ; конденсатор 107 нФ, с дальнейшей аэрозольной печатью при различных параметрах на подложках из чистых кварцевых стекол. Скорость движения подложки относительно сопла составляла 100 мкм/с. Расстояние от сопла до подложки было 2,5 мм. На подложку наносились дорожки, состоящие от одного до пяти слоев. На края дорожек наносилась серебряная паста в качестве электродов. Далее полученные дорожки постепенно отжигались до температуры 100 °C. Сопротивление измерялось с помощью мультиметра True RMS Agilent U1272A.

На рис. 1*а* показана зависимость сопротивления дорожки от количества нанесенных последовательно слоев. Видно, что сопротивление экспоненциально растет от 5,1 до 100,0 МОм с увеличением количества слоев от 1 до 5. На рис. 1*б* для каждой дорожки представлена зависимость сопротивления от температуры спекания. Обнаружено, что независимо от количества слоев сопротивление дорожки растет экспоненциально с увеличением температуры обработки. Так, при увеличении температуры от 23 до 100 °C для однослойной дорожки ее сопротивление растет с 4,8 до 30,0 МОм, а для дорожки в два слоя сопротивление растет с 15,3 до 95,0 МОм. С учетом измерения трехмерной геометрии дорожек методом профилометрии с использованием прибора Sensofar S neox optical profilometer были рассчитаны удельные сопротивления полученных материлов. Оказалось, что удельное сопротивление составляет порядка 10^5–10^7 Ом·см для дорожек с разным количеством слоев при температуре 23 °C.

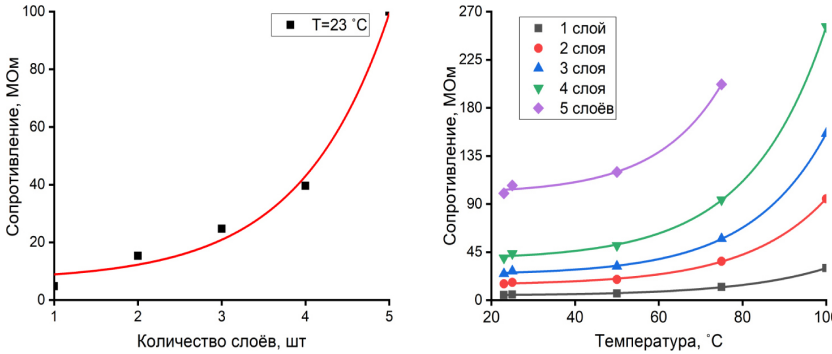


Рис. 1. Зависимость сопротивления от количества слоев (*а*), зависимость сопротивления от температуры (*б*)

Таким образом, методом сухой аэрозольной печати были получены дорожки из наночастиц никеля шириной порядка 300 мкм и длиной порядка 4000 мкм с разным количеством слоев — от одного до пяти, которые спекались при различных температурах до 100 °C. Выявлено, что удельное сопротивление материала дорожек можно варьировать от 0,4 до 32,0 МОм·см, регулируя параметры температурной обработки и высоты материала. При этом удельное сопротивление экспоненциально растет с 0,4 до 12,5 МОм·см с увеличением количества слоев с 1 до 5.

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-560.

Литература

1. Zhang L. et al. Nickel-based materials for supercapacitors // Materials Today, 2019. Vol. 25. P. 35–65.
2. Efimov A. A. et al. Investigation of sintering of silver lines on a heated plastic substrate in the dry aerosol jet printing // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. Vol. 1124. P. 081041.

УДК 621.3

Исследование характеристик жидких полупроводниковых материалов для создания печатных полевых транзисторов

Ульянова М. И.[1], Резник А. Ю.[2], к. т. н., Винник Д. А.[3], к. т. н., Лизунова А. А.[3]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] АО «МИКРОН»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Проведено исследование жидких полупроводниковых материалов IGZO, пригодных для создания тонкопленочных транзисторов методами печати. Представлены результаты экспериментального анализа транзисторных структур на основе IGZO, включая измерения подвижности зарядов и токов стока.
Ключевые слова: печатная электроника; IGZO; тонкопленочный транзистор; подвижность зарядов.

Стремительное развитие области печатной электроники обусловливает необходимость создания материалов с заданными электрофизическими характеристиками.

В ходе работы были выполнены исследования электрических и электрофизических характеристик полученных образцов транзисторных структур с каналом на основе оксида индия — галлия — цинка (IGZO), выполненных печатными методами. В частности, были проведены измерения подвижности носителей и проводимости образцов, также были проанализированы вольт-амперные характеристики (рис. 2, 3) полученных структур (рис. 1*а*, *б*). В результате проведенных экспериментов были получены электрические характеристики образцов тонкопленочных транзисторов при различных условиях термической обработки.

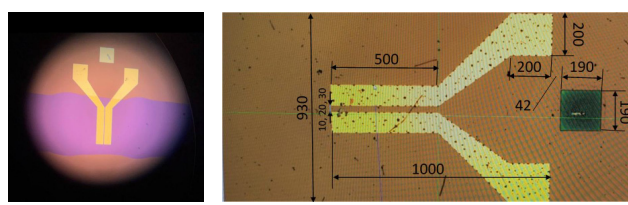


Рис. 1. Фото образца (*а*); топология образца (*б*)

Сравнение полученных характеристик с желаемыми значениями для печатного транзистора показывает, что подвижность существенно уступает целевым параметрам. Для канала шириной 60 нм желаемая подвижность составляет $\mu = 10^1$–10^2 см^2/(В·с), тогда как экспериментально была достигнута лишь $19 \cdot 10^{-4}$ см^2/(В·с). Для канала 15 нм наблюдается аналогичная картина: вместо требуемых 10^1–10^2 см^2/(В·с) получено $2{,}7 \cdot 10^{-4}$ см^2/(В·с). Ток стока также оказался ниже желаемого диапазона, составляя 10^{-7}–10^{-9} А при целевом значении $I_{ds} = 10^{-4}$–10^{-5} А. В то же время диапазон включения/выключения оказался даже выше ожидаемого: при

требуемом I_{on}/I_{off} порядка 10^3 были достигнуты значения $5{,}5 \cdot 10^3$ для канала 60 нм и $4{,}3 \cdot 10^4$ для канала 15 нм. Таким образом, несмотря на недостаточную подвижность и меньший ток стока, полученные транзисторы демонстрируют хорошие характеристики переключения, что указывает на перспективность дальнейших оптимизаций.

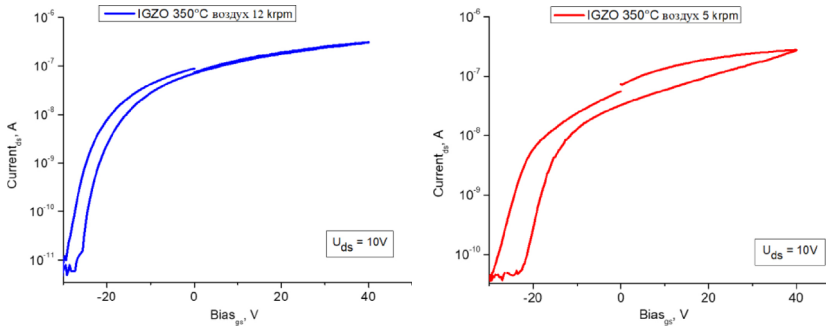
Таблица 1. Электрические характеристики образцов IGZO и IsoSol

Образец	VG (В)	Длина канала, нм	Подвижность μ, $м^2/В{\cdot}с$	I_{on}/I_{off}
IGZO-7	20	10	$1{,}039 \cdot 10^{-6}$	$3{,}63 \cdot 10^4$
IGZO-7	20	20	$2{,}324 \cdot 10^{-6}$	$1{,}11 \cdot 10^4$
IGZO-7	20	30	$4{,}700 \cdot 10^{-6}$	$2{,}57 \cdot 10^3$
IGZO-7	20	5	$-4{,}936 \cdot 10^{-2}$	—
IGZO-7	20	10	$-3{,}924 \cdot 10^{-3}$	—
IGZO-7	20	20	$-1{,}217 \cdot 10^{-3}$	—
IsoSol	10	10	$8{,}353 \cdot 10^{-7}$	$2{,}48 \cdot 10^4$
IsoSol	10	20	$1{,}908 \cdot 10^{-6}$	$1{,}19 \cdot 10^4$
IsoSol	10	30	$3{,}355 \cdot 10^{-6}$	$1{,}83 \cdot 10^3$
IsoSol	10	5	$-8{,}353 \cdot 10^{-7}$	—
IsoSol	10	10	$-1{,}908 \cdot 10^{-6}$	—
IsoSol	10	20	$-3{,}355 \cdot 10^{-6}$	—

Сравнение подвижности в транзисторах на основе IGZO и IsoSol выявляет принципиальные различия в механизмах переноса заряда. Для IGZO подвижность стабильно возрастает как с увеличением напряжения на затворе, так и с длиной канала, однако остается в пределах, характерных для аморфных оксидных полупроводников. Это указывает на ограниченную эффективность переноса, связанную с ловушками и низкой концентрацией носителей заряда.

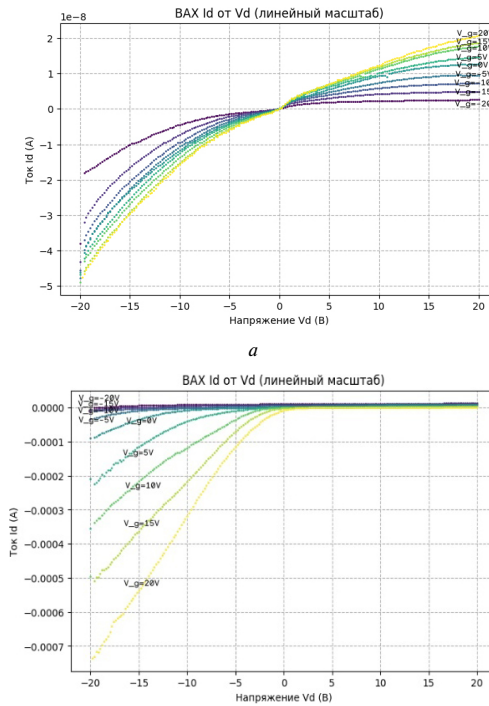
В противоположность этому проводимость образцов IsoSol оказывается значительно выше — на 3–5 порядков по сравнению с IGZO, особенно при высоком напряжении затвора и коротком канале. Такое поведение отражает особенности нанотрубочных структур, в которых уменьшение длины канала способствует росту подвижности по модулю за счет уменьшения вероятности разрывов в проводящей сети. Это подчеркивает потенциал IsoSol как материала для высокопроводящих печатных каналов, особенно в условиях, обеспечивающих формирование эффективной проводящей связи.

Несмотря на симметричную топологию исследуемых структур, прямые измерения токов через каждый из электродов (сток и исток) показали выраженную асимметрию, связанную с различием величин барьеров Шоттки на контактах. Токи, протекающие через разные контакты, отличались в 3–4 раза, что свидетельствует о наличии неэквивалентных зон контакта металл — полупроводник. Данное явление обусловлено морфологическими и технологическими особенностями: вариациями состава, локальными дефектами, неоднородной адгезией или неровностями поверхности в области формирования контактов.



а *б*

Рис. 2. Входные ВАХ транзистора с полупроводниковым каналом: IGZO, длина канала 15 и 60 мкм



а

б

Рис. 3. Выходные ВАХ для транзистора с длиной канала 10 и 20 мкм

Предположительно присутствие ловушек в подзатворном диэлектрике является устойчивым проявлением гистерезиса в передаточных характеристиках. Захваченные ловушками носители заряда изменяют распределение электрического поля в канале, что влияет на форму и воспроизводимость ВАХ при изменении полярности напряжения на затворе.

Полученные результаты демонстрируют актуальность комплексной оценки контактов и диэлектрических свойств при разработке печатных транзисторов. Предложенные методики позволяют выработать направления по повышению стабильности, надежности и энергоэффективности работы устройств.

Литература

1. Cardenas J. A. et al. Impact of Morphology on Printed Contact Performance in Carbon Nanotube Thin-Film Transistors // Advanced Functional Materials, 2019. Vol. 29. P. 1805727.
2. Liu F. et al. Focused review on print-patterned contact electrodes for metal-oxide thin-film transistors // Advanced Materials Interfaces, 2023. № 10 (7).
3. Efimov A. et al. Aerosol jet printing of silver lines with a high aspect ratio on a heated silicon substrate // Materials, 2020. Vol. 13. № 3. P. 730.

УДК 621.383

Влияние способа формирования слоя коллоидных квантовых точек халькогенидов ртути на характеристики гетероперехода и конечного фотодиода

Хакимов К. Т.[1], Королева Т. В.[1], Миленкович Т.[1], Сапцова О. А.[1], Яковлев В. О.[1], Попов В. С.[1,2]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Karim.Khakimov@gmail.com
[2] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9

Экспериментально показано, что различные способы формирования пленок будут влиять на свойства гетероперехода и на конечные свойства фотодиода. В данной работе рассматривается ряд подходов формирования диодных структур и их влияние на оптические и фотоэлектрические свойства гетеропереходов и фотодиодов на их основе.

Ключевые слова: коллоидные квантовые точки; селенид ртути; теллурид ртути; замена лигандов; послойная замена лигандов; вольт-амперная характеристика.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) — новый материал, особенности которого позволяют применять его не только в качестве источника люминесценции, но и как фоточувствительный материал. В зависимости от размера и материала ККТ будут чувствительны к инфракрасному излучению в различных областях спектра. На сегодняшний момент серийно выпускаются матричные фотоприемники на основе ККТ, способные регистрировать коротковолновое инфракрасное излучение [1, 2], однако исследования и разработки приборов, способных регистрировать в средневолновом и длинноволновом диапазонах, еще ведутся [3]. На данный момент существует несколько материалов, потенциально возможных для применения в MWIR-фотодетекторах: HgTe, HgSe, HgS, Ag_2Se [3, 4].

Для создания фотодетекторов, чувствительных в средневолновом и длинноволновом ИК-диапазонах, можно использовать ККТ на основе HgTe и HgSe [5, 6]. Преимущество HgSe заключается в том, что в нем возможны внутризонные переходы, которые позволяют добиться поглощения в средневолновом и длинноволновом инфракрасном диапазоне [4]. Преимущество HgTe заключается в том, что его коллоидный раствор, который используется для создания слоя на матрицах, обладает отличительной агрегативной стабильностью. HgSe и HgTe имеют разную ширину запрещенной зоны, поэтому на их основе возможно создание гетероперехода.

Процесс получения подобного гетероперехода включает в себя синтез ККТ HgSe и HgTe и их нанесение на подложку с контактными площадками методом спинкоутинга (центрифугирования) и дипкоутинга. В ходе работы разработаны способы формирования фоторезистивных слоев при помощи послойной и гибридной замены лигандов, а также способы получения гетероперехода. Метод послойной замены заключается в последовательном нанесении очищенного раствора ККТ

на область формирования сигнала с заменой лигандов на каждом слое. Метод гибридной замены предполагает последовательную замену лигандов на более короткие сперва в растворе ККТ, затем непосредственно на поверхности подложки. Процесс замены лигандов в растворе основывался на модифицированной методике, приведенной в работе [7].

Методы формирования структур с энергетическим барьером включали в себя два общих способа: формирование слоистой структуры из ККТ HgTe и ККТ HgSe, а также формирование слоистой структуры только из ККТ HgTe либо ККТ HgSe, обладающих отличными друг от друга свойствами. ККТ HgTe отличались друг от друга как размером, так и типом проводимости (дырочная/электронная). ККТ HgSe отличались друг от друга только размером.

От выбора способа формирования барьерных структур зависели оптические и электрофизические свойства полученного впоследствии фотодиода. В данном исследовании рассмотрено влияние различных способов формирования гетероперехода на электрофизические свойства фотодиода

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FSMG-2025-0024.

Литература

1. Попов В. С., Пономаренко В. П., Попов С. В. Гибридно-монолитные ИК-матрицы на основе коллоидных квантовых точек и 2D-материалов // Прикладная физика, 2023. — № 6. — С. 45–53. DOI: 10.51368/1996-0948-2023-6-45-53.
2. Попов В. С., Пономаренко В. П., Дирочка А. И., Попов С. В. Фотосенсорика инфракрасного диапазона на основе гибридно-монолитных матриц на квантовых точках // Прикладная физика, 2024. — № 6. — С. 54–61. DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-54-61.
3. Пономаренко В. П., Попов В. С., Шуклов И. А. и др. Фотосенсоры на основе коллоидных квантовых точек // Успехи химии, 2024. — Т. 93. — № 4. — С. RCR5113. DOI: 10.59761/RCR5113.
4. Lhuillier E., Guyot-Sionnest P. Recent Progresses in Mid Infrared Nanocrystal Optoelectronics // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 2017. Vol. 23. № 5. P. 1–8. DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2690838.
5. Lhuillier E. et al. Infrared Photodetection Based on Colloidal Quantum-Dot Films with High Mobility and Optical Absorption up to THz // Nano Lett., 2016. Vol. 16. № 2. P. 1282–1286. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b04616.
6. Попов В. С., Миленкович Т., Хакимов К. Т. и др. Чувствительность фоторезисторов на основе коллоидных квантовых точек HgTe в коротковолновом и средневолновом диапазонах инфракрасного спектра при комнатной температуре // Прикладная физика, 2024. — № 6. — С. 47–53. DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-47-53.
7. Xue X. et al. High-operating-temperature mid-infrared photodetectors via quantum dot gradient homojunction // Light: Science & Applications, 2023. Vol. 12. № 2. P. 1–11. DOI: 10.1038/s41377-022-01014-0.

УДК 621.3.035.22

Исследование электрофизических свойств углеродсодержащих паст в токопроводящих каркасах для суперконденсаторов

Жукова Д. Н., Морозов М. В., к. т. н.
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ
420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10
zhuckovadarja@yandex.ru

В данной работе проведено комплексное исследование электрофизических свойств углеродсодержащих паст, предназначенных для использования в токопроводящих каркасах суперконденсаторов. Основное внимание уделено определению оптимального состава пасты на основе различных углеродных материалов.

Ключевые слова: токопроводящие пасты; электрофизические свойства; углеродные материалы; электрод; суперконденсатор.

Суперконденсаторы являются перспективными устройствами для накопления энергии благодаря высокой мощности, быстрой зарядке и длительному сроку службы. Тип электролита и материал электрода определяют характеристики суперконденсатора [1]. Исследование материалов суперконденсаторов в основном разделяется на изучение электродных и электролитных материалов, сепараторов и коллекторов.

Различные типы углеродных электродных материалов включают активированный уголь, графен и углеродные нанотрубки [2]. Активированного угля достаточно для электродов конденсатора с двойным электрическим слоем, хотя его электропроводность значительно ниже, чем у металлов.

Суперконденсаторы имеет много преимуществ в приложениях с высокой плотностью мощности, где требуется много циклов зарядки-разрядки или более длительный срок службы. Они используются в ветряных турбинах, электронных устройствах и различных промышленных областях [3].

В данной работе электроды были изготовлены из следующих компонентов:

3) углеродные материалы (активированный уголь, пенографит, сажа);
4) растворитель (дистиллированная вода);
5) связующее (поливиниловый спирт);
6) пеноникель (токопроводящая основа).

Изготовление углеродсодержащей пасты:

1) в водный раствор ПВС добавить активированный уголь и перемешать до образования однородной суспензии;
2) медленно ввести сажу/пенографит при постоянном перемешивании;
3) выпарить избыток воды при 60–80 °C до получения вязкой пастообразной консистенции;
4) нанести пасту на пеноникель;
5) высушить при температуре 80–100 °C в течение часа для удаления остаточной влаги.

В табл. 1 представлены характеристики углеродной пасты с добавлением разной концентрации сажи.

Таблица 1. Характеристики паст с добавлением сажи

	S, см^2	d, мм	$m_{акт}$, г	R, Ом
АУ	1,79	1,7	0,06	140
Сажа 5%	1,92	1,66	0,02	95
Сажа 10%	1,79	1,8	0,08	87,5
Сажа 30%	1,85	1,9	0,14	50

В табл. 2 представлены характеристики углеродной пасты с добавлением разной концентрации пенографита.

Таблица 2. Характеристики паст с добавлением пенографита

	S, см^2	d, мм	$m_{акт}$, г	R, Ом
ПГ 2%	1,83	2	0,1	118
ПГ 3%	1,495	2,2	0,08	83,3
ПГ 7%	1,473	1,7	0,09	16,7

Выводы:

- для электродов с сажей наилучшие электрофизические характеристики достигнуты при содержании 30% (сопротивление 50 Ом);
- для электродов с пенографитом оптимальным оказалось содержание 7% (минимальное сопротивление 16,7 Ом);
- добавка сажи обеспечивает более равномерное распределение активного материала;
- пенографит формирует выраженную 3D-проводящую сетку, что объясняет его преимущество в проводимости;
- выявлен порог содержания добавок (30% для сажи, 10% для пенографита), после которого ухудшаются механические свойства.

Литература

1. Naoi K., Simon P. New Materials and New Configurations for Advanced Electrochemical Capacitors // Electrochem. Soc. Interface, 2008. P. 34–37.
2. Khalid M. A review on the selected applications of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for microgrids // Energies, 2019. P. 38.
3. Matron L. S. LS Ultracapacitor, LS Materials: Gyeonggi-do, Korea, 2016. 26
4. Bottu M., Crow M., Atcitty S. A power electronic conditioner using electrochemical capacitors to improve wind turbine power quality // Proceedings of the NURER Conference. Istanbul, Turkey, 20–23 May 2012. P. 250–262.

УДК 621.315.592, 621.9.048.7

Применение ионной имплантации для модификации параметров приборов на основе микро- и наноструктур (на примере оксидных мемристоров)

Окулич Е. В.[1], к. ф.-м. н. Окулич В. И.[2], д. ф.-м. н. Тетельбаум Д. И.[1], к. ф.-м. н. Михайлов А. Н.[1]

[1] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
eokulich@nifti.unn.ru
[2] НИУ филиал РАНХиГС
603950, г. Н. Новгород, просп. Гагарина, 46

Представлены результаты применения ионной имплантации для улучшения параметров мемристоров на основе перспективных материалов SiO_2 и $ZrO_2(Y)$. Исследования проводились для широкого спектра ионов — от H^+ до Xe^+.

Ключевые слова: ионная имплантация; мемристоры; оксид кремния; стабилизированный диоксид циркония.

Ионная имплантация является хорошо изученным методом модификации свойств материалов. В данной работе представлены результаты ее применения для улучшения параметров мемристорных устройств, которые, как известно, обладают некоторыми недостатками, основным из них является плохая воспроизводимость параметров резистивного переключения от структуры к структуре и от цикла к циклу. Для решения этой проблемы предложено два варианта: 1) формирование контролируемых дополнительных концентраторов электрического поля на границе между электродами и рабочим слоем (диэлектриком) структуры; 2) введение примесных атомов и/или дефектов в диэлектрик с контролемих распределения (в трех измерениях) путем выбора вида ионов, их энергии и дозы. При реализации идеи использования ионного облучения для управления параметрами мемристивных устройств в качестве объектов исследования были выбраны структуры на основе диоксида кремния SiO_2 и стабилизированного иттрием диоксида циркония $ZrO_2(Y)$, поскольку они относятся к числу наиболее перспективных материалов. Исследования проводились для широкого спектра ионов — от H^+ до Xe^+.

С использованием программы SRIM на примере ионов водорода и неона показано, что основной вклад в дефектообразование мемристивных структур вносят более тяжелые ионы [1]. Предложена и реализована методика расчета максимальной дозы ионов, необходимой для создания изолированных (неперекрывающихся) каскадов смещения. Это обеспечивает контролируемое создание концентраторов электрического поля при формовке филаментов в мемристорах, что должно приводить к повышению воспроизводимости и снижению разброса их параметров. Экспериментально установлено, что облучение мемристивных структур на основе SiO_2 ионами Xe^+ с рассчитанной по этой методике дозой не только снижает разброс параметров мемристоров, но и повышает отношение сопротивлений в высокоомном и низкоомным состояниях [2]. Показано, что облучение пленок оксида кремния и стабилизированного иттрием диоксида циркония ионами Si^+ приводит к значительному улучшению параметров мемристоров, созданных на базе этих пленок [3].

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах», и гос. задания № FSWR-2025-0006.

Литература

1. Белов А. И., Михайлов А. Н., Королев Д. С., Сергеев В. А., Окулич Е. В. и др. Влияние облучения ионами H+ и Ne+ на резистивное переключение в мемристивных структурах «металл — диэлектрик — металл» на основе SiO_x // Письма в Журнал технической физики, 2015. — Т. 41. — № 19. — С. 81–89.
2. Mikhaylov A. N., Belov A. I., Korolev D. S., Gerasimova S. A., Antonov I. N., Okulich E. V., Shuiskiy R. A., Tetelbaum D. I. Effect of ion irradiation on resistive switching in metal-oxide memristive nanostructures // J. Phys.: Conference Series, 2019. Vol. 1410. P. 012245.
3. Окулич Е. В., Коряжкина М. Н., Королев Д. С., Белов А. И., Шенина М. Е., Михайлов А. Н., Тетельбаум Д. И., Антонов И. Н., Дудин Ю. А. Влияние облучения ионами Si+ на резистивное переключение мемристивных структур на основе стабилизированного диоксида циркония // Письма в ЖТФ, 2019. — Т. 45. — № 14. — С. 3–6.

Методы постростовой обработки гетероструктур при изготовлении фотоэлектрических преобразователей солнечного и лазерного излучения

Романчук А. К., к. ф.-м. н. Малевская А. В., к. ф.-м. н. Калюжный Н. А., к. ф.-м. н. Солдатенков Ф. Ю., Нахимович М. В., к. ф.-м. н. Шварц М. З.
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Разработаны фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) лазерного и солнечного излучений. Описаны этапы формирования антиотражающих покрытий, омических контактов и периферийных мезаобластей. Проведен анализ характеристик ФЭП, предложены методы снижения оптических и омических потерь.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи; омические контакты; оптические потери.

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) солнечного и лазерного излучений находят широкое применение в различных областях науки и техники в качестве источников альтернативной энергии и в системах для беспроводной передачи энергии и сигналов [1, 2].

Разработка ФЭП включает в себя комплекс взаимосвязанных технологических этапов обработки гетероструктур, к которым относится формирование антиотражающих оптических покрытий, омических контактов, разделительной мезаструктуры с последующим разделением пластины на отдельные элементы.

Выполнены исследования этапов постростовой обработки GaInP/GaInAs/Ge- и AlGaAs/GaAs-гетероструктур при изготовлении ФЭП солнечного и лазерного излучения. Рассмотрены различные типы антиотражающих покрытий: двуслойные (TiO_x/SiO_2) и однослойные (TiO_x), которые в свою очередь обеспечивают дополнительную пассивирующую (защитную) функцию для периферийных областей ФЭП. При формовании токопроводящих шин на поверхности ФЭП рассматривались контактные системы на основе комбинаций материалов AuGe/Ni/Au, Pd/Ge/Au n-типа проводимости и NiCr/Ag/Au p-типа с электрохимическим утолщением золотом или серебром.

Основным источником оптических потерь из-за затенения фоточувствительной поверхности является контактная сетка. Разработан метод гальванического усиления контактов серебром, при котором исключается их «разрастание» на фоточувствительную поверхность при значительном увеличении толщины токопроводящей шинки на 1–2 мкм. При этом увеличивается площадь поперечного сечения контакта, что позволяет пропускать бóльшие значения тока при малых омических потерях мощности.

Дополнительное снижение оптических потерь возможно с помощью призматических покрытий, представляющих собой матрицу из полуцилиндрических полнотелых линейных линз с шириной основания каждой линзы, соответствующей шагу контактной сетки ФЭП [3]. Такие покрытия обеспечивают отклонение

световых лучей, направляемых в область металлического контакта, к фотоприемной поверхности ФЭП, способствуя повышению фототока и КПД приборов.

Проведен анализ фотоэлектрических характеристик полученных приборов. Внешний квантовый выход фотоответа и фототок ФЭП солнечного излучения увеличились на 1–2 % за счет контроля ширины контактов (при ограничении их «разрастания»). Использование призматического покрытия для ФЭП лазерного излучения позволило снизить затенение поверхности и повысить значение внешнего квантового выхода фотоответа с 75,3 до 84,5 %. Показан потенциал приборов при работе в лазерным (809 нм) излучением высокой (выше 30 Вт/см^2) плотности с регистрацией КПД более 57 %.

На основе полученных данных определены оптимальные материалы и режимы постростовой обработки гетероструктур при создании ФЭП солнечного и лазерного излучения, обеспечивающие повышение эффективности приборов за счет снижения оптических и омических потерь.

Литература

1. Yamaguchi M. et al. Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency // Journal of Applied Physics, 2021. Vol. 129. № 24.
2. Zheng Y. et al. Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges // Space Solar Power and Wireless Transmission, 2024. DOI: 10.1016/j.sspwt.2023.12.001.
3. Boca A., Edmondson K. M., King R. R. Prismatic covers for boosting the efficiency of high-concentration PV systems // 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). IEEE, 2009. P. 000131–000136.

УДК 621.382.032.27

Разработка технологии изготовления электродов на основе графеновых нанотрубок

Карпович А. Е., Бодяго Е. В.
Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А

В данном исследовании проводится изучение свойств графеновых нанотрубок при их диспергировании в различных полимерных средах в целях получения проводящих покрытий для изготовления электродов. Проведено исследование характеристики самих дисперсий и светоизлучающих устройств с их применением.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; графеновые нанотрубки; чернила графеновых нанотрубок; материалы электродов; электроника; печатная электроника; новые материалы электроники.

Углеродные нанотрубки (УНТ) благодаря высокой электропроводности и механическим свойствам перспективны для гибких прозрачных электродов [1–3]. Они превосходят ITO и металлические пленки по технологичности, позволяя производить нанесение из растворов простыми методами печати. ITO, хотя и прозрачен (до 90%), хрупок и требует высоких температур, а металлические пленки (60–70% прозрачности) не нашли коммерческого применения. УНТ CVD-метода обладают высокой проводимостью и прочностью, но сложны в масштабировании, тогда как УНТ-чернила, будучи гибкими и технологичными, уступают в прозрачности и однородности.

Известно несколько способов производства УНТ, различающихся выходом и формой конечного продукта: применение электрического дугового разряда [4], лазерной абляции [5], химическое осаждение из газовой фазы [6] и выращивание УНТ в плазмохимическом реакторе [7]. УНТ, выращенные методом химического осаждения, являются менее дефектными, так как во время синтеза возможно осуществлять контроль параметров синтеза. Но, несмотря на высококачественный конечный продукт и ряд научных исследований по получению прозрачных тонких волокон УНТ, дальнейшее применение данного материала в масштабах производства электроники остается под вопросом ввиду ограниченного объема продукта и необходимости рассмотрения ряда дополнительных этапов, связанных с переносом материала с одной подложки на другую, что влечет за собой изменение производственного цикла и, как следствие, экономические издержки.

Метод с использованием плазмохимического реактора для получения УНТ основан на их выращивании на наночастицах катализатора, испаряемого в камере при постоянной подаче с углеводородом. Этот метод эффективен для массового производства, но УНТ обладают высокой гидрофобностью, что приводит к кластеризации и затрудняет их диспергирование. Такие УНТ применяют как добавку в композиты для упрочнения в аэрокосмической отрасли или в электроды аккумуляторов для улучшения проводимости и механических свойств. Однако, несмотря на перспективность использования в качестве самостоятельного материала электрода, такие технологии пока мало представлены.

Настоящее исследование посвящено разработке УНТ-чернил для электродов путем химической обработки в полимерных растворах. Технология совместима с существующими производственными линиями, заменяя серебряные и медные чернила. Углеродные электроды сочетают легкость, гибкость, механическую прочность и превосходный теплоотвод без риска коррозии, что критично для гибкой электроники.

В работе изучены растворители и полимерные матрицы для диспергирования УНТ, исследованы физико-электрические свойства полученных чернил. Результаты формируют научно-технологическую базу для создания новых материалов современной электроники, включая гибкие и носимые устройства.

Литература

1. Bodiago E. V. et al. Transparent light-emitting electrochemical cells with acid treated multi-wall carbon nanotubes as a top electrode // Journal of Alloys and Compounds, 2023. Vol. 968. P. 172201.
2. Matyba P. et al. Flexible and metal-free light-emitting electrochemical cells based on graphene and PEDOT-PSS as the electrode materials // Acs Nano, 2011. Vol. 5. № 1. P. 574–580.
3. Yu Z. et al. Fully bendable polymer light emitting devices with carbon nanotubes as cathode and anode // Applied Physics Letters, 2009. Vol. 95. № 20.
4. Sari A. H., Khazali A., Parhizgar S. S. Synthesis and characterization of long-CNTs by electrical arc discharge in deionized water and NaCl solution // International Nano Letters, 2018. Vol. 8. P. 19–23.
5. Arepalli S. Laser ablation process for single-walled carbon nanotube production // Journal of nanoscience and nanotechnology, 2004. Vol. 4. № 4. P. 317–325.
6. Lee C. J. et al. Large-scale production of aligned carbon nanotubes by the vapor phase growth method // Chemical Physics Letters, 2002. Vol. 359. № 1–2. P. 109–114.
7. Предтеченский М. Р., Тухто О. М., Коваль И. Ю. Способ получения углеродных нанотрубок и реактор (варианты), 2013.

УДК 548.732

Ионно-пучковые методики изготовления подложек зеркал проекционного объектива ЭУФ-литографа на длину волны 11,2 нм

Михайленко М. С., Оськин И. Д., Пестов А. Е., Торопов М. Н., Чернышев А. К., Чхало Н. И., д. ф.-м. н.
Институт физики микроструктур РАН
603087, Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афонино, ул. Академическая, 7
mikhaylenko@ipmras.ru

В ИФМ РАН развиваются методики ионно-пучковой коррекции формы оптических элементов с прецизионной точностью. С помощью развитых методов возможно получение асферических подложек зеркал оптических элементов для проекционного объектива лабораторного стенда литографа на длину волны 11,2 нм с расчетным пространственным разрешением на уровне 40 нм.
Ключевые слова: ионное травление; литография; ионно-пучковая обработка; ЭУФ-литография.

В последнее время в России вырос интерес к проекционной ЭУФ-литографии на длине волны 11,2 нм. Короткая длина волны излучения накладывает жесткие требования на качество оптических элементов системы. Для достижения пространственного разрешения в соответствии с дифракционным пределом Рэлея необходимо, чтобы точность формы была менее 0,8 нм по среднеквадратичному отклонению от расчетной. Так как в ЭУФ-диапазоне длин волн в качестве отражающих покрытий применяются многослойные интерференционные покрытия с теоретическими приделами коэффициентов отражения на уровне 70%, то для обеспечения максимального значения коэффициента отражения необходимо, чтобы шероховатость поверхности в диапазоне пространственных частот от 10^{-3} до 10^{1} мкм$^{-1}$ была лучше 0,3 нм.

Достижение таких параметров возможно только с применением технологии ионно-пучковой коррекции формы поверхности. В ИФМ РАН активно развиваются методики асферизации, коррекции локальных ошибок формы и полировки поверхности пучками ускоренных ионов. Данные методики позволяют уже сейчас достигать субнанометрых точностей формы по среднеквадратичному отклонению от расчетных с эффективной шероховатостью менее 0,3 нм. В работе рассказывается о методиках ионно-пучковой коррекции формы поверхности для получения осесимметричных асферических поверхностей из плавленого кварца и монокристаллического кремния. Отдельное внимание уделено подбору параметров пучка ускоренных ионов перед проведением процедуры коррекции формы.

В работе показаны все этапы ионно-пучковой обработки поверхности подложек зеркал проекционного объектива лабораторного стенда литографа на длину волны 11,2 нм. В результате обработки волновые абберации проекционного объектива составили 0,86 нм при эффективной шероховатости поверхности в диапазоне пространственных частот 0,049–63,5 мкм$^{-1}$ менее 0,3 нм. Расчетное пространственное разрешение ≈40 нм.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-30029.

Пространственные измерения зондовым методом параметров HBr/Cl_2 плазмы в индустриальном TCP-реакторе травления poly-Si

Глотов А. В.[1], Лопаев Д. В.[1], Шибанов Д. Р.[1], Гиниятуллин Р. М.[2]
[1] НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова
119234, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

Исследовано радиальное распределение параметров низкотемпературной индуктивно связанной (ICP) 13,56 МГц плазмы в индустриальном реакторе плазмохимического травления poly-Si в смеси HBr/Cl_2 на пластине 300 мм. Измерения выполнялись подвижным ВЧ компенсированным зондом Ленгмюра.
Ключевые слова: диагностика плазмы; зондовая диагностика; электронная плотность плазмы; электроотрицательность плазмы.

В современной кремниевой технологии в индустриальных плазменных реакторах, использующих большие пластины (300 мм), выдвигаются высокие требования к однородности параметров плазмы. Исследования однородности плазмы в реальных процессах встречаются редко, хотя потребность в них на этапе отладки технологии очень высока.

В АО «НИИМЭ» тестируется индустриальный TCP-реактор российской разработки для плазменного травления poly-Si на пластине 300 мм. В рецепте травления используется смесь $HBr/Cl_2 = 3/1$ при давлении 0,8–2,8 Па, ICP-мощность — до 1600 Вт, мощность ВЧ-смещения на пластине — до 600 Вт. В условиях данного процесса проведено исследование радиального распределения параметров плазмы (плотности n_e и температуры T_e электронов, плотности положительных N_i^+ и отрицательных N_i^- ионов) над поверхностью пластины с помощью подвижного ВЧ компенсированного зонда Ленгмюра [1].

До начала зондовых измерений в смеси HBr/Cl_2 была проведена их калибровка в целях определения абсолютных концентраций ионов N_i^+ и электронов n_e. Для этого были проведены измерения в плазме чистого аргона, когда $N_i^+ = n_e$. При этом плотность электронов точно измерялась СВЧ (hairpin) зондом, располагавшимся рядом с зондом Ленгмюра. Результаты измерений СВЧ-зондом непосредственно сравнивались с данными зонда Ленгмюра и определялись поправочные коэффициенты к ионной и электронной частям зондовой ВАХ. В противном случае определение N_i^+ и n_e методами зондовой теории вносит слишком большую ошибку, зависящую от особенности конструкции зонда и плазменных условий.

В качестве примера на рис. 1 представлены некоторые из измеренных функций распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) в разных радиальных точках в плазме $HBr/Cl_2 = 3/1$ при давлении 0,8 Па, 800 Вт ICP-мощности. ФРЭЭ напоминает максвелловскую функцию с температурой электронов примерно $T_e \approx 3,5$ эВ. С увеличением давления температура электронов несколько падает, при этом ФРЭЭ приобретает уже «немаксвелловский» вид с малой температурой в хвосте ФРЭЭ. Радиальной зависимости T_e почти не наблюдается. Ошибка в определении

температуры электронов ($\delta T_e \approx \pm 0{,}1$ эВ) оказалась сравнимой и даже большей, чем ее изменение вдоль радиуса.

На рис. 2*а* представлен пример измеренных радиальных распределений плотности электронов, положительных и отрицательных ионов. Следуя условию квазинейтральности плазмы, плотность отрицательных ионов N_i^- определяют как разницу плотностей положительных ионов N_i^+ и электронов n_e: $N_i^- = N_i^+ - n_e$, что дает возможность оценить электроотрицательность плазмы, N_i^-/n_e. Видно, что концентрации N_i^+ и n_e падают к краю пластины, в то время как N_i^-, наоборот, немного возрастает, что показывает радиальную неоднородность плазмы на краю пластины. Подача ВЧ-смещения на пластину почти не влияет на форму радиальных распределений, хотя плотность плазмы слабо растет с ростом мощности ВЧ-смещения. Высокая электроотрицательность плазмы, когда $N_i^-/n_e > 1$, может оказывать влияние (иногда существенное) на структуру плазмы и ее пространственную однородность. Следует отметить, что для давлений ниже <2 Па (рис. 2*б*) в изученных режимах разряда относительно плотная плазма ($N_i^+ > 10^{10}$ см$^{-3}$) в смеси HBr/Cl_2 является слабоэлектроотрицательной: $N_i^-/n_e < 1$, что дает возможность эффективного контроля ее параметров, как в классической электроположительной плазме, например в аргоне.

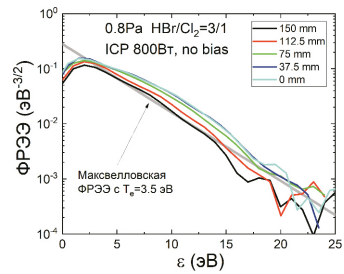
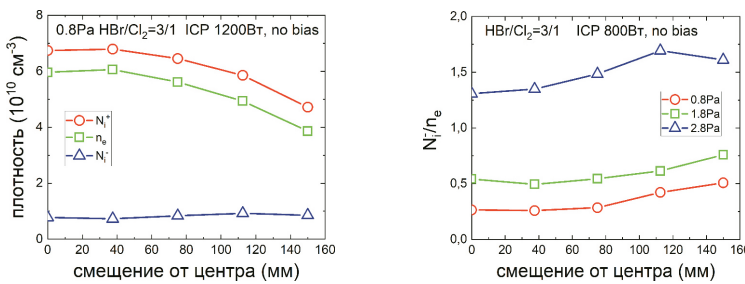


Рис. 1. Ненормированные ФРЭЭ, измеренные в плазме $HBr/Cl_2 = 3/1$ для разных радиальных положений зонда относительно центра стола



а *б*

Рис. 2. Радиальное распределение плотности N_i^+, N_i^- и n_e (*а*); радиальное распределение электроотрицательности N_i^-/n_e в плазме $HBr/Cl_2 = 3/1$ (*б*)

Таким образом, использованная диагностическая зондовая система позволила провести аккуратное тестирование однородности плазмы индустриального TCP-реактора для пластин 300 мм в реальном процессе травления poly-Si.

Литература

1. Godyak V. A., Alexandrovich B. M., Comparative analyses of plasma probe diagnostics techniques // Journal of Applied Physics, 2015. Vol. 118. P. 233302.

УДК 539.216.2

Получение и характеризация тонких пленок титаната стронция для сверхвысокочастотных применений

Богдан А. Р., Тумаркин А. В., Сапего Е. Н.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
alexey.bogdan98@gmail.com

Исследован механизм зародышеобразования и структурные характеристики тонких пленок титана стронция при различных технологических параметрах. Исследованы электрические характеристики планарных конденсаторов на основе пленок титаната стронция на частоте 2 ГГц с использованием высокоточного резонансного метода. Показано, что тенденция к улучшению кристаллической структуры пленки титаната стронция с повышением температуры подложки наиболее выражена для пленок, нанесенных при повышенном давлении рабочего газа. Продемонстрирована первая успешная попытка реализации управляемого конденсатора на основе пленки $SrTiO_3$, демонстрирующего коммутационный фактор качества более 3000 в сверхвысокочастотном диапазоне.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики; титанат стронция; тонкие пленки; магнетронное распыление.

Тонкие сегнетоэлектрические (СЭ) пленки являются перспективным материалом для управляемых емкостных элементов СВЧ-диапазона [1]. Одним из многообещающих СЭ-материалов выступает титанат стронция $SrTiO_3$ (STO), характеризующийся низкими диэлектрическими потерями, высокой диэлектрической нелинейностью и температурной стабильностью [2]. Основные характеристики СЭ емкостных элементов, а именно емкость и диэлектрические потери, зависят от качества кристаллической структуры пленки и материала подложки [3]. Поиск оптимальных технологических параметров синтеза пленок STO на подложках СВЧ электроники является актуальной задачей.

Целью данной работы является исследование влияния технологических параметров осаждения STO-пленок на их электрофизические свойства в СВЧ-диапазоне и поиск оптимальных условий синтеза пленок высокого структурного совершенства.

СЭ тонкие пленки STO были получены методом магнетронного ВЧ-распыления керамической мишени при различных технологических параметрах (состав и давление рабочего газа, температура подложки). В качестве подложек использовались монокристаллический и поликристаллический оксид алюминия (сапфир и поликор). Структура пленок исследовалась методом рентгеновской дифракции с помощью дифрактометра «ДРОН-6» на эмиссионной спектральной линии $CuK\alpha 1$ ($\lambda = 1{,}5406$ Å). Начальные стадии роста пленок изучались методом рассеяния ионов средних энергий. Электрические свойства пленок STO исследовались при помощи сформированных на их основе планарных конденсаторов с шириной зазора 5 мкм. В качестве слоя металлизации использовалась медь с адгезионным подслоем хрома. Измерения емкости и добротности проводились резонансным методом на частоте

2 ГГц с помощью коаксиального резонатора (относительные погрешности по емкости и добротности 1 и 10 % соответственно). Управляющее напряжение до 300 В подавалось непосредственно на обкладки конденсатора.

Механизмы зарождения пленок титаната стронция исследовались на образцах, осажденных в течение 20–100 с при температуре подложки 800–900 °С. Из анализа спектров рассеяния обратнорассеянных ионов можно сделать вывод, что формирование начальных слоев происходит по островковому механизму Вольмера — Вебера: вначале формируются отдельные островки фазы STO, которые затем эволюционируют в сплошную пленку без образования напряженных переходных слоев.

Анализ структурных свойств тонких пленок производился в зависимости от изменяемых технологических параметров: температуры подложки, состава рабочего газа и давления газа во время осаждения. Исследование температурных условий синтеза тонких пленок STO проводилось при давлении рабочего газа 3 Па, температура подложки изменялась в диапазоне 650–900 °С. Пленки, осажденные при низких температурах подложки, демонстрируют поликристаллическую напряженную структуру с основной кристаллической фазой (110). По мере увеличения температуры подложки происходит изменение структуры пленки с поликристаллической на (*h*00) ориентированную, снижаются внутренние напряжения структуры, что выражается в уменьшении полуширины рентгеновских пиков.

Состав рабочего газа Ar/O_2 варьировался в диапазоне от 9/1 до 1/9. Структурные свойства пленок в направлении роста [*h*00], характеризуемые интенсивностью и угловыми положениями рентгеновских пиков, улучшались с увеличением содержания аргона в смеси рабочего газа. Оптимальный состав рабочего газа соответствует соотношению $Ar/O_2 = 8/2$. Влияние давления рабочего газа на структуру пленки исследовалось в диапазоне от 3 до 10 Па. С увеличением давления происходит смещение пиков рентгеновских рефлексов в сторону больших углов, что говорит о снижении линейных растягивающих напряжений элементарной ячейки, кристаллическая структура представляет собой преимущественно ориентированную структуру с преобладанием фазы (*h*00).

Электрические характеристики планарных конденсаторов на базе тонких пленок STO демонстрируют общую тенденцию увеличения диэлектрической нелинейности и снижения потерь по мере улучшения структурного качества пленок. Емкостные элементы на основе пленок, синтезированных при давлении рабочего газа 10 Па и температуре подложки 900 °С, характеризуются высокой добротностью 110–130 и управляемостью 47 %, что выражается в коммутационном факторе качества выше 3000 на частоте 2 ГГц и является перспективным результатом для СВЧ-применений.

Литература

1. Huang J. et al. Ferroelectric thin films and nanostructures: Current and future // Nanostructures in Ferroelectric Films for Energy Applications. Elsevier, 2019. P. 19–39.
2. Tkach A. et al. Mechanical strain engineering of dielectric tunability in polycrystalline SrTiO 3 thin films // Journal of Materials Chemistry C, 2018. Vol. 6. № 10. P. 2467–2475.
3. Tumarkin A.V. et al. Capacitor structures based on strontium titanate films // Physics of the Solid State, 2012. Vol. 54. P. 968–971.

УДК 539.23

Влияние малых концентраций легирующих примесей Al на свойства активного слоя мемристоров на основе HfO_2

Шулаев Н. А.[1], Бобылев А. Н.[1], Азарапин Н. О.[2], Григорьев М. В.[2], Удовиченко С. Ю.[1]

[1] Лаборатория мемристорных материалов, центр природовдохновленного инжиниринга, школа естественных наук, Тюменский государственный университет
n.a.shulaev@utmn.ru
[2] Школа естественных наук, Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6

Разработан метод совместного реактивного магнетронного распыления для синтеза тонких пленок легированного Al:HfO_2 с контролируемой степенью легирования. Проведены исследования физических характеристик полученных пленок с содержанием Al от 0 до 3,87 ат.%.

Ключевые слова: мемристоры; магнетронное напыление; оксид гафния; ширина запрещенной зоны; легирование Al; структурные свойства.

Легирование алюминием (Al) — один из наиболее эффективных походов адаптации структуры HfO_2 для применения в мемристорных устройствах [1, 2]. Это позволяет точно контролировать концентрацию кислородных вакансий, которые имеют ключевую роль в механизме переключения сопротивления [3], тем самым повышая предсказуемость и надежность устройств.

Методы изготовления легированных структур Al:HfO_2 в применении к мемристорам в основном представлены следующими:

- послойное нанесение материла основной матрицы и примеси;
- магнетронное напыление соединения из составных мишеней.

В первом случае не обеспечивается равномерное распределение легирующей примеси по толщине. Во втором существенно усложняется подбор состава в процессе исследования. В данной работе пленки Al:HfO_2 синтезированы путем совместного реактивного распыления мишеней из Hf и Al с использованием RF и импульсного магнетрона в модифицированном модуле NanoFab-100. В ходе исследования определены области получения стехиометрических оксидов гафния и алюминия в зависимости от расхода кислорода в процессе распыления при различных мощностях магнетронного разряда. На основании результатов подобраны режимы получения пленок с малыми концентрациями легирующей примеси от 0 до 3,28 ат%.

Для каждой степени легирования изготовлена серия пленок толщиной 50 и 150 нм. Для образцов изучены физические и структурные свойства (табл. 1).

Состав определен с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA3, оборудованного EDS-приставкой Oxford Instruments X-Max 20.

Исследование и анализ морфологии поверхности пленок проведены с помощью атомно-силового микроскопа NT-MDT NTegra.

Данные о структуре получены на дифрактометре Tongda Td-3500 (излучение Cu-Ka) с линейным детектором MYTHEN2 R 1D по методу Ритвельда.

Таблица 1. Свойства и составы пленок Al:HfO_2

№	P, W	Al, at%	Средняя высота, нм	Eg, эВ	a, Å	b, Å	c, Å	β,°	V, Å^3
1	0	0,00	16,17	5,92	5,158(28)	5,366(31)	6,943(46)	90,63(55)	192,2(20)
2	9	1,85	16,26	5,95	5,170(20)	5,306(22)	6,496(30)	91,35(20)	180,1(13)
3	11	2,08	—	—	—	—	—	—	—
4	22	2,67	16,33	—	—	—	—	—	—
5	26	3,05	16,43	—	—	—	—	—	—
6	30	3,28	16,60	5,97	5,159(16)	5,301(17)	6,480(24)	91,63(15)	177,1(10)
7	33	3,87	—	—	—	—	—	—	—

Ширина запрещенной зоны оценена с использованием графиков Тауца, полученных на основе данных УФ-спектроскопии с прибора SHIMADZU UV-2450.

В результате исследования сделаны выводы о том, что легирование Al-пленок HfO_2 приводит к постепенному увеличению ширины запрещенной зоны, росту объема элементарной ячейки и, как следствие, шероховатости поверхности. Совместное распыление стехиометрических HfO_2 и Al_2O_3 позволяет синтезировать твердые растворы внедрения, избегая разделения фаз. Разработана методика точного контроля состава с помощью регулирования скорости распыления и расхода реактивного газа.

Результаты исследования позволят систематически исследовать мемристоры с контролируемыми концентрациями легирующих примесей и заданной плотностью кислородных вакансий, тем самым гипотетически улучшая их рабочие характеристики. Кроме того, полученные данные дают представление о структурных и функциональных свойствах материала, способствуя точному физическому моделированию механизмов переключения устройств с мемристорной памятью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания для Тюменского государственного университета (проект № FEWZ-2024-0020).

Литература

1. Peng C.-S., Chang W.-Y., Lee Y.-H., Lin M.-H., Chen F. and Tsai M.-J. Improvement of resistive switching stability of HfO_2 films with Al doping by atomic layer deposition // Electrochem. Solid State Letters, 2012. Vol. 15. № 4. P. H88.
2. Paul A. D., Biswas S., Das P., Edwards H. J., Dhanak V. R., Mahapatra R. Effect of aluminum doping on performance of HfOx-based flexible resistive memory devices // IEEE Trans. Electron Devices, 2020. Vol. 67. № 10. P. 4222–4227.
3. Molina-Reyes J., Valderrama-B. R. Role of oxygen vacancies on the resistive switching characteristics of MIM structures fabricated a low temperature // 2015 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), 2015.

УДК 620.187.3

Измерение толщин наноразмерных слоев фазосдвигающего фотошаблона с применением цифровой обработки изображений просвечивающей электронной микроскопии

Киреев Г. С., Боргардт Н. И.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
g.s.kireev@ya.ru

Разработан подход к измерению толщин наноразмерных слоев фотошаблонов и оценке погрешности измерения на основе изображений их поперечных сечений, полученных методом просвечивающей растровой электронной микроскопии. С его помощью изучена фазосдвигающая фотошаблонная заготовка для длины волны 193 нм и определен разброс толщин слоев в разных участках ее поверхности.

Ключевые слова: фазосдвигающий фотошаблон; просвечивающая растровая электронная микроскопия; цифровая обработка изображений; измерение толщин слоев.

Для формирования рисунков топологии в технологических слоях интегральных схем используют фотошаблоны, изготавливаемые из фотошаблонных заготовок (ФШЗ), которые состоят из наноразмерных слоев на поверхности стеклянной подложки. Поскольку их толщины влияют на коэффициент пропускания и величину фазового сдвига, критически важным является контроль точности формирования таких слоев. Для реализации маршрута изготовления ФШЗ на отечественных предприятиях необходимо разработать технические требования к характеристикам оборудования и технологическим процессам, что обуславливает актуальность исследования используемых в настоящее время образцов ФШЗ.

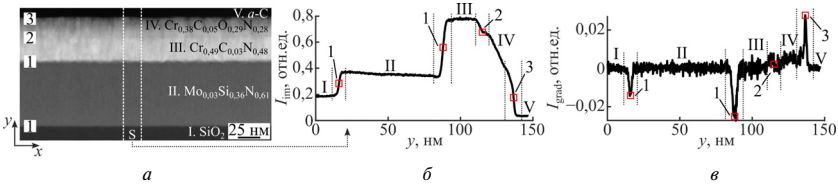
Разработан и реализован в программном пакете Matlab метод измерения толщин слоев, основанный на цифровой обработке изображений просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ). Исследование выполнялось для фазосдвигающей ФШЗ для длины волны 193 нм с размерами 152×152×6,35 мм. Она раскалывалась на части, и для пяти частей, расположенных в центре и в четырех углах, методом *in situ* lift-out в электронно-ионном микроскопе FEI Helios NanoLab 650 приготавливались тонкие фольги поперечного сечения [1], которые изучались в просвечивающем электронном микроскопе FEI Titan Themis 200 при ускоряющем напряжении 200 кВ.

ПРЭМ-изображение для одного из участков ФШЗ показано на рис. 1*а*. На нем визуализирован аморфный фазосдвигающий слой MoSiN (II) и два пористых поликристаллических маскирующих слоя CrCN (III) и CrCON (IV). Для проведения измерений в соответствии с [2] изображение разделялось на 20 вертикальных сегментов, анализируемых по очереди. Толщины слоев в пределах сегмента вычислялись по координатам межслойных границ, которые были классифицированы на три типа в зависимости от состава и свойств прилегающих слоев. Границы 1-го и 3-го типов образовывались между слоями, в одном из которых доля атомов тяжелых элементов значительно больше, чем во втором. Если пористость обоих слоев была низкой, граница между ними относилась к 1-му типу, а если один из слоев характеризовался

высокой степенью пористости, изменяющейся вдоль оси *y* (рис. 1*а*), то граница соответствовала 3-му типу. Граница 2-го типа возникала между слоями с примерно равными долями атомов тяжелых элементов, характеризующимися пористостью, по-разному изменяющейся вдоль оси *y*.

При анализе сегмента изображения определение позиций границ 1-го и 2-го типов проводилось по усредненному профилю интенсивности I_{im} (рис. 1*б* для выделенного сегмента S). На нем граница 1-го типа находится в середине переходной области (ПО) ступенчатого вида с резким перепадом интенсивности, обозначенной как «⁞», в точке с наибольшим наклоном графика. Координата границы, отмеченная как «□», определялась путем аппроксимации соответствующего участка профиля I_{im} с использованием функции ошибок. ПО границы 2-го типа соответствует участку с перегибом профиля интенсивности, которая либо убывает с обеих сторон от перегиба, либо с одной стороны убывает, а с другой изменяется слабо. При цифровой обработке из исходного профиля I_{im} вычитался модельный профиль, на котором перегиб выравнивался путем линейной интерполяции по двум точкам на левой и правой границах ПО. После вычитания на его месте образовывался локальный минимум, координата которого определяла положение границы. В ходе анализа границы 3-го типа строилось изображение градиента интенсивности путем численного нахождения производной по оси *y* в каждом пикселе. Для сегмента градиентного изображения вычислялся усредненный профиль I_{grad} (рис. 1*в* для S). На нем ПО имеет вид пика, наложенного на плавный фон. Для определения координаты границы проводилась линейная интерполяция фона по точкам слева и справа от пика, затем фон вычитался и пик аппроксимировался с использованием функции Гаусса.

Средние по пяти исследованным участкам ФШЗ толщины слоев составили (70,26 ± 0,08), (26,85 ± 0,13) и (20,06 ± 0,13) нм со средними отклонениями 0,4, 2,0 и 2,9% соответственно, что свидетельствует об их высокой степени латеральной равномерности. Выявлено некоторое увеличение толщин слоев в центральной части ФШЗ.



а *б* *в*

Рис. 1. ПРЭМ-изображение поперечного сечения ФШЗ (*а*) и усредненные профили интенсивности (*б*) и градиента интенсивности вдоль оси *y* (*в*) для вертикального сегмента S

Литература

1. Волков Р. Л., Боргардт Н. И. Идентификация структуры наноразмерных слоев многослойных гетерокомпозиций методами просвечивающей электронной микроскопии // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2023. — Т. 28. — № 6. — С. 711–726.
2. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2013. — 20 с.

УДК 621.3.049.77:621.315.5

Влияние структурных дефектов в антимониде индия на качество тепловизионного изображения фотодиодных матриц

Новиков И. В., Мирофянченко Е. В., Мирофянченко А. Е.
АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
orion@orion-ir.ru; mirofyanchenko@gmail.com

Среди бинарных полупроводников группы A^3B^5 антимонид индия (InSb) выделяется рекордно узкой шириной запрещенной зоны и исключительно высокой подвижностью электронов. Эти свойства сделали его ключевым материалом для производства высокочувствительных линейных и матричных инфракрасных детекторов, работающих в спектральном диапазоне 3–5 мкм [1]. Однако дислокации и микродефекты, формирующиеся в процессе роста кристаллов, приводят к появлению нерабочих пикселей или их кластеров на итоговых изображениях. Несмотря на многочисленные исследования дефектообразования [2–5], взаимосвязь между структурными несовершенствами InSb и качеством изображения остается недостаточно изученной.

Ключевые слова: антимонид индия; InSb; выращивание кристаллов; ростовые дефекты; Чохральский; селективное травление; ИК-МФПУ; ИК-детектор.

В работе использовались нелегированные пластины InSb ориентации (100) с проводимостью *n*-типа. Концентрация носителей заряда при 77 K составляла $4 \cdot 10^{14}$–$1{,}5 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$. Образцы были вырезаны из монокристалла, выращенного методом Чохральского, с контролируемой плотностью дислокаций ($N_d < 100$ см$^{-2}$), подтвержденной методом селективного травления. Матричные фотоприемные устройства изготавливались по стандартной технологии АО «НПО Орион». Для визуализации дефектов применялось последовательное травление: CP4, раствором на основе HCl и H_2O_2 или раствором на основе $FeCl_3$ и HCl. Толщина остаточного слоя InSb измерялась контактным профилометром Bruker Dektak. Панорамные изображения поверхности получены с помощью цифрового микроскопа Olympus DSX1000 в режимах светлого поля и дифференциального интерференционного контраста (ДИК). Морфология дефектов после травления исследовалась с помощью конфокального лазерного микроскопа Olympus LEXT OLS5000 и Sensofar S neox 3D Optical Profiler.

Корреляционный анализ. Сопоставление морфологии поверхности с ИК-изображениями выполнялось путем:

1) масштабирования и пространственного совмещения ИК-изображения матрицы с панорамой поверхности;
2) выделения зон со скоплениями плоскодонных ямок травления (рис. 1);
3) переноса координат дефектов на ИК-изображение для оценки их влияния.

Установлено, что при плотности плоскодонных ямок травления >1500 см$^{-2}$ наблюдается значительное ухудшение качества изображения. Скопления плоскодонных ямок проявляются на изображении в виде кластеров нерабочих пикселей. Это подтверждает критическую роль ростовых дефектов InSb в формировании неоднородности фотоприемных характеристик матриц.

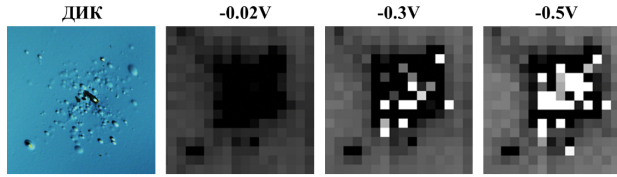


Рис. 1. Пример соотнесения скопления плоскодонных ямок травления с дефектной областью изображения, полученной при проведении контроля функционирования модуля матричного при 77 K

Литература

1. Markovitz T., Pivnik I., Calahorra Z. et al. Digital 640×512 / 15μm InSb detector for high frame rate, high sensitivity, and low power applications // Infrared Technology and Applications XXXVII, 2011. Vol. 8012. P. 956–965. DOI: 10.1117/12.883345.
2. Merrell J. L., Gray N. W., Bolke J. G. et al. Enabling on-axis InSb crystal growth for high-volume wafer production: characterizing and eliminating variation in electrical performance for IR focal plane array applications // Infrared Technology and Applications XLII, 2016. Vol. 9819. P. 285–297. DOI: 10.1117/12.2223956.
3. Hurle D. T. J., Rudolph P. A brief history of defect formation, segregation, faceting, and twinning in melt-grown semiconductors // Journal of Crystal Growth, 2004. Vol. 264. № 4. P. 550–564. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2003.12.035.
4. Gray N. W., Perez-Rubio V., Bolke J. G. et al. Interface and facet control during Czochralski growth of (111) InSb crystals for cost reduction and yield improvement of IR focal plane array substrates // Infrared Sensors, Devices, and Applications IV, 2014. Vol. 9220. P. 19–30. DOI: 10.1117/12.2061973.
5. Dhar N. K., Dat R., Sood A. K. Advances in Infrared Detector Array Technology // Optoelectronics — Advanced Materials and Devices, 2013. Vol. 7. P. 149–190. DOI: 10.5772/51665.

УДК 543.424.2

Исследование влияния электрического тока на свойства и морфологию ГКР-активной пленки Ag-Nb-N-O для фотонной сенсорики

Чумаченко Ю. В.[1], Новиков Д. В.[1], Дубков С. В.[1], к. т. н., Громов Д. Г.[1], д. т. н., Волкова Л. С.[1,2], Гаврилов С. А.[1], д. т. н.

[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
julia.chumachenko@mail.ru
[2] Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН
115487, г. Москва, Ленинский просп., 32А

Исследовано влияние воздействия электричества на тонкую многокомпонентную пленку Ag-Nb-N-O в целях получения ГКР-активной подложки. Исследовано влияние различных режимов воздействия тока на морфологию поверхности и ГКР-активности многокомпонентной пленки, а также получены характеристики разработанной ГКР-подложки.

Ключевые слова: ГКР-подложка; НЧ серебра; тонкая пленка; активация; электрический ток.

В настоящее время ведется активное исследование подложек, основанных на эффекте гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света, которые являются перспективным инструментом высокочувствительного и быстрого анализа. Они находят свое применение в нано- и микроэлектронике, экологии, биомедицине, в частности для разработки сенсоров персонализированной медицины. Ключевым элементом ГКР-подложек является массив плазмонных наночастиц на поверхности. Однако при контакте с атмосферой частицы окисляются и загрязняются адсорбированными из атмосферы веществами. Все эти факторы способствуют ухудшению чувствительности ГКР-подложек. Перспективным решением данной проблемы является применение тонкой многокомпонентной пленки, которая посредством энергетического воздействия способна формировать на своей поверхности массив наночастиц, обладающий способностью усиливать сигнал комбинационного рассеяния (КР) света. Такого типа подложки демонстрируют высокую стабильность свойств в течение длительного времени за счет того, что плазмонный материал находится в объеме тонкой пленки до момента непосредственного проведения измерений. Путем энергетического воздействия любого типа на такую подложку можно преобразовать ее в ГКР-активную.

В данной работе были исследованы результаты воздействия электрическим током в потенциостатическом режиме на ранее изученную [1] тонкую пленку Ag-Nb-N-O. Были проведены исследования взаимосвязи температуры структуры и ее ВАХ. Было проведено сравнение интенсивностей КР спектра при воздействии на тонкую пленку в различных режимах электричества. Анализируемым веществом выступали растворы родамина 6G различных концентраций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00610, https://rscf.ru/project/22-19-00610.

Литература

1. Dubkov S., Novikov D., Bandarenka H., Burko A., Trifonov A., Volkova L., Edelbekova P., Lebedev E., Skryleva E., Gromov D. Express formation and characterization of SERS-active substrate from a non-degradable Ag-Nb-N-O film // Applied Surface Science, 2024. Vol. 645. P. 158682.

УДК 621.315.592

Особенности формирования топологического рисунка при изготовлении матричных фоточувствительных структур на основе коллоидных квантовых точек

Петрушина В. А.[1], Мирофянченко Е. В.[1], Тальвеже В. В.[1], Попов М. А.[1,2], Еремкин Н. В.[1], Ильинов Д. В.[1], Гришина А. Н.[1], Атрашков А. С.[1], Панков М. А.[1], Попов В. С.[1,2], Пономаренко В. П.[1]

[1] АО «НПО «Орион»
111538, г. Москва, ул. Косинская, 9
V.A.Petrushina@yandex.ru
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В работе представлено формирование топологического рисунка различными методами при изготовлении матричных фоточувствительных структур на основе коллоидных квантовых точек. Применение разработанных режимов технологических процессов не привело к ухудшению электрофизических характеристик.

Ключевые слова: фотолитография; коллоидные квантовые точки; LOR-фоторезист.

Формирование топологического рисунка металлизации Cr/Au представляет собой сложную и комплексную задачу ввиду высокой пластичности золота и требований к топологическим нормам порядка 1 мкм. Оптимизация режимов «взрывной» фотолитографии направлена на уменьшение дефектов типа «юбки» — оставшихся кусочков металла, не поддающихся удалению. Данный дефект может нарушать целостность фоточувствительной структуры, верхнего электрода и приводить к последующему короткому замыканию. «Юбки» возникают вследствие формирования положительного наклона профиля стенок фоторезиста, который образуется при использовании позитивных фоторезистов [1]. Описаны процессы, позволяющие формировать вертикальный наклон профиля стенок двухслойной маски фоторезистов (PMGI / позитивный фоторезист), благодаря чему удалось минимизировать данный тип дефекта.

Фотоприемные устройства на основе коллоидных квантовых точек (ККТ) обладают такими преимуществами, как широкая полоса чувствительности, относительно низкая стоимость и простота изготовления. На сегодняшний день не существует выверенных решений по способам создания топологического рисунка по фоточувствительной структуре, содержащей слои ККТ. Методы формирования топологического рисунка можно разделить на две группы: с использованием фоторезистов и без использования фоторезистов. В методах без использования фоторезистов, например печати, удается избежать проблемы взаимодействия лигандов ККТ с компонентами фоторезиста. Однако данные методы имеют ряд ограничений, таких как разрешающая способность, встраиваемость в технологический процесс и стоимость.

При проведении фотолитографии по слоям, содержащим ККТ, возникает ряд трудностей, обусловленных химическим взаимодействием лигандов ККТ с компонентами фоторезистов или проявителей [2]. Крайне актуальной задачей является разработка режимов нанесения, проявления и снятия фоторезиста, при которых не будет происходить деградации свойств фоточувствительных слоев. Проведены процессы фотолитографии по фоточувствительной структуре, содержащей слои ККТ PbS. С использованием разработанного травителя успешно проведено удаление фоточувствительной структуры с периферийной части образца.

Отработаны режимы формирования двухслойной маски фоторезиста и сформирован наклон профиля стенок маски, обеспечивающий минимальное количество дефектов. Оценка полученных результатов проводилась методами оптической и растровой микроскопии, также были исследованы электрофизические параметры полученных образцов. Применение методов фотолитографии по фоточувствительной структуре не оказало негативного влияния на электрофизические характеристики.

Литература

1. Golden J., Miller H., Nawrocki D., Ross J. Optimization of bi-layer lift-off resist process // CS Mantech Technical Digest, 2009.
2. Hahm D. et al. Direct patterning of colloidal quantum dots with adaptable dual-ligand surface // Nature Technology, 2022. Vol. 17 (9). P. 952–958.

УДК 621.3.049

Анализ межфазных контактов в спин-поляризованных структурах ферромагнетик MnSb — полупроводники антимониды Al, Ga, In. Синтез тонкой пленки композита InSb—MnSb (50:50)

Биктеев А. А.[1], Маренкин С. Ф.[1], Нечушкин Ю. Б.[2]
[1] *Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН*
119991, г. Москва, Ленинский просп., 31
[2] *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
bikteev04@mail.ru

Рассмотрены межфазные контакты в структурах MnSb—A^3B^5. При вырожденной *p*-проводимости в InSb и GaSb формируются омические контакты для spin-down-носителей. Рассчитаны параметры синтеза и получены пленки InSb—MnSb (50:50), исследованные методом РЭМ.
Ключевые слова: зонная структура; спинтроника; напыление.

В работе [1] представлен анализ зонной структуры и межфазного контакта между MnSb и GaSb *p*-типа.

Установлено, что:

- для spin-down-носителей формируется омический контакт, так как термодинамическая работа выхода MnSb ($\Phi_м$) выше, чем у GaSb ($\Phi_п$);
- для spin-up-носителей реализуется *p-p*-контакт, невыпрямляющий, но сопровождающийся контактной разностью потенциалов.

Аналогичный подход применен для InSb и AlSb, отличающихся шириной запрещенной зоны и работой выхода. В табл. 1 представлены основные параметры этих материалов.

Таблица 1. Сравнение MnSb—A^3B^5 по параметрам зонной структуры

Полупроводник	Ширина запрещенной зоны E_g эВ	Работа выхода $\Phi_п$, эВ	Контакт по spin-down	Контакт по spin-up
GaSb	~0,7	~4,7	Омический	p–p (невыпрямляющий)
InSb	~0,17	~4,6–4,8	Омический / Шоттки	p–p, возможное вырождение
AlSb	~1,6	~5,1–5,2	Шоттки / туннельный	p–p, вомзожное с градиентом носителей

Как видно из таблицы:

- для InSb из-за узкой зоны ($E_g \approx 0{,}17$ эВ) сохраняется омический контакт для spin-down, однако при слабом легировании возможен шоттки-барьер;
- для AlSb ($E_g \approx 1{,}6$ эВ, высокая $\Phi_п$) вероятно формирование шоттки- или туннельного барьера для spin-down, для spin-up возможен градиент при разности концентраций дырок.

Одним из ключевых факторов, влияющих на зонную структуру гетерограницы MnSb—InSb, является степень вырождения полупроводниковой матрицы. Для оценки границы используется выражение для эффективной плотности состояний валентной зоны:

$$N_V = 3{,}5 \cdot 10^{15} \cdot T^{\frac{3}{2}},$$

$$N_V(300K) = 2 \cdot 10^{19}\ \text{см}^{-3}.$$

Переход к вырожденному состоянию наступает при $F - E_V \leq 2kT$, то есть

$$p = N_V \cdot \exp(-2) = 2{,}7 \cdot 10^{18}\ \text{см}^{-3}.$$

Таким образом, если концентрация дырок превышает 10^{-19} см$^{-3}$, полупроводник InSb становится вырожденным *p*-типа. Аналогичный расчет может быть сделан для AlSb. Несмотря на сходное значение N_V, для вырождения AlSb требуется значительно больший сдвиг уровня Ферми, чем для InSb. Следовательно, в структурах MnSb—AlSb уровень Ферми, как правило, остается выше верхней границы валентной зоны, а контакт с MnSb может сохранять характер Шоттки или туннельного барьера.

Эксперимент

Были получены многослойные пленки состава InSb—MnSb 50:50% методом послойного напыления в вакууме. Пленки осаждены на подложки из ситалла, кремния, сапфира ориентацией [001]. Порядок напыления — Mn, Sb, In. Общая толщина пленок составила ~0,5 мкм.

Массы навесок были рассчитаны на основе уравнения Ленгмюра.

На рис. 2 представлены графики зависимости массы навесок от содержания MnSb.

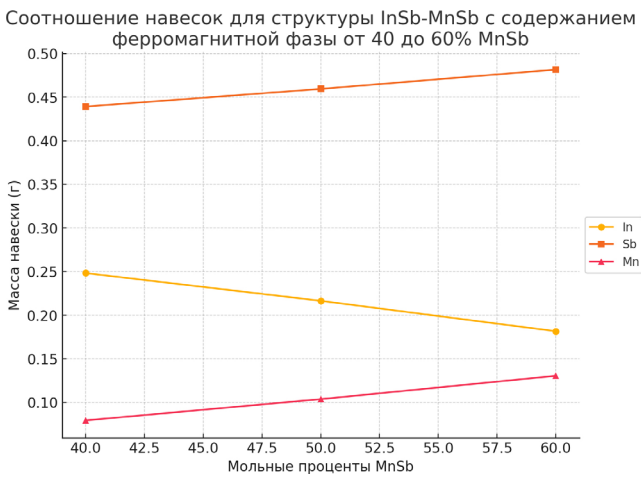
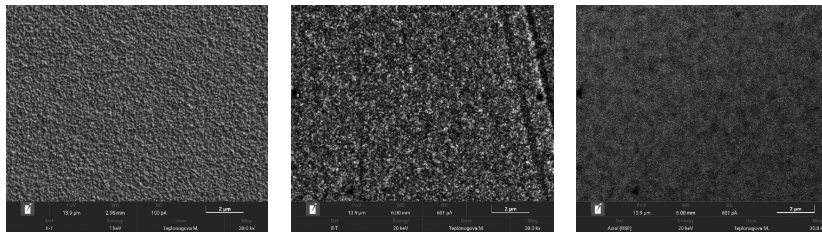


Рис. 2. Зависимость навесок от мольного содержания MnSb

Морфология образцов исследована методом РЭМ. Для морфологического контраста использовался детектор E-T (рис. 3*а*, *б*), для композиционного — детектор BSE (рис. 3*в*).



а *б* *в*

Рис. 3. РЭМ-изображение пленок InSb-MnSb до отжига (*а*) и после отжига (*б*, *в*)

Отжиг при 400 °C вызывает диффузию и формирование зернистой структуры. По данным РСМА выявлено фазовое разделение с локальным преобладанием Mn или In, что подтверждает образование композита из фаз InSb и MnSb (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав образцов до и после отжига

Материал	До отжига	После отжига	
		Фаза 1 (InSb)	Фаза 2 (MnSb)
Mn	33 ± 1	19	30
In	20 ± 1	35	5
Sb	48 ± 1	47	65

Заключение

Проведен теоретико-экспериментальный анализ спин-поляризованных композитов MnSb—A^3B^5. Установлено, что контакты MnSb с InSb и GaSb — омические для spin-down-носителей, с AlSb возможен туннельный барьер. Получены пленки InSb—MnSb (50:50). Методами РЭМ и РСМА показано, что отжиг при 400 °C приводит к формированию двухфазового композита InSb—MnSb. Разработанная методика применима для других систем и перспективна для спинтроники.

Литература

1. Sartipi E., Hojabri A., Bouchani A., Shakib M. H. First Principles Study of Half-metallic Properties at MnSb/GaSb(001) Interface // Chinese Journal of Chemical Physics, 2011. Vol. 24. P. 155–161.

УДК 538.97

Создание бета-вольтаических источников питания непрерывного и импульсного принципа действия для маломощных устройств

Брацук А. В., к. т. н., Фёдоров Е. Н., Шадский А. С., Варданян Д. М., Урусов А. А.
АО «НИИ НПО «ЛУЧ»
142103, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24
bratsuk@sialuch.ru

Разработаны и созданы образцы бета-вольтаических источников питания (БВИП) непрерывного и импульсного принципа действия для маломощных устройств (энергонезависимой памяти, датчиков беспроводной сенсорной сети и др.). Приведены параметры предлагаемых БВИП и даны рекомендации для их оптимизации.

Ключевые слова: ядерная батарея; радиоизотопная батарея; бета-вольтаический источник питания; никель-63.

В XXI веке стремительно развиваются технологии маломощных устройств с потреблением энергетической мощности от нескольких десятков нановатт до единиц микроватт. Обеспечить мощность такого порядка смогут перспективные бета-вольтаические источники питания (БВИП), в которых используются изотопы бета-излучения и полупроводниковые преобразователи (ПП). БВИП обладают высокой автономностью, имеют компактные размеры и длительный срок службы, определяемый периодом полураспада радиоизотопа.

Разработанные нами БВИП выполнены на основе никеля-63 20 % обогащения. Никель-63 является чистым бета-излучателем, не имеет побочных альфа- и гамма-излучений. Среди широко применяемых бета-излучающих изотопов (трития, стронция-90, углерода-14) он наиболее технологичен. Энергия бета-частиц никеля-63 не превышает 67 кэВ, что исключает возможность радиационных повреждений ПП. Заявленный срок службы БВИП на никеле-63 может составить 50 лет и определяется его периодом полураспада, равным чуть более 100 лет.

Нами разработан способ изготовления фольги из никеля-63 толщиной от 1 до 3 мкм и площадью поверхности 50×40 мм для планарных систем БВИП. Мы получаем металлический никель-63 из раствора хлорида никеля-63, переплавляем его в слиток и далее прокатываем слиток в фольгу. При этом потери никеля-63 составляют менее 1 %. Отличительной особенностью способа является работа с содержанием никеля-63 в исходном растворе массой от 0,35 г.

В ходе наших исследований мы рассмотрели несколько видов ПП для выбора их в состав БВИП. Исследованы монокристаллический кремний планарного и микроканального исполнения, диоксид титана в форме нанотрубок, планарные карбид кремния, синтетический алмаз и многопереходные структуры GaInP/GaInAs/Ge.

Наиболее высокий результат получен на ПП из карбида кремния pin-структуры: в контакте с никелем-63 20 % обогащения напряжение холостого хода составило 2,0 В, а плотность тока короткого замыкания — 30 нА/см^2. На основе настоящих ПП и никеля-63 20 % обогащения созданы БВИП непрерывного и импульсного

принципа действия. Созданные БВИП имеют срок службы не менее 25 лет, могут работать в диапазоне температур от минус 55 до плюс 85 °C, являются радиационно безопасными.

Параметры непрерывного БВИП в рабочей точке составляют 3,6 В, 105 нА, 1,3 мкВт/см^3. Параметры импульсного БВИП представлены в табл. 1.

Таблица 1. Достигнутые параметры импульсного БВИП

Параметр	Значение
Номинальное рабочее напряжение, В	3,6
Выходная мощность (в импульсе), мВт	33–38 (длительность 10 мс, период 16 с)
Длительность выходного импульса	Программируется: от 0,8 мс до 67 с; шаг изменения: октавный — 2×
Период выходного импульса	Программируется: от 1 с до 34 лет; шаг изменения: октавный — 2×
Габаритные размеры корпуса, мм	35×35×12

Импульсный режим в БВИП обеспечивается применением конденсаторов емкостью, равной нескольким мкФ, накапливающих заряд, и устройств формирования импульсов на основе интервальных таймеров, позволяющих управлять длительностью и периодичностью сигналов.

Разработанные БВИП можно оптимизировать, например, с помощью повышения удельной мощности ядерной батареи (за счет утонения ПП и повышения обогащения никеля-63), создания собственного конденсатора увеличенной емкости, использования стандартных металлокерамических корпусов для размещения составляющих БВИП. Выполнение перечисленных задач позволит достичь параметров, требуемых потенциальными потребителями. Например, разработчикам беспроводных телеметрических систем необходимы БВИП постоянной мощностью более 50 мкВт/см^3, при этом мощность в импульсе должна составлять порядка 20–55 мВт. Для интеграции БВИП в микросхемы энергонезависимой памяти требуется более 2–9 мкВт/см^3 в непрерывном режиме.

Мы полагаем, что уровень энергетического потребления современных электронных микроустройств и уровень генерируемых БВИП электрических параметров будут сопоставимы благодаря тенденции снижения потребления энергии и развитию технологий бета-вольтаики.

УДК 621.319.5

Зависимость тока утечки и усилия прижима от напряжения ЭКУ

Калугин В. В.[2], Трактирщиков В. С.[1,2], Ширяев М. Е.[3]
[1] АО «НПП «ЭСТО»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5/1
v.s.traktirschikov@nppesto.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] ООО «ЭСТИКА»
124681, г. Москва, г. Зеленоград, к. 237, кв. 95

В работе представлено исследование зависимости усилия удержания кремниевой пластины и тока утечки от приложенного к электростатическому крепежному устройству напряжения. Описаны испытательный стенд, методы исследования, а также проведен анализ полученных результатов.
Ключевые слова: электростатический прижим; электростатическое крепежное устройство; подложкодержатель; технологический стол.

Актуальность применения электростатических крепежных устройств (ЭКУ) в микроэлектронной промышленности многократно оговорена. Применение ЭКУ позволяет достигать высочайших значений степени интеграции ИС, значительно увеличивать равномерность температурного режима на поверхности обрабатываемой пластины, повышать производительность предприятия, выход годных, а также использовать другие преимущества его применения [1].

Тем не менее, несмотря на преимущества электростатического крепежного устройства, имеется ряд открытых вопросов в области его использования. Как заявляют некоторые производители электростатических крепежных устройств, ЭКУ в своем большинстве слабо подходят для использования на открытом воздухе или зажима влажных заготовок, так как статическое электричество и его притяжение быстрее рассеиваются при высокой влажности. Кроме того, следует соблюдать осторожность при использовании их в маслянистой среде [2].

По вышеуказанной причине исследование ЭКУ на атмосферных стендах может не дать полного и корректного представления о работе устройства. В рамках разработки методов проектирования и производства электростатических крепежных устройств был создан испытательный стенд, включающий систему создания вакуума в рабочей камере, схему измерения токов утечки и привод для отрыва кремниевых пластин. На рис. 1 демонстрируется схематичное представление стенда.

В данной работе представлены результаты исследования тока утечки и усилия прижима на атмосфере, где в качестве диэлектрического слоя ЭКУ используется эпоксидная смола толщиной 123 мкм. Диаметр макета ЭКУ составляет 100 мм. На рис. 2 представлены результаты измерения тока утечки и усилия прижима при различных напряжениях на электроде ЭКУ с шагом в 200 В. Полученные значения силы прижима кратно отличаются от расчетных.

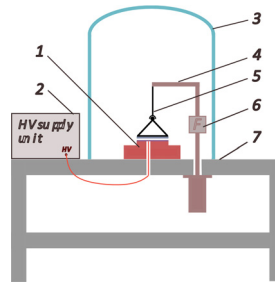
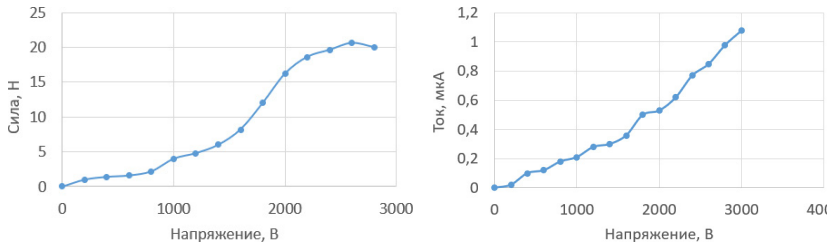


Рис. 1. Испытательный стенд, где: 1 — подложкодержатель с ЭКУ, 2 — высоковольтный блок питания, 3 — вакуумная камера, 4 — привод, 5 — кронштейн с закрепленной подложкой, 6 — динамометр, 7 — рама



а *б*

Рис. 2. Зависимости усилия прижима (*а*) и тока утечки (*б*) от напряжения на электроде ЭКУ

В условиях окружающей среды при постоянном напряжении на электроде ЭКУ может наблюдаться уменьшение значения усилия в несколько раз по сравнению с вакуумной средой для обеих полярностей. Предполагается, что молекулы воды диссоциируют под действием высоких электрических полей на границе раздела и в шероховатой области диэлектрика происходит перенос и захват ионного заряда. Это эффективно экранирует подложку от электрического поля, возникающего на внутреннем электроде ЭКУ, и тем самым снижает силы удержания, действующие на подложку [3, 4].

Несоответствие расчетных и измеренных значений усилия удержания пластины говорит о необходимости проведения испытаний в вакуумной среде и последующей проработки математической модели процесса. На сегодняшний день проводятся исследования зависимости усилия прижима в вакуумной среде с применением более совершенных макетов. Результаты исследования будут представлены позже.

Литература

1. Global Electrostatic Chucks for Wafer Market Size By Type of Electrostatic Chuck (Conventional Electrostatic Chucks, Piezoelectric Electrostatic Chucks), By Material Type (Ceramic Materials, Silicon-Based Materials), By Application (Semiconductor

Manufacturing, Microelectronics), By End-User Industry (Aerospace, Automotive), By Conductive Mechanism (DC-Voltage Based, AC-Voltage Based), By Geographic Scope And Forecast // Verified market reports. 2025. URL: Electrostatic Chucks for Wafer Market Size & Share Forecast [2023–2030] (verifiedmarketreports.com) (дата обращения: 14.04.2025).

2. Various Semiconductor Wafers // Creative technology co. 2025. URL: https://creative-technology.co.jp/products-e/wafer (дата обращения: 14.04.2025).
3. Yatsuzuka K., Hatakeyama F., Asano K., Aonuma S. Fundamental Characteristics of Electrostatic Wafer Chuck with Insulating Sealant // IEEE Transactions on Industry Applications, 2000. Vol. 36. № 2.
4. Kalkowski G., Risse S., Guyenot V. Electrostatic chuck behaviour at ambient conditions // Microelectronic Engineering, 2002. 61–62. P. 357–361.

УДК 621.382.2/.3

Оптимизация параметров плазмохимического травления для получения анизотропного профиля металлических межсоединений с использованием газовой смеси $C_4F_8 + O_2 + CO + Ar$

Михайлова А. В.[1,2], **Леготин С. А.**[2]
[1] *АО «Микрон»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
annastasiaro@mail.ru
[2] *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1

В исследовании рассматриваются процессы плазмохимического травления оксида кремния (SiO_2) в газовой смеси $C_4F_8 + O_2 + CO + Ar$ в целях получения анизотропного профиля травления, необходимого для формирования металлических межсоединений в микроэлектронных устройствах. Основное внимание уделено оптимизации ключевых параметров процесса, таких как состав газовой смеси, мощность плазмы, давление в реакторе, для достижения оптимальной скорости.

Ключевые слова: полупроводниковое производство; металлические межсоединения; переходные окна; контактные окна; via; плазмохимическое травление; полупроводниковая технология.

Плазмохимическое травление представляет собой сложный технологический процесс, требующий учета не только параметров травления основного материала, но и особенностей обработки вспомогательных слоев. К таким слоям относится антиотражающее покрытие (АОП), применяемое для минимизации светорассеяния от металлического рельефа. АОП сохраняет стабильность при проведении процесса экспонирования, поэтому требует отдельной стадии травления с применением газовых смесей $CHF_3/CF_4/O_2$, тогда как для травления оксида кремния оптимальным является состав газовой смеси $O_2/Ar/CF_4/CO$.

В работе исследовано влияние процесса травления антиотражающего покрытия и диэлектрика (SiO_2) с акцентом на геометрию металлических межсоединений. Экспериментально установлено, что правильный подбор соотношения компонентов плазмы и режимов обработки на разных стадиях травления позволяет достичь требуемых параметров межсоединений: профиля, линейных размеров и скорости травления. По итогам исследования удалось сократить время обработки пластины на 10% без ухудшения качества травления и изменения геометрических параметров межсоединения.

Полученные результаты подчеркивают необходимость комплексного подхода в разработке технологических режимов при переходе к меньшим топологическим нормам, где требования к точности воспроизведения геометрии межсоединений существенно возрастают. Предложенная методика оптимизации обеспечивает стабильное качество травления при повышении производительности процесса, что имеет важное значение для современного полупроводникового производства.

Литература

1. Plummer J. D. Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling. 2000. P. 609–679.
2. Ефремов А. М., Соболев А. М., Бетелин В. Б., Kwon K. H. Параметры и состав плазмы $CF_4 + O_2 + Ar$ и $CHF_3 + O_2 + Ar$ в процессах реактивно-ионного травления.

УДК 538.97

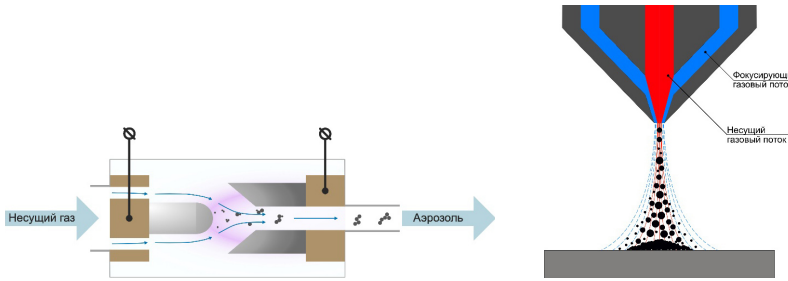
Усиление SERS-сигнала тонких пленок органических красителей с использованием плазмонных наноструктур, формируемых наночастицами металлов

Долгов В. А., Корнюшин Д. В., Борисов В. И., Иванов М. С., Мусаев А. Г., Ворошилова В. А., Иванов В. В.[1]
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

С использованием сформированных сухой аэрозольной печатью SERS-структур были исследованы спектры вынужденного комбинационного рассеяния органических красителей (малахитовый зеленый, родамин), установлена возможность детектирования компонентов в смеси растворов органических красителей с относительной их долей в растворе до 1 %.
Ключевые слова: рамановская спектроскопия; SERS; наночастицы; импульсный газовый разряд; сухая аэрозольная печать.

Широкое распространение рамановской спектроскопии обусловлено ее возможностями в идентификации внутримолекулярных связей, что обуславливает ее применимость не только в научных исследованиях, но и в приложениях медицины, в том числе для анализа качества и подлинности фармпрепаратов, в криминалистике, исследовании произведений искусства [1]. Важным недостатком метода является малая интенсивность излучения вынужденного комбинационного рассеяния, ограничивающая предельные концентрации обнаружения различных веществ в спектре, и невозможность увеличить эту интенсивность за счет увеличения интенсивности лазерного излучения ввиду риска термического повреждения исследуемого образца. Метод поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии (SERS) позволяет увеличить интенсивность излучения вынужденного комбинационного рассеяния и улучшить предельные концентрации обнаружения веществ до уровня отдельных молекул [2] за счет явления плазмонного резонанса. В настоящей работе исследовалось применение SERS-структур из квазисферических наночастиц металлов, формируемых принтером плазмонных наноструктур, разрабатываемым в МФТИ.

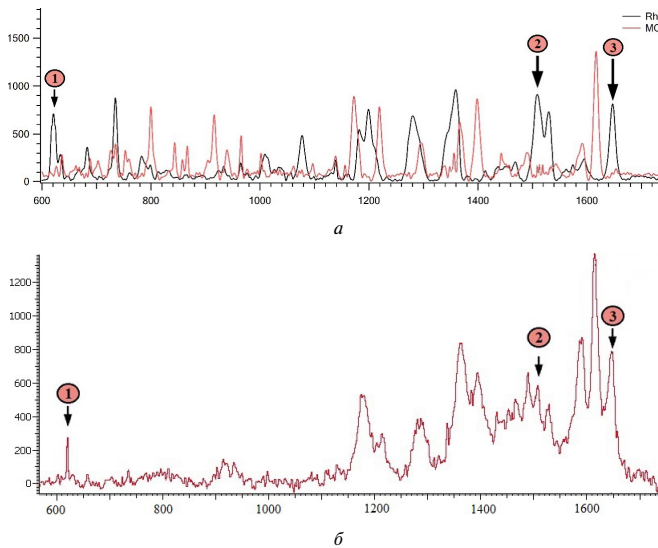
Наночастицы производились в газоразрядной ячейке (рис. 1*а*) методом импульсного искрового разряда из расходуемых металлических электродов в среде инертного газа. В процессе транспортировки дендритоподобные агломераты первичных наночастиц со средним размером 200 нм заводились в лазерный оптимизатор, в котором под воздействием импульсного лазерного излучения с длиной волны 1064 нм они преобразовывались в квазисферические наночастицы со средним размером порядка 70 нм. Наночастицы сфокусированно осаждались на подложки при помощи коаксиального сопла (рис. 1*б*), позволяющего за счет использования фокусирующего газового потока достичь ширины осаждения, частиц кратно меньшей выходного диаметра сопла.



а *б*

Рис. 1. Схематическое изображение синтеза наночастиц в газоразрядной ячейке (*а*) и сфокусированного осаждения наночастиц с использованием коаксиального сопла (*б*)

Приготавливались растворы родамина (RhC) и малахитового зеленого (MG) в химически чистом изопропиловом спирте. Использовался раствор RhC с концентрацией 10^{-3} моль/л и MG с концентрацией 10^{-1} моль/л, затем была приготовлена смесь растворов в соотношении 99:1 таким образом, что относительная доля RhC в растворе составила 1 %, а концентрация — 10^{-5} моль/л. Также для получения образца спектра вынужденного комбинационного рассеяния был получен раствор RhC 10^{-1} моль/л.



а

б

Рис. 2. Спектры вынужденного комбинационного рассеяния красителей RhC и MG (*а*); рамановский спектр тонкой пленки из смеси двух красителей RhC и MG (*б*)

При помощи дипкоатинга чистые растворы красителей с концентрацией 10^{-1} моль/л, а также смесь растворов наносились на подложки в виде тонких пленок. Затем на пленки красителей методом сухой аэрозольной печати наносились плазмонные наноструктуры из наночастиц золота Au. Полученные образцы исследовались на рамановском спектрометре с длиной волны лазерного излучения 532 нм EnSpectr M532.

По результатам исследований выявлено, что характерные пики RhC остаются выявляемыми в рамановском спектре смеси растворов и позволяют однозначно идентифицировать компонент как RhC. Таким образом, можно говорить о возможности детектирования в смеси компонента методом SERS с использованием плазмонных наноструктур, формируемых методом сухой аэрозольной печати, при относительной доле целевого компонента в смеси, составляющей до 1 %.

Литература

1. Ivanov V. et al. Aerosol Dry Printing for SERS and Photoluminescence-Active Gold Nanostructures Preparation for Detection of Traces in Dye Mixtures // Nanomaterials, 2022. Vol. 12. P. 448.
2. Nie S., Emory S. R. Probing Single Molecules and Single Nanoparticles by Surface-Enhanced Raman Scattering // Science, 1997. Vol. 275. P. 1102–1106.

УДК 621.314

Высокоэффективная система передачи мощности для системы ионной имплантации

Руднев Д. Н.[1,2], Сеньков Д. В.[1,2], к. т. н.
[1] *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН*
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
[2] *Новосибирский государственный университет*
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Разработаны структура и алгоритмы повышения надежности модульной системы передачи мощности для применения в системах ионной имплантации.
Ключевые слова: передача мощности; ионная имплантация; модульная система питания.

При разработке систем ионной имплантации неизбежно возникает задача организации питания оборудования, расположенного в высоковольтном терминале. Так как от современных имплантеров требуется высокая стабильность и предельные характеристики ионного луча, то канал транспортировки пучка, находящийся в высоковольтной части установки, содержит большое количество элементов магнитной оптики и диагностики, которые требуют относительно большой мощности для своего функционирования. В докладе описана архитектура компактной системы передачи мощности, позволяющей получить в терминале стабильную трехфазную сеть общей мощностью 50 кВт. Показаны решения, которые с помощью резервирования позволяют существенно повысить надежность системы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, код научной темы FWGM-2024-0001.

Литература

1. Руднев Д. Н., Сеньков Д. В. Проект модульной системы питания высоковольтного терминала системы ионной имплантации // V научно-технический семинар по электронно-пучковому оборудованию и технологиям «Обь-2024». — Новосибирск: Академиздат, 2024.
2. Skorobogatov D., Bryzgunov M., Parkhomchuk V., Pureskin D., Putmakov A., Reva V., Senkov D. et al. The power supply system for the accelerating column of the 2 MeV electron cooler for COSY // Proceedings of RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia. P. 512–514.
3. Батраков А. М., Брызгуно М. И., Гончаров А. Д., Гусев И. А., Жариков А. А., Пархомчук В. В., Рева В. Б., Сеньков Д. В. Система высоковольтного питания электронного охлаждения бустера NICA подавлением пульсаций // Письма в ЭЧАЯ, 2024. — Т. 21. — С. 199–207.

УДК 533.9.08

Дизайн пространственно-разрешенной оптической эмиссионной спектроскопии для оценки однородности плазмы в плазмохимических реакторах

Зиганшин И. И.[1,2], Лопаев Д. В.[1], Кириллов Е. А.[1,2], Брюшков М. М.[2], Рахимов А. Т.[1,2]

[1] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына 119234, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

[2] Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Предложен дизайн оптической системы для оценки однородности плазмы в плазмохимических реакторах на основе девяти каналов ОЭС. Девять спектров, получаемые одновременно детектором с разных произвольно выбираемых пространственных направлений, позволяют реализовать различные схемы оптических измерений для оценки пространственных характеристик плазмы в реакторе.

Ключевые слова: плазма; спектральный контроль; оптическая эмиссионная спектроскопия; диагностика плазмы.

Плазмохимические реакторы широко используются для обработки поверхности различных материалов. Так, в технологиях микроэлектроники плазма используется для травления, осаждения и модифицирования слоев обрабатываемого материала, обеспечивая высокую точность, анизотропию и селективность процессов. В настоящее время работа с пластинами все большего диаметра (вплоть до 450 мм) представляет повышенный интерес в индустрии, позволяя значительно снижать затраты, прежде всего на производство чипов. При этом к однородности обработки материалов плазмой предъявляются крайне высокие требования (типично 2–3 % неоднородность на пластине) для максимизации выхода годной продукции. Не всегда удается подобрать достаточно стабильный рецепт для осуществления точного и однородного процесса, хотя к этому все стремятся. Поэтому разработка неинвазивных, достаточно быстрых и надежных методов оценки однородности является важной составляющей технологии. При этом, конечно же, эти методы должны быть достаточно простыми и не требующими дорогостоящего и сложного в эксплуатации оборудования. В условиях плазмы наиболее соответствующими таким критериям являются методы, основанные на оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС).

В данной работе предложен дизайн многоканальной оптической системы для оценки пространственной однородности плазмы в плазмохимических реакторах на основе девяти каналов ОЭС. Схематично она представлена на рис. 1.

Каждый канал представляет собой УФ-оптоволокно со SMA-адаптером и мини-конденсором, обеспечивающим параллельный луч заданного диаметра до ~1 см. Все девять каналов сведены в общий SMA-жгут, состыкованный с входной щелью спектрографа с матричным детектором (кремниевая CCD- или CMOS-матрица, или ICCD-система). Девять спектров, получаемые одновременно детектором с разных в принципе произвольно выбираемых пространственных направлений, задаваемых юстировками лучей, позволяют реализовать различные схемы оптических измерений

(метод актинометрии и т. п.) для оценки пространственных характеристик плазмы в реакторе. Подобная система не требует внесения изменений в конструкцию реактора, а требует только наличия широкого апертурного окна или нескольких малых окон для сбора излучения из плазмы. В реальности лишь нужна апертура, обеспечивающая поле зрения всей плазмы реактора (пусть даже под очень малым углом). На текущий момент есть недорогие, но достаточно чувствительные камеры, обеспечивающие высокую частоту кадров в несколько кГц. Это дает возможность получать информацию об эволюции пространственного распределения параметров плазмы с хорошим временным разрешением, например информацию о пространственной эволюции плазмохимических реакций над обрабатываемой пластиной, так как характерное время этих реакций, как и время протока газа в реакторе, как раз соответствует миллисекундам.

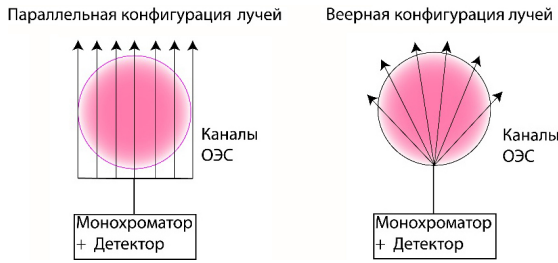


Рис. 1. Дизайн многоканальной оптической системы для оценки пространственной однородности плазмы в плазмохимических реакторах на основе девяти каналов ОЭС

Предложенная многоканальная система ОЭС не является томографической системой. Она подходит для реакторов низкого давления, где квазиоднородность достигается за счет быстрого диффузионного расплывания. Это условие собственно обеспечивает упрощенный алгоритм восстановления пространственного распределения спектров. Алгоритм восстановления данного распределения по девяти лучам был проверен на синтетических изображениях и распределениях излучения плазмы. Было показано, что если неоднородность плазмы невелика, то среднее значение вдоль луча позволяет достаточно точно восстановить в пространственной точке измеряемую величину, например концентрацию радикалов по методу актинометрии. Если же неоднородность большая, то необходимо использовать преобразование Абеля для восстановления распределения.

Очевидно, что подобная методика прежде всего нужна в исследовательских работах, а также на этапах опытно-конструкторских и пусконаладочных работ. Но при необходимости она может быть востребована и непосредственно на производстве в качестве средства контроля технологии, а также правильности функционирования реактора после проведения регламентных или ремонтных работ.

Литература

1. Lopaev D. V., Volynets A. V., Zyryanov S. M., Zotovich A. I., Rakhimov A. T. Actinometry of O, N and F atoms // J. Phys. D. Appl. Phys., 2017. Vol. 50. P. 075202.
2. Lopaev D. V., Smirnov A. V. Diagnostics of Heterogeneous Processes with the Participation of Radicals by Time-Resolved Actinometry // Plasma Physics Reports, 2004. Vol. 30. P. 882–893.

УДК 621.3.049

Исследование процесса плазменного травления нитрида кремния с вертикальным профилем для фотонных интегральных схем

Куринная А. А.[1,2], Соловьёв А. А.[2], Дятлов В. Д.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
kurinnaia.aa@phystech.edu
[2] ООО «Маппер»
109316, г. Москва, Волгоградский просп., 42, корп. 5
anatoly.solovyov@mapperllc.ru

В данной работе отработан процесс плазменного травления нитрида кремния в целях получения вертикального профиля структур $90 \pm 1^{\circ}$ селективностью к резисту более 2:1 и неравномерностью по пластине ∅100 мм менее 5%. В ходе исследования изучено влияние основных рабочих параметров установки на технологические характеристики процесса травления.
Ключевые слова: SiN; плазменное травление; рабочие и технологические параметры; селективность; равномерность.

Нитрид кремния (SiN) активно применяется в фотонных интегральных схемах (ФИС) благодаря широкому рабочему спектральному диапазону, который охватывает длины волн от видимого света до среднего ИК. Также его преимуществами являются низкое оптическое затухание (<0,1 Дб/см, что критически важно для минимизации потерь сигнала) и возможность полной интеграции в стандартные КМОП-процессы [1]. Это позволяет использовать его в волоконно-оптических системах связи, биосенсорах и в сенсорных системах для мониторинга окружающей среды транспортных средств.

На высокую производительность структуры из SiN влияет управление процессом плазмохимического травления. Вертикальный профиль структур, высокая селективность к фоторезисту и равномерность по пластине, в дополнение отсутствие других дефектов, таких как шероховатость стенок и бочкообразность профиля, позволяют получать минимальные потери в оптических волноводах. Влияние рабочих параметров на вышеперечисленные технологические в процессе плазменного травления нитрида кремния — приоритетное исследование в данной работе.

Было проанализировано влияние газовой смеси, рабочего давления и мощности источника плазмы на технологические параметры. В качестве образцов применялись кремниевые пластины ∅100 мм с осажденным нитридом кремния 500 нм (методом PECVD). Травление происходило на установке с емкостной связанной плазмой с частотой генератора 13,56 МГц и мощностью не более 300 Вт. Технологические параметры: равномерность и селективность, скорость травления, угол профиля — измерялись методом сканирующей электронной микроскопии. В ходе выполнения работы на основе полученных зависимостей был составлен процесс травления нитрида кремния, обеспечивающий реализацию заданных параметров с учетом перечисленных ранее ограничений.

Литература

1. Buzaverov K. A. et al. Silicon Nitride Integrated Photonics from Visible to Mid-Infrared Spectra // Laser & Photonics Reviews, 2024. Vol. 18. № 12. P. 2400508.

УДК 538.958

Оптически активные дефектные центры в матрице Si для КМОП-совместимых устройств квантовой фотоники

Юрасов Д. В.[1], Яблонский А. Н.[1], Захаров В. Е.[1], Михайлов А. Н.[2], Никольская А. А.[2], Новиков А. В.[1]

[1] Институт физики микроструктур РАН
603087, Нижегородская обл., д. Афонино, ул. Академическая, 7
Inquisitor@ipmras.ru
[2] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

Для задач оптических квантовых коммуникаций и вычислений необходимы излучатели одиночных фотонов. В работе представлены результаты по формированию оптически активных дефектных центров в матрице Si и исследования возможностей создания на их основе КМОП-совместимых источников одиночных фотонов.

Ключевые слова: Si-фотоника; дефектные центры; ионная имплантация; микрорезонаторы; люминесценция; ближний ИК; однофотонные источники.

Десятилетиями прогресс в микроэлектронике достигался в основном за счет уменьшения размеров транзисторов и увеличения их плотности размещения на кристалле. Однако эти возможности практически исчерпаны, поскольку характерные размеры элементов снизились до единиц нанометров. В связи с этим переход к оптоэлектронике и фотонике признается во всем мире как перспективный путь развития. Тем не менее Si был и остается основной платформой электроники, а в связанные с ним производственные мощности и накопленные знания вложены огромные средства. Отсюда вытекает требование к устройствам фотоники быть совместимыми с существующей КМОП-технологией. Многие оптические элементы на базе Si (волноводы, модуляторы и др.) уже созданы, но до сих пор отсутствует один из главных — эффективный излучатель на основе Si, т. к. Si является непрямозонным полупроводником. Ввиду этого задача создания эффективного Si-совместимого источника излучения ближнего ИК-диапазона остается актуальной. Другой аспект проблемы связан с новыми направлениями, а именно с квантовыми вычислениями и коммуникациями. Для задач оптических квантовых коммуникаций и вычислений необходимы, помимо прочего, излучатели одиночных фотонов. Создание фотонных схем на чипе с интегрированными однофотонными источниками открывает новые возможности для реализации квантовых вычислительных протоколов, а также для масштабирования таких систем. Локализация таких источников в микрорезонаторах имеет перспективы для создания элементов оптической квантовой памяти.

Одним из возможных подходов к решению вышеописанных задач является использование оптически активных дефектных центров в Si [1]. Создание таких центров возможно различными методами, в частности за счет ионной имплантации — стандартного метода, совместимого с КМОП-технологией. Среди большого разнообразия дефектных центров в Si [2] внимание будет в основном сосредоточено на двух типах — т. н. G- и W-центрах. G-центр (комплекс из двух атомов C и одного атома Si) является популярным объектом исследований ввиду того, что он излучает

в ближнем ИК (~1278 нм), является одним из наиболее ярких и обладает малой шириной линии (от долей мэВ для природного Si до значений ниже 1 мкэВ для матрицы из изотопно очищенного 28Si). W-центр (комплекс из трех атомов Si в междоузлиях) исследован меньше, однако тоже представляется перспективным. Он также излучает в ближнем ИК (~1220 нм), причем обладает большей термостойкостью.

Эффективным способом модификации оптических свойств среды является использование диэлектрических микрорезонаторов. Развитие технологий к настоящему времени позволяет создавать микрорезонаторы с высокой точностью и малыми размерами элементов. Использование микрорезонаторов для вышеописанных дефектных центров в Si позволит повысить их эффективность как излучателей и даст дополнительные возможности по управлению их излучением.

Развитие технологий очистки природного Si позволяет получить образцы 28Si с остаточными долями изотопов 29Si и 30Si на уровне 10–100 ppm. Формирование дефектных центров в матрице из изотопно очищенного 28Si позволяет устранить уширение линии излучения таких центров, связанное с флуктуациями их окружения, что приводит к резкому (1–2 порядка) сужению линии их излучения при низких температурах.

Создание на основе дефектных центров в Si оптически активных элементов, в т. ч. источников одиночных фотонов в ближнем ИК-диапазоне, полностью совместимых с КМОП-технологией, откроет новые возможности по разработке элементов фотонных схем и квантово-фотонных устройств.

Работа поддержана РНФ (грант № 25-12-00367).

Литература

1. Davies G. The optical properties of luminescence centres in silicon // Phys. Rep., 1989. Vol. 176 (3–4). P. 83.
2. Durand A., Baron Y., Redjem W., Herzig T., Benali A., Pezzagna S., Meijer J., Kuznetsov A. Yu., Gerard J.-M., Robert-Philip I., Abbarchi M., Jacques V., Cassabois G., Dreau A. Broad Diversity of Near-Infrared Single-Photon Emitters in Silicon // Phys. Rev. Lett., 2021. Vol. 126. P. 083602.

УДК 621.383

Вычислительная оптоэлектроника и новые возможности электрически управляемых фотодетекторов

Сёмкин В. А.[1], Мазуренко И. М.[1], Капралов К. Н.[1,2], Мыльцев В. Н.[1], Кайдашев В. Е.[3], Домарацкий И. К.[1,2], Кащенко М. А.[1,2], Борисенко Д. П.[4], Кононенко О. В.[4], Бочаров А. Ю.[2], Свинцов Д. А.[1,2], к. ф.-м. н.

[1] Центр фотоники и двумерных материалов,
Московский физико-технический институт
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
svintcov.da@mipt.ru
[2] АО «Сканда Рус»
143403, г. Красногорск, ул. Речная, 8
[3] Южный федеральный университет
344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 200/1
[4] Институт проблем технологии микроэлектроники
и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

Вычислительная оптоэлектроника представляет собой набор методов для определения спектра, поляризационного и пространственного состояния излучения с помощью фотоприемников с электрически управляемыми характеристиками. В данной парадигме оказывается возможным построение одноэлементных спектрометров и поляриметров без сложных оптических обвязок, а также фоточувствительных матриц, не требующих сопряжения с интегральными схемами считывания. В докладе дается обзор достижений вычислительной оптоэлектроники в России и в мире.

Ключевые слова: фотоприемник; инфракрасное излучение; спектрометр; поляриметр; двумерные материалы.

Относительно недавно было понято, что изменение фоточувствительных характеристик приемников в реальном времени может быть использовано для получения информации о детектируемом излучении, дополняющей определение интенсивности. Такая концепция была названа вычислительной оптоэлектроникой, с помощью ее методов оказывается возможным определение спектра, поляризационного состояния и пространственного распределения интенсивности излучения с помощью единичных детекторов [1].

Принцип вычислительной оптоэлектроники проще всего понять на примере вычислительной спектроскопии. Пусть чувствительность приемника R зависит от управляющего напряжения V и длины волны излучения λ, при этом функция $R(V, \lambda)$ определена на этапе калибровки. Фототок детектора при данном управляющем напряжении $I_{ph}(V)$ может быть представлен в виде свертки спектра изучаемого излучения $\rho(\lambda)$ с функцией чувствительности. После дискретизации свертки это соотношение представляется в виде линейной системы $I_{ph}(V_i) = \sum_j R(V_i, \lambda_j)\rho(\lambda_j)\Delta\lambda$. Из нее спектр излучения $\rho(\lambda_j)$ определяется однозначно по измеренному массиву фототоков $I_{ph}(V_i)$ при разных управляющих напряжениях. Для качественного определения спектра важна невырожденность матрицы чувствительностей. Иначе говоря, изменения спектра поглощения при подаче управляющего напряжения

должны быть нетривиальными и не должны сводиться к пропорциональному умножению. Данная концепция была применена для реализации спектрометров на основе эффекта Штарка в квантовых ямах на основе черного фосфора [2], на основе эффекта Франца — Келдыша в двумерном гетеропереходе [3], на основе изменения межзонных дипольных моментов при приложении поперечного поля в двухслойном графене [4].

В работах нашей группы мы сфокусировались на реализации вычислительной поляриметрии — определении поляризационного состояния излучения с помощью детекторов с затворно-управляемой чувствительностью. Нами было показано, что детекторы ИК-излучения ($\lambda_0 = 8{,}6$ мкм) на основе барьера Шоттки «металл — графен» могут переключаться из состояния с сильной анизотропной поляризационной чувствительностью в поляризационно-нечувствительное состояние при подаче напряжения на нижний затвор [5]. Это происходит из-за (1) зависимости ширины барьера Шоттки на контакте от затворного напряжения, (2) зависимости пространственного распределения поглощения на контакте «металл — графен» от поляризации падающего излучения. Измерение фототоков в этих двух электрически определенных состояниях — изотропном и анизотропном — оказывается достаточным для однозначного определения интенсивности и угла линейной поляризации регистрируемого излучения. Далее было показано, что эффект специфичен для дальнего инфракрасного диапазона, где размер области локального усиления поля вблизи металлического края $l \sim \lambda_0 / 100 \sim 100$ нм сопоставим с длиной барьера Шоттки. Наконец, возможны модификации геометрии контактов к двумерному материалу, для которых возможно определение угла линейной поляризации и степени эллиптичности поляризации излучения.

Вторым ярким примером достижений вычислительной оптоэлектроники является реализация матричного инфракрасного детектора, не требующего вертикальной гетерогенной интеграции со схемой считывания. В таком устройстве фоторезисторы (фотопроводники или болометры) объединяются электрически в простую квадратную решетку. Подача тока смещения и считывание сигнала фотонапряжения производятся лишь на периметре сетки фоторезисторов, при этом положение контакта для инжекции тока меняется с помощью внешнего мультиплексора. Для каждого положения точки инжекции распределение фоточувствительности детекторов по матрице оказывается различным. Измерение напряжений на периметре при разных токах инжекции оказывается с запасом достаточным для построения полного изображения. Принцип работы такого матричного детектора является универсальным и не зависит от фоточувствительного материала. С помощью данного принципа нами были изготовлены матричные детекторы небольшой размерности на основе многослойного графена и диоксида ванадия.

Литература

1. Yuan S. et al. Geometric deep optical sensing // Science, 2023. Vol. 379. № 6637. P. 1103.
2. Yuan S., Naveh D., Watanabe K., Taniguchi T. Xia F. A wavelength-scale black phosphorus spectrometer // Nat. Photonics, 2021. Vol. 15. № 8. P. 601–607.
3. Uddin M. G. et al. Broadband miniaturized spectrometers with a van der Waals tunnel diode // Nat. Commun., 2024. Vol. 15. № 1. P. 571.

4. Ma C. et al. Intelligent infrared sensing enabled by tunable moiré quantum geometry // Nature, 2022. Vol. 604. № 7905. P. 266–272.
5. Semkin V., Mylnikov D., Titova E., Zhukov S., Svintsov D. Gate-controlled polarization-resolving mid-infrared detection at metal–graphene junctions // Appl. Phys. Lett., 2022. Vol. 120. № 19. P. 191107.

УДК 681.7.068; 535.513.1

Использование оптических волокон со сверхвысокой числовой апертурой при вводе излучения в чипы фотонных интегральных схем: опыт применения и полученные результаты

Паньков А. С., Пономарев Р. С., к. ф.-м. н.
Пермский государственный национальный исследовательский университет
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15
lab.photon.psu@gmail.com

Разработаны технологии формирования волоконно-оптических элементов с использованием волокон со сверхвысокой числовой апертурой, применяемых для ввода излучения в фотонные интегральные схемы. Предложенный метод изготовления позволяет получать структуры, способные сохранять поляризацию оптического излучения.
Ключевые слова: оптическое волокно со сверхвысокой числовой апертурой; фотонная интегральная схема; ввод-вывод оптического излучения; UHNA.

Миниатюризация электронных схем приближается к критической отметке, однако потребность в более высокой скорости обработки данных продолжает расти. Для преодоления этого ограничения необходимы устройства, работающие на новых принципах обработки данных. Одним из перспективных решений является применение фотонов как для передачи, так и для обработки информации. На этом фоне фотонные интегральные схемы (ФИС), отличающиеся высокой скоростью работы и минимальным энергопотреблением, начинают рассматриваться как перспективный путь развития технологий [1]. При использовании ФИС до сих пор остается проблема потерь оптического излучения. Стандартное одномодовое волокно имеет диаметр сердцевины порядка 9 мкм — это в разы больше, чем размеры волноводов ФИС. Диаметры полей мод (ДПМ) волокна и волноводов, которые описывают распределение светового поля в волокне и волноводе, существенно отличаются. Чем меньше разница между числовыми апертурами волокна и волновода, тем лучше согласование и ниже оптические потери при передаче излучения в фотонную интегральную схему [2]. В данной работе для снижения оптических потерь при вводе излучения в ФИС предлагается использование волоконно-оптических сборок, включающих в себя отрезки волокна со сверхвысокой числовой апертурой (UHNA). Эти отрезки способны формировать пучки диаметром 3 мкм, что позволяет повысить эффективность ввода оптического излучения в ФИС.

В результате работы были изготовлены образцы оптических элементов ввода излучения, состоящие из одномодового оптического волокна, в том числе с сохранением поляризации оптического излучения типа (PMF), с приваренным к нему отрезком волокна типа UHNA. Значения потерь при сварке одномодовых волокон с волокнами со сверхвысокой числовой апертурой составили от 0,2 до 0,4 дБ в зависимости от типа волокна (UHNA-1, UHNA-3, UHNA-4). Значения коэффициента поляризованного затухания полученных структур варьировались в интервале от 30 до 40 дБ.

Пары сформированных волоконно-оптических структур (PMF-UHNA) использовались для стыковки с ФИС на основе нитрида кремния (Si_3N_4). При стыковке оценивались потери системы «волокно — ФИС — волокно» на длине волны 1550 нм. Результаты оптических потерь при использовании оптических элементов с UHNA сравнивались с результатами при использовании линзованных оптических волокон. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Численные результаты оптических потерь структур, использованных для стыковки с ФИС

Тип структуры	Оптические потери, дБ	
	TE-поляризация	TM-поляризация
PMF-UHNA1	5,79	6,01
PMF-UHNA3	5,01	5,97
PMF-UHNA4	3,87	4,56
PMF-PMF	11,21	14,03

Показано, что изготовленные структуры способны минимизировать оптические потери при стыковке с фотонными интегральными схемами с волноводами малого диаметра, в некоторых случаях позволяя получить более низкие значения оптических потерь относительно одномодовых волокон.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSNF-2024-0001.

Литература

1. Mu X., Wu S., Cheng L., Fu H. Y. Edge couplers in silicon photonic integrated circuits: a review // Applied sciences, 2020. Vol. 10 (4). P. 1–2.
2. Ивашенцева И. В., Третьяков И. В., Каурова Н. С., Голиков А. Д. Эффективность согласования одномодового волокна с фотонной интегральной схемой Si_3N_4 // Оптика и спектроскопия, 2024. — Т. 132 (10). — С. 1076–1086.

УДК 02-302

Генерация групп связанных солитонов в эрбиевом волоконном лазере с пассивной синхронизацией мод на основе одностенных углеродных нанотрубок

Исмаил Алмикдад[1,2], Крылов А. А.[3], Образцова Е. Д.[1,4]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
almikdad12@gmail.com
[3] Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е. М. Дианова
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38
[4] Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Разработан полностью волоконный эрбиевый генератор ультракоротких импульсов с пассивной синхронизацией мод на основе естественно насыщающегося поглотителя в виде пленки из одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ). Была получена генерация групп связанных солитонов (солитонных молекул) с центральной длиной волны 1560 нм, длительностью импульса ≈700 фс и частотой повторения 30,84 МГц. Количеством солитонов можно управлять путем изменения мощности накачки лазера. Получена генерация типичного одноимпульсного солитона, группы солитонных молекул с двумя, тремя, четырьмя и пятью импульсами.

Ключевые слова: солитонные молекулы; лазеры ультракоротких импульсов; углеродные нанотрубки.

Волоконные лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) привлекают все большее внимание как объекты научных исследований и мощные инструменты для применения в различных областях. В солитонных молекулах устанавливается когерентное состояние между несколькими импульсами (солитонами), которые генерируются с определенной фазовой разницей, что приводит к образованию «молекулы» импульсов [1], характеризующейся определенными длительностями импульсов и расстояниями между пиками. Теоретическая основа СМ базируется на солитон-солитонных взаимодействиях и теории квантования солитонов. Фундаментально высокая внутрирезонаторная нелинейность вызывает расщепление солитонов при высокой мощности накачки. Роль фильтрации резонатора также значительна: когда нелинейность резонатора лазера достаточно выражена, фазовая самомодуляция (ФСМ) расширяет оптический спектр за пределы ограниченной полосы пропускания активного волокна. При высокой мощности накачки могут генерироваться независимые спектральные компоненты с более длительными импульсами, что приводит к образованию СМ после усиления в активном волокне и последующей фильтрации из-за потерь резонатора в ходе многократных проходов.

Генерация СМ была раньше нами получена на основе нелинейной эволюции поляризации (НЭП) в качестве искусственного насыщающегося поглотителя (НП) [1]. Получилась управляемость количеством импульсов в широком диапазоне от 4 до 14. Однако реализация синхронизации мод в самозапускаемом режиме в волоконных лазерах является сложной задачей. В отличие от естественных НП, например одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ), механизм НЭП очень чувствителен к температуре и внешним условиям. Изменение положения любого волокна в резонаторе может привести к изменению двулучепреломления и, соответственно, распаду режима синхронизации мод.

В связи с данной проблемой было решено исследовать возможность генерации СМ на основе ОУНТ, был разработан полностью волоконный кольцевой лазер, легированный эрбием. В качестве активной среды было использовано активное волокно, легированное атомами эрбия (EDF) длиной 3 м с отрицательной дисперсией групповой скорости (ДГС) = $-22{,}2$ пс^2·км$^{-1}$, что позволило получить суммарную отрицательную ДГС резонатора около $-0{,}151$ пс^2. Это условие дает возможность настроить генератор в солитонном режиме и упростить получение УКИ с помощью ОУНТ при балансе между параметрами дисперсии и нелинейности. Общая длина резонатора составила 6,48 м, что соответствует периоду выходных импульсов 32,42 нс и частоте повторения импульсов 30,84 МГц. Для реализации механизма синхронизации мод использовалась тонкая пленка из ОУНТ со следующими характеристиками: глубина модуляции 6,64 %, ненасыщенные потери 17,26 % и энергия насыщения 29 пдЖ. Стоит отметить, что ОУНТ изготовлены дуговым методом (arc discharge) и имеют поглощение слабого сигнала 22 % на 1560 нм (центр — полоса усиления эрбиевых лазеров).

С мощностью накачки 79,8 мВт наблюдалась генерация УКИ в режиме солитона с шириной спектра 2,75 нм, длительностью импульса 894 фс, центральной длиной волны 1563,55 нм и выходной средней мощностью 0,672 мВт. Данная генерация продолжалась с мощностью накачки до 83,24 мВт. При увеличении мощности накачки наблюдалась генерации СМ с количеством импульсов 2, 3, 4, и 5 в диапазоне накачки от 88,7 до 252 мВт. Количество импульсов увеличивалось при увеличении мощности накачки. Также выходная мощность увеличивалась с 6,27 до 39 мВт. Возможность изменения количества импульсов осуществлялась путем увеличения или уменьшения мощности накачки. Важно заметить, что пленка ОУНТ не испытывала повреждения, поскольку генерация УКИ происходит в режиме СМ, что гарантирует низкую пиковую мощность за счет разделение энергии на нескольких импульсах. Изменение числа импульсов произошло на основе теории квантования солитонов, которая допускает увеличение энергии солитона при сохранении относительно постоянного уровня пропускания НП. Мы ожидаем, что разработанный генератор СМ на основе ОУНТ будет находить интересные применения, особенно в области квантовых вычислений и квантовой телекоммуникации.

Литература

1. Ismaeel A., Orekhov I. O., Sazonkin S. G., Dvoretskiy D. A. et al. Low-noise soliton molecule generation with an in-phase controllable pulse number by third-and second-order dispersion compensation in an all-fiber erbium-doped oscillator // Applied Optics, 2024. № 63 (33). P. 8503–8509.

УДК 535.015

Генерация сжатых состояний света в LNOI-волноводах

Пошевкина А. А., Шарапова П. Р.
ООО «МЦКТ»
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
a.poshevkina@gmail.com

Исследовано влияние геометрических параметров LNOI-волновода и свойств накачивающего лазерного излучения на число мод Шмидта генерируемого сжатого света. Найдены значения геометрических параметров волновода, позволяющие генерировать свет с большим числом мод Шмидта при высоком значении гейна G = 5.

Ключевые слова: LNOI; ниобат лития на изоляторе; сжатые состояния света; сжатый вакуум; параметрическое рассеяние; квантовые фотонные чипы; квантовые фотонные процессоры.

Сжатые состояния света являются одним из ключевых ресурсов в современной квантовой оптике, поскольку, благодаря уменьшению квантовых флуктуаций в одной из квадратур электромагнитного поля ниже стандартного квантового предела, их использование позволяет существенно повысить точность измерений и уровень контроля над квантовыми состояниями. Вследствие этого сжатые состояния света находят широкое применение в различных направлениях квантовых технологий, таких как:

- протоколы квантовой коммуникации и квантовой криптографии, где сжатие света используется для повышения устойчивости к возникновению ошибок при передаче информации, в частности в схемах квантовой телепортации и распределения ключей в непрерывных переменных;
- высокоточная метрология: например, в детекторах гравитационных волн типа LIGO внедрение сжатого вакуума позволило увеличить чувствительность за счет подавления шумов при измерениях;
- квантовые вычисления с использованием непрерывных переменных, где сжатые состояния света играют важную роль носителя информации.

Одним из универсальных и наиболее перспективных материалов для производства интегральных фотонных схем в целях квантовых вычислений является ниобат лития, предлагающий сочетание таких свойств, как высокая нелинейность второго порядка, широкое окно прозрачности и сильные электрооптические коэффициенты. Эти качества позволяют производить на одном устройстве из ниобата лития как линейные элементы, такие как светоделители и фазовращатели, так и нелинейные элементы, основанные на эффекте параметрического рассеяния света, с высокой эффективностью. В последние годы особую популярность приобрела платформа тонких пленок ниобата лития на изоляторе (LNOI), которая, в отличие от традиционных волноводов из ниобата лития, позволяет производить более плотную упаковку элементов на чип, а также модифицировать свойства генерируемого света при помощи изменения геометрии волновода. Эти атрибуты делают LNOI особенно подходящим для разработки квантовых оптических процессоров с улучшенной производительностью и масштабируемостью.

Целью нашего исследования была разработка источника сжатого света с высоким числом мод Шмидта. Такие моды весьма привлекательны для квантовых оптических вычислений, так как могут быть использованы в качестве ресурса для построения кластерных состояний. Более того, на основе таких мод может быть реализован гауссов бозонный сэмплинг, а также универсальные вычисления в схемах с измерениями.

В результате исследования были рассчитаны числа мод Шмидта для различных геометрических параметров волновода и параметров лазерной накачки. Была найдена аналитическая зависимость числа мод Шмидта от длинны кристалла и длительности импульса. Также были обнаружены конфигурации, дающие большие числа мод Шмидта, превышающие K = 100.

Литература

1. Zhao J., Fang B., Zhang Y. et al. Flexible source of correlated photons based on LNOI rib waveguides // Journal of Physics: Photonics, 2022. Vol. 4. № 2.
2. Mikhalychev A., Khalili F., Chekhova M.V. Phase sensitivity of spatially broadband high-gain SU(1,1) interferometers // Physical Review Research, 2023. Vol. 5. № 4.
3. Zhu D., Hu H., Zheng L. et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate // Advances in Optics and Photonics, 2021. Vol. 13. № 2. P. 242–352.
4. Ebers L., Ferreri A., Hammer M. et al. Flexible source of correlated photons based on LNOI rib waveguides // Journal of Physics: Photonics, 2022. Vol. 4. Article 024009.

УДК 538.958

Применение модуляционных методов фурье-спектроскопии в исследовании гетероструктур GeSiSn/Ge/Si для приборов интегральной фотоники

Чуманов И. В.[1], Фирсов Д. Д.[1], Коляда Д. В.[1], Комков О. С.[1], Скворцов И. С.[2], Тимофеев В. А.[2]

[1] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
[2] Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

Методами модуляционной фурье-спектроскопии исследованы перспективные для интегральной фотоники гетероструктуры на основе GeSiSn. Высокая информативность методов позволила оценить механические напряжения в эпитаксиальных слоях, определить напряженность встроенного электрического поля на гетерогранице и изучить влияние отжига на люминесцентные свойства структур.

Ключевые слова: германий; кремний; GeSiSn; GeSn; фурье-спектроскопия; гетероструктуры; фотоотражение; фотолюминесценция.

Интегральная фотоника развивается параллельно с электроникой и является важной технологией, предназначенной для скоростной передачи и маршрутизации большого объема данных. Проведение исследований для поиска подходящих материалов и разработки новых приборов является важной задачей для данной области. В связи с этим полупроводниковые материалы на основе твердых растворов германия, кремния и олова в последние годы вызывают существенный интерес. К преимуществам данного класса материалов можно отнести возможность получения состава с прямой структурой зон, совместимость с существующей КМОП-технологией и попадание в спектральный диапазон окон прозрачности, утвержденный Международным союзом телекоммуникаций [1].

Наиболее изученным является двухкомпонентный твердый раствор GeSn, в котором прямая структура энергетических зон наблюдается при содержании Sn свыше 6,5–10 % [2]. На основе данного материала уже существуют прототипы рабочих оптоэлектронных приборов в области ближнего и среднего инфракрасного (ИК) диапазона [3, 4]. Однако существует ряд технологических трудностей при эпитаксиальном росте, среди которых можно отметить сегрегацию олова на поверхности при увеличении его доли в составе, низкую растворимость олова в германии (в твердой фазе), различие в периоде кристаллической решетки (различие периодов α-Sn с Ge — 15 %, а с Si — 17 %), высокую концентрацию дефектов [2].

В данной работе представлены результаты исследования гетероструктур на основе трехкомпонентного твердого раствора GeSiSn на кремниевых подложках с помощью модуляционных методов фурье-спектроскопии фотоотражения (ФО), а также фотолюминесценции (ФЛ). Фотоотражение представляет собой бесконтактный чувствительный метод, в котором регистрируется изменение интенсивности отраженного зондового луча из спектрометра при периодической модуляции

приповерхностного или встроенного электрического поля образца с помощью лазера с энергией фотонов в области собственного поглощения материала. Применение данного метода для исследования образцов GeSn/Ge/Si и GeSiSn/Ge/Si позволило экспериментально определить энергии прямых межзонных переходов, по которым были уточнены составы слоев. Также было показано влияние температуры отжига образцов в атмосфере аргона на величину механических напряжений. Полученные результаты согласуются с независимыми измерениями методом рентгеновской дифракции. В другой серии образцов в спектрах ФО были зарегистрированы осцилляции Франца — Келдыша. С их помощью стало возможно определение величины напряженности электрического поля на гетерогранице эпитаксиальный слой / Ge буфер, значения этих величин составили от 22 до 27,7 кВ/см при 80 K. Таким образом, появляется возможность оценки концентрации свободных носителей заряда.

Метод фотолюминесценции с модулированным излучением накачки применялся для изучения квантово-размерных структур на основе GeSiSn. При исследовании образцов с квантовыми ямами с помощью данного метода было показано влияние различных видов отжига на дефекты в структуре, а также это позволило наблюдать переходы на гетерогранице GeSiSn/Si с энергиями 0,512–0,75 эВ (длина волны 1,65–2,42 мкм) при 11 K. Аналогичные исследования образцов с квантовыми точками GeSiSn показали существенное (на порядок) увеличение сигнала ФЛ, энергия которого расположена вблизи 0,7 эВ, после отжига в водородной плазме.

Таким образом, в рамках данной работы были применены возможности методов на основе ИК-фурье-спектроскопии для проведения исследований зонной структуры материалов GeSiSn и наблюдения ФЛ от квантово-размерных структур. Результаты работы представляют интерес и являются востребованными для проектирования и разработки приборов интегральной фотоники, работающих в телекоммуникационном диапазоне.

Литература

1. Timofeev V. A. et al. Features of Optical Transitions in GeSiSn/Si Multiple Quantum Wells // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2022. Vol. 58. № 6. P. 571–578.
2. Коляда Д. В. и др. Исследование влияния отжига и состава на инфракрасную фотолюминесценцию наногетероструктур GeSiSn/Si с множественными квантовыми ямами // Физика и техника полупроводников, 2022. — Т. 56. — № 8. — С. 765–769.
3. Oehme M. et al. GeSn pin detectors integrated on Si with up to 4 % Sn // Applied Physics Letters, 2012. Vol. 101. № 14. P. 141110.
4. Zhou Y. et al. Electrically injected GeSn lasers with peak wavelength up to 2.7 μm // Photonics Research, 2021. Vol. 10. № 1. P. 222–229.

УДК 535.8

Численное моделирование зависимости эффективного показателя преломления SiN-волновода от концентрации водорода в атмосфере

Кузнецов И. В.[1], Перин А. С.[1,2], к. т. н.
[1] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, ул. Ленина, 40
igor.v.kuznetsov@tusur.ru
[2] Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1

Приведены результаты моделирования зависимости эффективного показателя преломления оптического волновода и интенсивности на выходе ИМЦ от концентрации водорода в атмосфере. Показано, что возможно осуществлять детектирование изменения концентрации водорода посредством обнаружения возникающей фазовой задержки.
Ключевые слова: водород; нитрид кремния; фотонная интегральная схема.

Водород (H_2) является одним из важных реагентов в химической промышленности. В частности, H_2 используется в качестве восстановителя в производстве аммиака и соляной кислоты. Поскольку при сгорании H_2 образуется только водяной пар, водород в последние годы рассматривается в качестве экологически чистого топлива для автомобильной и космической промышленности.

При использовании H_2 важно учитывать, что он является легко воспламеняемым и взрывоопасным газом. Отметим, что водород не имеет цвета или запаха, что затрудняет обнаружение его утечек. При этом H_2 взрывоопасен в широчайшем диапазоне концентраций.

В настоящее время наиболее распространенными на рынке детекторами H_2 являются электрические приборы, к которым относятся каталитические, электрохимические и датчики на основе изменения теплопроводности. Общим недостатком всех перечисленных типов датчиков можно назвать то, что использование электрических сигналов обуславливает возможность ложных срабатываний ввиду подверженности электромагнитным помехам, а также создает угрозу детонации водорода из-за возможности образования искр. Альтернативой электрическим датчикам могут служить оптические датчики, использующие взрывобезопасные и помехоустойчивые оптические сигналы.

Целью работы является численное моделирование эффективного показателя преломления SiN-волновода для исследования возможности обнаружения водорода с помощью чувствительных элементов на основе фотонных интегральных схем.

Рассматриваемая схема чувствительного элемента представлена на рис. 1.

Ширина сердцевины волновода (SiN) составляла 1,4 мкм, высота — 160 нм, высота подложки составляла 2 мкм (SiO_2), а высота оболочки (SiO_2 или воздух) — 5 мкм. Длина опорного плеча L составляла 320 мкм, а длина безоболочного плеча составляла $k\,L$, где k>1. Дисперсионные уравнения показателей преломления SiO_2 и SiN приведены в работах [1, 2].

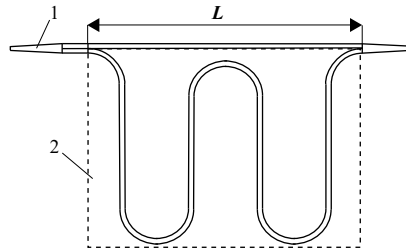
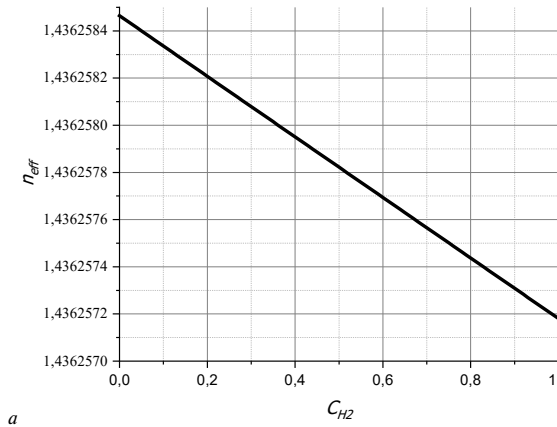
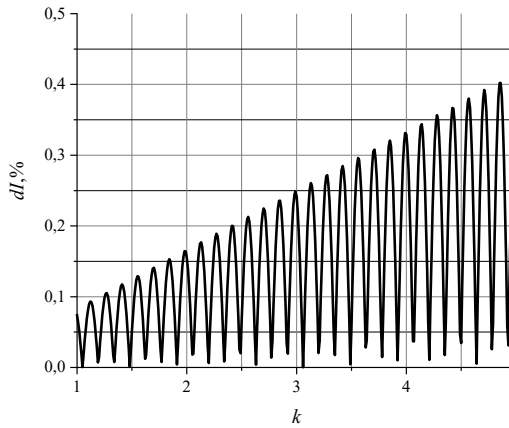


Рис. 1. Схема рассматриваемого чувствительного элемента: 1 — волноводная структура на основе SiN на изоляторе SiO_2, 2 — область, где волноводная структура не имеет оболочки



а



б

Рис. 2. Результаты моделирования

Показатели преломления воздуха (n_{air}) и водорода (n_{H2}) определяются по дисперсионным уравнениям, приведенным в работах [3, 4]. Поскольку в научной литературе нет данных о зависимости показателя преломления воздуха от концентрации H_2 (C_{H2}), было принято решение описать это зависимостью

$$n = (1 - C_{H_2}) n_{air} + C_{H_2} n_{H_2}.$$

В дальнейшем эту зависимость можно будет пересмотреть, если эмпирически удастся установить иную.

На рис. 2*а* приведена зависимость эффективного показателя преломления безоболочного волновода от CH_2, на рис. 2*б* — зависимость изменения интенсивности между 0-й и 100%-й концентрациями водорода на выходе оптической схемы от величины параметра k.

На рис. 2*б* видно, что по мере увеличения L разница между интенсивностью при нулевой и максимальной концентрации H_2 возрастает. При этом провалы этой зависимости объясняются изменением положения рабочей точки.

Таким образом, как можно понять из рис. 2, задача проектирования оптического чувствительного элемента H_2 сводится к подбору конфигурации ИМЦ таким образом, чтобы рабочая точка модулятора оказалась на линейном участке характеристики и при этом длина безоболочной области была максимальной. В дальнейшем стоит рассмотреть вопрос повышения селективности чувствительного элемента.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России по государственному заданию (проект № FEWM-2025-0002).

Литература

1. Malitson I. H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica // Josa, 1965. Vol. 55. № 10. P. 1205–1209.
2. Luke K. et al. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si_3N_4 microresonator // Optics letter, 2015. Vol. 40. № 21. P. 4823–4826.
3. Ciddor P. E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared // Applied optics, 1996. Vol. 35. № 9. P. 1566–1573.
4. Peck E. R., Huang S. Refractivity and dispersion of hydrogen in the visible and near infrared // JOSA, 1977. Vol. 67. № 11. P. 1550–1554.

УДК 538.94

Новые подходы к созданию материалов с управляемыми оптическими свойствами на основе кремнийорганических полимеров и нитевидных нанокристаллов фосфида галлия

Козко И. А.[1], Кондратьев В. М.[1,2], Татмышевский М. К.[1], Кузнецов А.[1,2], Резник И. А.[3], д. ф.-м. н., Зюзин М. В.[1,3], д. ф.-м. н., Большаков А. Д.[1,2,4,5]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
ivkozko@gmail.com
[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
[3] Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А
[4] Ереванский государственный университет
0025, Республика Армения, Ереван, Алека Манукяна, 1
[5] Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Данная работа направлена на создание новых материалов с управляемыми оптическими свойствами на основе нитевидных нанокристаллов фосфида галлия (далее — ННК GaP) и кремнийорганических полимеров, в частности полидиметилсилоксана (далее ПДМС). ННК GaP, получаемые эпитаксиальными методами, вводились в матрицу полимера на этапе, предшествующем температурной вулканизации. Показано влияние концентрации и степени ориентированности ННК GaP на спектры оптического пропускания и отражения поляризованного и неполяризованного света.

Ключевые слова: нитевидные нанокристаллы; фосфид галлия; полимерная матрица; ПДМС; спектроскопия пропускания; спектроскопия отражения поляризованного света.

Кремнийорганические полимеры зачастую используются в качестве гибкой подложки для синтеза эффективных элементов наноэлектроники. Особый интерес также представляют полупроводниковые нитевидные нанокристаллы, которые благодаря своему нанометровому поперечному сечению и высокому отношению площади поверхности к объему демонстрируют заметные отличия в оптических свойствах по сравнению с объемными нанокристаллами, сохраняя при этом относительную простоту постростовой обработки и волноводные свойства благодаря своей микрометровой длине.

Совмещение свойств кремнийорганических полимеров и нитевидных нанокристаллов представляет собой перспективное направление исследований, которое объединяет гибкость, биосовместимость и химическую устойчивость полимеров с уникальными оптическими свойствами нитевидных нанокристаллов.

Оптические свойства полупроводниковых соединений III-V, активно использующихся в нитевидной геометрии для нужд нанофотоники и наносенсорики, при

внедрении в полимерные матрицы меняются в зависимости от внешних условий, а также плотности нитевидных нанокристаллов в матрице. Проведены работы по исследованию спектров пропускания подобных материалов [1, 2], однако их оптическая характеризация методами спектроскопии поляризационного отражения и спектральной эллипсометрии остается нетривиальной и актуальной задачей.

В рамках данной работы нитевидные нанокристаллы фосфида галлия, синтезированные методом молекулярно-пучковой эпитаксии, имеющие длину порядка 25 мкм и характерный размер поперечного сечения 50–300 нм, были инкапсулированы в матрицу ПДМС, а затем нанесены на кремниевые подложки методом центрифугирования в различных пропорциях ПДМС/ННК GaP. После этапа температурной вулканизации синтезированных материалов был проведен ряд исследований с использованием методов спектральной эллипсометрии. Выявлены различия в дисперсии показателя преломления в зависимости от количества, а также степени единообразной ориентации ННК GaP в исследуемых материалах. При увеличении числа ННК GaP, ориентированных в ПДМС поперек падению света, наблюдается сублинейное увеличение показателя преломления.

Перспектива использования таких материалов заключается в возможности интеграции материалов на основе ННК GaP и кремнийорганических полимеров в высокопреломляющие покрытия, гибкие элементы фотоники, оптические фильтры и носимую электронику.

Литература

1. Kim Y. J., Yoo Y. J., Kang M. H., Ko J. H., Park M. R., Yoo D. E., Lee D. W., Kim K., Kang I.-S., Song Y. M. Mechanotunable optical filters based on stretchable silicon nanowire arrays // Nanophotonics, 2020. № 9 (10). P. 3287–3293.
2. Park H., Seo K., Crozier K. B., Adding colors to polydimethylsiloxane by embedding vertical silicon nanowires // Appl. Phys. Lett., 2012. № 101 (19). P. 193107.

УДК 535.93, 621.372.8

Теоретическая разработка и экспериментальная реализация одновременно трех сверточных фильтров на интегрально-оптическом чипе для ускорения сверточных нейронных сетей

Аргенчиев А. С.[1], Кондратьев И. В.[1], Урусова К. Н.[1], Скрябин Н. Н.[1], Дьяконов И. В.[1,2], Страупе С. С.[1,2], Кулик С. П.[1]

[1] Центр квантовых технологий, физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

[2] Российский квантовый центр 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

На трех длинах волн мы откалибровали четырехканальный интерферометр, состоящий из четырех многоканальных светоделителей и трех слоев фазовых задержек. С помощью цифровой модели интерферометра мы запрограммировали унитарное преобразование, эквивалентное операции свертки входного изображения, одновременно с тремя фильтрами 2×2.

Ключевые слова: оптические вычисления; программируемые интерферометры; сверточные фильтры; сверточные нейронные сети.

В последнее время происходит увеличение количества исследований в области создания оптических процессоров [1]. Основной составной частью таких устройств являются многоканальные интерферометры — волноводные структуры, оснащенные настраиваемыми фазовращателями. С помощью набора фазовращателей программируют определенную унитарную матрицу, которая применяется к входному вектору амплитуд светового поля.

Большим преимуществом оптических вычислителей перед электронными являются их энергоэффективность, высокая скорость вычислений [1] и возможность параллельной обработки данных, что позволяет использовать оптические вычисления для решения сложных математических задач. В области глубокого обучения такими задачами являются обучение с подкреплением [2], обучение комплекснозначных [3] и сверточных нейронных сетей [4]. Однако современные оптические вычислительные схемы не являются масштабируемыми, так как количество оптических элементов квадратично возрастает с увеличением размера вычислительной матрицы. Кроме того, уменьшается точность вычислений по сравнению с электронными аналогами вследствие присутствия различных шумов в системе.

Операция математической свертки используется в сверточных нейронных сетях в задачах классификации и является вычислительно сложной для электронных процессоров, так как матрично-векторные умножения приводят к дублированию данных и потреблению дополнительной памяти [5], в то время как в оптических процессорах результат свертки входного закодированного изображения одновременно с несколькими фильтрами может быть получен сразу, когда излучение проходит через интерферометр. Кроме того, для данных систем требуемое количество фазовращателей линейно зависит от увеличения размера фильтров, а наличие шумов в системе незначительно влияет на точность классификации [4].

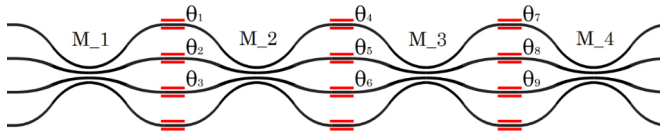


Рис. 1. Структурная схема интерферометра

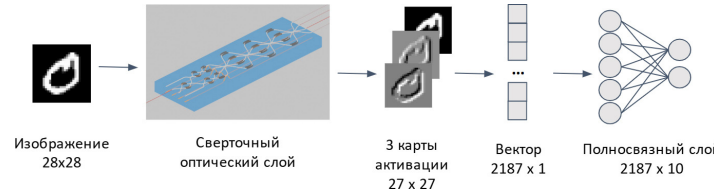
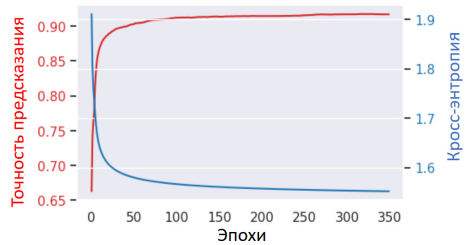
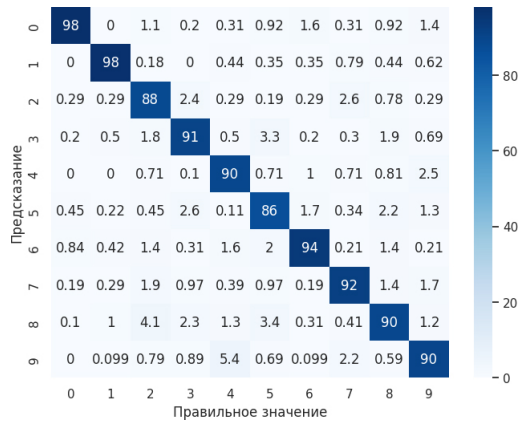


Рис. 2. Схема симуляции эксперимента



а



б

Рис. 3. Обучение нейросети на датасете MNIST, предобработанного с помощью оптики (*а*); матрица ошибок по результатам обучения (*б*)

В данной работе на трех длинах волн (910, 945 и 980 нм) был откалиброван четырехканальный интерферометр, состоящий из четырех многоканальных светоделителей с четырьмя входными и выходными портами и трех слоев фазовых задержек (рис. 1). Была получена его цифровая модель, позволяющая выставить на нем произвольное унитарное преобразование. С помощью девяти управляемых параметров на интерферометре было запрограммировано унитарное преобразование, эквивалентное операции свертки входного изображения, одновременно с тремя фильтрами 2×2. На полученных в результате свертки с тремя фильтрами картах активации было произведено обучение нейронной сети, состоящей из одного полносвязного слоя, в задаче классификации изображений MNIST (рис. 2). В результате точность классификации на 350 эпохах обучения достигла 92% (рис. 3). В данный момент идет экспериментальная проверка симуляции процесса свертки изображения на интегрально-оптическом чипе.

Литература

1. Caxton Griffith Kibebe, Yue Liu, Jiaxi Tang. Harnessing optical advantages in computing: a review of current and future trends // Frontiers in Physics, 2024. Vol. 16.
2. Xuan-Kun Li et al. High-efficiency reinforcement learning with hybrid architecture photonic integrated circuit // Nature Communications, 2024. Vol. 15. P. 1044.
3. Zhang H. et al. An optical neural chip for implementing complex valued neural network // Nature Communications, 2021. Vol. 12. P. 457.
4. Meng X. et al. Compact optical convolution processing unit based on multimode interference // Nature Communications, 2023. Vol. 14. P. 3000.
5. Xu S. et al. High-order tensor flow processing using integrated photonic circuits // Nature Communications, 2022. Vol. 13. P. 7970.

УДК 535.015

Исследование процессов генерации второй оптической гармоники в мезопористых наночастицах Si/SiO_2

Фунтикова А. С.[1,2], Можаров А. М.[1,2], Шаров В. А.[2], Федоров В. В.[1,2], Мухин И. С.[1,2], Новикова К. Н.[1,2], Дворецкая Л. Н.[2]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б

[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

Исследована возможность генерации второй оптической гармоники в мезопористых наночастицах Si/SiO_2. Показано влияние резонансов различной природы на эффективность генерации второй гармоники.

Ключевые слова: генерация второй гармоники; нелинейные эффекты; кремний; резонансы Ми; сферические наночастицы.

Нелинейные оптические явления второго порядка широко используются для создания различных элементов нанофотоники, когерентных источников света, оптических усилителей, преобразователей частот и других устройств. Такие нелинейные кристаллы, как KDP (дигидрофосфат калия) и $LiNbO_3$ (ниобат лития), а также соединения A^3B^5 [1] часто используются для создания эффективных нелинейных преобразователей благодаря высоким значениям нелинейной оптической восприимчивости. Однако высокая стоимость синтеза структур на основе соединений A^3B^5 и плохая совместимость с кремниевой технологией сильно ограничивают возможность интеграции подобных устройств в современные оптические системы.

В свою очередь, кремниевая платформа позволяет создавать различные, в том числе низкоразмерные, структуры, отличающиеся простотой изготовления и низкой стоимостью. Главной проблемой нелинейной оптики на основе кремния является невозможность преобразования электромагнитной энергии в рамках нелинейных эффектов второго порядка из-за наличия центра инверсии кристаллической решетки кремния. Тем не менее существует несколько механизмов, позволяющих обходить данный запрет, таких как нарушение симметрии на границах кристаллов и учет взаимодействий следующего порядка малости. Данные эффекты зависят от морфологии и свойств поверхностей кристаллов. Так, использование пористого кремния [2] и кремниевых наночастиц может значительно увеличить эффективность нелинейных процессов.

Другим подходом к усилению оптического отклика является улучшение удержания внутренней энергии системы. Данного эффекта можно добиться, используя различные резонаторы, например, резонансов Ми на структурах сферической геометрии, а также металлов в качестве подложки для возбуждения поверхностного плазмонного резонанса. Сочетание резонансов различной природы или на разных длинах волн может эффективно усиливать нелинейный оптический отклик, в том числе генерации второй гармоники (ГВГ).

В данной работе проведено исследование генерации второй гармоники в сферических мезопористых наночастицах различных диаметров, представляющих собой каркас из оксида кремния (SiO_2), заполненный кремнием. Были рассмотрены

различные механизмы ГВГ для систем разных диаметров и на различных подложках. Численное исследование ГВГ от мезопористых наночастиц Si/SiO_2 показало зависимость сечения рассеяния и эффективности ГВГ от диаметра наночастиц и длины волны накачки. Интенсивность отклика второй гармоники может быть усилена за счет двух механизмов: резонансной локализации света на длине волны накачки и резонанса Ми на длине волны второй гармоники. Использование наночастиц с диаметрами, соответствующими резонансным условиям как на длине волны падающего света, так и на длине волны второй гармоники, заметно повышает эффективность ГВГ. Для наночастиц Si/SiO_2 доминирующим вкладом в ГВГ обладает поверхность. Усиление эффективности ГВГ можно наблюдать как при пересечении мод резонансов Ми для разных длин волн, так и при пересечении резонанса Ми и поверхностного плазмонного резонанса золотой подложки. Таким образом, можно сделать вывод, что комбинация различных резонансных эффектов на длинах волн падающего света и второй гармоники приводит к значительному усилению эффективности ГВГ.

Представленные научные результаты получены в рамках конкурса Минобрнауки России по созданию молодежных лабораторий в Научно-исследовательской лаборатории эпитаксиальных наноструктур соединений A^3B^5 на кремнии (FSEG-2024-0017, рук. Федоров В. В.).

Литература

1. Anthur A. P., Zhang H., Akimov Y., Rong Ong J., Kalashnikov D., Kuznetsov A. I., Krivitsky L. Second harmonic generation in gallium phosphide nano-waveguides // Optics Express, 2021. Vol. 29. № 7. P. 10307–10320.
2. Murzina T. V., Kolmychek I. A., Maidykovski A. I., Nikulin A. A., Sychev F. Y., Aktsipetrov O. A. Second-and third-harmonic generation and hyper-Rayleigh scattering in porous-silicon-based photonic microcavities // Optics letters, 2008. Vol. 33. № 22. P. 2581–2583.

УДК 621.3.049

Эффективность люминесцентных взаимодействий в гетероструктуре многопереходного солнечного элемента

Корниенко П. Д., Левина С. А., Минтаиров М. А., Нахимович М. В., Шварц М. З.
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
p.d.kornienko@mail.ioffe.ru

В работе рассмотрены люминесцентные взаимодействия в многопереходных солнечных элементах и основные теоретические модели, описывающие данное явление. Экспериментально определены ключевые модельные параметры (γ_s и J_{rd}), позволяющие устанавливать свойства гетероструктуры солнечного элемента.

Ключевые слова: многопереходные солнечные элементы; люминесцентные взаимодействия; люминесцентная связь; ток насыщения.

Максимальная теоретическая эффективность солнечного элемента (СЭ), включающего один *p-n*-переход, лимитирована значением 30% или пределом Шокли — Квиссера. Появление многопереходных (МП) СЭ позволило преодолеть данное ограничение: современные архитектуры включают до шести переходов (субэлементов), каждый из которых поглощает излучение в своем спектральном диапазоне, и демонстрируют КПД, превышающий 47% [1] при теоретическом пределе ~69% [2].

Обеспечение максимально эффективного поглощения солнечного спектра является сложной технологической задачей, требующей комплексной оптимизации конструкции прибора. Сложности возникают и на стадии диагностики готовых МП СЭ: затруднительным является определение спектральной зависимости внешнего квантового выхода фотоответа EQE(λ) узкозонных субэлементов в связи с наличием сложных оптоэлектронных взаимодействий между *p-n*-переходами. Одно из них — люминесцентное, определяемое излучательной рекомбинацией в широкозонном *p-n*-переходе и поглощением этого излучения узкозонным с генерацией дополнительного фототока при фотоэлектрическом преобразовании. Наиболее ярко люминесцентные взаимодействия (ЛВ) проявляются при различии (дисбалансе) в величинах фотогенерированных токов субэлементов, что в ряде случаев является необходимым условием при исследованиях характеристик МП СЭ.

Рассмотрим ситуацию, когда широкозонный субэлемент под действием внешнего освещения генерирует избыточный фототок J_W, а узкозонный — меньший ток J_{N0}. Пусть при поглощении люминесцентного излучения узкозонным переходом его ток возрастает до значения J_N.

Эффективность ЛВ между двумя находящимися в непосредственном оптическом контакте субэлементами может характеризоваться параметром γ:

$$\gamma = \frac{J_N - J_{N0}}{J_W - J_N} = \frac{\Delta J_N(J_{pn})}{J_{pn}}, \quad (1)$$

где J_{pn} — ток, протекающий в излучающем *p-n*-переходе и определяющийся как

$$J_{pn} = J_{01} \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) + J_{02} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right), \quad (2)$$

где q — заряд электрона, V — приложенное напряжение, k — постоянная Больцмана, T — температура, J_{01} и J_{02} — диффузионный (коэффициент идеальности диода A = 1) и рекомбинационный (A = 2) обратные токи насыщения соответственно.

Рождение люминесцентного фотона является более вероятным, когда доминирует связанный с межзонной рекомбинацией диффузионный механизм протекания тока, что характерно при больших значениях J_{pn}. При этом зависимость $\Delta J_N(J_{pn})$ становится линейной и γ достигает своего предельного значения.

В данной работе для описания ЛВ используется модель [3], основные параметры которой имеют конкретный физический смысл и могут быть найдены экспериментально:

- предельная эффективность ЛВ γ_s, характеризующаяся излучательной способностью широкозонного *p-n*-перехода и вероятностью достижения люминесцентным фотоном узкозонного;
- параметр (J_{rd}), определяющий точку перегиба зависимости $\gamma(J_{pn})$, где диффузионная компонента тока через *p-n*-переход равна рекомбинационной.

Для реализации методики экспериментального определения этих параметров был изготовлен образец GaInP/GaAs/Ge малой площади (диаметр фотоприемной поверхности 0,5 мм), что позволило получить высокие плотности тока J_{pn} и зарегистрировать выход функции $\gamma(J_{pn})$ на режим насыщения.

Определение параметров γ_s и J_{rd} позволяет делать выводы о качестве *p-n*-переходов, прозрачности соединяющих субэлементы слоев, рассчитывать корректирующие коэффициенты для экспериментально регистрируемых спектральных зависимостей. Опора на получаемые данные обеспечивает новые возможности для оптимизации МП СЭ.

Литература

1. Geisz J. F., France R. M., Schulte K. L. et al. Six-junction III—V solar cells with 47,1 % conversion efficiency under 143 Suns concentration // Nature Energy, 2020. Vol. 5. P. 326–335.
2. Philipps S. P., Dimroth F., Bett A. W. High-Efficiency III—V Multijunction Solar Cells // Practical Handbook of Photovoltaics, 2012. P. 417–448.
3. Shvarts M. Z., Mintairov M. A., Emelyanov V. M., Evstropov V. V., Lantratov V. M., Timoshina N. Kh. Method for direct measurements of luminescent coupling efficiency in concentrator MJ SCs // AIP Conference Proceedings, 2013. Vol. 1556. P. 147.

УДК 537.876

Собственные моды периодической круговой цепочки N малых плазмонных сферических частиц с электрическим дипольным взаимодействием

Крылов А. А.[1,3], **Барабаненков М. Ю.**[2,3]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН*
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
[3] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

В однопольном приближении рассчитаны собственные моды периодической круговой цепочки N сферических частиц. Общая формула проиллюстрирована на примере димера и ансамбля из четырех частиц.
Ключевые слова: плазмоника; собственные моды цепочки частиц.

Разнообразные приложения наночастиц в современной медицине, нанобиотехнологии, фотохимии, спектроскопии, оптоэлектронике обусловлены резонансным взаимодействием частиц и их ансамблей с электромагнитным излучением из частотных диапазонов видимого и ближнего ИК-спектра. Например, в работе [1] рассчитаны токи, наведенные в треугольной и квадратной цепочках малых плазмонных сферических частиц с электрическим дипольным взаимодействием электромагнитным излучением, поляризованным перпендикулярно плоскости цепочки.

В данной работе в однопольном приближении рассчитаны собственные моды периодической круговой цепочки N сферических частиц (рис. 1). Общая формула проиллюстрирована на примере димера и ансамбля из четырех частиц.

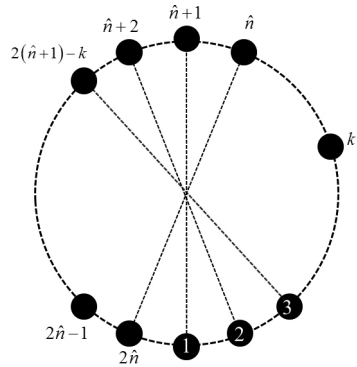


Рис. 1. Схематическое изображение периодического кругового расположения четного числа сферических частиц

В случае четырех частиц получим четыре собственных моды λ, собственные значения U в координатах следующие:

$$\lambda_1 = 1 - 2a_{12}\cos\frac{\pi}{2} + a_{13} = 1 + a_{13},\ U^{(1)} = [1,\ p_1,\ p_1^2,\ p_1^3],\ p_1 = \exp(i\pi/2) = i,,\ U^{(1)} = [1, i,\ -1, -i], \quad (1)$$

$$\lambda_2 = 1 - 2a_{12}\cos\frac{2\pi}{2} - a_{13} = 1 + 2a_{12} - a_{13},\ U^{(2)} = [1,\ p_2,\ p_2^2,\ p_2^3],$$

$$p_2 = \exp(i2\pi/2) = \exp(i\pi) = -1,\ U^{(2)} = [1, -1, 1, -1], \quad (2)$$

$$\lambda_3 = 1 - 2a_{12}\cos\frac{3\pi}{2} + a_{13} = 1 + a_{13},\ U^{(3)} = [1,\ p_3,\ p_3^2,\ p_3^3],$$

$$p_3 = \exp(i3\pi/2) = i\sin(3\pi/2) = -i,\ U^{(3)} = [1, -i, -1, i], \quad (3)$$

$$\lambda_3 = 1 - 2a_{12}\cos\frac{4\pi}{2} - a_{13} = 1 - 2a_{12} - a_{13},\ U^{(3)} = [1,\ p_4,\ p_4^2,\ p_4^3],$$

$$p_4 = \exp(i4\pi/2) = \exp(i2\pi) = 1,\ U^{(4)} = [1, 1, 1, 1]. \quad (4)$$

Формулы (1)–(4) дополняют результаты [1].

Литература

1. Барабаненков М. Ю., Барабаненков Ю. Н. Взаимное возбуждение вложенных кольцевых цепочек малых плазмонных частиц // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования, 2018. — № 1. — С. 12–15.

УДК 621.383

Методы реализации вычислительных устройств на основе фотонных компонент

Мокшин П. В.
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва
443086, г. Самара, Московское ш., 34
mokshinfabio@gmail.com
mokshin.pv@ssau.ru

Рассмотрены варианты реализации фотонно-кристаллических структур и интерференционного логического элемента, лишенного проблемы «неопределенности фазы». Показаны варианты построения сложных ИЛЭ на основе имеющегося базиса.

Ключевые слова: фотонный кристалл; интегральная оптика; волновод; логический элемент.

Разработка элементной базы оптических вычислительных систем на основе двумерных фотонных кристаллов (ФК) позволяет создавать интегральные оптические устройства обработки информации, обладающие следующими преимуществами:

- высокое быстродействие [1];
- технологичность (возможность реализации имеющимися технологиями микроэлектроники);
- радиационная стойкость [2].

Фотонно-кристаллические (ФК) структуры применяются для создания волноводов, логических элементов и других устройств фотоники. Фотонные кристаллы обычно представляют собой структурированные среды с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью, в которых создается препятствие для распространения определенных диапазонов длин электромагнитных волн (фотонные запрещенные зоны). Фотонные кристаллы нашли широкое применение в приложениях интегральной оптики.

Рассматриваются различные методы реализации фотонно-кристаллических структур, а также подробным образом рассмотрена теоретическая база, отражающая механизм реализации данных структур. Настоящая работа посвящена итерационному процессу расчета параметров, как металл-диэлектрических, так и кремниевых фотонно-кристаллических решеток, в целях повышения эффективности работы ФК-структур или перерасчета уже имеющейся структуры под иные параметры. Также в работе рассмотрены проблемы анализа распространения излучения через фотонно-кристаллические волноводы и предложен способ регистрации излучения для исследования планарного ФК-волновода методом ближнепольной микроскопии. В работе рассматриваются согласующие устройства, в том числе и варианты стыковок различных типов волноводов. Рассматриваются и численно исследуются интерференционные логические элементы, лишенные проблемы «неоднозначности фазы». На основе базиса «И» и «НЕ» доказывается возможность реализации остальных логических операций [3].

Таким образом, актуальной следует признать задачу реализации фотонно-кристаллических структур в целях дальнейшего использования их в качестве

компонентов фотонных вычислительных устройств. В работе также реализуются логические элементы на ФК-основе, лишенные проблемы «неоднозначности фазы».

Литература

1. Derdour R., Lebbal M. R., Mouetsi S., Hicini A. A novel connected structure of all-optical high speed and ultra-compact photonic crystal OR logic gate // Journal of Optical Communications, 2021. P. 152.
2. Shiue R. J., Gao Y., Tan C. et al. Thermal radiation control from hot graphene electrons coupled to a photonic crystal nanocavity // Nat. Commun., 2019. № 10. P. 109.
3. Мокшин П. В., Головашкин Д. Л., Павельев В. С. Интерференционные логические элементы на основе фотонного кристалла с Y-образным дефектом // Компьютерная оптика, 2023. — Т. 47. — № 6. — С. 895–900. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1293.

УДК 535.3+53.084.2

Контроль активной терагерцевой метаповерхности на основе VO_2 при помощи поверхностных акустических волн

Очкуров М. В., Карапетьян Г. Я., Кайдашев В. Е.
Южный Федеральный Университет, лаборатория наноматериалов, 344090, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 200/1
ochkurov@sfedu.ru

Мы разработали новый подход к *in-situ* мониторингу измененных состояний пикселей в активной амплитудной ТГц дифракционной решетке на основе VO_2 с использованием поверхностных акустических волн (ПАВ), генерируемых в подложке $LiNbO_3$.

Ключевые слова: активная метаповерхность; терагерцевая решетка; поверхностная акустическая волна; диоксид ванадия; ПАВ; VO_2.

Метаповерхности предоставляют новые возможности для плоских оптических инструментов благодаря способности формировать ранее недоступные распределения поля в пределах волнового фронта. Их активно исследуют для применения в терагерцевом (ТГц) неразрушающем контроле, спектроскопии, визуализации, микрофлюидном обнаружении биологических видов и других задачах. Пассивные метаповерхности состоят из фиксированных антенн [1–4], тогда как активные используют материалы с фазовым переходом, свойства которых регулируются внешними воздействиями [5]. В большинстве устройств свойства метаатомов изменяются одновременно [7], что затрудняет создание локально адресованных терагерцевых метаатомов [6, 8]. В данной работе рассматривается ТГц дифракционная решетка как пример устройства, требующего лишь одного литографического шага. Недавно, используя ПАВ, мы экспериментально исследовали необычный переход металл — изолятор в композите $VO_2/TiO_2/LiNbO_3$ [9], который позволил нам не просто переключать материал между состояниями изолятора и металла, но также постепенно подстараивать его проводимость на любую точку петли гистерезиса. Такое уникальное свойство композита $VO_2/TiO_2/LiNbO_3$ открывает новые возможности построения активных метаповерхностей «градиентного» типа. В данной работе мы изучаем новый подход использования поверхностных акустических волн (ПАВ), генерируемых в подложке $LiNbO_3$, для *in situ* мониторинга состояний пикселей на активной ТГц-метаповерхности на основе VO_2.

Если более конкретно, мы теоретически моделируем новое устройство на основе ПАВ для одновременного и независимого мониторинга ТГц-отражения всех N линий активной дифракционной решетки на основе VO_2. Один широкополосный РЧ-ответ устройства на ПАВ состоит из N узкополосных частотных каналов, которые содержат информацию обратной связи о текущем состоянии каждого штриха решетки (пикселя). Этот подход является общим и может применяться для мониторинга многих других типов терагерцевых устройств на основе VO_2, открывая новые перспективы в области фотоники. Таким образом, изменение сопротивления во всех пикселях активной дифракционной решетки на основе VO_2 контролируется заранее даже без падающего ТГц-излучения. Подход позволяет получить гарантированный контроль переключения пикселей, а также обнаружить старение или ложное переключение, связанное с технологическими дефектами. Теоретически

рассмотрены сценарии программирования и мониторинга бинарной отражающей амплитудной решетки с регулируемым периодом и градиентной отражающей амплитудной решетки. Также модель выявила ограничения, которые необходимо накладывать на длину акустического канала при проектировании активной части ТГц дифракционной решетки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-29-00175 для ЮФУ.

Литература

1. Zhang X., Tian Z., Yue W., Gu J., Zhang S., Han J., Zhang W. Broadband terahertz wave deflection based on C-shape complex metamaterials with phase discontinuities // Advanced Materials, 2013. Vol. 25. № 34. P. 4567.
2. Liu L., Zhang X., Kenney M., Su X., Xu N., Ouyang C., Shi Y., Han J., Zhang W. Zhang S. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude // Advanced Materials, 2014. Vol. 26. № 30. P. 5031.
3. Wang G., Zhou T., Huang J., Wang X., Hu B., Zhang Y. Moiré meta-device for flexibly controlled Bessel beam generation // Photonics Res., 2023. Vol. 11. № 1. P. 108.
4. Zhao H., Wang X., Liu S., Zhang Y., Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band // Opto-Electronic Advances, 2023. Vol. 6. № 2. P. 220012.
5. Jeong H., Le D. H., Lim D., Phon R., Lim S. Reconfigurable Metasurfaces for Frequency Selective Absorption // Adv. Opt. Mater., 2020. Vol. 8. № 1. P. 1902182.
6. Li Q., Cai X., Liu T., Jia M., Wu Q., Zhou H., Liu H., Wang Q., Ling X., Chen C., Ding F., He Q., Zhang Y., Xiao S., Zhou L. Gate-tuned graphene meta-devices for dynamically controlling terahertz wavefronts // Nanophotonics, 2022. Vol. 11. № 8. P. 2085–2096.
7. Fu X., Shi L., Yang J., Fu Y., Liu C., Wu J. W., Yang F., Bao L. Cui T. J. Flexible Terahertz Beam Manipulations Based on Liquid-Crystal-Integrated Programmable Metasurfaces // ACS Appl Mater Interfaces, 2022. Vol. 14. № 19. P. 22287.
8. Kaydashev V., Slavich A., Domaratskiy I., Zhukov S., Kirtaev R., Mylnikov D., Alymov G., Kutepov M., Kaidashev E. Reconfigurable VO_2 metasurfaces with hybrid electro-optical control: manipulating THz radiation with 0.3 W/cm^2 light // Appl. Opt., 2023. Vol. 62. № 22. P. 4942.
9. Kaydashev V., Khlebtsov B., Kutepov M., Nikolskiy A., Kozakov A., Konstantinov A., Mikheykin A., Karapetyan G., Kaidashev E. Photothermal Effect and Phase Transition in VO_2 Enhanced by Plasmonic Particles // Materials, 2023. Vol. 16. № 8. P. 2579.

УДК 535.015

Источники излучения на основе гидротермального оксида цинка

Кадинская С. А.[1,2], Кондратьев В. М.[1,2], Николаева А. В.[1,2], Гец Д. С.[3], Большаков А. Д.[1,2,4]

[1] Центр нанотехнологий, Алферовский университет
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8/3
[2] Центр фотоники и двумерных материалов,
Московский физико-технический институт
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Инженерно-физический факультет, Университет ИТМО
191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9
[4] Лаборатория перспективных функциональных материалов,
Ереванский государственный университет
0025, Республика Армения, Ереван, Алека Манукяна, 1
skadinskaya@bk.ru

Были исследованы резонаторные свойства микропризм ZnO, синтезированных гидротермальным методом, с помощью спектроскопии микрофотолюминесценции при комнатной температуре. Результаты показали, что микропризмы ZnO являются эффективными резонаторами. Результаты демонстрируют потенциал гидротермального синтеза для изготовления светоизлучающих устройств на основе ZnO.

Ключевые слова: оксид цинка; гидротермальный синтез; фотолюминесценция; моды шепчущей галереи; перовскит.

Оксид цинка (ZnO), ширина запрещенной зоны которого позволяет использовать этот материал для получения УФ-излучения, привлекает большое внимание в последние годы. Помимо большой ширины запрещенной зоны (3,37 эВ при комнатной температуре), наиболее примечательным свойством ZnO является энергия связи экситона (60 мэВ), которая намного превышает тепловую энергию при комнатной температуре (около 26 мэВ) [1]. Приведенный выше факт указывает на то, что экситонный эффект в ZnO может сохраняться до комнатной температуры, позволяя получать эффективное УФ-излучение. Кроме того, ZnO является недорогим относительно распространенным химически стабильным простым в синтезе и нетоксичным материалом. ZnO также может служить резонатором на основе мод шепчущей галереи (МШГ). В данной работе резонансные свойства ZnO будут исследованы путем изучения структуры ZnO/перовскит ($CsPbBr_3$), где перовскит будет использоваться в качестве источника излучения.

В данном исследовании ZnO был синтезирован гидротермальным методом на Si(100)-подложках. Ростовой раствор состоял из эквимолярных концентраций — 100 ммоль/л ГМТА и $Zn(NO_3)_2$. Также для синтеза ZnO в геометрии гексагональных микропризм в ростовой раствор был добавлен цитрат натрия в концентрации 5 ммоль/л. После синтеза микропризмы ZnO были перенесены на стеклянную подложку и покрыты слоем перовскита ($CsPbBr_3$) толщиной 90 нм. Исследование методом спектроскопии микрофотолюминесценции проводилось с использованием фемтосекундного лазера (Light Conversion) с длительностью импульса 150 фс

и частотой повторения 10 кГц, длина волны накачки — 480 нм при комнатной температуре.

В результате исследования получены спектры фотолюминесценции для значений накачки меньше и больше порогового значения. Пороговое значение составило 76 мкДж/см^2. На длине волны излучения перовскита наблюдается узкий (FWHM = 0,377 нм) пик. Кроме того, была рассчитана добротность данного резонатора Q = 1400.

Литература

1. Look D. C., Claflin B., Alivov Y. I., Park S. J. The Future of ZnO Light Emitters // Phys. status solidi, 2004. Vol. 201. P. 2203–2212.

УДК 621.3.004

Системный подход к построению цифрового двойника изделия для оптимизации управления производством электронной техники

Кузнецова Е. С.[1,2]
[1] *АО «НИИ «Субмикрон»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
[1] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
e.s.kuznetsova@inbox.ru

Предложен системный подход к оптимизации микроэлектронного производства на основе динамического цифрового двойника, интегрирующего FMEA-анализ и машинное обучение. Реализация обеспечила снижение затрат на обслуживание на 23 % и повышение точности планирования на 35 %.
Ключевые слова: FMEA; цифровой двойник; машинное обучение; анализ отказов.

Современное микроэлектронное производство характеризуется ростом сложности технологических процессов и неэффективностью реактивных методов управления [1]. Актуальность исследования обусловлена необходимостью сокращения времени вывода продукции на рынок, минимизации производственных потерь и перехода к превентивному управлению на основе прогнозирования отказов.

Цифровой двойник, представляющий собой виртуальную модель физического объекта, объединяет в себе его материальные свойства, функциональные особенности и эксплуатационные параметры. Архитектура цифрового двойника базируется на сложной иерархической структуре, включающей три ключевых компонента: слой данных, аналитический слой, интерфейс управления [2].

В работе предложена интеграция FMEA-анализа с динамической моделью цифрового двойника, обновляемой в реальном времени [3]. Архитектура реализует трехуровневую структуру: слой агрегации гетерогенных данных, аналитический модуль на основе ансамбля решающих деревьев с L_2-регуляризацией и интерфейс управления, интегрированный с системой 1С:УПП [4]:

$$Loss = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 + \lambda\sum_{j=1}^{m} w_j^2, \quad (1)$$

где y_i — реальное значение времени до отказа, $\hat{y}_i$ — предсказанное значение времени до отказа, n — количество наблюдений, λ — коэффициент регуляризации, m — количество параметров модели, w_j — вес модели, соответствующий j-признаку.

Критическими параметрами модели, идентифицированными на ретроспективных данных приборостроительного предприятия, стали общее время наработки, текущая наработка и дата последнего ТО. Внедрение системы позволило сократить время тестирования оборудования на 18 % за счет предиктивного обслуживания, снизить затраты на ТО на 23 % через оптимизацию интервалов обслуживания и запасов компонентов, а также повысить точность планирования на 35 %. Интеграция с системой управления запасами сократила время реакции на дефицит

компонентов на 40 % благодаря синхронизации прогнозов отказов с логистическими процессами.

В рамках исследования были разработаны и апробированы научные положения и получены результаты, демонстрирующие вклад в развитие методов управления сервисным оборудованием. Ключевым новшеством является разработка динамической модели цифрового двойника, которая интегрирует данные анализа видов и последствий отказов (FMEA) с алгоритмами машинного обучения. Разработанный подход демонстрирует потенциал для адаптации в наукоемких отраслях, обеспечивая превентивное выявление рисков и сквозную оптимизацию ресурсов.

Литература

1. Cheng J., Zhang H., Tao F. et al. DT-II:Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing // Robot. Comput. Integr. Manuf., 2020. Vol. 62. Art. 101881. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101881.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681435. «Система управления наземной аппаратурой»: программа для ЭВМ / Чукин П. Е., Стешин А. С., Орлов И. А., Чукина Н. А., Кузнецова Е. С. (RU); правообладатель Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Субмикрон». № 2023665845; заявл. 28.07.2023 г.; опубл. 13.10.2023 г.
3. Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2021. — Т. 64. — № 7. — С. 517–531. DOI: https://doi.org/10.17586/ 0021-3454-2021-64-7-517-531.
4. Боровков А. И., Рябов Ю. А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Сб. тр. науч.-практ. конф. Цифровая трансформация экономики и промышленности. Санкт-Петербург, СПбПУ, 2019. — С. 234–245.

УДК 004.891.3:616-71

Мультимодальная нейронная сеть для анализа спектров рамановского рассеяния и дерматоскопических изображений новообразований кожи

Матвеева И. А.
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва
443086, г. Самара, Московское ш., 34
m-irene-a@yandex.ru

Разработана мультимодальная сверточная нейронная сеть для идентификации злокачественной меланомы и доброкачественных пигментных новообразований кожи, принимающая решение на основе анализа рамановских спектров и дерматоскопических изображений новообразований.
Ключевые слова: сверточная нейронная сеть; дерматоскопия; злокачественная меланома; мультимодальный анализ; рамановская спектроскопия; новообразования кожи.

По оценкам исследователей, в 2020 году в мире было диагностировано около 325 000 новых случаев злокачественной меланомы (ММ), и количество новых случаев ММ в год будет увеличиваться более чем на 50 % с 2020 по 2040 годы [1]. Качество диагностики ММ во многом зависит от квалификации врача и составляет 40–80 % точности [2]. Более полную клиническую картину дает взятие биопсии, но в связи с высокими рисками метастазирования процедура обычно не применяется [3]. Следующие оптические методы признаны перспективными инструментами для исследования кожной ткани: дерматоскопия [4], рамановская спектроскопия [5, 6] и др. Однако сейчас методы оптической биопсии не превосходят по точности золотой стандарт диагностики — гистологическое исследование. Одним из способов преодоления ограничений является совместное использование нескольких методов [7].

Целью исследования является разработка метода идентификации ММ на основе мультимодального совместного анализа данных рамановского рассеяния и дерматоскопических изображений. Исследование новообразований кожи *in vivo* проводилось в Самарском областном клиническом онкологическом диспансере. Рамановские спектры регистрировались при возбуждении на длине волны 785 нм со спектральным разрешением 0,2 нм в диапазоне от 837 до 920 нм [5]. Дерматоскопические изображения новообразований кожи получали с помощью цифрового дерматоскопа [4]. Для анализа зарегистрированных данных разработана мультимодальная сверточная нейронная сеть, принимающая на вход данные обоих типов. Сначала данные анализируются независимо, а затем промежуточные слои обеих нейронных сетей объединяются с помощью метода стекинга. Модель классификации ММ и доброкачественных пигментных новообразований показала рост эффективности классификации по сравнению с анализом только спектров или изображений на 5 и 9 % соответственно. Чувствительность и специфичность модели составляют 0,91 и 0,85 соответственно, что превышает качество диагностики врачами.

Мультимодальный метод диагностики рака кожи одновременно учитывает как спектральные особенности новообразований, так и морфологические признаки. Интеграция передовых оптических методов с современными технологиями машинного обучения открывает новые возможности для точной и неинвазивной диагностики рака кожи. Предлагаемый подход оптической биопсии может быть использован для автоматизированной скрининговой диагностики кожных патологий в целях выявления опухолей на ранней стадии развития.

Литература

1. Ferlay J., Colombet M., Soerjomataram I. et al. Cancer statistics for the year 2020: An overview // International journal of cancer, 2021. Vol. 149. № 4. P. 778–789.
2. Haenssle H. A., Fink C., Schneiderbauer R. et al. Man against machine: diagnostic performance of a deep learning convolutional neural network for dermoscopic melanoma recognition in comparison to 58 dermatologists // Annals of oncology, 2018. Vol. 29. № 8. P. 1836–1842.
3. Friedman R. J., Rigel D. S., Kopf A. W. Early detection of malignant melanoma: the role of physician examination and self-examination of the skin // CA: a cancer journal for clinicians, 1985. Vol. 35. № 3. P. 130–151.
4. Matveeva I. A., Komlev A. I., Kaganov O. I. et al. Multidimensional Analysis of Dermoscopic Images and Spectral Information for the Diagnosis of Skin Tumors // Journal of Biomedical Photonics & Engineering, 2024. Vol. 10. № 1. P. 010307.
5. Bratchenko I. A., Bratchenko L. A., Moryatov A. A. et al. In vivo diagnosis of skin cancer with a portable Raman spectroscopic device // Experimental Dermatology, 2021. Vol. 30. № 5. P. 652–663.
6. Matveeva I. Bratchenko Y. Khristoforova et al. Multivariate curve resolution alternating least squares analysis of in vivo skin Raman spectra // Sensors, 2022. Vol. 22. № 24. P. 9588.
7. Rey-Barroso L., Peña-Gutiérrez S., Yáñez C. et al. Optical technologies for the improvement of skin cancer diagnosis: a review // Sensors, 2021. Vol. 21. № 1. P. 252.

УДК 621.3.049

КМОП-интегрированные мемристоры на основе двухслойного диэлектрика $Al_2O_3/ZrO_2(Y)$

Серов Д. А., Круглов А. В., к. ф.-м. н. Белов А. И., к. ф.-м. н. Коряжкина М. Н., Лукоянов В. И., Грязнов Е. Г., Котомина В. Е., Котина А. Ю., Антонов И. Н., к. т. н. Щаников С. А., Борданов И. А., Таран Д. А., Королев Л. Я., Жарков Г. Д., Тютина Е. Р., к. ф.-м. н. Михайлов А. Н.

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского 603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

serow.dim2015@yandex.ru

Представлены результаты исследования электрофизических и синаптических свойств мемристивной ячейки памяти на основе Ta / Al_2O_3(6 нм) / ZrO_2(Y) / Pt. Ячейка демонстрирует более 16 резистивных состояний, низкие напряжения, выносливость более $3 \cdot 10^6$, длительность удержания резистивного состояния более 10^4 с.

Ключевые слова: мемристор; RRAM; диоксид циркония; нейроморфные устройства.

В настоящее время одним из актуальных научно-технических направлений является изучение и разработка мемристивных устройств [1]. Принцип работы мемристоров основан на эффекте резистивного переключения (РП), изменении сопротивления структуры при подаче внешнего электрического поля. Одним из механизмов РП является формирование/разрушения филамента — тонкого токопроводящего канала в резистивном слое. В процессе РП реализуются по крайней мере два хорошо различимых резистивных (логических) состояния. Помимо них мемристоры способны принимать промежуточные значения сопротивления, что позволяет использовать их в качестве как цифровых, так и аналоговых приборов. Наибольший интерес представляет использование мемристоров в качестве элементов резистивной памяти нового поколения и аналогов синапсов в нейроморфных вычислительных системах. Для их реализации требуется интеграция мемристоров в традиционный технологический процесс комплементарный «металл — оксид — полупроводник» (КМОП), что накладывает на мемристоры ряд требований: 1) токи и напряжения на мемристоре не должны превышать требуемых в КМОП-схемах, 2) мемристор должен демонстрировать стабильные РП, высокую выносливость и высокую длительность удержания резистивного состояния. Одним из способов удовлетворить данные требования является использование дополнительного слоя Al_2O_3, локализирующего часть филамента и стабилизирующего его форму [2].

В настоящей работе представлены результаты исследования электрофизических и синаптических свойств ячейки памяти «один транзистор — один мемристор», в которой мемристоры на основе стека Ta / Al_2O_3(6 нм) / ZrO_2(Y) / Pt последовательно соединяются с полевыми транзисторами, выполненными по технологии КМОП «кремний на изоляторе» с проектными нормами 0,35 мкм [3]. Слои мемристивных структур формировались методами магнетронного распыления и взрывной фотолитографии. Исследованная ячейка демонстрирует биполярный тип РП при напряжениях от 1,0 до 1,3 В, выносливость свыше $3 \cdot 10^6$ циклов перезаписи и длительность удержания резистивного состояния выше 10^4 с. Показана

возможность программирования как минимум 16 резистивных состояний мемристорной ячейки в диапазоне от 0,2 до 1,8 кОм. Продемонстрирована высокая устойчивость к многократной перезаписи резистивного состояния мемристивного устройства, в том числе плавного изменения проводимости, представляющего собой синаптическую пластичность. Показано, что резистивные состояния, реализующиеся при потенциации и депрессии, не перекрываются. Продемонстрирована функциональность мемристорных ячеек в режимах многоуровневой записи и чтения информации в автоматическом режиме, а также векторно-матричное умножение в рабочем режиме искусственных нейронных сетей на базе матрицы «кроссбар» с весовыми коэффициентами, заданными в форме проводимостей мемристорных ячеек.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах». Мемристивные структуры изготовлены в лаборатории мемристорной наноэлектроники ННГУ (государственное задание № FSWR-2025-0006) с использованием инфраструктуры учебного дизайн-центра электроники ННГУ.

Литература

1. Михайлов А. Н., Белов А. И., Королев Д. С., Гусейнов Д. В., Грязнов Е. Г. и др. Мемристивные наноматериалы и технологии новой элементной базы нейроэлектроники // Нейротехнологии и Нейроэлектроника, 2024. — Т. 1. — № 1. — С. 44–109.
2. Tran X. A., Yu H. Y., Gao B., Kang J. F., Sun X. W. et al. Ni Electrode Unipolar Resistive RAM Performance Enhancement by AlO_y Incorporation Into HfO_x Switching Dielectrics // IEEE Electron Device Letters, 2011. Vol. 32. № 9. P. 1290–1292.
3. Пат. 023630113 Российская Федерация. Топология элементов энергонезависимой резистивной памяти и элементов нейроморфных систем на основе мемристоров / Грязнов Е. Г., Антонов И. Н., Михайлов А. Н. // № 2023630098; заявлено 10.07.2023; опубликовано 21.08.2023. — Бюл. № 9. — 1 с.

УДК 621.389

Исследование производительности магнонной резервуарной вычислительной системы

Гапончик Р. В.[1], Никитин А. А.[1], Костылев М. П.[2], Устинов А. Б.[1]
[1] *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
rvgaponchik@etu.ru
[2] *Университет Западной Австралии*
Западная Австралия, 6009, Австралия, Кроли, шоссе Стерлинг, 35

Проведено экспериментальное исследование производительности магнонного физического резервуара. Определены емкости тестов на кратковременную память (ТКП) и проверку четности (ТПЧ). Результаты показали возможность использования магнонного резервуара для задач распознавания образов.
Ключевые слова: магноника; физические реализации нейронных сетей; нейроморфные вычисления.

В настоящее время одним из многообещающих направлений в области искусственного интеллекта является исследование физических нейронных сетей и нейроморфные вычисления на их основе. Важным шагом на пути к физическому воплощению резервуарного компьютера стала недавно предложенная концепция физического резервуара на основе магнонного активного кольцевого резонатора (АКР) [1]. Основным компонентом такого магнонного АКР является спин-волновая линия задержки (СВЛЗ). Главным компонентом СВЛЗ является пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ), динамика сверхвысокочастотных спиновых волн (СВ) в которой является существенно нелинейной. Для управления коэффициентом передачи СВ используется электрический ток, проходящий по металлическому электроду на поверхности образца.

В настоящей работе экспериментально показано, что при подаче импульсов напряжения в металлической полоске наводится ток порядка нескольких мА, что позволяет эффективно управлять величиной создаваемого магнитного поля. С помощью этого поля производится управление амплитудой автоколебаний в магнонном АКР. При подаче с генератора импульсов напряжения величиной 175 мВ происходит изменение коэффициента передачи СВЛЗ на величину порядка 0,31 дБ, что позволяет производить переключение между двумя величинами амплитуды магнонного АКР и таким образом вводить в резервуар входную последовательность импульсов желаемой формы. Длительность входных импульсов выбиралась такой, чтобы она превышала время задержки в магнонном АКР, которое равнялось 279 нс.

Следующим шагом было исследование производительности магнонной резервуарной вычислительной системы. Для оценки производительности были использованы два общепризнанных эталонных теста, а именно ТКП и ТПЧ [2]. Методика оценки емкости ТКП и ТПЧ состоит из обучения и последующего тестирования магнонного резервуара. Поскольку оба теста работают с двоичными последовательностями, для вычисления их емкости требуется только одна входная случайная последовательность.

При оценке емкостей ТКП и ТПЧ для ряда различных комбинаций коэффициента передачи СВЛЗ и длительности входных импульсов было показано, что емкость ТКП варьируется от 0,9 до 5,53, а емкость ТПЧ — от 0,1 до 0,67. Максимальные емкости наблюдались для значения напряжения входных импульсов в 175 мВ, наводящего в полоске ток порядка 7 мА, и длительности входных импульсов в 0,2 мкс для ТПЧ и 5 мкс для ТКП.

В заключение была предложена и экспериментально реализована схема магнонного резервуара на базе спин-волнового АКР с использованием СВЛЗ с токовым управлением. Устройство демонстрирует ряд преимуществ перед ранее предложенными схемами магнонных резервуаров. Во-первых, была значительно упрощена конструкция магнонного резервуара. Во-вторых, для управления устройством требуется очень малый ток — 5–10 мА. В-третьих, мы достигли рекордно высокого значения емкости STM — 5,53 по сравнению с предыдущими результатами из литературы [3, 4]. Предлагаемое устройство может найти множество применений, среди которых распознавание цифр, букв и изображений, нейроморфные вычисления, оптимизация и классификация данных.

Литература

1. Watt S., Kostylev M. Numerical simulations of a magnonic reservoir computer // Journal of Applied Physics, 2024. Vol. 135. № 2.
2. Bertschinger N., Natschläger T., Legenstein R. At the edge of chaos: Real-time computations and self-organized criticality in recurrent neural networks // Advances in neural information processing systems, 2004. Vol. 17.
3. Watt S. et al. Implementing a magnonic reservoir computer model based on time-delay multiplexing // Physical Review Applied, 2021. Vol. 15. № 6. P. 064060.
4. Nikitin A. A. et al. Theoretical model for nonlinear spin-wave transient processes in active-ring oscillators with variable gain and its application for magnonic reservoir computing // Journal of Applied Physics, 2022. Vol. 131. № 11.

УДК 519.688:004.032.26

Применение сверточных архитектур в моделировании нейросетевых квантовых состояний для задач оптимизации

Кулешов И. А.[1,2], Бажанов Д. И.[1,2]
[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1*
[2] *Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2*
i.a.kul-science@yandex.ru

Рассматриваются подходы к построению нейросетевых квантовых состояний для решения задач комбинаторной оптимизации. Показаны преимущества применения сверточных архитектур при моделировании задачи MaxCut.
Ключевые слова: нейросетевые квантовые состояния; NQS; модель Изинга; задача MaxCut; комбинаторная оптимизация; сверточные нейронные сети; графовые данные.

Задачи комбинаторной оптимизации занимают важное место в различных областях науки и техники, поскольку их постановки часто возникают при анализе и проектировании сложных систем. Классическим примером таких задач является задача поиска максимального разреза (MaxCut) в графе, заключающаяся в разбиении множества вершин на две группы таким образом, чтобы число ребер между ними было максимальным. MaxCut относится к классу NP-трудных задач, что определяет необходимость разработки эффективных приближенных методов ее решения.

Модель Изинга позволяет формализовать задачу MaxCut в виде минимизации соответствующего гамильтониана, что делает возможным применение методов вариационного Монте-Карло. Одним из современных подходов, активно развивающихся в последние годы, является использование нейросетевых квантовых состояний (NQS, Neural-network Quantum States) для приближенного нахождения основного состояния гамильтониана модели Изинга. В рамках метода NQS аппроксимация волновой функции квантовой системы осуществляется с помощью параметризованной нейронной сети, что позволяет применять методы стохастической оптимизации и упомянутых выше методов вариационного Монте-Карло.

Традиционно для аппроксимации волновой функции в модели NQS используется ограниченная машина Больцмана (RBM). Такая архитектура хорошо зарекомендовала себя при моделировании систем с простой структурой взаимодействий. Однако при работе с задачами на графах общего вида, характерных для комбинаторной оптимизации, возникает важная проблема: классическая RBM не учитывает специфическую топологию графа, которая определяет структуру взаимодействий между вершинами. Особый интерес в данном контексте представляет использование сверточных архитектур для обработки графовых данных в модели NQS. Сверточные операции позволяют агрегировать информацию о соседних вершинах при формировании признаков каждой вершины, что делает архитектуру модели более чувствительной к структуре исходного графа. Перспективным направлением является применение таких архитектур для повышения качества аппроксимации энергии основного состояния и ускорения сходимости вариационного алгоритма.

Численные эксперименты, проведенные для задачи MaxCut на графах различного размера и плотности, показали, что использование сверточных операций на этапе формирования признаков позволяет повысить точность моделирования по сравнению с классической архитектурой RBM. Эффект от применения сверток наиболее выражен на графах большого размера и сложной структуры, где стандартная RBM демонстрирует ограничения по качеству аппроксимации. При этом использование сверточных операций сопровождается возрастанием вычислительных затрат и увеличением времени моделирования, что может не быть проблемой при необходимости получить как можно более точное решение.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что внедрение графовых сверток в модель нейросетевых квантовых состояний представляет собой перспективное направление для повышения эффективности методов комбинаторной оптимизации на основе вариационного Монте-Карло.

Исследование выполнено в рамках государственного заказа МГУ имени М. В. Ломоносова за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-01012).

Литература

1. Carleo G., Troyer M. Solving the quantum many-body problem with artificial neural networks // Science, 2017. Vol. 355. № 6325. P. 602–606.
2. Lucas A. Ising formulations of many NP problems // Frontiers in physics, 2014. Vol. 2. P. 5.
3. Shi H. Q., Sun X. Y., Zeng D. F. Neural-network quantum state of transverse-field Ising model // Communications in Theoretical Physics, 2019. Vol. 71. № 11. P. 1379.
4. Vicentini F. et al. NETKET 3: Machine learning toolbox for many-body quantum systems // SciPost Physics Codebases, 2022. P. 007.

УДК 621.38-022.532

Мемристивные структуры на основе поли-п-ксилилена: от электрофизических свойств до синаптических функций с нейроморфными применениями в конденсаторной одиночной и кроссбар-геометрии на твердой и гибкой подложке

Швецов Б. С.[1,2], Юкляевских Г. А.[1,2], Емельянов А. В.[1,2,3]
[1] *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1*
[2] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1*
[3] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
b.shvetsov15@physics.msu.ru

Исследованы мемристоры на основе парилена с биоподобной синаптической пластичностью, устойчивые к механическим деформациям, для применения в носимой нейроморфной электронике.
Ключевые слова: мемристоры; резистивное переключение; нейроморфные вычисления; парилен; органическая электроника.

В настоящее время активно развиваются аппаратные нейроморфные вычислительные системы (НВС) на основе мемристивных устройств, главным образом из-за возможности мемристоров обеспечивать высокую производительность и энергоэффективность при решении когнитивных задач, таких как распознавание речи, восприятие, обобщение, память и т.д. Кроме этого, мемристоры уже получили широкое распространение на промышленном уровне в качестве элемента энергонезависимой памяти, элемента для вычислений в памяти, генератора случайных чисел для безопасности данных и т.д. Основным принципом работы наиболее распространенных мемристивных устройств является ионная миграция, что делает мемристор эффективным имитатором как биологических нейронов, так и биологических синапсов [1].

Органические материалы вызывают особый интерес благодаря вариабельности методов производства, низкой стоимости и биосовместимости. Вместе с этим органические материалы демонстрируют стабильный эффект резистивного переключения и не уступают неорганическим материалам по основным электрофизическим характеристикам (окно сопротивлений более 10^5, время энергонезависимого удержания состояния более 10 лет, число резистивных переключений без деградации структуры более 10^{12} и многоуровневость резистивного переключения). В этом отношении парилен обеспечивает рациональный компромисс и баланс между перечисленными основными характеристиками. Кроме этого, механизм резистивного переключения основан на электрохимической металлизации, что делает его подобным механизму работы биологического синапса [2]. Важно отметить возможность создания мемристоров на основе парилена в кроссбар-геометрии, 3D-геометрии и на гибких подложках [3]. Вышеописанные свойства открывают возможность использования таких мемристоров в качестве обучаемых синаптических весов,

связывающих нейроны различных типов, для реализации схем аппаратных НВС, перцептронов, ассоциативного обучения и обучения с подкреплением. При этом низкая цена производства и простые методы создания делают их доступными для обширного применения в носимой электронике и биомедицинских устройствах.

Целью работы является изучение эффекта резистивного переключения в мемристорах на основе парилена в зависимости от механической деформации изгиба, а также изучение синаптической пластичности в мемристорах на основе парилена в кроссбар-геометрии на кремниевой подложке.

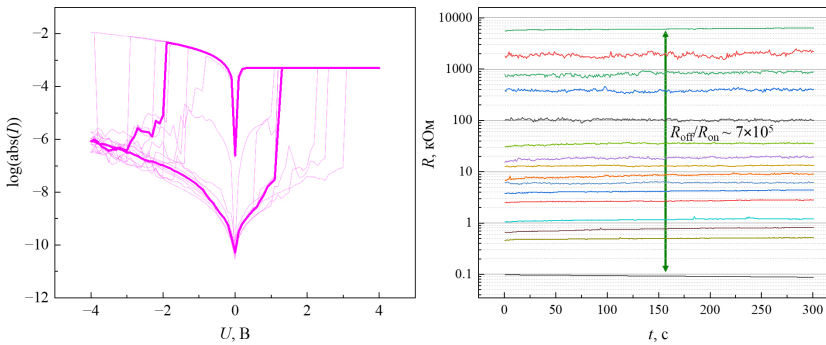


Рис. 1. ВАХ Cu/ППК/Au кроссбар-элемента в логарифмическом масштабе с медианной кривой (жирным) (*а*); многоуровневое резистивное переключение с временами удержания не менее 300 с (*б*)

Так, созданные кроссбар-массивы обладают выдающимися показателями пластичности (окно сопротивлений $R_{off}/R_{on} \sim 10^5$ и 16 стабильных резистивных состояний с временем энергонезависимого хранения не менее 300 с, рис. 1). В частности, исследование отклика на синаптическую функцию LTP/LTD демонстрирует возможность контролируемого и плавного изменения проводимости структуры с помощью серии однополярных импульсов, что важно для использования данных структур в качестве синаптических элементов для нейроморфных систем. Кроме того, кроссбар-массивы демонстрируют биоподобный отклик на синаптическую функцию STDP, основанную на долговременной потенциации/депрессии.

Мемристоры обладают стабильным эффектом резистивного переключения вне зависимости от типа подложки или степени деформации изгиба, демонстрируют отличные показатели пластичности и энергонезависимого удержания состояния. Результаты данного исследования открывают перспективы для дальнейших исследований возможности применения мемристоров на основе чистого парилена в качестве элементной базы носимой нейроморфной электроники.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-19-00200) в части исследования образцов и государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в части изготовления образцов. Работа была выполнена на оборудовании ресурсных центров (НИЦ «Курчатовский институт»).

Литература

1. Yuan L., Liu S., Chen W. et al. Organic Memory and Memristors: From Mechanisms, Materials to Devices // Advanced Electronic Materials, 2021. Vol. 7. № 11.
2. Minnekhanov A.A., Emelyanov A.V., Lapkin D.A. et al. Parylene Based Memristive Devices with Multilevel Resistive Switching for Neuromorphic Applications // Sci. Rep., 2019. Vol. 9. № 10800. P. 1–9.
3. Швецов Б.С., Мацукатова А.Н., Миннеханов А.А. и др. Мемристоры на основе полипараксилилена на гибких подложках // Письма в журнал технической физики, 2019. — Т. 45. — № 21. — С. 40.

УДК 621.3.049

Адаптивный гетерогенный нейронаблюдатель состояния системы

Кузнецов М. А.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
isau@mail.ru

В системах управления для обеспечения эффективной работы требуется точная математическая модель объекта управления. Предложенный наблюдатель является методом, сочетающим нейросетевые подходы с математическим моделированием для динамической адаптации к изменяющимся характеристикам технических систем.

Ключевые слова: инерциальные навигационные системы; накопление ошибок; наблюдатель систем; нейросетевая архитектура; динамическая адаптация; реальное время.

Инерциальные навигационные системы (ИНС) являются частью навигационного комплекса летательных аппаратов (ЛА). Современные ЛА требуют высокой точности определения положения и ориентации в пространстве в режиме реального времени. При длительных полетах параметры ИНС могут существенно искажаться вследствие дрейфа датчиков, износа компонентов, температурных колебаний и воздействия внешних факторов, что приводит к накоплению ошибок в определении положения. Традиционные методы компенсации этих ошибок основаны на предварительном расчете калибровочных коэффициентов и их периодической корректировке, что не обеспечивает достаточной точности при значительных изменениях характеристик системы.

В системах автоматического управления ЛА для корректной работы алгоритмов часто необходимо иметь точную математическую модель системы. Традиционно такие модели рассчитываются аналитически с применением метода кусочной линеаризации. Однако данный подход имеет существенные ограничения: при изменении характеристик системы аналитические расчеты начинают давать некорректные показания, что может привести к негативным последствиям.

Предложенный адаптивный гетерогенный нейронаблюдатель основан на нейросетевой архитектуре, где каждый слой содержит «нейроны», реализующие различные математические функции. Подобно методу обратного распространения ошибки в нейронных сетях, в данной системе происходит корректировка весовых коэффициентов каждой математической функции. Таким образом, при обучении полученная «нейросеть» будет представлять из себя математическую модель наблюдаемой системы [1].

Ключевое преимущество системы заключается в ее адаптивности — она работает в реальном времени и непрерывно обучается, не завися от предварительно заданных моделей. Дополнительным преимуществом является возможность предварительного обучения на кусочно-линеаризованных математических моделях перед интеграцией в реальную систему. После активации система динамически адаптирует границы линеаризованных сегментов под фактические нелинейные свойства объекта, повышая точность модели в условиях реальной эксплуатации.

Практическое применение предложенного подхода перспективно не только в навигационных комплексах, но и в широком спектре технических приложений, включая системы управления космическими аппаратами, беспилотные ЛА и сложные технические комплексы. В частности, для ИНС такой нейронаблюдатель способен существенно снизить накопленную ошибку определения положения и ориентации, автоматически адаптируясь к изменениям в характеристиках датчиков и влиянию внешних факторов [2].

Таким образом, предложенное решение представляет собой сочетание адаптивности нейросетевых подходов с точностью традиционных методов математического моделирования.

Литература

1. Терехов В. А., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю. Нейросетевые системы управления: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. школа, 2002. — 183 с.
2. Muhammad Taimoor, Li Aijun, Muhammad Samiuddin. Sliding mode learning algorithm based adaptive neural observer strategy for fault estimation, detection and neural controller of an aircraft, 2020. 24 p.

УДК 621.38

Мемристоры на основе нанокомпозита поли-(п-ксилилен)-MoO_x на гибких подложках для носимой нейроморфной электроники

Рябова М. А.[1,2], Мацукатова А. Н.[1,3], Емельянов А. В.[1,2]

[1] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
rmargo01@mail.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Работа посвящена исследованию влияния деформации изгиба на резистивные переключения (РП) нанокомпозитных мемристоров Cu/поли-(п-ксилилен)-MoO_x/ITO и выявлению детального механизма их РП. Полученные результаты демонстрируют перспективность дальнейших исследований для использования таких мемристоров в новейших устройствах носимой нейроморфной электроники.

Ключевые слова: резистивное переключение; нанокомпозиты; носимая нейроморфная электроника.

Мемристоры — устройства, демонстрирующие эффект резистивного переключения (РП) и активно используемые в нейроморфных вычислительных системах (НВС), могут быть изготовлены из органических биосовместимых материалов на гибких подложках и в дальнейшем внедрены в носимые биомедицинские системы. В литературе уже продемонстрированы перспективные характеристики гибких мемристоров на основе поли-(*п*-ксилилена) (ППК) [1]. При внедрении в матрицу ППК нанокластеров MoO_x наблюдается значительное улучшение основных мемристивных характеристик, что позволяет использовать данные мемристоры для построения эффективных НВС [2, 3]. Однако детального изучения механизма РП в мемристорах на основе нанокомпозитов ППК-MoO_x и возможности их изготовления на гибких подложках не проводилось. Вместе с тем это важно для реализации надежной носимой электроники и НВС на их основе.

В данной работе предметом исследования являются мемристоры Cu/ППК-MoO_x/ITO на гибких подложках из полиэтиленнафталата (PEN). Нанокомпозит ППК-MoO_x был получен методом газофазной полимеризации на поверхности. Устройства продемонстрировали плавное и стабильное РП, связанное с модифицированным механизмом электрохимической металлизации (ЭХМ) РП. Ранее было показано, что в мемристорах на основе ППК процесс РП описывается механизмом ЭХМ [4], в котором сопротивление структуры зависит от роста, разрыва и повторного образования металлического филамента внутри диэлектрической матрицы. В структуре Cu/ППК-MoO_x/ITO/PEN ионы меди, дрейфующие от верхнего электрода к нижнему в сильных электрических полях, могут восстанавливаться не только на нижнем электроде, но и на наночастицах MoO_x, поскольку

потенциалы восстановления Cu и MoO_x имеют разные знаки [5], что подтверждается результатами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного микроанализа. Таким образом, за счет концентрации меди на наночастицах MoO_x стабилизируется рост филамента. При этом, как показали температурные зависимости проводимости, сам филамент полностью не замыкается при переходе в проводящее состояние.

Исследование влияния деформации изгиба на РП изготовленных мемристоров было проведено по вольт-амперным характеристикам до и после изгибов по цилиндру. После изгибов по цилиндрам с радиусами 2 и 1,5 см значительных изменений не наблюдалось. Начиная с 1 см и меньше происходило заметное сужение окна сопротивлений в основном за счет увеличения сопротивления проводящего состояния. Деградация мемристивных свойств предположительно связана с нарушением адгезии слоев после изгиба. Кроме этого, в работе были получены основные мемристивные характеристики, необходимые для использования устройств в НВС.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РНФ № 24-19-00200 с использованием оборудования ресурсных центров (НИЦ «Курчатовский институт»).

Литература

1. Cai Y., Tan J., Yefan L., Lin M., Huang R. A flexible organic resistance memory device for wearable biomedical applications // Nanotechnology. IOP Publishing, 2016. Vol. 27. № 27. P. 1–6.
2. Minnekhanov A., Matsukatova A., Trofimov A., Nesmelov A., Zavyalov S., Demin V., Emelyanov A. Reliable Memristive Synapses Based on Parylene-MoO x Nanocomposites for Neuromorphic Applications // ACS Applied Materials & Interfaces, 2023. Vol. 15. № 47. P. 54996–55008.
3. Ryabova M.A., Matsukatova A.N., Emelyanov A.V., Nesmelov A.A., Patsaev T.D., Demin V.A. Parylene-MoO x crossbar memristors as a volatile reservoir and non-volatile readout: a homogeneous reservoir computing system // Nanoscale. Royal Society of Chemistry, 2024. Vol. 16. № 44. P. 20628–20636.
4. Minnekhanov A.A., Emelyanov A.V., Lapkin D.A., Nikiruy K.E., Shvetsov B.S., Nesmelov A.A., Rylkov V.V., Demin V.A., Erokhin V.V. Parylene Based Memristive Devices with Multilevel Resistive Switching for Neuromorphic Applications // Scientific Reports, 2019. Vol. 9. № 1. P. 10800.
5. Haynes W.M. CRC Handbook of Chemistry and Physics. — CRC Press, 2014. — 2670 p.

УДК 004.032.26; 621.382

Исследование и статистический анализ параметров ячеек памяти в мемристорных кроссбарах на основе диоксида циркония, стабилизированного иттрием

Жарков Г. Д.[1], Белов А. И.[1], Большаков Д. И.[1], Лукоянов В. И.[1,2], Грязнов Е. Г.[1,2], Сафонов А. В.[1,2], Михайлов А. Н.[1]

[1] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, научно-образовательный центр «Физика твердотельных наноструктур» 603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
grigoriyzharkov@gmail.com
[2] Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю. Е. Седакова» 603952, г. Нижний Новгород, бокс № 486

Исследованы электрофизические свойства мемристорных ячеек памяти перспективных конструкций: 1T1M и 5T1M. Ячейки содержат мемристоры на основе диоксида циркония, стабилизированного иттрием, и транзисторы, созданные по технологии КМОП КНИ 0,35 мкм. Приведены характеристики ячеек памяти, характеризующие разброс параметров от устройства к устройству, проведен анализ напряжений формовки.

Ключевые слова: мемристор; резистивная память; RRAM; кроссбар; нейроморфные вычислительные системы; стабилизированный диоксид циркония; антиформовка.

Резистивная память на основе мемристоров (RRAM — Resistive Random Access Memory) является наиболее многообещающим кандидатом для создания устройств нейроэлектроники будущего. Важнейшее преимущество элементов RRAM — их совместимость с традиционной технологией КМОП (комплементарная структура металл — оксид — полупроводник), используемой для создания подавляющего количества современных интегральных микросхем. К примеру, в статье [1] показана возможность формирования мемристорных структур на кремниевой пластине в слоях металлизации.

Объединение элементов RRAM в кроссбар-матрицы позволяет повысить плотность записи информации, а также провести аналоговое векторно-матричное умножение, необходимое для работы нейронных сетей. В пассивных матрицах неизбежно появление токов утечки, способных искажать информацию, считываемую с выбранной ячейки памяти, а также изменять состояние соседних ячеек [2]. Для борьбы с токами утечки в каждую ячейку добавляются управляющие устройства, призванные минимизировать потери энергии при взаимодействии с выбранной ячейкой [3].

В настоящей работе проведено исследование наиболее перспективных конструкций мемристорных ячеек памяти в кроссбар-матрицах:

- ячейки конструкции 1T1M в кроссбаре 32×8 на тестовом кристалле RRAM_FB_II. Мемристор последовательно подключен к *n*-канальному МОП-транзистору (структура металл — оксид — полупроводник). Транзистор играет роль селектора и ограничивает токи через невыбранные ячейки памяти;

- ячейки конструкции 5T1M в кроссбаре 64×64 на тестовом кристалле RRAM_PTM. Пять МОП-транзисторов (два *p*-канальных и три *n*-канальных) играют роль селектора, блокируя протекание тока через невыбранные ячейки. Схема также содержит два КМОП-инвертора, необходимых для правильной работы *p*-канальных транзисторов.

Транзисторы выполнены по технологии «кремний на изоляторе» с проектными нормами 350 нм (КМОП КНИ 0,35 мкм НИИИС им. Ю. Е. Седакова) [4]. Мемристоры выполнены в верхних слоях металлизации методом магнетронного распыления и имеют структуру Au(20 нм) / Ta(40 нм) / ZrO_2(Y)(20 нм) / Pt(20 нм) / Ti(10 нм).

Проведено измерение вольт-амперных характеристик ячеек в кристаллах, определены начальные состояния ячеек. Большинство ячеек после создания структуры находились в состоянии с низким сопротивлением, что связывается с частичным окислением танталового электрода в процессе осаждения. Для абсолютного большинства работоспособных ячеек не требовалось проведение электроформовки.

Рассчитаны разбросы напряжений переключения, напряжений формовки и сопротивлений в состояниях с высоким и низким сопротивлением. Установлено, что почти все работоспособные ячейки переключаются при напряжениях, не превышающих 1,2 В.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах». Мемристивные структуры изготовлены в лаборатории мемристорной наноэлектроники ННГУ (государственное задание № FSWR-2025-0006) с использованием инфраструктуры учебного дизайн-центра электроники ННГУ.

Литература

1. Mikhaylov A. N., Gryaznov E. G., Koryazhkina M. N., Bordanov I. A., Shchanikov S. A., Telminov O. A., Kazantsev V. B. Neuromorphic Computing Based on CMOS-Integrated Memristive Arrays: Current State and Perspectives // Supercomputing Frontiers and Innovations, 2023. Vol. 10. № 2. P. 77–103.
2. Li Huihan, Wang Shaocong, Zhang Xumeng, Wang Wei, Yang Rui, Sun Zhong, Feng Wanxiang, Lin Peng, Wang Zhongrui, Sun Linfeng, and Yao Yugui Memristive Crossbar Arrays for Storage and Computing Applications // Advanced Intelligent Systems, 2021. Vol. 3. № 9. P. 2100017.
3. Chen An. Memory selector devices and crossbar array design: a modeling-based assessment // Journal of Computational Electronics, 2017. Vol. 16. P. 1–15.
4. Михайлов А. Н., Белов А. И., Королев Д. С., Гусейнов Д. В., Грязнов Е. Г., Коряжкина М. Н., Лукоянов В. И., Слиняков Ю. Г., Шарапов А. Н., Филатов Д. О., Горшков О. Н., Андреева Н. В., Смирнов В. А., Федотов А. А., Щаников С. А., Казанцев В. Б. Мемристивные наноматериалы и технологии новой элементной базы нейроэлектроники // Нейротехнологии и нейроэлектроника, 2024. — Т. 1. — № 1. — С. 44–109.

УДК 621.3.049.77

Мемристорные структуры с односторонней проводимостью на основе оксида меди для нейроморфной кроссбар-ЭКБ

Дзюба Д. А., Саенко А. В., к. т. н., Томинов Р. В., к. т. н., Вакулов З. Е., к. т. н., Смирнов В. А., к. т. н.
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
dmdzyuba@sfedu.ru

В работе представлены результаты изготовления и исследования мемристорной структуры с односторонней проводимостью на основе оксида меди. Показано проявление в них self-rectifying резистивного переключения за счет образования барьера Шоттки на границе полупроводника (оксида меди) и меди. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления нейроморфной ЭКБ на основе мемристорных кроссбаров.

Ключевые слова: self-rectifying memristor; мемристоры с односторонней проводимостью; Cu_2O; паразитные токи кроссбар-структур; ReRAM.

Пассивные мемристорные кроссбар-структуры, применяемые в ReRAM и нейроморфных вычислительных системах, характеризуются проблемой паразитных токов, которые протекают в кроссбар-массиве через мемристоры, параллельные адресуемому мемристору, что приводит к ошибкам чтения и записи информации. Существует множество способов борьбы с этой проблемой, например различные схемы считывания кроссбар-массивов или подключение селекторных устройств последовательно с мемристором. Однако использование специальных схем считывания требует сложной и массивной схемотехнической обвязки кроссбар-массива и все равно не позволяет полностью избавиться от влияния паразитных токов [1]. Применение же дополнительных селекторов, например транзисторов (архитектура 1T1R) и диодов (1D1R), ведет к увеличению латеральных размеров кроссбар-ячеек и усложнению технологического процесса их изготовления. Альтернативой кроссбар-архитектуре 1D1R являются мемристорные структуры с односторонней проводимостью (англ. Self-rectifying memristor structures). Такие структуры сочетают в себе одновременно свойства *p-n*-перехода и резистивного переключения мемристора, что позволяет использовать их в кроссбар-массивах ReRAM и нейроморфных системах для снижения проблемы паразитных токов без необходимости формирования дополнительного селекторного устройства [2]. Таким образом, исследование мемристорных структур с односторонней проводимостью, в частности на основе Cu_2O, является актуальной задачей.

Для исследования свойств резистивного переключения мемристоров с односторонней проводимостью с помощью метода магнетронного распыления на стеклянной подложке была сформирована многослойная структура стекло/ITO/Cu_2O/Cu. Толщины слоев составили: ITO = 250 нм, Cu_2O = 250 нм, Cu = 150 нм. Напыление каждого последующего материала проводилось через маску для формирования слоев по площади, меньшей, чем у предшествующего слоя, чтобы обеспечить доступ измерительных зондов к каждому из слоев структуры.

С использованием зондовой станции и измерителя сопротивлений Keithley 6517B было проведено исследование резистивного переключения сформированных мемристорных структур, в результате которого были получены ВАХ с несимметричностью относительно оси абсцисс, характерной для диодных структур. А также с помощью растровой электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии исследована морфология поверхности и электрофизических параметров пленки Cu_2O.

Было установлено, что без проведения электроформовки мемристорные структуры проявляют эффект односторонней проводимости за счет образования барьера Шоттки [3] на границе Cu/Cu_2O. После проведения электроформовки за счет образования проводящего канала в Cu_2O исследованный мемристор демонстрирует биполярное резистивное переключение.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления элементов нейроморфной ЭКБ на основе мемристорных кроссбаров для уменьшения влияния паразитных токов за счет эффекта односторонней проводимости, а также в оптических элементах за счет прозрачности используемого материала подложки (стекло) и нижнего электрода (ITO).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00809, https://rscf.ru/project/25-19-00809, в Южном федеральном университете.

Литература

1. Huihan Li, Shaocong Wang, Xumeng Zhang, Wei Wang, Rui Yang, Zhong Sun, Wanxiang Feng, Peng Lin, Zhongrui Wang, Linfeng Sun, and Yugui Yao. Memristive Crossbar Arrays for Storage and Computing Applications // Advanced Intelligent Systems, 2021. Vol. 3. P. 2100017. DOI: 10.1002/aisy.202100017.
2. Ren Sheng-Guang, Dong A-Wei, Yang Ling, Xue Yi-Bai, Li Jian-Cong, Yu Yin-Jie, Houji Zhou, Zuo Wen-Bin, Li Yi, Cheng Wei-Ming, Miao Xiang-Shui. Self-Rectifying Memristors for Three-Dimensional In-Memory Computing // Advanced materials, 2023. Vol. 36. P. e2307218. 10.1002/adma.202307218. DOI: 10.1002/adma.202307218.
3. Schottky W. Zur Halbleitertheorie der Sperrschicht- und Spitzengleichrichter // Z. Physik, 1939. Vol. 113. P. 367–414. https://doi.org/10.1007/BF01340116.

УДК 004.032.26

Система предсказания параметров цифровых схем с использованием методов машинного обучения

Зиазетдинов А. А., Подгорный Л. Е., Зунин В. В.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
miem@hse.ru

Предложены подходы к внедрению методов машинного обучения в проектировании цифровых СБИС. Проведено исследование существующих датасетов и создан собственный набор данных. Эксперименты показали эффективность модели Transformer [1] с метрикой MAPE [2], равной 0,0095. Таким образом, получается снизить вычислительно-временные затраты на проектирование и повысить качество результатов.

Ключевые слова: цифровые схемы; машинное обучения; нейронные сети; датасеты.

В работе предлагаются подходы к интеграции методов машинного обучения (ML) в проектирование цифровых сверхбольших интегральных схем (СБИС) в целях повышения точности и скорости оценки параметров комбинационных схем, таких как задержка сигнала, потребление энергии, площадь чипа и надежность. Цель исследования заключается в разработке гибридных моделей, способных обрабатывать графовые структуры схем, и создании расширенного датасета для обучения, учитывающего ограничения существующих наборов данных, таких как ISCAS [3] и IWLS2005 [4], которые характеризуются малым количеством схем и ограниченным набором метрик. Для решения этих задач был создан собственный датасет из 25 000 схем с использованием генератора CircuitGen [5], обеспечивающего разнообразие топологий (сумматоры, мультиплексоры, шифраторы).

Модели:

- TransformerCONV — гибридная архитектура с механизмами внимания (глобальный анализ) и графовыми свертками (локальные паттерны);
- GCN/GAT [6] — энкодеры с контрастным обучением (функция потерь NT-Xent) для извлечения обобщаемых признаков графов.

Формат данных:

- представление схем в виде графов (graphML);
- кодирование узлов через one-hot-encoding и учет типов ребер.

Результаты:

- TransformerCONV достиг рекордной точности с MAPE = 0,0095 % при предсказании задержки схем, превосходя GCN/GAT-модели (MAPE 2,3–2,4 %);
- преимущества: устойчивость к вариациям топологии графов, возможность масштабирования на высокоразмерные данные;
- ограничения: высокая вычислительная сложность, требующая мощных ресурсов и крупных датасетов.

Литература

1. Vaswani A. et al. Attention Is All You Need // Adv Neural Inf Process Syst. Neural information processing systems foundation, 2017. Vol. 2017-December. P. 5999–6009.
2. de Myttenaere A. et al. Mean Absolute Percentage Error for regression models // Neurocomputing. Elsevier, 2016. Vol. 192. P. 38–48.
3. Brglez F., Bryan D., Kozminski K. Combinational profiles of sequential benchmark circuits // Proc. IEEE Int. SymP. Circuits Syst. Publ by IEEE, 1989. Vol. 3. P. 1929–1934.
4. Albrecht C. IWLS 2005 Benchmarks // 2005 International Workshop on Logic Synthesis, 2005.
5. CircuitGen_Generator [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/vvzunin/CircuitGen_Generator (дата обращения: 15.05.2025).
6. Scarselli F. et al. The graph neural network model // IEEE Trans. Neural Networks. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2009. Vol. 20. № 1. P. 61–80.

УДК 004.383.8.032.26

Исследование возможностей обучения импульсной нейронной сети с учетом особенностей функционирования мемристивного кроссбар-массива

Дудкин А. П., Андреева Н. В., Рындин Е. А.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
anddudkin000@gmail.com, nvandr@gmail.com, rynenator@gmail.com

Разработаны модель и методика моделирования импульсной нейронной сети в режиме обучения с учетом особенностей функционирования мемристивных кроссбар-массивов. Получены результаты тестирования разработанной модели импульсной нейронной сети в режиме обучения и инференс-режиме.
Ключевые слова: импульсные нейронные сети; аппаратное исполнение; мемристивный кроссбар-массив.

Перспективным подходом к аппаратному исполнению импульсных нейронных сетей (ИмНС) в нейроморфных электронных модулях является интеграция мемристивной электронной компонентной базы (ЭКБ) в архитектуре кроссбар-массива.

При переходе от программного обучения ИмНС к аппаратному режиму обучения необходимо учесть особенности функционирования мемристивных кроссбар-массивов. На точность вычислений в ИмНС будет влиять несколько факторов: дискретный диапазон состояний и нелинейность вольт-амперных характеристик (ВАХ) реальных мемристивных элементов [1], а также падение напряжения на интегральных соединительных линиях в кроссбар-массиве. Поэтому разработка моделей, методик и эффективных средств проектирования ИмНС на основе мемристивных кроссбар-массивов, учитывающих особенности мемристоров и позволяющих реализовать алгоритмы обучения ИмНС, является важной и актуальной задачей. В рамках работы по созданию модели нейроморфного модуля, учитывающего особенности аппаратного исполнения импульсных нейросетей на мемристорной ЭКБ, были разработаны:

- программный симулятор ИмНС с функционалом, позволяющим учесть особенности мемристивных кроссбар-массивов в инференс-режиме и в режиме обучения;
- математическая модель для расчета падений напряжения на интегральных соединительных линиях кроссбар-массива;
- комплекс алгоритмов, использующих экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) мемристивных элементов при расчете кроссбар-массива, учитывающих дискретность уровней проводимости мемристоров и нелинейность ВАХ.

На рис. 1 приведена схема мемристивного кроссбар-массива.

Модель мемристивного кроссбар-массива, представленная нами ранее в работе [2], используется в итерационном алгоритме, который методом последовательных приближений позволяет учесть нелинейность ВАХ мемристивных элементов и дискретность диапазона состояний проводимости при расчете токов и напряжений в кроссбар-массиве.

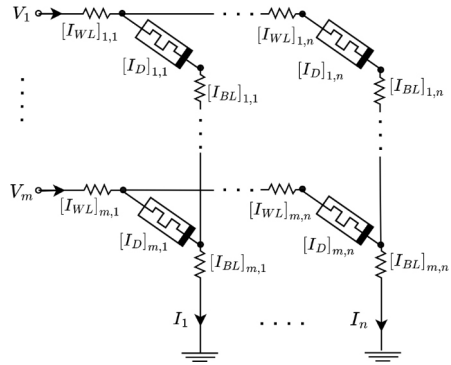


Рис. 1. Схема мемристивного кроссбар-массива

Для моделирования аппаратного обучения ИмНС использовано локальное правило обучения, основанное на синаптической пластичности нейронов (STDP, spike-timing-dependent plasticity) (рис. 2), при котором величины усиления и ослабления синаптических весов нейросети зависят от времени между импульсами постсинаптических и пресинаптических нейронов и описываются следующими выражениями:

$$\Delta w = A_+ \cdot e^{\frac{t_{pre} - t_{post}}{\tau}} \quad \text{для } t_{post} > t_{pre} \text{ и } \Delta t < t_+,$$

$$\Delta w = \mathrm{A}_- \quad \text{для } t_{post} < t_{pre} \text{ и } \Delta t < t_-,$$

где t_{pre} — время импульса пресинаптического нейрона; t_{post} — время генерации импульса постсинаптическим нейроном; Δw — величина изменения синаптического веса; A_+ и A_- — максимальные положительное и отрицательное изменения синаптического веса; τ — коэффициент, определяющий усиление синапсов.

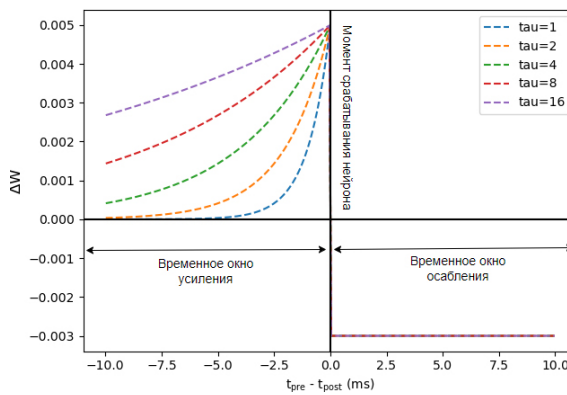


Рис. 2. Правило синаптической пластичности нейронов

Для оценки влияния особенностей аппаратного исполнения алгоритмов обучения проведен ряд экспериментов по обучению ИмНС распознаванию изображений. Полученные результаты показывают, что падение напряжения на элементах соединений кроссбар-массива, нелинейность ВАХ мемристивных элементов и увеличение дискретности диапазона состояний проводимости могут приводить к тому, что сеть перестает обучаться, однако оптимизация гиперпараметров ИмНС позволяет уменьшить снижение точности распознавания изображений после обучения на 10–25 % в сравнении с результатами, полученными на абстрактной программной модели, что говорит о необходимости учета данных факторов при проектировании нейроморфных модулей.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2025-0005.

Литература

1. Bouvier M., Valentian A., Mesquida T. Spiking Neural Networks Hardware Implementations and Challenges: A Survey. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019. Vol. 15. P. 1550–4832.
2. Dudkin A. P., Ryndin E. A., Andreeva N. V. Modeling the Functional Features of a Memristive Crossbar Array // Neuromorphic Electronic Modules. Russ Microelectron, 2024. № 53. P. 554–566. https://doi.org/10.1134/S1063739724600675.

УДК 621.382; 004.383.8.032.26

Исследование влияния вольт-амперных характеристик элементов ячейки мемристорно-селекторного кроссбар-массива на форму выходного сигнала

Неустроев А. А., Бусыгин А. Н., д. ф.-м. н., Удовиченко С. Ю.
Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
al.a.neustroev@utmn.ru

Проведена оценка влияния вольт-амперных кривых мемристоров и селекторов в отдельности и в комбинации путем схемотехнического моделирования на выходной сигнал кроссбар-массива. Предложен алгоритм определения оптимальной комбинации ячейки, исследовано влияние ячейки с паразитными элементами на сигнал.
Ключевые слова: мемристор; кроссбар; кроссбар-массив; деградация сигнала; селектор; нейроморфные вычисления.

Мемристор как новый компонент микроэлектроники обладает свойствами, которые позволяют использовать его в широком спектре технических приложений, от вычислений на памяти до аппаратных нейронных сетей. При размещении мемристора [1] и селектора [2] на пересечении электродов образуется мемристорно-селекторный кроссбар-массив. Применение пассивных селекторов предназначено для уменьшения влияния паразитных токов на вычислительные операции, снижения энергопотребления, повышения производительности и повышения стабильности и надежности матриц на основе кроссбар-массивов.

Особенности управления матрицами на основе кроссбар-массивов с пассивными селекторами, а также требования КМОП-периферии к форме получаемого сигнала ведут к необходимости оптимизации геометрии, электрофизических свойств ячеек. Однако из-за большого разнообразия и сильных различий в вольт-амперных характеристиках как мемристоров, так и селекторов становится затруднительно получить оптимальную комбинацию мемристор — селектор для ячейки кроссбар-массива. В данной работе предложен метод определения степени влияния вольт-амперной кривой мемристоров и селекторов на форму выходного сигнала как по отдельности, как и при комбинировании их в ячейке кроссбар-массива топологии 1S1M.

Для оценки влияния мемристоров и селекторов из различных материалов были применены различные количественные метрики, которые показывают степень влияния как на фронт прямоугольного импульса напряжения, так и на прямолинейный его участок и амплитуду импульса. Анализ и сравнение в заданных условиях работы были проведены для мемристоров из материалов HfO_x, AlO_x, YSZ [3–5], а также отобранных пассивных селекторов с различными вольт-амперными кривыми (OTS, MIEC, диод Зенера, кремниевые диоды, включенные противопараллельно, варистор, диод Шоттки).

Предложен алгоритм определения оптимальной ячейки, образованной из комбинации мемристор — селектор, и с его помощью получена комбинация для избранных мемристоров и селекторов. Исследовано влияние электрофизических

характеристик полученной оптимальной ячейки с добавлением паразитных элементов, появляющихся из-за геометрии и топологии кроссбар-массива, на форму выходного сигнала логической матрицы 1S1M. Полученная схемотехническая модель в LTspice описывает свойства реальной ячейки при управлении высокочастотным сигналом прямоугольной формы и может быть использована при моделировании устройств с мемристорно-селекторными кроссбар-массивами. Кроме того, предложены рекомендации для оптимизации ячеек и управления кроссбар-массивом, в котором применяются пассивные селекторы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FEWZ-2024-0020).

Литература

1. Xiao Y. et al. A review of memristor: material and structure design, device performance, applications and prospects // Science and Technology of Advanced Materials, 2023. Vol. 24. № 1. P. 2162323.
2. Chekol S.A. et al. Selector devices for emerging memories // Memristive Devices for Brain-Inspired Computing, 2020. P. 135–164.
3. Wu L. et al. A multi-level memristor based on Al-doped HfO 2 thin film // Nanoscale research letters, 2019. Vol. 14. P. 1–7.
4. Yue J. et al. Synapse Neurotransmitter Channel-Inspired AlOx Memristor with “V” Type Oxygen Vacancy Distribution // Small Methods, 2024. Vol. 8. № 12. P. 2301657.
5. Upadhyay N.K. et al. A memristor with low switching current and voltage for 1S1R integration and array operation // Advanced Electronic Materials, 2020. Vol. 6. № 5. P. 1901411.

УДК 004.048

Исследование латентного пространства моделей глубокого обучения применительно к задачам входного контроля полевых транзисторов

Чернова А. С.[1,2], Мещанинов Ф. П.[1], Жевненко Д. А.[1,3], Горнев Е. С.[1,2]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
achernova@niime.ru
[2] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

Предложен интерпретируемый подход для автоматизации входного контроля транзисторов с применением автоэнкодеров и моделей для временных рядов, обеспечивающий высокую точность обнаружения аномалий в ВАХ. Реализована регуляризация латентного пространства для повышения интерпретируемости.
Ключевые слова: входной контроль; транзисторы; вольт-амперная характеристика; автоматизация; аномалия; глубокое обучение.

Контроль электрофизических параметров транзисторов на этапе производства критически важен для обеспечения качества микроэлектронных устройств [1]. Традиционные методы, основанные на пороговых значениях и визуальном анализе вольт-амперных характеристик (ВАХ), трудоемки и не адаптируются к новым типам дефектов.

В работе предложен интерпретируемый подход для автоматизации детектирования аномалий в ВАХ транзисторов, сочетающий методы глубокого обучения с анализом латентных представлений. В качестве базового метода использованы автоэнкодеры [2], обученные на нормальных данных, с последующим анализом ошибки восстановления для выявления отклонений. Исследованы три архитектуры: полносвязный, рекуррентный и сверточный автоэнкодеры.

Для повышения интерпретируемости введена регуляризация [2] латентного пространства, стягивающая латентные вектора к единичному вектору и таким образом влияющая на обучение модели. Данная регуляризация повысила компактность кластеров нормальных данных, сохранив точность предсказаний модели. Для обработки данных с малыми значениями сигналов (токи порядка нескольких наноампер) разработана специализированная нормализация, включающая вычитание среднего ряда и контролируемое шумоподавление.

Для многоканальных данных применены специализированные модели: USAD [3] (состязательные автоэнкодеры) и GBAD [4] (графовый автоэнкодер с динамическим обучением связей). Графовая модель GBAD достигла максимальных значений $F1 = 0{,}857$ и $Precision = 0{,}923$, превзойдя гибридный подход USAD и другие модели автоэнкодеров, что подтверждает важность явного учета структурных связей в данных. Эффективность предложенного подхода была подтверждена на 14256 экспериментальных ВАХ транзисторов.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

1) разработана модель глубокого обучения для детектирования аномалий электрофизических параметров транзисторов;
2) разработанный метод представляет собой готовое решение для отбраковки транзисторов по совокупности их ВАХ и отличается высокой степенью универсальности, что позволяет адаптировать его к данным других устройств;
3) впервые для задачи контроля транзисторов применена графовая модель GBAD, учитывающая структурные зависимости между временными рядами;
4) проанализированы изменения в латентном пространстве различных моделей при добавлении регуляризационного слагаемого в функцию потерь и их влияние на качество самих моделей.

Практическая значимость работы заключается в создании адаптируемого инструмента для автоматизированной отбраковки дефектных компонентов, обеспечивающего снижение зависимости от человеческого фактора. Результаты демонстрируют потенциал глубокого обучения для решения задач контроля качества в условиях быстро развивающихся технологий микроэлектроники.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
2. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016. http://www.deeplearningbook.org.
3. Audibert J., Michiardi P., Guyard F., Marti S., Zuluaga M. A. Usad: Unsupervised anomaly detection on multivariate time series // Proceedings of the 26th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery & data mining, 2020. P. 3395–3404.
4. Ahmad A., Kovalenko A., Makarov I. Anomaly Detection Using Graph-Based Autoencoder with Graph Structure Learning Layer // 2024 IEEE 6th International Symposium on Logistics and Industrial Informatics (LINDI). IEEE, 2024. P. 89–94.

УДК 537.312.7

Обзор современного состояния мемристорных структур применительно к энергонезависимой памяти и нейроморфным вычислениям

Мизгинов Д. С., Тельминов О. А., Горнев Е. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
niime@niime.ru

Проанализировано современное состояние мемристоров применительно к энергонезависимой памяти и нейроморфным вычислениям.
Ключевые слова: мемристор; энергонезависимая память; нейроморфные вычисления; элементная база.

Современное состояние исследований и разработок мемристивных структур демонстрирует существенный прогресс в направлении интеграции данных элементов в архитектуры энергонезависимой памяти (non-volatile memory, NVM), а также в реализации нейроморфных вычислительных парадигм, приближенных по принципу действия к биологическим нейронным сетям [1]. Мемристоры, обладая способностью сохранять информацию в виде устойчивых состояний сопротивления, представляют собой фундаментально иной подход к хранению и обработке информации, выходящий за рамки фоннеймановской архитектуры. Их физическая реализация преимущественно базируется на переходных оксидах металлов, таких как HfO_2, TiO_2, Ta_2O_5 и их производные, где ключевыми являются механизмы формирования и разрыва проводящих филаментов, обусловленных ионной миграцией и модуляцией локального состава материала. В контексте энергонезависимой памяти мемристоры демонстрируют потенциал к сверхвысокой плотности интеграции, многоуровневому хранению информации, а также к реализации энергоэффективного доступа с малыми задержками, что ставит их в один ряд с наиболее перспективными кандидатами на замену существующих технологий, включая NAND-флеш и STT-MRAM [2].

Однако стабильность переключения, стохастический характер формирования состояний и деградация при многократных циклах записи/стирания остаются ключевыми проблемами, сдерживающими промышленное внедрение. Параллельно развивается исследовательское направление, связанное с использованием мемристоров в качестве синаптических элементов в аппаратных нейроморфных системах [3]. За счет своей способности воспроизводить формы синаптической пластичности, такие как Spike-Timing-Dependent Plasticity (STDP), а также долгосрочную и краткосрочную модуляцию проводимости мемристоры могут быть использованы для построения энергоэффективных, распределенных и адаптивных вычислительных структур, способных к обучению на уровне физического слоя. Нейроморфные чипы, основанные на массивных мемристивных матрицах (crossbar arrays), в совокупности с CMOS-элементами демонстрируют экспериментальные реализации обучения с подкреплением, классификации образов и предсказания временных последовательностей, при этом существенно превосходя традиционные GPU и CPU по метрикам энергоэффективности [4]. Отдельное внимание уделяется вопросам совместимости с современными техпроцессами, интеграции в трехмерные структуры и формированию надежных моделей для

схемотехнического моделирования и верификации. Несмотря на достигнутые успехи, остается ряд нерешенных задач, включая вариабельность порогов переключения, тепловую нестабильность, необходимость в разработке новых схем коррекции ошибок и алгоритмов обучения, адаптированных к физическим особенностям устройств [6, 7]. Тем не менее ускоренное развитие синергетических направлений в области материаловедения, нанофабрикации и вычислительной нейронауки позволяет говорить о мемристорах как о ключевом элементе будущих энергоэффективных и адаптивных вычислительных платформ, способных существенно изменить принципы как хранения данных, так и их обработки

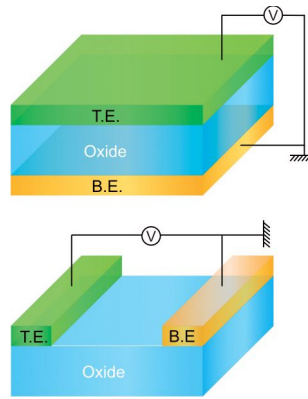


Рис. 1. Схематическое изображение мемристорной структуры [5]

Литература

1. Egorov K.V., Kirtaev R.V., Lebedinskii Y.Y., Orlov O.M. et al. Complementary and bipolar regimes of resistive switching in TiN/HfO_2/TiN stacks grown by atomic-layer deposition // Physica Status Solidi. A: Applications and Materials Science, 2015. Vol. 212. № 4. P. 809–816.
2. Strukov D.B. et al. The missing memristor found // Nature, 2008. Vol. 453. P. 80–83.
3. Egorov K.V., Lebedinskii Y.Y., Markeev A.M., Orlov O.M. Full ALD Ta_2O_5-based stacks for resistive random access memory grown with in vacuo XPS monitoring // Applied Surface Science, 2015. Vol. 356. P. 454–459.
4. Zhu L. et al. An overview of materials issues in resistive random access memory // J. Materiomics, 2015. Vol. 1. № 4. P. 285–295.
5. The modifcation of ultraviolet illumination to resistive switching behaviors in Ga_2O_3 memory device // Journal of Materials Science: Materials in Electronics, March 2019. Vol. 30. P. 8629–8635.
6. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. — М.: ТЕХНОСФЕРА, 2002. — С. 413–413.
7. Mehonic A., Kenyon A.J. Resistive Switching in Oxides // Defects at Oxide Surfaces. J. Jupille, G. Thornton (Eds.). Cham: Springer, 2015. P. 401–428.

УДК 538.958

Влияние коалесценции на динамику проводимости и мемристивные свойства ансамблей наночастиц серебра

Василевская Ю. О.[1], Чумаченко Ю. В.[2], Новиков Д. В.[2], Сибатов Р. Т.[1]
[1] НПК «Технологический центр»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Институт перспективных материалов и технологий
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
fedorovauo@mail.ru

В исследовании изучается влияние структуры ансамблей наночастиц на их мемристивные свойства, а также дается оценка перспектив их дальнейшего применения в системах для резервуарных вычислений. Вариация геометрических параметров в ансамбле наночастиц серебра достигается за счет изменения массы испаряемого металла и температуры отжига. Структура систем наночастиц оценивалась по изображениям растровой электронной микроскопии (РЭМ) и оптическим спектрам поглощения излучения в диапазоне длин волн ультрафиолет (УФ) — ближний инфракрасный (ИК). Экспериментально продемонстрировано, что структура ансамблей определяет мемристивную динамику и пороговое напряжение переключения в проводящее состояние
Ключевые слова: наночастицы; коалесценция; мемристивные свойства; резервуарные вычисления.

Разработки в области резервуарных вычислений становятся все более актуальными в контексте современных требований к вычислительным системам, так как они предлагают новые подходы к обработке информации [1]. Использование массивов наночастиц серебра в качестве физического резервуара является перспективной концепцией, объединяющей возможности нанотехнологий, микроэлектронику и вычислительные методы [2, 3]. Высокая чувствительность к внешним электромагнитным полям и химическая активность наночастиц серебра позволяют рассматривать их как потенциально полезную архитектуру для создания энергоэффективных устройств с управляемой проводимостью [4].

В исследовании для анализа динамики проводимости ансамбля серебряных наночастиц использовались экспериментальные образцы в виде планарных структур. Образцы были изготовлены на термически окисленной кремниевой подложке и содержали два электрода, разделенных зазором шириной 2 мкм. Массив наночастиц серебра осаждался вакуум-термическим испарением в область зазора между электродами. Значение давления остаточных газов в камере при осаждении было не ниже $1 \cdot 10^{-5}$ Торр. Расстояние между испарителем и поверхностью осаждения составляло 20 см, время испарения зависело от массы серебра и составляло от 10 до 20 секунд. Вариация геометрических параметров для наночастиц достигалась за счет изменения массы испаряемого металла и температуры отжига. В работе исследовались ансамбли наночастиц со средними размерами от 20 до 100 нм.

Статистические особенности динамики проводимости и параметры мемристивного поведения исследовались с использованием циклической вольтамперометрии на базе зондовой станции (Cascade Microtech Summit, США)

и параметрического анализатора B1500A (Keysight, США). Процесс агрегации в массиве наночастиц подтверждался с помощью контроля динамики изменения морфологии и распределения наночастиц по РЭМ-изображениям и оптическим спектрам поглощения, причем для наночастиц меньших размеров скорость изменений была выше. Коалесценция наночастиц серебра изменяет мемристивные характеристики системы. В частности, при укрупнении наночастиц увеличивается средний зазор между соседними частицами и, как правило, снижается проводимость и ухудшается стабильность системы. Кроме того, такие изменения могут вызвать деградацию производительности и уменьшить длительность работы резервуарных вычислительных устройств. Поэтому контроль над процессами коалесценции является ключевым для достижения стабильных и эффективных показателей в подобных системах. Старение системы вызывает укрупнение наночастиц за счет окисления и поверхностной диффузии. Это ослабляет гистерезис ВАХ и снижает вариативность проводимостей, ухудшая резервуарные свойства.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FNRM-2025-0010).

Литература

1. Liang X., Tang J., Zhong Y., Gao B., Qian H., Wu H. Physical reservoir computing with emerging electronics // Nature Electronics, 2024. Vol. 7. № 3. P. 193–206.
2. Mallinson J. B., Steel J. K., Heywood Z. E., Studholme S. J., Bones P. J., Brown S. A. Experimental demonstration of reservoir computing with self-assembled percolating networks of nanoparticles // Advanced Materials, 2024. Vol. 36. № 29. P. 2402319.
3. Sibatov R. T., Savitskiy A. I., L'vov P. E., Vasilevskaya Y. O., Kitsyuk E. P. Self-Organized Memristive Ensembles of Nanoparticles Below the Percolation Threshold: Switching Dynamics and Phase Field Description // Nanomaterials, 2023. Vol. 13. № 14. P. 2039.
4. Yu Y., Xiao M., Fieser D., Zhou W., Hu A. Nanoscale memristor devices: materials, fabrication, and artificial intelligence // Journal of Materials Chemistry C, 2024. Vol. 12. № 11. P. 3770–3810.

УДК 004.896

Методы оптимизации алгоритмов ML для микроконтроллеров

Аманов А. У., Старостенко В. И., к. т. н. Попов Д. А.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
aamanov@edu.hse.ru

В условиях роста интереса к Интернету вещей и автономным системам задачи внедрения машинного обучения на микроконтроллерах становятся все более актуальными. В работе рассмотрены методы оптимизации, обеспечивающие выполнение нейросетевых алгоритмов в условиях ограниченных ресурсов.
Ключевые слова: TinyML; системы искусственного интеллекта; микроконтроллеры; оптимизация; квантизация; прунинг; IoT.

Введение

В последние годы наблюдается стремительное развитие направлений, связанных с применением машинного обучения (ML) на маломощных устройствах, таких как микроконтроллеры. Такое применение, получившее название TinyML, позволяет реализовывать локальную обработку данных без обращения к облачным сервисам, что критически важно для задач с высокими требованиями к конфиденциальности, скорости отклика и энергопотреблению.

Методы оптимизации моделей машинного обучения

Одним из ключевых вызовов при разработке таких систем является ограниченность вычислительных ресурсов и объема памяти. Для их преодоления применяются специализированные методы оптимизации [1]:

- квантизация снижает точность представления чисел в модели (например, Float32 в Int8), уменьшая размер модели и ускоряя вычисления,
- обрезка удаляет малозначимые веса или целые слои сети, что позволяет сократить количество операций и объем памяти. Различают структурированную и неструктурированную обрезку,
- компрессия моделей, включая дистилляцию знаний, позволяет упростить модель без существенной потери точности,
- подкачка данных и ограниченный поиск архитектур позволяют эффективно адаптировать архитектуру под конкретные условия выполнения,
- более специализированные методы, к примеру конденсаторы внимания для трансформеров, ориентированы на снижение вычислительных затрат при сохранении ключевой информации.

Для реализации TinyML-задач применяются разнообразные фреймворки: TensorFlow Lite Micro, Edge Impulse, CMSIS-NN и др. [2]. Эти инструменты предоставляют поддержку большинства перечисленных методов и адаптацию под различные архитектуры микроконтроллеров.

В рамках исследования были реализованы несколько прототипов различных моделей на базе нескольких микроконтроллеров, таких как STM32, ESP32, «МИК32 АМУР», оптимизированных с помощью различных методов. Сравнительный анализ оптимизированных моделей и микроконтроллеров показывает, что

эффективность применения тех или иных методов сильно зависит от конкретных аппаратных условий и прикладных целей: так, к примеру, для инференса на микроконтроллерах с критически малым объемом оперативной памяти, как «МИК32 АМУР», для распознавания голосовых команд помимо описанных выше методов оптимизации необходимо использовать одномерные сверточные слои вместо двумерных. В таком случае пиковое использование оперативной памяти снижается до 14,3 КБ, но обработку звука необходимо выполнять на внешнем вычислительном устройстве и передавать значения мел-частотных кепстральных коэффициентов.

Заключение

Методы оптимизации играют критическую роль в успешной реализации машинного обучения на микроконтроллерах. TinyML обладает значительным потенциалом в Интернете вещей, медицине, промышленности и других сферах. Совершенствование оптимизационных подходов и их интеграция с аппаратной частью обеспечивают дальнейшее развитие edge-вычислений.

Литература

1. Ray P. P. A review on TinyML: State-of-the-art and prospects // Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences. King Saud bin Abdulaziz University, 2022. Vol. 34. № 4. P. 1595–1623.
2. Saha S. S., Sandha S. S., Srivastava M. Machine Learning for Microcontroller-Class Hardware: A Review // IEEE Sensors Journal. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. Vol. 22. № 22. P. 21362–21390.

УДК 004.942

Прогнозирование нештатных ситуаций на промышленных объектах

Голубева И. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
irinkagolubeva.com@gmail.com

Разработан инструментарий для прогнозирования нештатных ситуаций на промышленных объектах на основе нейронных сетей и математического аппарата. Приведено краткое описание разработанной программной реализации и компонентов, вошедших в нее.
Ключевые слова: модели искусственного интеллекта; фильтр Калмана; модель деградации; метод Монте-Карло; прогнозирование; нештатные ситуации.

В настоящее время объемы данных мониторинга функционирования промышленных объектов постоянно увеличиваются. В связи с этим за короткое время невозможно обеспечить их качественные анализ и обработку для выявления опасных отклонений. Таким образом, разработка инструментария прогнозирования нештатных ситуаций, который обеспечит снижение риска значительных финансовых потерь, в результате аварий, к тому же угрожающих жизни и здоровью сотрудников, является актуальной и своевременной.

Известен ряд существующих предиктивных программных решений, прогнозирующих нештатные ситуации, в частности, Loginom, KNIME Analytics Platform, SAS Enterprise Miner, In-DAP, Форсайт, аналитическая платформа Logi Predict, SAP Analytics Cloud, Видеоинтеллект. Однако для них характерны следующие недостатки: высокая стоимость, отсутствие адаптации под узкоспециализированные условия работы предприятий, недоступность исходного кода и, как следствие, низкая защищенность от внешнего вмешательства.

В связи с этим сделан вывод о необходимости программной реализации новых информационных, математических и алгоритмических решений прогнозирования нештатных ситуаций. Функционал этого инструментария позволит своевременно обнаруживать девиации наблюдаемых процессов и планировать сроки проведения технического обслуживания технологической оснастки и систем. В результате снизится вероятность выхода оборудования из строя и, как следствие, повысится наработка на отказ, срок службы и время безотказной работы промышленных объектов.

В качестве языка программирования предполагается применение Python, а в качестве среды разработки — инструментальная среда PyCharm.

В перспективе предусматривается дополнение функционала инструментария интеграцией улучшенных функций, способных учитывать степень износа датчиков для предотвращения генерации ложных оповещений, а также отображение отчетов о произошедших нештатных ситуациях.

Литература

1. Сучкова Л. И. Подход к прогнозированию нештатных ситуаций в системах мониторинга с использованием паттернов поведения группы временных рядов // Ползуновский вестник, 2013. — № 2. — С. 88–92.
2. Бочков А. В., Пономаренко Д. В. Научно-методические основы мониторинга и прогнозирования состояния производственной безопасности ПАО «Газпром» // Газовая промышленность, 2017. — № 3 (749). — С. 21–28.

УДК 537.312.7

Исследование и моделирование процессов резистивного переключения в оксидах металлов

Ванькаев А. С.[1,2], Клюкина Е. В.[1,3], Федотов М. И.[1,4,5], Ковешников С. В.[1]
[1] *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН*
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
skoveshnikov@iptm.ru
[2] *МИРЭА — Российский технологический университет*
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
s.vankaev14@gmail.com
[3] *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)*
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
katerina-klyukina@mail.ru
[4] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
fedotov.mi@physterch.edu
[5] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
fedotov.mi@physterch.edu

Элементы резистивной памяти представляют большой интерес, так как они могут применяться для нейроморфных систем. Целью нашей работы было исследование двух главных проблем: разброс значений по току в высокоомном состоянии и непредсказуемый характер переключения. Обе проблемы объяснены нами в рамках модели многофиламентарного переключения.
Ключевые слова: энергонезависимая память; резистивный эффект; плавный Reset; нейроморфные сети; мемристоры.

Нейросистемы — одно из ключевых направлений исследований в связи с активным развитием искусственного интеллекта [1]. Элементы резистивной памяти стали актуальным объектом, потому что они могут быть сравнимы с работой естественных синапсов головного мозга человека, показывая пластичность и возможность переключения в аналоговом режиме [2]. Для того чтобы создать искусственные синапсы, элементы памяти должны обладать возможностью многоуровневого переключения. Именно плавное переключение в высокоомное состояние (RESET) позволяет элементам памяти иметь несколько промежуточных ступеней [3]. Если переключение в RESET плавное, то перехода на разные промежуточные уровни можно достичь путем контроля напряжения. В нашей работе мы провели теоретические и экспериментальные исследования процесса плавного переключения в режиме RESET.

Для достижения многоуровневости необходимо понимать механизм и физические принципы переключения. Мы разработали модель многофиламентарного переключения на элементах памяти, которая может объяснить плавный RESET. Идея заключается в том, что в ячейке памяти заключается не один, а сразу несколько

филаментов. В рамках модели мы предполагаем, что филамент представляет собой проводящий цилиндр из вакансий кислорода. Если эти филаменты сопоставимы по длине, они работают как параллельные элементы. В таком случае каждый из филаментов дает вклад в проводимость всей ячейки. В модели многофиламентарного переключения первым окисляется и уменьшается самый большой филамент до уровня, следующего по размеру. Таким образом, мы наблюдаем плавное уменьшение тока и можем получать несколько промежуточных состояний в режиме RESET.

Работа была проведена в ИПТМ РАН, г. Черноголовка. В качестве объектов исследования использовались структуры TiO_x и HfO_x. В рамках моделирования процесса плавного переключения в режиме RESET были получены:

1) теоретическая вольт-амперная характеристика ячейки памяти, которая показала хорошее соответствие эксперименту;
2) теоретическая зависимость температуры филамента от напряжения. Филамент в структуре может разогреваться до 800 K, что хорошо согласуется с аналогичными работами по моделированию процесса резистивного переключения [4].

Чтобы проверить справедливость предложенной модели, был проведен эксперимент на структурах с HfO_x. Изначально мы имели три структуры, каждая из которых показала резкое переключение в режиме RESET. После их параллельного соединения мы получили плавный характер переключения и достигли десяти промежуточных состояний. Таким образом, была проверена предложенная модель плавного переключения в режиме RESET. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими.

Таким образом, нами разработана модель плавного переключения в режиме RESET, которая заключается в существовании нескольких параллельно включенных филаментов в одной ячейке. Мы экспериментально подтвердили правильность предложенной модели.

Литература

1. Wang W., Pedretti G., Milo V., Carboni R., Calderoni A., Ramaswamy N., Spinelli A. and Ielmini D. Computing of temporal information in spiking neural networks with ReRAM synapses // The Royal Society of Chemistry 2019, Faraday Discuss., 213. P. 453–469. DOI: 10.1039/C8FD00097B.
2. Sarkar B., Lee B., Misra V. Understanding the gradual reset in $Pt/Al_2O_3/Ni$ RRAM for synaptic applications // Semiconductor Science Technology 30, 2015. P. 5. DOI: 10.1088/0268-1242/30/10/105014.
3. Chen P., Hsu W., Chiang M. Gradual RESET modulation by intentionally oxidized titanium oxide for multilayer-hBN RRAM // 2019 IEEE 14th Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC), Stockholm, Sweden, 2019. P. 18–23. DOI: 10.1109/NMDC47361.2019.9084024.
4. Russo U., Ielmini D., Cagli C., Lacaita A. Self-Accelerated Thermal Dissolution Model for Reset Programming in Unipolar Resistive-Switching Memory (RRAM) Devices // IEEE Transactions on Electron Devices, 2009. Vol. 56. № 2. DOI: 10.1109/TED.2008.2010584.

УДК 621.3.049

Фоточувствительное резистивное переключение структур на основе композита парилен—PbTe

Трофимов А. Д.[1], Емельянов А. В.[1,2,3]

[1] Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
[3] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Разработаны мемристоры Cu/парилен—PbTe/ITO для нейроморфных применений, показывающие улучшенные мемристивные характеристики, биоподобные синаптические свойства и изменение работы под действием освещения.

Ключевые слова: резистивное переключение; нанокомпозит; фоточувствительные мемристоры.

В последние годы мемристоры на основе нанокомпозитов привлекают внимание благодаря их потенциалу для создания энергоэффективных устройств памяти и нейроморфных вычислений. Нанокомпозиты на основе органической матрицы парилена (поли-*n*-ксилилена, ППК) особенно перспективны, так как раннее для структур на их основе были продемонстрированы стабильные мемристивные эффекты [1], ППК дешев и прост в производстве, есть перспективы применения в носимой нейроморфной электронике. Одним из способов улучшения характеристик переключения и стабильности является внедрение наночастиц (НЧ) в матрицу ППК. Одной из ключевых задач является поиск оптимального состава нанокомпозита для реализации надежных мемристорных устройств.

В данной работе были исследованы резистивные переключения (РП) в мемристивных структурах на основе композитов ППК с НЧ PbTe без отжига и с отжигом после синтеза нанокомпозита [2]. Композит получен методом газофазовой полимеризации с соосаждением PbTe во время синтеза. В качестве верхнего и нижнего электрода использовались Cu и оксид индия-олова (ITO) соответственно. Благодаря использованию отжига синтезировали наноструктуры с контролируемыми размерами наночастиц и морфологией, чтобы изучить их влияние на электрофизические свойства устройств. Проведен статистический анализ разброса характеристик РП от цикла к циклу и от контакта к контакту. РП происходит по механизму электрохимической металлизации (ЭХМ), как в других мемристорах на основе ППК [3]. Изучены основные мемристивные характеристики, такие как пластичность и выносливость, время переключения. Эксперименты показали, что мемристоры на основе PbTe демонстрируют высокую надежность переключения, низкое энергопотребление и хорошую стабильность при многократных циклах работы. Было продемонстрировано изменение резистивного состояния данного образца по биоподобному алгоритму пластичности, зависящей от времени прихода импульсов,

а также долговременная потенциация и депрессия под действием последовательности импульсов напряжения.

Более того, внедрение полупроводниковых частиц PbTe позволяет создать фоточувствительный мемристор. Было проведено исследование влияния белого света 5600 °C и мощностью 9 мВт/см^2 на резистивные переключения в устройствах на основе композита ППК—PbTe с отжигом. Свет вызывает появление фотогенерированных электронов в наночастицах PbTe, которые влияют на проводимость в высокоомном состоянии и на процессы формирования проводящего филамента из электрохимически активного металла верхнего электрода меди (рис. 1).

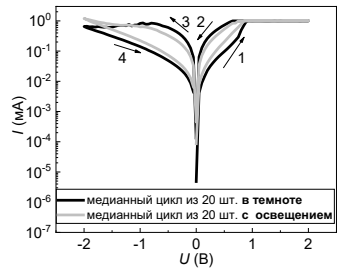


Рис. 1. Медианные вольт-амперные характеристики структуры Cu/ППК—PbTe/ITO в условиях темноты и при освещении со стороны прозрачного электрода ITO

Таким образом, наличие дополнительных НЧ внутри матрицы ППК, размер и распределение частиц PbTe напрямую влияют на характеристики переключения, а оптимальная морфология наноматериала позволяет достичь высокой производительности устройств. Работа подчеркивает важность дальнейших исследований наноматериалов на основе ППК для создания следующего поколения оптоэлектронных нейроморфных вычислительных систем, которые можно будет использовать в современных энергоэффективных электронных системах, носимой электронике и в нейроморфных приложениях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-19-00200).

Литература

1. Minnekhanov A. A., Emelyanov A. V., Lapkin D. A. et al. Parylene Based Memristive Devices with Multilevel Resistive Switching for Neuromorphic Applications // Sci. Rep., 2019. Vol. 9. № 10800. P. 1–9.
2. Trofimov A. D., Emelyanov A. V., Masukatova A. N. et al. Photosensitive resistive switching in parylene–PbTe nanocomposite memristors for neuromorphic computing // Nanoscale, 2025. Vol. 17. P. 8484–8495.
3. Minnekhanov A. A., Masukatova A. N., Trofimov A. D. et al. Reliable Memristive Synapses Based on Parylene-MoOx Nanocomposites for Neuromorphic Applications // ACS Appl. Mater. Interfaces, 2023. Vol. 15. № 47. P. 54996–55008.

УДК 621.382; 004.383.8.032.6; 519.6;

Макет двухполюсника на основе микроконтроллера, эмулирующий работу мемристора

Николаева Е. А., Писарев А. Д.
Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
evn.72@yandex.ru

В докладе представлен энергоэффективный масштабируемый термостойкий мемристорный эмулятор на микроконтроллере с настраиваемой синаптической пластичностью.

Ключевые слова: нейроморфная архитектура; мемристор; микроконтроллер; искусственный интеллект.

В настоящее время исследования принципов работы биполярных и униполярных мемристоров в нейроморфной электронике открывают широкие перспективы для создания энергоэффективных и высокопроизводительных аппаратных устройств с возможностью адаптивного обучения на базе нейронных сетей. В работах [1, 2] представлены такие устройства, которые используют механизмы переключения сопротивления на основе ионного транспорта в металлооксидных мемристорах.

Тем не менее существующие подходы к разработке мемристоров с использованием наноматериалов сталкиваются с рядом технологических и экономических ограничений. Цель настоящей работы — разработка эмулятора мемристора на базе микропроцессорной архитектуры, предназначенного для изучения основных принципов его функционирования в контролируемых условиях и без применения дорогостоящих нанотехнологий.

На базе микроконтроллера разработан макет, представляющий собой программно-аппаратную модель мемристора с двухполюсной реализацией, не требующей дополнительных цепей питания. Компактная схема устройства (рис. 1) включает диодный мост (D1—D2) и резистор (R3) для реализации биполярного режима, резистор (R1) для моделирования двух устойчивых резистивных состояний, блокировочный конденсатор (C1) для стабилизации питания, а также стабилитрон (VD1), защищающий контроллер от перенапряжения питания. Клеммы 1–2 являются основными контактами эмулятора мемристора. Контакты K1—K5 используются для программирования микроконтроллера.

На основе представленной выше схемы разработан и изготовлен макет на основе спроектированной печатной платы (рис. 2). В центре печатной платы расположен микропроцессор, справа от которого — конденсатор и стабилитрон соответственно. Рядом с клеммами 1 и 2 находятся выпрямительные диодные сборки. Над микроконтроллером установлены клеммы для портов ICSPCLK, ICSPDAT, VSS, VDD и VPP.

С помощью разработанного эмулятора воспроизводятся квазистатические вольт-амперные характеристики (ВАХ) реальных мемристоров. Схема снятия ВАХ показана на рис. 4, на которой Rm — эмулятор мемристора, R — шунт, играющий роль резистора токового сенсора для АЦП. Настройка ВАХ осуществляется путем адаптации алгоритма программы микроконтроллера на языке ассемблера. Созданное устройство может быть использовано для эмуляции работы мемристоров

в аппаратных нейронных сетях малого масштаба по принципам, которые описаны в [3], где представлены подходы к аппаратной реализации нейропроцессора на основе концепции биоморфного нейропроцессора.

Основной мотивацией для разработки эмулятора мемристора стало стремление к более глубокому пониманию физического моделирования мемристоров в аппаратных нейронных сетях. Кроме того, создание макета нейросети имеет образовательную ценность и способствует популяризации знаний о принципах работы реальных мемристоров.

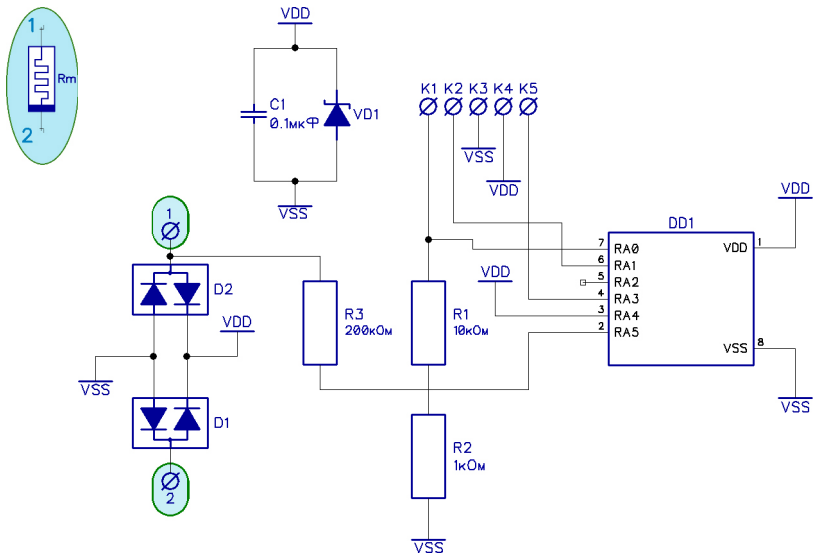
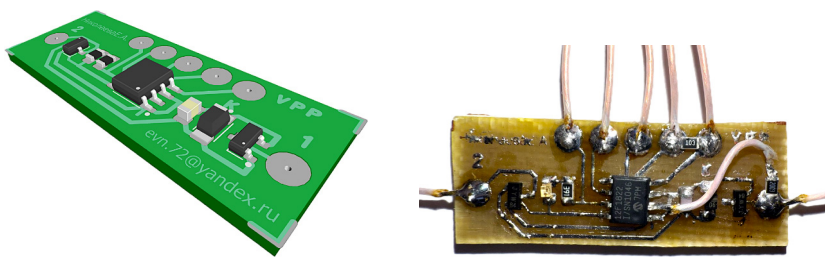


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема эмулятора мемристора



а *б*

Рис. 2. Печатная плата эмулятора мемристора: *а*) макет; *б*) фото

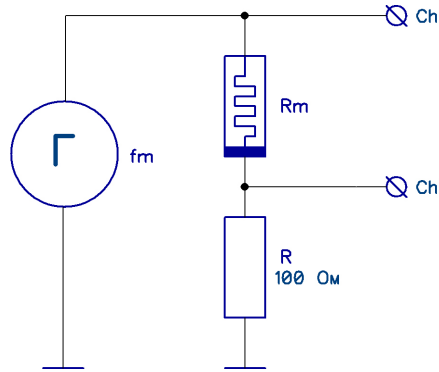


Рис. 4. Схема снятия вольт-амперной характеристики эмулятора мемристора

Литература

1. Im I. H., Kim S. J., Jang H. W. Memristive devices for new computing paradigms // Advanced Intelligent System, 2020. Vol. 2. № 11.P.2000105.
2. Бусыгин А. Н., Писарев А. Д., Кузьменко А. Ю., Филиппов В. А. Особенности моделирования работы биоморфной нейросети на электронном устройстве с энергонезависимой памятью и низким потреблением энергии // Вестник ТюмГУ. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2016. — Т. 2. — № 1. — С. 92–100.
3. Filippov V. A., Bobylev A. N., Busygin A. N., Pisarev A. D., Udovichenko S. Yu. A biomorphic neuron model and principles of designing a neural network with memristor synapses for a biomorphic neuroprocessor // Neural Computing and Applications, 2020. Vol. 32. P. 2471–2485.

УДК 004.272

Нейроморфные подходы к решению проблем с большими данными

Щанькин К. Д., Сафронова А. В., к. т. н., Козырева Н. И.
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23
mr.shanckin@yandex.ru

Нейроморфные вычисления, вдохновленные работой мозга, предлагают энергоэффективные решения для обработки больших данных. Благодаря синаптической пластичности и интеграции памяти с вычислениями нейроморфные процессоры обеспечивают высокую адаптивность и низкое энергопотребление.

Ключевые слова: нейроморфные вычисления; энергоэффективность; импульсные нейронные сети (SNN); большие данные; периферийные вычисления; архитектура фон Неймана.

В условиях стремительного увеличения объемов данных традиционные вычислительные архитектуры, основанные на модели фон Неймана, сталкиваются с серьезными ограничениями. Большие данные требуют систем, которые способны параллельно обрабатывать информацию, быстро адаптироваться к новым условиям и быть энергоэффективными. Нейроморфные вычисления, вдохновленные биологическими процессами мозга, предлагают инновационные решения, которые способны преодолеть эти вызовы.

Одним из ключевых преимуществ нейроморфных подходов является их энергоэффективность. Традиционные архитектуры требуют значительных затрат энергии, тогда как нейроморфные системы потребляют энергию только при необходимости. «Энергоэффективность нейроморфных вычислений делает их хорошо подходящими для периферийных вычислений и Интернета вещей (IoT)» [1]. Например, нейроморфные чипы в устройствах IoT способны обрабатывать данные локально, минимизируя задержки, снижая энергопотребление и повышая конфиденциальность. Кроме того, благодаря синаптической пластичности такие системы обладают способностью обучаться на основе новых данных, что позволяет им адаптироваться к изменениям, например, в финансовой сфере для точного прогнозирования рыночных изменений.

Нейроморфные процессоры объединяют память и вычислительные ядра, что устраняет задержки и снижает энергопотребление, делая их особенно эффективными для задач в реальном времени. Это особенно важно для таких областей, как диагностика в медицине, анализ промышленных данных или работа автономных систем, например беспилотных автомобилей. «Отечественный нейроморфный процессор «Алтай» потребляет на сравнимых задачах почти в тысячу раз меньше энергии, чем традиционные графические ускорители (GPU)» [2], что подчеркивает их энергоэффективность и перспективность.

Нейроморфные подходы к обработке больших данных предлагают перспективное решение, основанное на принципах работы человеческого мозга. Современные системы обработки данных, такие как нейронные сети, сталкиваются

с ограничениями классической архитектуры фон Неймана, где узким местом являются задержки и энергозатраты. Нейроморфные вычисления, напротив, используют принципы биологической работы мозга, такие как импульсные нейронные сети (Spiking Neural Networks, SNN), в которых нейроны активируются только при достижении определенного порога. Это позволяет значительно сократить количество вычислений и энергии, что особенно важно при работе с большими данными, где требуется обработка в режиме реального времени. Например, суперкомпьютер SpiNNaker, упомянутый в источнике, «в реальном времени моделирует работу огромного количества нейронов», а его архитектура позволяет обслуживать до миллиона процессорных ядер [3].

Практическое применение нейроморфных технологий охватывает множество сфер, включая моделирование биологических систем, медицинскую диагностику и автономные системы управления. Например, проект Blue Brain Project фокусируется на создании точной модели мозга мыши, что может стать ключом к пониманию сложных биологических процессов и их переносу в вычислительные системы. Важным компонентом таких технологий являются аппаратные платформы, такие как нейроморфный процессор Loihi от Intel, который уже используется для реализации сложных алгоритмов, включая поиск ближайшего соседа.

Несмотря на значительные успехи, нейроморфным вычислениям еще предстоит пройти долгий путь. Проблемы масштабирования, поиска новых материалов и технологий все еще стоят перед учеными и инженерами. Как отмечается в источнике, «огромная пропасть лежит между парой десятков смоделированных нейронов... и тысячами, если не миллионами нейронов», необходимых для достижения человеческих возможностей [3]. Однако с развитием таких проектов, как BrainScaleS и Human Brain Project, у человечества появляется шанс создать системы, способные эффективно решать задачи анализа и обработки больших данных. Это позволит не только ускорить вычислительные процессы, но и открыть новые горизонты в развитии искусственного интеллекта.

Литература

1. Нурмырадова Т., Дженнелова Г., Нуритдинов Н. Нейроморфные вычисления: революция в будущем технологий [Электронный ресурс] // cyberleninka.ru: [сайт]. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/neyromorfnye-vychisleniya-revolyutsiya-v-buduschem-tehnologiy (дата обращения: 12.04.2025).
2. Ивлев П. Нейроморфные вычисления — новое мышление ИИ Что такое «нейроморфные процессоры» и что они считают [Электронный ресурс] // digitalocean.ru: [сайт]. — URL: https://digitalocean.ru/n/nejromorfnye-vychisleniya-novoe-myshlenie-ii (дата обращения: 12.04.2025).
3. Карлсон М. Нейроморфные вычисления и их успехи [Электронный ресурс] // habr.com: [сайт]. — URL: https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/576376 (дата обращения: 12.04.2025).

УДК 004.855.5

Сравнение моделей и методов предиктивного кодирования в задаче восстановления мультимодальных сигналов

Хакимов А. Т.[1], Батуев Б. Б.[2]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] *ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН*
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
khakimov.at@phystech.edu

В данной работе рассматриваются различные подходы к предиктивному кодированию аудио- и визуальных данных. Показано, что спайковая модель с архитектурой LIF нейрона на локальном хеббовском правиле с экспоненциальным распадом весов превосходит другие архитектуры в задаче восстановления мультимодального сигнала.
Ключевые слова: предиктивное кодирование; спайковые нейросети; сверточные нейросети; SNN; CNN; мультимодальные сигналы; автоэнкодер.

В данной работе проведено сравнение моделей и методов предиктивного кодирования [3] в задаче восстановления мультимодальных сигналов. Предложена реализация импульсной нейронной сети с архитектурой leaky-integrate-and-fire (LIF) [2], использующей модифицированное правило Хебба с распадом весов (формула (1)), где η — скорость обучения, v_{pre} и v_{post} — активности пред- и постсинаптических нейронов соответственно, $decay$ — коэффициент распада. Сеть получает сигналы из двух сенсорных подсистем — визуальной и аудиальной — и предсказывает входные данные на основе текущего состояния, корректируя представление с учетом ошибки восстановления:

$$\frac{dw}{dt} = \eta(v_{post} \cdot v_{pre} - w \cdot decay). \quad (1)$$

Полная архитектура модели (рис. 1) состоит из трех популяций: визуального входа (784 нейрона, по одному на пиксель MNIST 28×28) [4], аудиального входа (5000 нейронов, FSDD [6]) и скрытого слоя (370 нейронов). Входные спайковые сигналы обоих каналов проецируются на скрытый слой (синапсы 2 и 6), а обратные связи (синапсы 4 и 8) формируют предсказания текущих входов, которые сравниваются с реальными данными для вычисления ошибки предсказания.

Для оценки предложенной архитектуры мы последовательно провели несколько экспериментов. Сначала сверточная мультимодальная CNN показала исходную способность классического подхода объединять разнородные сигналы. Затем мы извлекли усредненные во времени спайковые активности 370 нейронов скрытого слоя SNN и обучили на них логистическую регрессию, что позволило оценить линейную составляющую информационной емкости представления. Аналогично была применена одномерная сверточная сеть для проверки захвата более сложных нелинейных зависимостей. В целом можно сказать, что архитектура состоит из двух автоэнкодеров, которые сжимают изображение или аудиосигнал в компактное представление и восстанавливают их через нисходящие связи, поэтому

качество итоговой модели напрямую зависит от эффективности базовых автоэнкодеров, вследствие чего также было проведено сравнение классического и спайкового автоэнкодеров для изображений.

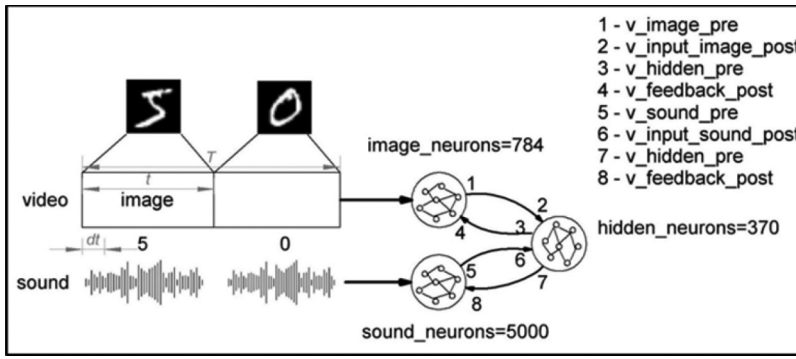


Рис. 1. Схема архитектуры предиктивной импульсной сети

Полученные результаты подтверждают, что представленная архитектура превосходит в мультимодальной интеграции классические аналоги и может быть использована для дальнейшего развития нейроморфных систем. Реализация эксперимента доступна на платформе GitHub [7].

Таблица 1. Сводные метрики архитектур

Модель	Метрика	Сигнал	Значение
PC	MSE	IMG	0,02–0,04
PC	COR	IMG	0,96–0,98
PC	MSE	AUDIO	0,07–0,09
PC	COR	AUDIO	0,88–0,91

Модель	Метрика	Сигнал	Значение
PC (hidden)	Accuracy	IMG + AUDIO	0,74–0,79
LogReg	Accuracy	IMG	0,90–0,91
CNN (hidden)	Accuracy	IMG + AUDIO	0,70–0,72

Литература

1. Antsiperov V. E. Generative Model of Autoencoders Self-Learning on Images Represented by Count Samples // Automation and Remote Control, 2022. Vol. 83. № 12. P. 1959–1983. DOI: 10.1134/s00051179220120098.
2. Abbott L. F. Lapicque's introduction of the integrate-and-fire model neuron (1907) // Brain Res Bull, 1999. Vol. 50. № 5–6. P. 303–304. DOI: 10.1016/s0361-9230(99)00161-6.

3. Friston K. The free-energy principle: A unified brain theory? // Nature Reviews Neuroscience, 2010. Vol. 11. № 2.
4. LeCun Y., Cortes C., Burgess C. J. C. MNIST handwritten digit database // AT&T Labs [Online]. Available: http://yann.lecun.com/exdb/mnist. 2010. Vol. 7.
5. Trappenberg T. P. Fundamentals of Computational Neuroscience // Fundamentals of Computational Neuroscience, 2022.
6. Zohar J. Free Spoken Digit Dataset (FSDD) [Electronic resource]. 2020. URL: https://github.com/Jakobovski/free-spoken-digit-dataset.
7. Predictive Coding Multisensor [Electronic resource]. URL: https://github.com/AT-Khakimov/PredictiveCodingMultisensor.

УДК 004.048

Моделирование показателей надежности с применением нейросетевого подхода

Мещанинов Ф. П.[1], Жевненко Д. А.[1,3], Селецкий А. В.[1], Московцев А. Ф.[1,2], Клочкова Е. Л.[1], Горнев Е. С.[1,2]

[1] АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

achernova@niime.ru

[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

[3] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

Разработан интерпретируемый метод предсказания параметров надежности дискретных транзисторов на основе временных рядов, полученных в условиях ускоренных испытаний. Предложены нейросетевые модели на основе графового механизма внимания и мультичастотного разбиения последовательности, превосходящие стандартные методы регрессии более чем на 10%. Метод верифицирован на синтетическом датасете, основанном на моделировании деградации и экспериментальных данных 65-нм транзисторов.

Ключевые слова: транзисторы; тесты на надежность; временные ряды; глубокое обучение.

Повышение требований к надежности электронных компонентов в современной микроэлектронике требует новых подходов к контролю параметров в условиях ограниченного объема данных и высокой вариативности производственных факторов [1]. Традиционные методы испытаний на надежность (например, температурно-временное старение или высокотемпературные циклы) являются дорогостоящими, что ограничивает максимальное количество образцов и общее время тестирования [2]. Современные методы и модели машинного обучения направлены на решение этой проблемы, позволяя получать и корректировать предсказания с высокой точностью.

В работе предложен новый метод предсказания параметров надежности на основе глубокого обучения во временных рядах, полученных в результате измерений в рамках ускоренных испытаний. В рамках метода рассматривается подготовка моделей на основе передовых архитектур на основе графового механизма внимания (модель GBAD [3]), выделения временных зависимостей различного масштаба (модель TimesNet [4], TimeMixer [5]) и их комбинаций.

Валидация разработанного метода и моделей проводилась на основе 2000 сгенерированных испытаний, полученных на основе симуляций инжекции горячих носителей. Параметры для процессов и финальная верификация построенного датасета были выполнены основе результатов тестирования дискретных транзисторов проектной нормы 65 нм, проведенных в АО «НИИМЭ».

Модели на основе графовых механизмов внимания и извлечения временных зависимостей различного масштаба продемонстрировали более чем на 10% лучшее качество, чем стандартные подходы ГОСТ на основе параметрической регрессии.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

1) предложен метод предсказания параметров надежности на основе моделей машинного обучения, обучаемых на временных рядах из ускоренных испытаний;
2) построен и верифицирован синтетический датасет из 2000 траекторий деградации, основанный на моделировании механизмов отказа и данных по испытаниям дискретных транзисторов 65 нм;
3) предложена модель на основе нейросетевых архитектур, обеспечивающая более чем 10%-й прирост качества по сравнению со стандартными методами регрессии.

Практическая значимость работы заключается в создании воспроизводимого и масштабируемого подхода к прогнозированию надежности компонентов на ранних этапах тестирования. Предложенное решение может быть адаптировано к различным классам электронных устройств и использовано для ускорения и сокращения ресурсоемкости испытаний.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника. Часть 3: Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — Т. 3. — С. 63–93.
2. Ерошкин А. Л., Попо Р. А. Оценка надежности полупроводниковых приборов и микросхем // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015. — Т. 12. — № 2. — С. 221–225.
3. Ahmad A., Kovalenko A., Makarov I. Anomaly Detection Using Graph-Based Autoencoder with Graph Structure Learning Layer // 2024 IEEE 6th International Symposium on Logistics and Industrial Informatics (LINDI). Karaganda, Kazakhstan: IEEE, 2024. P. 89–94.
4. Wu H. et al. TimesNet: Temporal 2D-Variation Modeling for General Time Series Analysis: arXiv:2210.02186. arXiv, 2023.
5. Wang S. et al. TimeMixer: Decomposable Multiscale Mixing For Time Series Forecasting, 2024.

УДК 004.416

Нейросетевое сопоставление признаков и оценка гомографии на RISC-V-платформе для задач выравнивания изображений

Яковлев Р. А.
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24
iakovlev.rysta@gmail.com

Разработан метод выравнивания изображений на базе моделей SuperPoint и SuperGlue с вычислением гомографии с помощью RANSAC. Адаптация выполнена под архитектуру RISC-V с использованием одноплатного компьютера Lichee Pi 4A. Показано, что, несмотря на ограничения ресурсов, нейросетевые методы успешно реализуются на RISC-V-платформах и демонстрируют устойчивость и высокую точность сопоставления в edge-сценариях. Результаты показывают потенциал применения RISC-V для задач локальной обработки изображений и мобильных интеллектуальных систем.
Ключевые слова: RISC-V; SuperPoint; SuperGlue; гомография; выравнивание изображений; Lichee Pi 4A; edge-аналитика.

Классические методы сопоставления изображений, такие как SIFT, ORB, AKAZE и SURF, опираются на ручное извлечение признаков и формирование дескрипторов. Несмотря на устойчивость к масштабным и поворотным преобразованиям, они неэффективны при слаботекстурированных сценах и сложных перспективах. Современные нейросетевые подходы, в частности связка SuperPoint + SuperGlue, предлагают альтернативу, основанную на обучаемых признаках и графовых нейросетях с вниманием. SuperPoint извлекает ключевые точки и дескрипторы, а SuperGlue строит граф соответствий и оптимизирует сопоставления.

В данной работе проведена адаптация указанного конвейера для RISC-V-платформы Lichee Pi 4A. Это энергоэффективное решение на базе 4-ядерного C910 RISC-V-процессора с поддержкой Linux и необходимых библиотек. Систему использовали для выравнивания 1300 пар изображений с различными условиями: слабая текстура, переменное освещение, частичные перекрытия. Сопоставление реализовано в режиме mixed precision с оптимизацией по памяти и ускорением графов через ONNX Runtime.

Для оценки точности использован RANSAC с автоматической калибровкой. Результаты подтвердили, что нейросетевой подход дает в 2–3 раза больше достоверных соответствий по сравнению с классическими методами при аналогичных условиях. Также подтверждена применимость RISC-V-решений для edge-аналитики: выравнивание выполнено на плате Lichee Pi 4A без GPU с использованием оптимизированных CPU-инструкций.

Методика особенно перспективна для встроенных интеллектуальных камер, дронов и автономных мобильных систем. Открытая архитектура RISC-V обеспечивает гибкость и масштабируемость, а наличие ускорителей NPU в новых моделях позволяет наращивать производительность без увеличения энергопотребления. Представленная реализация демонстрирует возможность интеграции сложных нейросетевых методов обработки изображений в RISC-V-экосистему.

Литература

1. DeTone D., Malisiewicz T., Rabinovich A. SuperPoint: Self-Supervised Interest Point Detection and Description // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2018. P. 224–236.
2. Sarlin P.-E., DeTone D., Malisiewicz T. et al. SuperGlue: Learning Feature Matching with Graph Neural Networks // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020. P. 4938–4947.
3. Lowe D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision, 2004. Vol. 60. № 2. P. 91–110.
4. Теллур Электроникс. Почему в современных микроконтроллерах применяется RISC-V? (12.05.2023). — URL: https://tellur-el.ru (дата обращения: 01.06.2025).
5. Sipeed. Lichee Pi 4A — RISC-V Linux Development Board (Sipeed Wiki, 2023). — URL: https://wiki.sipeed.com (дата обращения: 01.06.2025).

УДК 004.4'416:004.4'422

Применение алгоритмов обучения с подкреплением в автоматизированной настройке оптимизирующих преобразований компилятора как оптимизационной задаче с ограничениями

Ефанов Н. Н., к. ф.-м. н.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Разработан и апробирован алгоритм обучения с подкреплением, предназначенный для поиска оптимизационных последовательностей преобразований инфраструктуры LLVM, поддерживающий однокритериальную целевую функцию и ограничения по другим целям, интегрируемым в процесс расчета функции потерь при обучении стратегии либо в функцию наград. Произведено экспериментальное сравнение обоих подходов на наборе бенчмарков CBench для задачи уменьшения размера кода в бинарном файле при ограничении на время выполнения ключевых тестов. Показаны варианты улучшения эффективности решения задачи с использованием разработанного подхода.
Ключевые слова: компиляторы; оптимизация ПО; обучение с подкреплением; LLVM.

Оптимизирующая компиляция [1–4] является одним из основных способов оптимизации программного обеспечения. Современные компиляторы реализуют сотни различных оптимизирующих проходов [1, 2], тонкое управление которыми позволяет существенно улучшать качество ПО по сравнению со стандартными уровнями оптимизаций (-O2, -O3, -Oz и др) практически в любом «необщем» случае [3]. В силу сложности их ручной настройки приобрели популярность исследования и разработки, посвященные построению методов и инструментов автоматизированного поиска последовательностей оптимизирующих проходов — автонастройке [1]. Задача такого поиска является задачей дискретной оптимизации по пространству большой размерности, и способы решения, реализованные в современных работах, различны: эвристический поиск с применением эволюционных алгоритмов, обучение с подкреплением, классическая оптимизации и др. Данная работа посвящена реализации поиска посредством обучения с подкреплением, причем интерес для исследования представляет случай, когда к результатам оптимизации предъявляются требования, содержащие ограничения. К примеру, минимизировать размер кода исполняемого файла в сравнении с -Oz при условии, что производительность на избранных тестах будет не хуже, чем при -Oz. Для решения поставленной задачи был реализован алгоритм семейства «актор — критик с преимуществом» (A2C) в двух вариантах:

- «классический»: ограничения интегрированы в функцию наград. Формально при обучении оптимизирующего агента в нем решается задача поиска стратегии, максимизации математического ожидания суммарной награды без ограничений, а компонент ограничений обеспечивает скорее плотность награды;

- «ограничивающий стратегии». Формально решается задача оптимизации с ограничениями стратегии, то есть задача условной оптимизации, сведенная в данной к безусловной оптимизации посредством метода множителей Лагранжа [4]. Функция потерь стратегии в данном алгоритме рассчитывается как L(total) = L + l max (0, dT – e), где dT — ухудшение производительности за эпизод, l — коэффициент, обучаемый во внешнем итерационном процессе, e — погрешность измерений.

В целях сравнения способов был проведен эксперимент по снижению размера кода в сопоставлении с -Oz при условии производительности не хуже, чем с -Oz, на компиляторе LLVM 12 для целевой платформы x86 (рис. 1) с запуском на аппаратуре, а также для платформ ARMv8 (aarch64-linux-gnu) и RISC-V (riscv64d) с экспериментами на эмуляторе QEMU (табл. 1). В экспериментах измерялось среднее снижение размера по срезу номеров эпизодов, кратному 50. При этом для x86 достигнуто максимальное сжатие для подхода «ограничивающий стратегии» — 16,77 %, для подхода «классический» — 16,62 % на 500 и 469 эпизодах соответственно.

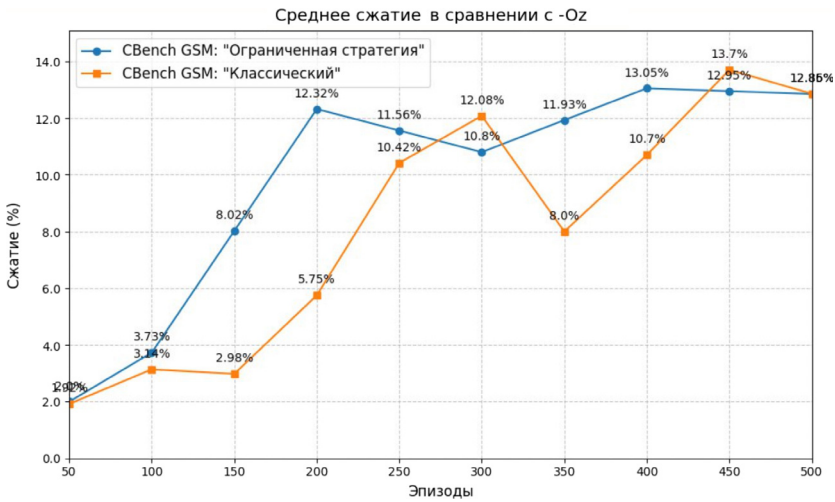


Рис. 1. Сравнение алгоритмов при обучении агента, оптимизирующего тест CBench GSM для x86-64

Таблица 1. Максимальное сжатие для различных целевых платформ

	«Ограничивающий стратегии», %	«Классический», %
x86-64	16,77	16,62
ARMv8 (aarch64-linux-gnu)	14,76	14,08
RISC-V (riscv64d)	5,8	5,8

Из результатов экспериментов следует, что подход «ограничивающий стратегии» демонстрирует лучшие показатели как в смысле стабильности обучения, так и скорости сходимости к среднему и лучшему значениям выигрыша по сравнению с «классическим» по числу эпизодов. В дальнейшем следует провести серии экспериментов с другими алгоритмами и бенчмарками, а также с различными значениями гиперпараметров.

Литература

1. Ashouri A. H. et al. A Survey on Compiler Autotuning using Machine Learning // ACM Computing Surveys (CSUR), 2018. Vol. 51. Issue 5. P. 1–42.
2. Отращенко А. И., Акимов З. Д., Ефанов Н. Н. Разработка средства оптимизации встраиваемого ПО на базе автонастройки перестановкой оптимизационных проходов современного компилятора GCC // Труды МФТИ, 2024. — Т. 16. — № 1 (61). — С. 44–59.
3. Lebedev G., Efanov N. Exploring the Space of Function Level Phase Ordering for Code Size Reduction at Constant Execution Time using Random Optimization Sequences in GCC // Конференция «Инжиниринг и Телекоммуникации» 22–23 ноября 2023. P. 370–377.
4. Diddigi R. B. et al. Actor-critic algorithms for constrained multi-agent reinforcement learning // arXiv preprint arXiv:1905.02907, 2019.

УДК 621.3.049

Оптимизация функции умножения симметричной ленточной матрицы на вектор под архитектуру RISC-V

Воденеева А. А., Мееров И. Б., Волокитин В. Д., Козинов Е. А., Пирова А. Ю.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
vodeneeva@unn.ru

Описан опыт оптимизации функции умножения симметричной ленточной матрицы на вектор библиотеки OpenBLAS под архитектуру RISC-V с использованием векторных инструкций. Представлены результаты экспериментов на устройствах с rvv 0.7.1 и rvv 1.0. Достигнуто ускорение до трех раз относительно базовой версии OpenBLAS.
Ключевые слова: sbmv; RISC-V; OpenBLAS; линейная алгебра.

Развитие архитектуры набора инструкций RISC-V открывает новые возможности для решения широкого круга задач, ориентированных на высокопроизводительные вычислительные системы. Открытость, свобода от патентных ограничений и неограниченные возможности для дальнейшего развития [1] привлекают исследователей и инженеров по всему миру. По всей видимости, в ближайшие годы можно ожидать появления многоядерных векторных внеочередных процессоров RISC-V, пригодных для построения систем класса HPC. Использование таких систем требует не только наличия соответствующего оборудования, но и развития всей экосистемы. Текущее состояние дел в готовности экосистемы RISC-V для HPC описано в [2].

Данная работа сосредоточена на оптимизации производительности функции умножения симметричной ленточной матрицы на вектор библиотеки OpenBLAS, одной из наиболее распространенных открытых реализаций для спецификаций BLAS. Этот алгоритм востребован для решения задач с использованием методов численного анализа в научных и инженерных приложениях. Он был выбран в качестве цели для оптимизации на основе масштабного тестирования производительности OpenBLAS на процессорах x86. Оно показало существенное отставание этой функции по сравнению с реализациями из Intel OneAPI MKL. Поэтому возможность дальнейшей оптимизации сосредоточена в первую очередь на платформе RISC-V, что предполагает улучшение векторизации с использованием специфики архитектуры. Реализация использует rvv 0.7.1 и rvv 1.0, а также планируется интеграция с OpenBLAS.

Результаты экспериментов демонстрируют, что ускорение для нетранспонированных матриц достигает 3x и составляет в среднем 2x и 1.3x для тестовых систем Lichee Pi 4A (rvv 0.7.1) и Banana Pi BPI-F3 (rvv 1.0) соответственно. На Lichee Pi 4A оптимизированная версия превосходит базовую для любого значения lda. Для Banana Pi BPI-F3 она превосходит базовую до lda = 14 для матриц в двойной точности и до lda = 20 для матриц в одинарной точности. При большей ширине ленты оптимизированная версия замедляется или не ускоряется по сравнению с базовой на rvv 1.0, поэтому здесь было добавлено переключение на эталонную версию в зависимости от ширины ленты. В целом для rvv 0.7.1 оптимизированная версия работает

стабильно во всех тестовых конфигурациях. Для rvv 1.0 она работает стабильно для матриц с шириной ленты менее 14.

Литература

1. Asanović K., Patterson D. Instruction sets should be free: The case for RISC-V. EECS Department, University of California, Berkeley, Tech. Rep., 2024. UCB/EECS-2014-146.
2. Brown N. RISC-V for HPC: Where we are and where we need to go. arXiv:2406.12398, 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2406.12398.

УДК 004.272.5:004.385.3:004.434.42

Оптимизация функции minigemm с использованием 256-битных векторных регистров на платформе RISC-V

Лылова С. С.
Новосибирский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1
s.lylova@g.nsu.ru

В работе исследуется разработка и оптимизация функции minigemm для ускорения инференса сверточных нейронных сетей на платформе RISC-V. Реализована оптимизированная версия mini_gemm для процессоров с поддержкой RVV 1.0, учитывающая особенности 256-битных векторных регистров. Тестирование на платах Lichee Pi 4A и Banana Pi BPI-F3 показало, что mini_gemm превосходит OpenBLAS на отдельных задачах, достигая 35–40 % от теоретического максимума производительности.

Ключевые слова: RISC-V; векторные инструкции; матричное умножение; GEMM; OpenBLAS; высокопроизводительные вычисления.

Функция матричного умножения (GEMM) занимает центральное место в современных вычислительных системах, являясь ключевым компонентом в широком спектре научных и инженерных приложений. В данной работе рассматривается оптимизация функции minigemm, являющейся функцией матричного умножения, для эффективного использования 256-битных векторных регистров, доступных в процессоре SpacemiT Key Stone K1. Оптимизация включала модификацию микроядра функции для полного использования возможностей SIMD-инструкций, включая операции FMA (Fused Multiply-Add).

Экспериментальная оценка производительности проводилась на нескольких аппаратных платформах. На плате Banana Pi с процессором SpacemiT Key Stone K1 (RVV 1.0, 256-битные регистры) оптимизированная реализация minigemm продемонстрировала производительность на уровне 35–40 % от теоретического максимума, что соответствует 1,5–2-кратному преимуществу перед реализацией из библиотеки OpenBLAS для матриц размера от 100 до 1000. На плате Lichee Pi 4A (RVV 0.7.1, 128-битные регистры) было достигнуто 30–35 % от пиковой производительности с устойчивым преимуществом перед OpenBLAS при размере матрицы, большем 100.

Для сравнения: на платформе x86-64 (процессор AMD Ryzen 7 5800H с поддержкой AVX2) аналогичный подход позволил достичь 85–90 % производительности от теоретического максимума, демонстрируя отставание всего на 5–10 % от высокооптимизированной реализации OpenBLAS. Полученные результаты свидетельствуют о значительном потенциале архитектуры RISC-V для задач матричных вычислений, хотя абсолютные показатели производительности пока уступают современным x86-решениям.

УДК 004.428

Особенности реализации экспоненты под архитектуру RISC-V

Панова Е. А., Волокитин В. Д., Мееров И. Б.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
elena.panova@itmm.unn.ru

В работе демонстрируется векторная реализация функций exp, exp2 и expm1 под архитектуру RISC-V в половинной, одинарной и двойной точности. Производится сравнение с существующими аналогами. Показывается, что в большинстве случаев данная реализация выигрывает по точности и производительности.

Ключевые слова: векторная библиотека математических функций; экспонента; архитектура RISC-V.

Создание высокопроизводительных программ подразумевает использование возможностей архитектуры, в частности векторных вычислений. Для эффективной векторизации математических кодов требуется библиотека векторных математических функций. В случае многих современных архитектур такие библиотеки являются частью стандартной библиотеки компилятора, например Intel SVML или Libmvec компилятора GNU для архитектуры x86. В данной работе рассматриваются особенности реализации векторных математических функций под архитектуру RISC-V, в частности на примере стандартной математической функции exp(x).

В ННГУ им. Н. И. Лобачевского совместно с компанией Yadro разрабатывается библиотека векторных математических функций под архитектуру RISC-V. Задачей проекта является разработка высокопроизводительных реализаций стандартных математических функций, удовлетворяющих определенным ограничениям по точности. В частности, для рассматриваемых в данной работе функций установлено ограничение 0.501 ulp. Понятие *unit in the last place* (*ulp*) обозначает расстояние между двумя соседними представимыми числами с плавающей точкой; 0.501 ulp подразумевает возможность неверного округления на 1 из 1000 случайных точек, при этом ответ может отличаться от точного только в последнем бите мантиссы.

Достижение баланса по производительности и точности не является тривиальной задачей. Для двойной точности корректное округление во всех точках требует вычислений в расширенной точности. Данный подход реализован, например, в библиотеке MPFR [1]. В библиотеке CRLibm [2] используется комбинированный подход: вычисление экспоненты состоит из «быстрого» этапа, дающего корректный ответ в двойной точности в большинстве случаев, и «точного» этапа, вычисляющего ответ с использованием расширенной арифметики в тех точках, где произошло неверное округление. Большинство библиотек допускает возможность ошибкок округления в целях увеличения производительности. Современные высокопроизводительные библиотеки поддерживают несколько реализаций функций, отличающихся по точности и производительности. Например, в некоторые компиляторы позволяют влиять на точность вычислений математических функций путем установки соответствующих опций компилятора.

В работе представляется векторная реализация функции exp(x), а также функций exp2(x) и expm1(x) под архитектуру RISC-V для одинарной, двойной

и половинной точности. Демонстрируется процесс пошагового увеличения точности реализации с целью достичь необходимых ограничений по качеству результата и производительности с учетом формата хранения числа с плавающей точкой. Реализация выполнена с использованием специфических для архитектуры RISC-V функций-инстринсиков, компилирующихся в инструкции RVV 1.0. Отдельное внимание уделяется возможности увеличения производительности для архитектуры RISC-V за счет варьирования параметра LMUL.

Приводится сравнение с существующими библиотеками, в том числе векторными математическими библиотеками под архитектуру RISC-V, а именно SLEEF [3] и Veclibm [4]. Эксперименты производились на процессоре Banana Pi RISC-V SpacemiT K1 (RVV 1.0, длина векторного регистра 256 бит), использовался кросс-компилятор GCC 14.2. Мы показываем, что демонстрируемая реализация экспоненты превосходит сторонние реализации по точности, а также в большинстве случаев по производительности в 2–3 раза.

Литература

1. Библиотека GNU MPFR. URL: https://www.mpfr.org (дата обращения: 30.04.2025).
2. Daramy C. et al. CR-LIBM: The evaluation of the exponential: дис. — Laboratoire de l'informatique du parallélisme, 2003.
3. Библиотека SLEEF. URL: https://sleef.org (дата обращения: 30.04.2025).
4. Tang P. T. P. An Open-Source RISC-V Vector Math Library // 2024 IEEE 31st Symposium on Computer Arithmetic (ARITH). IEEE, 2024. P. 60–67.

УДК 004.054

Применение неправильных клеточных автоматов для задачи распределения регистров на архитектуре RISC-V

Голубович Т. С.[1,2], Владимиров К. И.[1,2]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] *ООО «Синтакор»*
123022, г. Москва, ул. Рочдельская, 15, стр. 11

В данной работе рассматривается применение неправильных клеточных автоматов для решения задачи распределения регистров на архитектуре RISC-V в рамках компиляторской инфраструктуры LLVM. Предлагается алгоритм, основанный на моделях клеточных автоматов с произвольной зоной взаимодействия клеток, что позволяет учитывать сложные связи между регистровыми переменными. Исследуются два алгоритма: CLAVCA и FICAVCA. Проведен анализ эффективности и сходимости предложенных методов, что открывает новые возможности для эвристического решения NP-полных задач распределения регистров в современных компиляторах.
Ключевые слова: клеточные автоматы; LLVM; NP-полные задачи; автоматизация проектирования архитектур.

Распределение регистров является актуальной проблемой в современных компиляторах [1]. При простой математической постановке, исключающей многие важные эвристики, можно свести эту задачу к раскраске графа [1] с тем ограничением, что количество цветов (физических регистров) ограничено. Это ограничение решается при помощи временной материализации части регистров на стек (spill). Задача покраски графа является NP-полной [2] и решается в основном эвристически. В компиляторной инфраструктуре LLVM [3] существуют три эвристических алгоритма, основанных на «жадной» эвристике Linear scan [4]. Еще один подход к распределению регистров вообще не задействует раскраску графа, а решает проблему квадратичного булева программирования (PBQP) [1]. В данной работе предлагается внедрить в довольно удобную инфраструктуру компилятора LLVM алгоритм, основанный на неправильных (fuzz irregular) клеточных автоматах.

Обычный клеточный автомат — это дискретная математическая модель, активно изучающаяся в приложении к различным задачам [5]. Ее основой является пространство из взаимодействующих клеток (cells). При этом у каждой клетки есть свое состояние, а переход из текущего состояния в новое задается функцией, зависящей от состояния соседей для данной клетки. Неправильный клеточный автомат означает, что мы отказываемся от планарной смежности клеток в евклидовом пространстве, допуская для каждой клетки произвольное количество соседей. В этой работе исследуются два интересных алгоритма на клеточных автоматах: CLAVCA [6] и FICAVCA [7]. В обоих структра автомата строится на графе для покраски, поэтому понятия «клетка» и «вершина» взаимозаменяемы.

Алгоритм FICAVCA основан на вероятностном подходе к выбору цвета. Для каждой клетки задается вектор вероятностей размерности, на один превышающей количество ее соседей (это минимально возможное разумное ограничение).

Далее запускается процесс вычисления цвета каждой из вершин. Этот алгоритм показал отсутствие гарарантированной сходимости.

Алгоритм FICAVCA основан на трех стадиях: голосование, покраска и обновление. Во время стадии голосования вершины в графе выбирают одну или несколько вершин, которые будут покрашены на следующей стадии. В качестве состояния для каждой клетки выступает отношение числа непокрашенных соседей к его общему количеству.

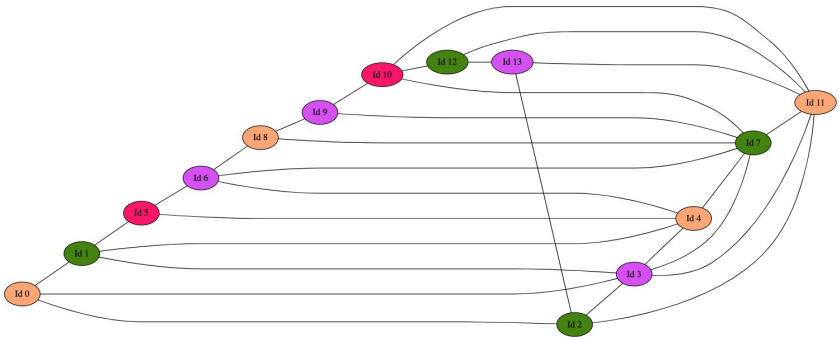


Рис. 1. Пример покраски графа алгоритмом FICAVCA

Таблица 1. Сравнение существующих алгоритмов в llvm с Ficavca на примере модуля из coremark

Хроматические числа для модуля core_list_join.ll из [8]				
Функция	PBQP	Basic	Greedy	Ficavca
calc_func	10	10	10	9
cmp_complex	4	4	4	3
cmp_idx	4	4	3	3
copy_info	4	3	3	3
core_bench_list	26	26	25	18
core_list_find	3	4	3	3
core_list_reverse	3	3	3	3
core_list_mergesort	15	15	15	16
core_list_remove	5	5	5	5
core_list_undo_remove	5	5	5	5
core_list_init	18	18	17	15
core_list_insert_new	9	9	8	8

Алгоритм Ficavca можно варьированием определенных параметров сделать «жадным». При этом он покрасит все вершины за первую итерацию. Для исследования, на каких графах Ficavca находит меньшее хроматическое число, чем его «жадный» вариант, был создан генератор случайных графов. А для сравнения с существующими алгоритмами аллокации регистров была дописана трансформация виртуальных регистров и их времен активностей в графовое представление, к которому был применен алгоритм Ficavca для вычисления хроматического числа.

Вывод: предложенные алгоритмы были исследованы для решения задачи покраски графа и, как следствие, задачи распределения регистров. При этом алгоритм FICAVCA, показавший себя довольно эффективно, будет доработан и интегрирован в существующую инфраструктуру llvm.

Литература

1. Владимиров К. Оптимизирующие компиляторы. Структура и алгоритмы. — Москва, 2024.
2. Lalla Mouatadid. Introduction to Complexity Theory: 3-Colouring is NP-complete.
3. http://compilers.cs.ucla.edu/fernando/projects/soc/llvm_doc/regAlloc.html.
4. Omri Traub, Glenn Holloway, Michael D. Smith. Quality and Speed in Linear-scan Register Allocation.
5. The Nature of code https://natureofcode.com/cellular-automata.
6. Javad Akbari Torkestani, Mohammad Reza Meybodi. A cellular learning automata-based algorithm for solving the vertex coloring problem. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.01.098.
7. Mostafa Kashani, Saeid Gorgin, Seyed Vahab Shojaedini. A fuzzy irregular cellular automata-based method for the vertex colouring problem. https://doi.org/10.1080/09540091.2019.1650329.
8. Coremark benchmark https://github.com/eembc/coremark.

УДК 004.23

Расширения F, D в RISC-V на примере вычислителя с плавающей точкой FPnew

Протасова Е. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе рассматривается реализация расширений с плавающей точкой одинарной и двойной точности в процессорном ядре RISC-V. Для реализации данных расширений требуется регистровый файл для чисел с плавающей точкой, добавление поддержки новых инструкций, регистр контроля и статуса fcsr и вычислитель с плавающей точкой (FPU). В качестве вычислителя был выбран FPnew с открытым исходным кодом, поддерживающий основные форматы и операции RISC-V.

Ключевые слова: Floating Point Unit (FPU); RISC-V; FPnew.

Современные микропроцессоры не обходятся без вычислений над вещественными числами. Для реализации таких вычислений используется блок с плавающей точкой, снижающий нагрузку на процессор и повышающий его производительность. В архитектуре RISC-V представлены несколько расширений набора команд для поддержки операций с плавающей точкой, включая F и D расширения для работы над числами одинарной и двойной точности соответственно.

Для реализации данных расширений в процессорном ядре RISC-V был использован вычислитель с плавающей точкой с открытым исходным кодом FPnew. FPnew поддерживает основные форматы и операции RISC-V, содержит несколько режимов работы и удобен для настройки под определенную микроархитектуру.

Интеграция расширений с плавающей точкой в процессорное ядро — сложный и трудоемкий процесс, который включал в себя изучение и добавление поддержки всех инструкций данного расширения: изменение структурной схемы процессора, добавление новых блоков и путей данных, а также модификацию декодера инструкций. Кроме того, данные расширения требуют добавление нового регистра контроля и статуса fcsr для отслеживания статуса операций с плавающей точкой и задания режима округления.

Литература

1. The RISC-V Instruction Set Manual: Volume I Unprivileged Architecture.
2. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic, 2008.

УДК 004.416

Повышение эффективности обработки изображений в OpenCV на RISC-V: интеграция векторных инструкций и алгоритмическая оптимизация

Кузьмин Р. С., Пшеницына П. С., Шагалова П. А., Соколова Э. С.
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24
roma.kuzmin@rambler.ru

Выполнен анализ повышения производительности алгоритмов компьютерного зрения через интеграцию векторных инструкций архитектуры RISC-V в библиотеку OpenCV. Рассмотрены алгоритмические оптимизации, такие как кеширование и многопоточность. Результаты подтверждают эффективность предложенных решений для использования в устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.
Ключевые слова: RISC-V; OpenCV; компиляторная и алгоритмическая оптимизации; векторное расширение; детектор углов; ключевые точки; обработка изображений.

Современные технологии компьютерного зрения находят широкое применение в различных областях, таких как автоматическое управление, робототехника, медицина и анализ изображений. Архитектура RISC-V благодаря своей открытости и энергоэффективности становится перспективной платформой для решения таких задач. Однако ключевые библиотеки обработки изображений, включая OpenCV, изначально оптимизированы под x86 и ARM с их SIMD-расширениями (SSE, AVX, NEON), тогда как поддержка RISC-V Vector Extensions (RVV) находится на ранней стадии [1].

В данной работе мы исследуем методы оптимизации OpenCV на RISC-V, комбинируя:

1) интеграцию RVV-инструкций для базовых операций (на примере оператора сложения cv :: add);
2) алгоритмические оптимизации (параллелизация, кеширование), ранее успешно примененные для CPU;
3) реализацию и оптимизацию детектора углов, основанного на свойствах глобальной и локальной кривизны [3].

Выполнена практическая реализация RVV в OpenCV на RISC-V, проведены замеры производительности, проанализированы перспективы для обработки более сложных операций, таких как фильтрация и свертка.

Исследование методов алгоритмической оптимизации включает эффективное кеширование промежуточных данных, использование векторизованных функций OpenCV и многопоточную обработку через OpenMP [2]. Эти подходы успешно применены к задачам детектирования ключевых точек, где сочетание различных оптимизационных методик позволило достичь значительного прироста производительности.

Важным аспектом исследования является универсальность предложенных решений. Разработанные методы оптимизации могут быть адаптированы для широкого класса алгоритмов компьютерного зрения — от базовых операций обработки изображений до сложных алгоритмов детектирования и сопоставления признаков. Это создает основу для дальнейших исследований в области ускорения компьютерного зрения на RISC-V-архитектуре.

В ходе экспериментов подтверждена эффективность RISC-V Vector Extensions при обработке изображений OpenCV: например, базовая операция cv :: add с RVV показала прирост скорости в 1,5–2 раза по сравнению со скалярной версией [1, 2]. Дальнейшие исследования направлены на оптимизацию таких функций, как фильтрация и преобразования изображений. Применение комбинированного подхода к оптимизации вычислений (аппаратное ускорение + алгоритмические оптимизации) критически важно для маломощных устройств.

Применение полученных результатов актуально в робототехнике, например, при трекинге объектов с низким энергопотреблением, в программном обеспечении медицинских устройств (обработка изображений на портативных сканерах), AR/VR-обработке изображений (уменьшение задержек при рендеринге).

Литература

1. Chen Y., Lee J., Smith K. et al. RISC-V Vector Extensions for Computer Vision Applications // IEEE Access, 2023. Vol. 11. P. 12345–12356.
2. Wang L., Zhang H., Johnson M. et al. Optimizing OpenCV for RISC-V Architectures // Journal of Computer Vision, 2022. Vol. 15. P. 234–248.
3. Harris C., Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector // Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, 1988. P. 147–151.

УДК 004.382.4

Система анализа изображений микроскопии на базе одноплатного компьютера с процессорной архитектурой RISC-V

Симонова Д. В., Савкин А. Е., Шагалова П. А., Соколова Э. С.
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24
kotik-da@yandex.ru

Разработана система анализа изображений на базе одноплатного компьютера с процессорной архитектурой RISC-V, включающая промышленный микроскоп с варьируемым приближением 120–1200x, одноплатный компьютер Lichee Pi 4A, держатель, камеру с разрешением 8 мп, систему освещения и моторизированный предметный столик. Описаны процесс проектирования системы и алгоритмы анализа изображений микроскопии
Ключевые слова: архитектура RISC-V; компьютерное зрение; интерфейс GPIO; электронный микроскоп.

Разработана система анализа изображений на базе одноплатного компьютера Lichee Pi 4A с открытой и гибкой процессорной архитектурой RISC-V. Аппаратная часть включает моторизованный предметный столик микроскопа и систему освещения, программная часть реализует анализ изображений микроскопии биомедицинских образцов (клеток крови и частиц вещества в фармацевтических препаратах).

Выполнено проектирование конструкции умного микроскопа. Объектив представляет промышленный микроскоп с варьируемым приближением 120–1200x, установленный на специальный держатель, к микроскопу подключается камера с разрешением 8 мп, способная снимать видео разрешением 4K и 60 fps, разработана конструкция передвижного предметного столика, спроектированная в программе «Компас 3D» и распечатанная на 3D-принтере (рис. 1).

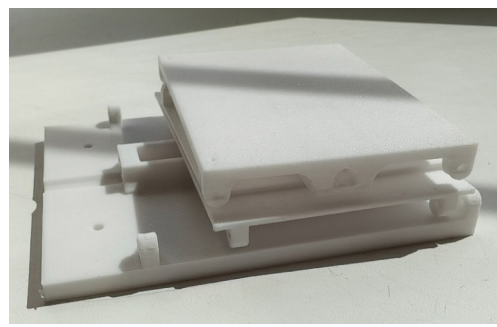


Рис. 1. Прототип столика для микроскопа

Подсистема освещения включает фотомодуль с фоторезистором, набор светодиодов, равномерно распределенных по корпусу устройства, резисторы. Определение уровня освещенности осуществляется фотомодулем, фиксирующим уровень освещения. Алгоритм регулировки освещения следующий: при выявлении недостаточного освещения сначала регулируется яркость одного светодиода с использованием широтно-импульсной модуляции, затем последовательно активируются дополнительные светодиоды, каждый из которых настраивается по яркости. Процесс продолжается до тех пор, пока фотомодуль не начнет пропускать сигнал, что свидетельствует о достижении необходимого уровня освещенности. Вся процедура настройки выполняется автоматически.

Передвижение предметного столика осуществляется с помощью двух сервоприводов модели SG90. Сначала препарат перемещается, чтобы система зафиксировала его угловое положение. После этого производится фотосъемка. Далее на один из сервоприводов подается серия кратковременных управляющих импульсов, каждый из которых обеспечивает смещение препарата на величину, соответствующую одному кадру микроскопа. По достижении противоположной грани исследуемого объекта активируется второй сервопривод, осуществляющий перемещение препарата вдоль перпендикулярной оси. Цикл повторяется до достижения противоположного угола препарата. Процедуры фотосъемки, перемещения и при необходимости автоматического сшивания полученных изображений выполняются в автоматическом режиме.

Электрическая схема подключения модулей освещенности и передвижения к плате представлена на рис. 2.

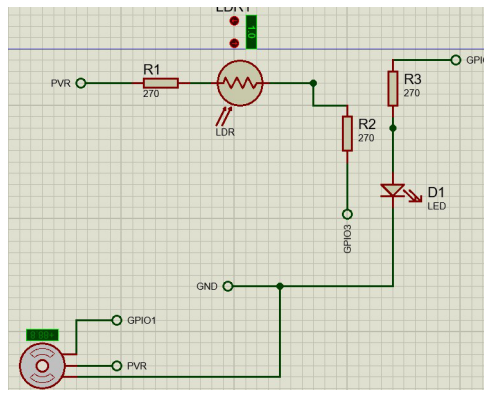


Рис. 2. Электрическая схема подключения модулей освещенности и передвижения к плате

Выполнено обучение нейронных сетей для решения задач обнаружения и анализа частиц фармацевтических препаратов, оптимизированных под особенности RISC-архитектуры. Использование гибридных алгоритмов, комбинирующих классические методы обработки изображений с глубоким обучением, позволило достичь баланса между точностью и скоростью обработки — до 25 кадров в секунду для изображений с разрешением 4K.

Литература

1. Харрис С. Л. Харрис Д. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера: RISC-V. Ред. А. Ю. Романов / перев. А. Ю. Романова, В. С. Яценкова. — ДМС Пресс, 2021. — С. 810.
2. Шагурин И. И. Современные микроконтроллеры и микропроцессоры. — Горячая линия — Телеком, 2004. — С. 952.

УДК 004.4'244

Разработка системы автоматизированной проверки лабораторных работ по программированию RISC-V

Кондратенко К. Е., Тиняков С. А., Горский К. Д., к. т. н., Заславский М. М.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф

В рамках статьи описывается лабораторный практикум по программированию на языке Assembler для RISC-V, поддерживающий автоматические генерацию условий и проверку. Практикум запускает студенческие решения с помощью riscv-gnu-toolchain, использующего инструмент эмуляции QEMU. В разработанной системе реализованы поддержка векторных расширений и инструмента отладки GDB, эмуляция прерываний и аппаратных устройств.
Ключевые слова: RISC-V; QEMU; лабораторный практикум.

Актуальность

В связи с ростом популярности [1] архитектуры RISC-V становится актуальным вопрос изучения архитектуры RISC-V и получения практических навыков разработки на языке Assembler для RISC-V. Процесс изучения осложняется необходимостью создания лабораторий и учебных классов, оборудованных специализированными учебными стендами, что не всегда осуществимо в условиях неуклонного роста количества студентов [2]. По этой причине возникает потребность создания переносимой системы, которая позволяет автоматически генерировать условия заданий и автоматически проверять решения студентов. Система не должна зависеть от архитектуры устройства, на котором она используется.

Разработка системы автоматизированной проверки лабораторных работ по программированию RISC-V

Решение упаковано в Docker-контейнер. В качестве базового образа выбран trampgeek/jobeinabox [3], этот образ включает в себя сервер Job Engine [4], который предоставляет интеграцию с плагином CodeRunner для платформы Moodle. В контейнер устанавливается riscv-gnu-toolchain [5] для работы с архитектурой RISC-V. В riscv-gnu-toolchain входит набор инструментов для работы с программами, написанным под RISC-V-архитектуру, например компилятор, линковщик, а также стандартные библиотеки (например, glibc для RISC-V). В riscv-gnu-toolchain используется инструмент эмуляции QEMU [6] в режиме user-mode. Система реализует двухэтапный процесс:

1) генерация уникальных заданий;
2) проверка решений через изолированное выполнение кода и сравнение полученных результатов с ожидаемыми.

Задания создаются программно с использованием шаблонов. Задания генерируются случайным образом на основе seed, что обеспечивает воспроизводимость заданий при сохранении одинаковой структуры.

Апробация системы автоматизированной проверки лабораторных работ по программированию RISC-V

На данный момент разработано семь лабораторных работ. Система разработана в рамках создания автоматизированного лабораторного практикума по дисциплине «Организация ЭВМ и систем» (Заславский Марк Маркович, Тиняков Сергей Алексеевич, Морозов Сергей Михайлович, Горский Кирилл Денисович, Сабалиров Мухаммад Заурович) по заказу альянса RISC-V. Система проверки внедрена в образовательный процесс в 2024–2025 учебном году в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» на предмете «Организация ЭВМ». Студентам второго курса было предложено выполнить задание в объеме двух лабораторных работ. В решении задания приняло участие 135 студентов.

Литература

1. RISC-V Tech Market Overview 2024–2034 [Электронный ресурс] // Market Research Future. URL: https://www.marketresearchfuture.com/reports/risc-v-tech-market-38126.
2. Министерство науки и высшего образования РФ. 2023 [Электронный ресурс]. URL: https://www.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/77192.
3. JobeInABox [Электронный ресурс] // GitHub. URL: https://github.com/trampgeek/jobeinabox.
4. Jobe Server [Электронный ресурс] // GitHub. URL: https://github.com/trampgeek/jobe.
5. riscv-gnu-toolchain [Электронный ресурс] // GitHub. URL: https://github.com/riscv-collab/riscv-gnu-toolchain.
6. QEMU [Электронный ресурс] // QEMU. URL: https://www.qemu.org/docs/master/about/index.html.

УДК 004.318

SCR1 на платформе Tang Primer 20k: поддержка периферии

Луконенко Н. И., Смирнов К. К.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
lukonenko.nikitka@mail.ru

Реализована SoC на базе SCR1 для Tang Primer 20K. Добавлен UART 16550 [4] и ROM-память с загрузчиком SC-BL. Периферия общается с ядром посредством AHB-шины, реализован AHB-мультиплексор. Ведется работа над поддержкой в SoC DDR3-памяти и добавлением GPIO-контроллера.
Ключевые слова: ядро SCR1; загрузчик SC-BL; SoC; AHB-шина; DDR3; ROM; GPIO; UART 16550.

FPGA — это программируемая логическая интегральная схема. После изготовления схемы этого типа могут быть многократно запрограммированы, это позволяет использовать их при решении широкого спектра задач. Логика работы устройства описывается на семействе языков HDL, наиболее распространенными являются VHDL, Verilog и System Verilog.

FPGA используют на этапе pre-silicon-проверки процессоров [3], в качестве вспомогательной периферии какой-либо техники, например для работы компьютерного зрения в автомобиле [2], а также в образовательных целях [1]. С платами такого типа имеет смысл использовать процессоры с архитектурой RISC-V, поскольку эта архитектура достаточно гибкая и может быть использована как в устройствах, где важна компактность, так и там, где необходима большая вычислительная мощность. На базе RISC-V строятся различные ядра и процессоры. Существуют открытые решения, например ядро SCR1. Оно написано на языке System Verilog и ранее было запущено разработчиками на платах Digilent Arty (Xilinx), Digilent Nexys 4 DDR (Xilinx), Arria V GX Starter (Intel), Terasic DE10-Lite (Intel). В последнее время на рынке FPGA приобретает популярность новый производитель Gowin, некоторые платы этого производителя можно купить по доступным ценам, это является одной из причин возросшей популярности. В связи с этим возникла задача проверить возможность запуска ядра SCR1 на плате с использованием чипа от этого производителя. В предыдущих работах были достигнуты некоторые результаты: сначала была запущена небольшая программа, реализующая loopback между COM-портом и SCR1, далее был запущен загрузчик SC-BL.

В силу некоторых технических трудностей ранее ROM-память располагалась по нестандартным адресам в карте памяти. Это не позволяло запускать программное обеспечение, написанное для ядер серии SCR, без изменения их исходного кода. В ходе текущей работы это было исправлено. Ножки JTAG также были заведены на SoC, после чего получилось запустить программу sysinfo с использованием OpenOCD. Данная программа является одной из тестовых программ в RISC-V-тулчейне SC-DT [8], который был собран инженерами компании Syntacore и открыто распространяется на официальном сайте. Программа предназначена для отображения характеристик аппаратной составляющей проекта.

Для реализации всего потенциала FPGA Tang Primer 20K есть необходимость добавления поддержки DDR3-памяти и GPIO-контроллера для интерфейса PMOD.

Для этого в SoC добавлен арбитр для шины данных и инструкций, которые подключаются к контроллеру DDR3-памяти, модифицирован AHB-мультиплексор и добавлена схема сихнронизации тактовых доменов. Также в SoC добавлена готовая реализация GPIO-контроллера, которая взята с платформы GitHub [9]. Ведется работа по отладке DDR3-памяти и устройств взаимодействия с ней, а также написанию драйвера для платы расширения TM-1638, подключенной к PMOD. Плата представляет из себя набор кнопок, светодиодов и семисегментных индикаторов. Она работает по специальному протоколу, который представляет из себя три входа-выхода: CLK, DIO, STB, и по устройству похож на I2C [10]. С результатами можно ознакомиться в репозиториях [5, 6, 7].

Литература

1. Andreas Koch, Ulrich Golze. FPGA Applications in Education and Research. URL: https://www.esa.informatik.tudarmstadt.de/assets/publications/materials/1993/1993_E UROCHIP93.pdf.
2. David Castells-Rufas, Vinh Ngo, Juan Borrego-Carazo, Marc Codina, Carles Sanchez, Debora Gil, Jord Carrabina. A Survey of FPGA-Based Vision Systems for Autonomous Cars. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9991145.
3. Farooq U., Mehrez H. Umer Farooq Habib Mehrez. Pre-Silicon Verification Using Multi-FPGA Platforms: A Review. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10836-021-05929-1.
4. Github репозиторий UART 16550. URL: https://github.com/zhelnio/ahb_lite_uart16550.
5. Github репозиторий SC-BL. URL: https://github.com/SurfaceYellowDuck/sc-bl.
6. Github репозиторий fpga-sdk-prj. URL: https://github.com/SurfaceYellowDuck/fpga-sdk-prj.
7. Github репозиторий SCR1. URL: https://github.com/SurfaceYellowDuck/scr1.
8. Набор инструментов SC-DT. URL: https://syntacore.com/tools/development-tools.
9. Github репозиторий AHB_GPIO. URL: https://github.com/ninglixin98/AHB_GPIO/tree/main/AHB-GPIO_v1.0.
10. Joseph Wu. Texas Instruments. A Basic Guide to I2C. URL: https://www.ti.com/lit/an/sbaa565/sbaa565.pdf?ts=1747944951848.

УДК 004.318

Интеграция процессорного ядра SCR1 в платформу LiteX для запуска на ПЛИС Colorlight i9

Муковенков Р. С., Смирнов К. К.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
roman.mukovenkov@gmail.com

Разработана поддержка ядра SCR1 с внутренней шиной AXI4 в платформе автоматического создания систем на кристалле LiteX. Абстрагирована спецификация ядра. Транслированы исходные файлы для поддержки инструментом синтеза Yosys. Проверена работоспособность на ПЛИС Colorlight i9.
Ключевые слова: SCR1; система на кристалле; ПЛИС; обработчик прерываний; RISC-V; LiteX.

Ручной подбор компонентов для систем на кристалле, позволяющий оптимизировать использование ресурсов и быстродействие индивидуально под плату, является предпочтительным способом для конечного продукта в индустрии. В качестве альтернативы можно использовать предлагаемый инструментом LiteX [1] автоматический способ, который позволяет существенно сократить затраты времени на этап прототипирования. Для реализации этой возможности LiteX располагает большой библиотекой компонентов, чтобы создание системы на кристалле для описанных в платформе ядра и ПЛИС делалось минимальными усилиями. Файлы описания можно изменять, добавлять в них модули с помощью интерфейса платформы в зависимости от требований. Важно отметить, что абстрагирована нетривиальная логика контроллеров памяти и арбитража.

RISC-V является популярной архитектурой ядер микропроцессоров. На рынке представлен широкий спектр процессоров этой архитектуры, от открытых учебных реализаций до серьезных продуктовых решений. Данная работа посвящена запуску процессора на основе открытого ядра SCR1 [2], разработанного компанией Syntacore на языке SystemVerilog, на ПЛИС Colorlight i9. Для создания системы на кристалле был использован фреймворк LiteX. В процессе работы была выявлена и решена проблема несовместимости SystemVerilog в инструменте синтеза Yosys. Исходные файлы на языке SystemVerilog были автоматически переведены в Verilog с помощью инструмента sv2v. Было описано ядро в соответствующем Python-файле. Интегрирована базовая логика обработчика прерываний IPIC (Integrated Programmable Interrupt Controller), интерфейс которого был заимствован [3]. Файлы инициализации были заимствованы из директории описания другого RISC-V-процессора, но к ним добавлена новая логика, связанная с инициализацией и работой обработчика прерываний. Среди поддерживаемой периферии платы Colorlight i9 можно отметить SDRAM, SPI Flash, BRAM в виде TCM (Tightly Coupled Memory), взаимодействие с которыми происходит с помощью LiteX BIOS через UART. Также имеется возможность запускать пользовательские приложения.

Для исследования характеристик полученного решения и сравнения с аналогами был проведен эксперимент. Сравнивались использование ресурсов ПЛИС и пропускная способность памяти для созданных в LiteX систем на кристалле на основе ядер SCR1, VexRiscv, FazyRV, PicoRV32, Fire-V, запущенных на Colorlight i9.

В результате было выяснено, что система на кристалле на основе SCR1 занимает значительно большее количество ресурсов и обладает средней пропускной способностью памяти по сравнению с другими системами на кристалле. Предложен путь оптимизации, который был выявлен в результате анализа сгенерированной платформой LiteX иерархии модулей. Реализация опубликована в открытом доступе, с результатом можно ознакомиться по ссылке [4].

Литература

1. LiteX. URL: https://github.com/enjoy-digital/litex (дата обращения: 12.04.2025).
2. SCR1. URL: https://github.com/syntacore/scr1 (дата обращения: 12.04.2025).
3. Zephyr RTOS Syntacore Fork. URL: https://github.com/syntacore/zephyr (дата обращения: 12.04.2025).
4. SCR1 на Colorlight i9. URL: https://github.com/Mukovenkov-Roman-Sergeyevich/scr1-colorlight-i9-litex (дата обращения: 12.04.2025).

УДК 004.23, 004.31

Реализация аппаратного механизма сбора точных архитектурных событий для вычислительной системы с архитектурой RISC-V

Зайцев В. Л., Хайдуков Д. И.
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
zaitsev.vl@phystech.edu
khajdukov.di@phystech.edu

В работе предложена реализация модуля сбора точных событий для суперскалярного микропроцессора с архитектурой RISC-V. Результаты исследования на высокоуровневой модели показывают существенное повышение точности локализации архитектурных событий в коде программы, снижение накладных расходов при профилировании.
Ключевые слова: вычислительная система; анализ производительности; профилирование; счетчики производительности.

Спецификация на средства аппаратного мониторинга производительности (САМП) в архитектуре RISC-V уступает в проработке более зрелым архитектурам ARM и x86. В частности, отсутствует механизм сбора точных архитектурных событий (ТАС), аналог PEBS [1] в процессорах Intel, который позволяет точно определять адрес инструкции, вызвавшей архитектурное событие, и обеспечивать дополнительную метаинформацию о нем. Это улучшение особенно важно для точного профилирования программного кода и оптимизаций на основе профиля.

Представленная в работе реализация механизма ТАС не имеет основного недостатка стандартного метода семплирования — погрешности (skid) [2] определения точного *PC* (адреса инструкции) для привязки архитектурного события к инструкции в коде программы (согласно теоретическим оценкам [2, 3], погрешность может составлять до 20 инструкций). Реализация основана на специальном буфере (рис. 1), расположенном в выделенной памяти, в который при переполнении счетчика *hpmcounter* записывается битовый пакет данных, который содержит текущий *PC*, временную метку из стандартного счетчика тактов и битовую маску архитектурного события. Дополнительно в пакете данных может быть зафиксирована служебная информация об обращениях в память или последних инструкциях перехода. При достижении определенного уровня заполненности буфера генерируется исключение для передачи управления ОС. Доступ к буферу осуществляется через регистры косвенного доступа.

Производительность представленного механизма была оценена с помощью высокоуровневой модели. Эксперименты с микробенчмарками показали снижение ошибки при определении инструкции — источника переполнения счетчика с восьми инструкций в среднем до нуля, что значительно упрощает идентификацию «критических инструкций» и возможностей для потенциальных оптимизаций. Кроме того, удалось снизить накладные расходы при профилировании [4] на 3%.

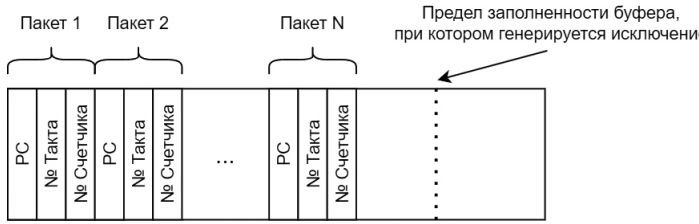


Рис. 1. Буфер сбора точных событий

Литература

1. Официальная документация на технологию Intel PEBS. [Электронный ресурс]. URL: https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/articles/technical/timed-process-event-based-sampling-tpebs.html (дата обращения: 11.02.2025).
2. EasyPerf. Understanding Performance Events Skid [Электронный ресурс]. URL: https://easyperf.net/blog/2018/08/29/Understanding-performance-events-skid (дата обращения: 10.02.2025).
3. EasyPerf. Advanced profiling topics: PEBS and LBR [Электронный ресурс]. URL: https://easyperf.net/blog/2018/06/08/Advanced-profiling-topics-PEBS-and-LBR (дата обращения: 10.02.2025).
4. Soramichi Akiyama, Takahiro Hirofuchi. Quantitative Evaluation of Intel PEBS Overhead for Online System-Noise Analysis // Proceedings of the 7th International Workshop on Runtime and Operating Systems for Supercomputers ROSS 2017 (ROSS '17). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 3. P. 1–8. https://doi.org/10.1145/3095770.3095773.

УДК 004.318

Анализ эффективности параллельного исполнения команд на уровне конвейера RISC-V-микропроцессора

Воложинов Д. С.[1,2], Сенин А. С.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
volozhinov.ds@phystech.edu
[2] ПАО «Сбербанк»
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32, к. А

Представлены результаты исследования влияния модификации, реализующей параллельное исполнение команд внутри RISC-V-ядра, на его производительность. Рассмотрены причины потери производительности, проанализированы пути обхода конфликтов, выявлены переменные, вносящие вклад в итог модификации.
Ключевые слова: RISC-V; ядро микропроцессора; микроархитектура; параллельное исполнение.

Одним из наиболее популярных методов повышения производительности процессора является перевод логически последовательного порядка команд на параллельное исполнение. При таком переводе увеличиваются количество затрачиваемых процессором ресурсов и потребляемая им мощность. Однако кроме таких очевидных затрат возникают проблемы, связанные с конфликтами между несколькими одновременно исполняющими команды потоками.

Основные виды конфликтов схожи с таковыми в задаче конвейеризации однотактового процессора:

- конфликты по данным — попытки одновременной записи и чтения с одного регистра или записи в него разных данных сразу с двух потоков;
- конфликты по управлению — одновременное исполнение двух команд, одна из которых может изменить состояние счетчика команд таким образом, что вторая логически не должна выполниться;
- конфликты по ресурсам — одновременная попытка доступа к одному модулю двух потоков.

Модификация производится на микроархитектурном уровне: раздваивается исполняющая часть конвейера процессора, для решения конфликтов добавляется специальный запрещающий одновременное исполнение механизм, адаптируются модули для одновременной работы с двумя потоками. На рис. 1 представлена схема модификации конвейера процессора.

Результаты модификации процессора в терминах производительности, замеренной на бенчмарке dhrystone 2.1, показаны в табл. 1. Измерения, приведенные в таблице, являются лишь частью анализируемых данных, взятых при конкретной микроархитектурной конфигурации процессора.

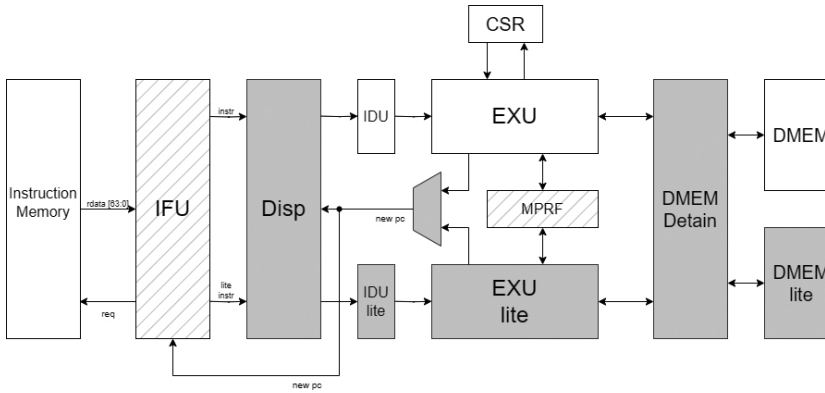


Рис. 1. Принципиальная схема модификации конвейера процессора. Полностью закрашены добавленные модули, заштрихованы — адаптированные под исполнение в два потока

Таблица 1. Эффективность модификации для разных конфигураций памяти данных в максимальной конфигурации — при поддержке расширений IMC набора команд и трех стадий исполнения

	Оригинальный процессор	Модификация с одним портом памяти	Модификация с одним портом на чтение, одним портом на запись	Модификация с двумя портами памяти
DMIPS/MHz	1,22	1,46	1,53	1,99
Эффективность модификации на относительную производительность	—	20,0 %	25,8 %	63,7 %
Эффективность модификации с учетом потери максимальной частоты	—	11,1 %	18,6 %	52,4 %

В ходе анализа более обширной статистики измерений производительности были получены следующие результаты для различных микроархитектурных переменных конфигурируемого процессора:

- количество портов памяти данных: возможность одновременного обращения к памяти с двух потоков сильно экономит количество тактов, поскольку в стандартном наборе команд без расширения M только команды обращения в память не реализуемы в однотактовом виде;
- количество стадий исполнения и относительные характеристики производительности: для DMIPS/MHz на одной частоте для оригинального процессора и модифицированного наблюдается однозначная отрицательная корреляция между количеством стадий исполнения и эффективностью модификации, связанная с необходимостью синхронизации потоков;

- количество стадий исполнения и абсолютные характеристики производительности: при поправке на потерю максимальной частоты корреляция нарушается в связи со смягчением факторов потери частоты при увеличении количества стадий исполнения.

В работе были выявлены основные критерии целесообразности перевода RISC-V-ядра на параллельное исполнение команд в зависимости от микроархитектурных параметров переводимого дизайна.

Литература

1. Gokulan T., Muraleedharan A., Varghese K. Design of a 32-bit, dual pipeline superscalar RISC-V processor on FPGA // 23rd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD), 2020. DOI: 10.1109/dsd51259.2020.00062.
2. AMBA AXI and ACE Protocol Specification AXI3, AXI4, AXI5, ACE and ACE5 // AMD Technical Information Portal, 2017. URL: https://docs.amd.com/r/en-US/pg073-axi-apb-bridge/References (дата обращения: 06.03.2025).

УДК 004.421

Использование Coremark в регрессионном тестировании процессорного ядра RISC-V

Карпухин М. С.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе описан подход к интеграции Coremark в регрессионное верификационное окружение процессорного ядра RISC-V. Представлена структура адаптации существующего функционального верификационного окружения для автоматического запуска Coremark на уровне RTL-симуляции без необходимости развертывания виртуальной СнК и описаны механизмы передачи результатов теста через стандартные интерфейсы верификационного окружения.

Ключевые слова: Coremark; регрессионное тестирование; верификация; RISC-V; RTL-симуляция; SoC.

Для оценки производительности и базовой функциональности процессорного ядра на этапе RTL-разработки часто используются тесты из состава стандартных бенчмарков. Одним из них является Coremark, предназначенный для измерения вычислительной эффективности встроенных систем. В типичных условиях его запуск требует моделирования простой системы на кристалле с UART или другим механизмом ввода-вывода для получения результата. Однако это требует проектирования сборки элементов СнК.

Предложенный в работе метод использует вывод результата тестирования при помощи обращения к ячейке памяти. Такое решение упрощает интеграцию Coremark в существующее регрессионное верификационное окружение. Результат считывается напрямую средой верификации, что делает возможным автоматический запуск Coremark в составе тестирования.

Данный подход особенно полезен при поэтапной разработке SoC, когда функциональность ядра уже доступна, но периферийные модули еще не реализованы или не прошли верификацию. Это позволяет начать оценку производительности и отладку программной части на ранних этапах проекта.

Литература

1. EEMBC CoreMark Benchmark Specification.
2. The RISC-V Instruction Set Manual: Volume II Privileged Architecture.

УДК 004.254

Реализация аппаратного блока предвыборки в кеш для RISC-V-ядра

Левонюк А. А.[1,2], Тищук Б. Ю.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] ПАО «Сбербанк»
117303, г. Москва, ул. Керченская, 1А

В работе представлена аппаратная реализация блока предвыборки данных на основе алгоритма RPT для RISC-V-ядра класса MCU. Введены механизмы предотвращения избыточных запросов в случае серии кеш-попаданий. Для повышения точности предсказаний реализован метод отслеживания циклических паттернов доступа к памяти, включая нерегулярные повторяющиеся последовательности.

Ключевые слова: RISC-V; предвыборка данных; RPT; паттерн доступа к памяти; доля попаданий в кеш.

Для увеличения эффективности подсистемы памяти применяются методы кеширования и используются аппаратные блоки предвыборки, обеспечивающие наличие данных в кеше к моменту запроса со стороны ядра.

Наиболее распространенными паттернами доступа к памяти являются:

- последовательные обращения с постоянным шагом;
- обращения с чередующимся или циклическим шагом;
- нерегулярные обращения, зависящие от содержимого данных или структуры алгоритма [1].

Блок предвыборки должен быть гибким, чтобы подстраиваться под эти паттерны и не перегружать шину памяти избыточными запросами.

В данной работе представлен аппаратный блок предвыборки для кеша данных первого уровня для RISC-V-ядра класса MCU [2].

В основе предвыборки используется алгоритм RPT (Reference Prediction Table), расширенный в целях улучшения предсказаний и фильтрации неэффективных запросов [3].

На рис. 1 представлена схема расширенного алгоритма. Рассмотрим основные особенности реализации:

- поддержка нескольких шагов на один указатель команды;
- счетчик доверия, активирующий предсказание только при стабильных повторениях;
- фильтрация предвыборки при серии кеш-попаданий;
- буфер последних шагов для предсказания циклических паттернов;
- удаление устаревших паттернов.

Блок встроен в кеш и взаимодействует с памятью через конечный автомат. Предвыборка выполняется только при отсутствии обращений со стороны ядра, а при наличии запрашиваемой строки в кеше — отменяется.

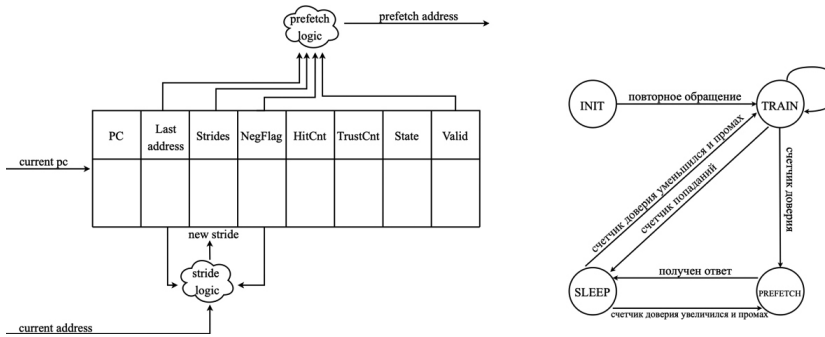


Рис. 1. Схема расширенного алгоритма RPT

Проведенные тесты подтверждают применимость предложенного решения к практическим задачам и показывают высокую адаптивность блока предвыборки к типичным шаблонам обращений. Разработанный аппаратный блок может быть эффективно использован в качестве улучшения подсистемы памяти.

Литература

1. Braun P., Litz H. Understanding memory access patterns for prefetching // International Workshop on AI-assisted Design for Architecture (AIDArc), held in conjunction with ISCA, 2019.
2. SCR1 open-source RISC-V MCU core // URL: https://github.com/syntacore/scr1.
3. Chen T. F. Data prefetching for high-performance processors. — University of Washington, 1993.

УДК 004.318

Реализация предсказателей ветвления для процессоров с архитектурой RISC-V

Тарасова А. Н., Примаков Е. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработан блок предсказателя переходов BPU гибридной структуры, состоящий из буфера целевых адресов переходов BTB и таблицы истории ветвлений GShare, для Linux-capable процессорного ядра на архитектуре RISC-V. Приведен обзор основных методов и алгоритмов построения предсказателей переходов, включая реализованные в данной работе, их особенности и сравнительный анализ влияния на производительность процессорных ядер.
Ключевые слова: предсказатель переходов; BPU; ветвления; процессор RISC-V.

На сегодняшний день блоки предсказания переходов (BPU — Branch Prediction Unit) являются ключевыми компонентами современных конвейерных процессорных ядер, обеспечивающими высокую производительность за счет предсказания направления ветвлений и целевых адресов переходов. Неправильное предсказание перехода приводит к простою конвейера, очистке частично выполненных инструкций и повторной выборке инструкций правильной ветви кода из памяти, что значительно увеличивает время выполнения программы.

Одним из наиболее распространенных методов предсказания является использование буфера адресов переходов (BTB — Branch Target Buffer) и таблицы истории ветвлений (BHT — Branch History Table). BTB представляет собой кеш, в котором хранятся целевые адреса переходов. При попадании в BTB информация о предыдущем переходе используется для ускорения выбора следующего адреса еще до прихода текущей инструкции из памяти. BHT представляет собой структуру данных, которая запоминает результаты прошлых ветвлений и принимает решение о дальнейших действиях на основании накопленной статистики. GShare является усовершенствованной и более эффективной реализацией BHT, использующей концепцию глобальной истории ветвлений и XOR-индексацию таблицы истории предсказаний.

Помимо представленного решения, существуют и другие распространенные методики организации BPU, такие как Return Address Stack (RAS), применяемый для предсказания возвратов из подпрограмм, специализированные предсказатели циклов (Loop Predictors), гибридные подходы, объединяющие преимущества нескольких видов предсказателей, такие как BTB и Gshare, двухуровневые предсказатели, которые используют локальную и глобальную историю ветвлений для повышения точности, а также предсказатели с многоуровневой иерархией таблиц предсказателей (TAGE). Различные реализации BPU характеризуются различными параметрами, включая точность предсказания, сложность реализации, потребность в аппаратных ресурсах и энергопотребление, что позволяет подобрать оптимальный метод предсказания в соответствии с требованиями и имеющимися ограничениями конкретного проекта.

В рамках данной работы были изучены основные методы и алгоритмы построения предсказателей переходов, особенности их реализации и эффективность.

Разработано RTL-описание блока BPU, сочетающего модули BTB и GShare. Данный блок был успешно интегрирован в конвейерное Linux-capable процессорное RISC-V-ядро и протестирован в верификационном окружении. Интеграция BPU привела к увеличению производительности процессорного ядра, что было подтверждено результатами тестов CoreMark.

Литература

1. Youssif A., Ismail N., Torkey F. Comparison of branch prediction schemes for superscalar processors // Electrical, Electronic and Computer Engineering, 2004.
2. Hennessy J. L., Patterson D. A. Computer Architecture: A Quantitative Approach. 5th ed. Elsevier, 2011.

УДК 004.258

Верификация средств виртуализации и защиты памяти RISC-V

Петров Д. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлены описания уровней привилегий, механизмов защиты памяти и виртуализации для архитектуры RISC-V, структурная схема верификационного окружения, тестовые сценарии для проверки защиты памяти и виртуализации, программная реализация алгоритма трансляции виртуальных адресов.

Ключевые слова: виртуальная память; PMP; RISC-V; верификация; RISCV-DV.

Для полноценной поддержки современных операционных систем архитектура процессора должна обеспечивать определенный набор функций. Среди них особенно важны механизмы многопоточности, обработка исключений и прерываний, поддержка виртуальной памяти, а также средства защиты памяти. RISC-V с поддержкой виртуальной памяти реализует необходимые функции для запуска ОС с разделением привилегий и адресного пространства.

Одна из важнейших функций процессора в многозадачных операционных системах — поддержка виртуальной памяти. Она позволяет изолировать процессы друг от друга и обеспечивает защиту данных, а также эффективное использование физической памяти.

Дополнительно к виртуальной памяти архитектура RISC-V предусматривает механизм PMP (Physical Memory Protection). PMP позволяет конфигурировать права доступа к различным регионам физической памяти на уровне аппаратуры. Это особенно важно для систем без виртуальной памяти, например микроконтроллеров или систем реального времени.

Верификация средств виртуализации и защиты памяти крайне важна. Ошибки в реализации MMU могут привести к нарушениям безопасности, утечкам данных и сбоям системы.

Литература

1. The RISC-V Instruction Set Manual: Volume I Unprivileged Architecture.
2. The RISC-V Instruction Set Manual: Volume II Privileged Architecture.

УДК 621.39

Реализация и отладка через Debug-mode RISC-V-ядра в составе СнК

Гуржов Н. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Debug-mode представляет собой привилегированный режим для низкоуровневой отладки ядра, реализованный по принципу программного буфера. Этот подход минимизирует вмешательство в конвейер процессора и интегрирован с готовым модулем riscv-dbg из экосистемы CHESHIRE SOC.
Ключевые слова: Debug-mode.

Архитектура Debug-mode (D-mode)

Debug-mode представляет собой привилегированный режим для низкоуровневой отладки ядра, реализованный по принципу программного буфера. Этот подход минимизирует вмешательство в конвейер процессора и интегрирован с готовым модулем riscv-dbg из экосистемы CHESHIRE SOC. D-mode обладает наивысшим приоритетом среди всех режимов привилегий, включая Machine-mode, что позволяет отладчику перехватывать управление в критических ситуациях.

Ключевые регистры отладки

Для управления отладкой введены специализированные регистры управления и состояния (CSR). Регистр dcsr (0x7b0) хранит информацию о причине входа в D-mode (ebreak, haltreq, триггеры), предыдущем уровне привилегий и настройках обработки инструкций ebreak; dpc (0x7b1) сохраняет адрес инструкции для возобновления работы после отладки. Пара регистров dscratch0/1 (0x7b2–0x7b3) служит временным хранилищем для обработчика отладки без конфликтов с основным контекстом.

Механизмы перехода между режимами

Вход в D-mode инициируется триггерами: выполнением ebreak (если разрешено в dcsr), внешним запросом haltreq от отладчика или срабатыванием аппаратных точек останова. Система приоритетов гарантирует, что resethaltreq (останов после сброса) имеет высший приоритет, за ним следуют haltreq, ebreak и пошаговое выполнение (step). При входе автоматически сохраняются текущий уровень привилегий в dcsr.prv и адрес возврата в dpc. Для выхода используется инструкция dret, которая восстанавливает привилегии из dcsr.prv и адрес выполнения из dpc, аналогично работе mret/sret в других режимах.

Интеграция с конвейером процессора

При изменении критических CSR (например, dcsr) выполняется полный сброс конвейера (flush) для синхронизации состояния. Сигналы valid сопровождают данные при передаче между вычислительными элементами, что минимизирует переключения триггеров и снижает энергопотребление. Механизм квантования данных (поддержка INT8/INT16) аппаратно реализован на входах-выходах систолического массива, что критично для эффективности нейросетевых вычислений.

Текущая реализация в ядре mrv_1f64_core

Базовые регистры D-mode (dcsr, dpc, dscratch0/1) полностью реализованы и протестированы. Реализована поддержка инструкции dret. Интеграция с обработкой ebreak позволяет перенаправлять исключения в D-mode при активации соответствующих битов в dcsr.ebreak. Для отладки в многопоточных сценариях добавлена логика обработки немаскируемых прерываний (NMI) через бит nmip в dcsr.

УДК 004.4'233

Реализация RISC-V Debug SPEC 1.0 в отладчике GDB

Тарасов Ю. В.[1,2]
[1] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*
[2] *ООО «Синтакор» 123022, г. Москва, ул. Рочдельская, 15, стр. 11*
yuly.tarasov@syntacore.com

В работе рассматривается проблема реализации новой спецификации внешней отладки для расширяемой архитектуры RISC-V. Цель исследования заключалась в реализации взаимодействия отладчика с отладочными триггерами. В ходе работы реализованы соответствующие компоненты отладчика GDB, результаты были вынесены на обзор в репозитории с открытым исходным кодом и сейчас используются в индустрии.
Ключевые слова: GDB; RISC-V; отладка; портирование отладчика.

RISC-V представляет собой открытую и расширяемую [1] архитектуру процессора, основанную на концепции RISC [2] и разработанную с целью обеспечить эффективное и гибкое выполнение инструкций. Одной из ключевых особенностей RISC-V является его модульность и расширяемость. Архитектура разделена на несколько стандартных базовых наборов инструкций [3], таких как RV32I (32-битный набор инструкций) и RV64I (64-битный набор инструкций). В связи с растущим интересом к данной архитектуре возникает необходимость в реализации средств разработки. В рамках этой задачи комитет по стандартизации RISC-V работает над спецификацией поддержки внешней отладки (RISC-V External Debug Support).

Спецификация поддержки отладки описывает по большей части взаимодействие с внешним отладчиком, но самостоятельная отладка также возможна. Одним из важнейших расширений для отладки является расширение Sdtrig, которое входит в спецификацию и позволяет устанавливать точки останова с помощью триггеров.

Спецификация определяет 15 типов триггеров. Для установки точек останова и наблюдения используются триггеры mcontrol и mcontrol6.

Конфигурация триггеров, указанных в спецификации на отладочную подсистему, доступна с помощью CSR-регистров, которые доступны только в привилегированных режимах. По этой причине невозможно реализовать поддержку аппаратных точек останова только с помощью GDB [4], так как GDB работает в непривилегированном режиме. Это ограничение обходится передачей управления операционной системе с помощью системного вызова. Когда триггер срабатывает, возникает прерывание, управление передается операционной системе, которая посылает сигнал GDB о том, что исполнение приостановилось.

В ходе выполнения этой работы была добавлена поддержка аппаратных точек останова для отладчика, взаимодействующего с операционной системой Linux через интерфейс ptrace и добавлен обработчик сигнала, возникающего при срабатывании точки останова, для того чтобы в этот момент отладчик прерывал исполнение пользовательской программы по этому сигналу.

Поддержаны команды hbreak, watch, rwatch и awatch, show remote hardware-watchpoint-limit и show remote hardware-breakpoint-limit, которые устанавливают аппаратные точки останова и наблюдения или показывают текущее доступное количество точек наблюдения и останова соответственно.

В ходе работы было реализовано взаимодействие отладчика GDB с операционной системой Linux для предоставления пользовательского интерфейса аппаратных точек останова. Была выполнена реализация новой спецификации внешней отладки для 64-битной архитектуры RISC-V. Тестирование производилось с помощью эмулятора QEMU с поддержкой расширения Sdtrig спецификации 1.0. Исходный код был выложен в открытый доступ на платформе Github [5], а также послан для рецензирования в почтовую рассылку отладчика GDB [6]. Результат представлен на заседании рабочей группы RISC-V по отладке. В настоящее время результаты работы активно используются open source сообществом.

Литература

1. Asanović K, Patterson D.A. Instruction sets should be free: The case for RISC-V. EECS Department, University of California, Berkeley, Tech. Rep. UCB/EECS-2014-146. 2014 Aug 6.
2. Aletan S.O. An overview of RISC architecture. InProceedings of the 1992 ACM/SIGAPP Symposium on Applied computing: technological challenges of the 1990's 1992 Apr 1. P. 11–20.
3. Waterman A., Lee Y., Patterson D., Asanovic K., level Isa VI, Waterman A., Lee Y., Patterson D. The RISCV instruction set manual. Volume I: User-Level ISA', version. 2014 Apr;2.
4. Stallman R., Pesch R., Shebs S. Debugging with GDB. Free Software Foundation, 1988. 675.
5. GitHub — syntacore/riscv-binutils-gdb at syntacore-debug-1.0-PoC. URL: https://github.com/syntacore/riscv-binutils-gdb/tree/syntacore-debug-1.0-PoC (дата обращения: 07.11.2023).
6. [PATCH] [RFC] Add basic support for HW breakpoints/watchpoints with RISC-V target — MARC. URL: https://marc.info/?l=gdb-patches&m=166983239103609 (дата обращения: 07.11.2023).

УДК 004.031.6

Экспериментальное исследование SoC Cheshire: методика и результаты

Матюхин А. В., Примаков Е. В.
Научно-исследовательская лаборатория энергоэффективных систем на кристалле, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
DeSauzzz@yandex.ru

Приведена методика использования системы сборки SoC Cheshire для ее использования в образовательных целях. Предложены рекомендации по прототипированию на неподдерживаемые платы FPGA, а также показаны результаты использования системы на кристалле на плате KC705 с заменой процессорного ядра CVA6 на MRV1F.
Ключевые слова: SoC Cheshire; FPGA; CVA6; MRV1F.

В современном мире технологий, где устройства становятся все более компактными и многофункциональными, ключевую роль играют системы на кристалле (SoC, System on Chip). Эти интегральные схемы объединяют на одном чипе множество компонентов, таких как процессор, графический ускоритель, модули памяти, беспроводные интерфейсы и другие элементы, что делает их незаменимыми в разработке устройств самого разного спектра применения.

Базовым принципам работы с системами на кристалле можно научиться благодаря наличию некоторых из них в открытом доступе. Одной из таких систем на кристалле является Cheshire, предоставляющий удобную конфигурируемую систему сборки, которую при необходимости можно адаптировать под любую из плат FPGA, имеющую достаточное количество ресурсов утилизации. Все это делает SoC Cheshire отличным решением для образовательных целей, несущих в себе задачу продемонстрировать принцип работы современных систем на кристалле.

В процессе выполнения данной работы подробно рассмотрена система сборки SoC Cheshire, а также предложены рекомендации по ее модификации для прототипирования на неподдерживаемые платы FPGA. Продемонстрированы пример сборки системы на кристалле вокруг ядра CVA6, а также дальнейшая замена CVA6 на ядро MRV1F с последующей сборкой уже вокруг нового процессорного ядра. Приведены результаты прохождения coremark при сборке SoC Cheshire на плате KC705 вокруг процессорного ядра MRV1F.

Результатом выполнения данной работы является полностью функционирующий прототип системы на кристалле, собранный на неподдерживаемой ранее плате KC705 вокруг процессорного ядра MRV1F. После анализа полученных результатов сформулированы рекомендации по использованию и видоизменению системы сборки SoC Cheshire.

Литература

1. URL: https://docs.amd.com/v/u/en-US/ug810_KC705_Eval_Bd (дата обращения: 10.12.2024).

2. URL: https://docs.amd.com/v/u/en-US/ug883_K7_KC705_Eval_Kit (дата обращения: 10.12.2024).
3. URL: https://docs.amd.com/v/u/en-US/ug886-ams101-eval-card (дата обращения: 12.12.2024).
4. URL: https://github.com/pulp-platform/cheshire (дата обращения: 09.11.2024).

УДК 004.453

Поддержка архитектуры RISC-V в упаковщике исполняемых файлов UPX

Храповицкий Т. А.[1], Иртегов Д. В.[1], Власов А. А.[1,2]
[1] Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
[2] Институт автоматики и электрометрии СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

В UPX добавлена поддержка упаковки 64-битных программ для архитектуры RISC-V в ОС Linux. Реализован загрузчик упакованного исполняемого файла на базе ассемблерного кода для архитектуры AMD64. Сначала ассемблерные инструкции AMD64 были заменены на аналогичные инструкции RISC-V, а затем за счет оптимизаций размер загрузчика был уменьшен.
Ключевые слова: RISC-V; UPX; Linux; ассемблер; оптимизация; ELF.

UPX — популярный упаковщик исполняемых файлов с открытым исходным кодом. Он получает на вход файл программы и генерирует файл меньшего размера, но обладающий тем же функционалом. UPX позволяет сэкономить дисковое пространство, ускорить загрузку файла по сети, а также загрузку с диска в память. При запуске упакованного файла сначала исполняется его загрузчик: он распаковывает сжатую оригинальную программу в память, подключает нужные библиотеки и передает на нее управление.

UPX не поддерживает открытую архитектуру RISC-V. Добавив эту поддержку, мы улучшим состояние программной инфраструктуры этой платформы. В результате работы была реализована поддержка 64-битных программ формата ELF для архитектуры RISC-V и операционных систем семейства Linux.

Основная часть работы состояла в написании загрузчика для упакованного файла. За основу был взят существующий загрузчик для AMD64. Его исходный код написан на ассемблере и Си. Чтобы повторить существующий функционал для загрузчика RISC-V, каждая инструкция в ассемблерных файлах была по возможности заменена на одну или несколько аналогичных инструкций RISC-V. Это позволило достаточно быстро получить идентично работающую программу, однако написанный код получился не оптимальным с точки зрения размера.

Поскольку основная задача UPX — уменьшение размера программ, полученный код загрузчика потребовалось оптимизировать. В результате размер загрузчика и, следовательно, упакованного файла был уменьшен. Большинство оптимизаций связаны с различиями наборов инструкций AMD64 и RISC-V.

Часть загрузчика упакованного файла тоже хранится в сжатом виде и распаковывается при запуске. Если в ней будут повторяться длинные последовательности байтов, кодирующих инструкции, алгоритм сжатия сможет значительно уменьшить размер загрузчика. На этом основывается еще одна группа оптимизаций.

Механизм релаксаций RISC-V позволяет уменьшить размер кода на этапе компоновки. UPX использует собственный компоновщик для упакованных файлов, и потому логику релаксаций для RISC-V пришлось реализовать самостоятельно.

RISC-V — модульная архитектура. Помимо базового набора команд процессора существуют различные расширения. Чтобы UPX поддерживал как можно больше устройств, в загрузчике были использованы только базовые инструкции. Однако, если программа на входе уже использует сжатые инструкции из расширения «C», оптимально их использовать также и в загрузчике. Поэтому для таких файлов был создан отдельный загрузчик, и он получился значительно меньше старого.

УДК 004.45

Оценка функциональности современных инструментов контейнерной оркестрации на процессорной архитектуре RISC-V

Черепанов Н. И., Ребдев П. А., Чистяков В. М., Мадьяров Г. С., Степина Н. О.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б

Работа посвящена исследованию современных инструментов контейнерной оркестрации K8s, K3s и Docker Swarm на архитектуре RISC-V. Целью работы является оценка производительности и функциональности оркестраторов при исполнении приложений, построенных по принципам микросервисных архитектур. В статье представлены результаты тестирования производительности и анализ выявленных проблем.
Ключевые слова: RISC-V; аппаратное обеспечение; микросервисы; портирование; оркестраторы; тестирование.

Введение

Переход на открытую процессорную архитектуру RISC-V открывает новые перспективы для развития вычислительных систем, однако ставит перед разработчиками комплекс новых задач, одной из которых является адаптация современных инструментов оркестрации контейнеров, которые стали неотъемлемой частью микросервисных приложений. Актуальность работы обусловлена стремительным распространением RISC-V-архитектур в различных областях — от встраиваемых систем до серверных решений. При этом отсутствие полноценной поддержки современных инструментов DevOps создает существенные барьеры для внедрения этих технологий в промышленные решения [1].

Постановка задачи

Основная задача данного исследования заключается в комплексном анализе проблем и ограничений, возникающих при адаптации ключевых оркестраторов Kubernetes, K3s и Docker Swarm для RISC-V-архитектуры, а также в выявлении перспективных направлений для развития экосистемы:

- анализ совместимости существующих систем оркестрации с процессорной архитектурой RISC-V;
- выявление технических ограничений и проблем портирования;
- оценка производительности и функциональности доступных решений;
- определение ключевых направлений для развития инструментария.

Kubernetes

Инструмент Kubernetes, являясь промышленным стандартом в области оркестрации контейнерных workloads в enterprise-средах, сталкивается с фундаментальными проблемами совместимости на RISC-V из-за отсутствия официальной поддержки в базовых компонентах и скриптах сборки. Основные трудности связаны с несовместимостью системы сборки и конфликтами версий cgroups, что особенно заметно при попытках запуска даже портированных старых версий [2].

K3s

Утилита K3s, как легковесная альтернатива инструмента Kubernetes, демонстрирует лучшие перспективы для RISC-V благодаря своей модульной архитектуре и адаптивности. Однако даже этот оркестратор требует доработки инструментов мониторинга и дополнительной оптимизации компонентов контроля ресурсов для полной поддержки RISC-V-архитектуры [2].

Docker Swarm

Docker Swarm, несмотря на кажущуюся простоту развертывания, выявляет серьезные проблемы с производительностью и масштабируемостью на RISC-V-архитектуре. Хотя данный инструмент технически работает, тесты показывают его значительное отставание по скорости обработки контейнеров по сравнению с K3s. При этом Docker Swarm сохраняет преимущества в простоте начальной настройки и может быть временным решением для небольших проектов [3].

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует, что современные оркестраторы контейнеров сталкиваются с серьезными вызовами при адаптации к архитектуре RISC-V. Kubernetes, требует значительных доработок для полноценной работы. Утилита K3s, как наиболее перспективное решение, уже сегодня может использоваться в RISC-V-средах, но нуждается в развитии инструментов мониторинга. Утилита K3s предпочтительна для сложных сценариев благодаря совместимости с инструментом Kubernetes и оптимизации ресурсов. Фреймворк Docker Swarm уступает в производительности и масштабируемости в 16 раз (утилита K3s выполняет 2,996 итераций в секунду на плате Lichee Pi 4A, в то время как фреймворк Docker Swarm — 188), но подходит для небольших проектов.

Литература

1. Шеремет С. С., Мадьяров Г. С., Никифоров И. В., Степина Н. О. Система резервного восстановления программной инфраструктуры на экспериментальном стенде с RISC-V // Современные технологии в теории и практике программирования: Сборник материалов научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 23–24 апреля 2025 года. — Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. — С. 357–359. EDN RUMYOC.
2. Baier J., White J. Getting Started with Kubernetes: Extend YourContainerization Strategy by Orchestrating and Managing Large-ScaleContainer Deployments. Packt Publishing Ltd, 2018.
3. Venkat M. Comparative Analysis of Container Orchestration Platforms: Kubernetes vs. Docker Swarm. International Journal of Scientific Research in Science and Technology, 2024. Vol. 11. P. 526–543. 202410.32628/IJSRST24105254.

УДК 004.457

Уменьшение времени сборки образов в Yocto Project за счет модификации взаимодействия с кеш-зеркалами

Денисова О. К., Тиняков С. А., Гаврилов А. В., к. т. н., Заславский М. М.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
denisova.olga.k@gmail.com

В данной статье описываются подходы, которые ускоряют сборку дистрибутивов Linux с помощью Yocto Project, устраняя несколько узких мест: избыточные запросы при поиске кеш-файлов решаются за счет внедрения индекс-файлов, а наличие нерабочих кеш-зеркал устраняется с помощью фильтрации. Результаты оптимизации, полученные на одной вычислительной машине, при наличии актуального кеша на 53 кеш-зеркалах показали уменьшение времени сборки образа в пять раз, наличие недоступных кеш-зеркал перестало влиять на время проверки, и общее время сборки при наличии 50 недоступных кеш-зеркал сократилось в 4,5 раза.

Ключевые слова: Yocto Project; кеш-зеркала; ускорение сборки; индекс-файл; проверка доступности.

Целью данного исследования является ускорение процесса сборки образа дистрибутива в Yocto Project. Объектом исследования является Yocto Project, а предметом — процесс сборки образа операционной системы.

В ходе анализа процесса сборки [4, 5, 6] были выявлены несколько узких мест, которые негативно влияют на время сборки:

- процесс проверки доступности (поиска) кешированных артефактов [7, 8, 9]: в текущем алгоритме поиска кешированных артефактов (кеш-файлов) отсутствует информация о том, как кеш-файлы распределены по кеш-зеркалам. В результате для каждого кеш-файла отправляются запросы на все указанные в конфигурации кеш-зеркала. Это приводит к избыточным запросам и увеличению времени сборки. Алгоритм имеет сложность $O(n \cdot m)$, где n — количество задач, а m — количество зеркал. Такое поведение особенно критично при большом количестве зеркал, так как, как правило, количество задач при сборке достигает тысяч, то есть каждое указанное в конфигурации зеркало увеличивает количество запросов на несколько тысяч;
- нерабочие кеш-зеркала: наличие нерабочих кеш-зеркал в конфигурации также увеличивает время сборки, так как система отправляет запросы на скачивание кеш-файлов каждому кеш-зеркалу и ожидает ответа перед переходом к следующему. Поскольку таких запросов генерируется тысячи — по одному для каждой задачи и каждого указанного кеш-зеркала,ожидание отклика от нерабочих кеш-зеркал заметно увеличивает общую продолжительность выполнения этапов поиска и скачивания кеш-файлов.

Для решения выявленных проблем предложены следующие подходы:

- ускорение проверки доступности кешированных артефактов: переработан алгоритм поиска кеш-файлов. В новом алгоритме добавлена

предварительная стадия, на которой к каждому зеркалу отправляется запрос на скачивание индекс-файла. Индекс-файл представляет собой структурированный набор данных, содержащий актуальную информацию о наличии и расположении кеш-файлов на сервере. После анализа индекс-файла кеш-файлы загружаются непосредственно с соответствующего зеркала, что минимизирует избыточные запросы и сокращает время сборки. Сложность нового алгоритма составляет O(n), где n — количество задач;

- автоматическое создание индекс-файла: для обеспечения актуальности индекс-файла добавлен этап его автоматической генерации в конце каждой сборки. Такой подход гарантирует, что индекс-файл соответствует текущему состоянию файловой системы. Более того, так как индекс-файл охватывает данные о кеш-файлах не только от последней сборки, но и от более ранних, это значительно повышает его применимость на последующих сборках;
- фильтрация кеш-зеркал: введена процедура фильтрации кеш-зеркал, которая позволяет исключать из списка нерабочие или недоступные зеркала. Это достигается путем предварительной проверки доступности каждого зеркала перед началом процесса сборки. Таким образом, система избегает ненужных задержек, связанных с ожиданием ответа от нерабочих кеш-зеркал, что уменьшает общее время сборки.

Для систематического анализа и оценки эффективности внедренных улучшений был создан инструмент, позволяющий запускать ряд экспериментов с различным количеством поднятых кеш-зеркал, с его помощью были проведены измерения временных показателей:

- время сборки образа стало независимым от количества указанных в конфигурации кеш-зеркал при наличии полностью актуального кеша. Это позволило сократить время сборки образа при 53 кеш-зеркалах в пять раз (с 19 минут до 3,82 минуты);
- благодаря добавлению этапа фильтрации кеш-зеркал была достигнута независимость времени поиска кеш-файлов на кеш-зеркалах от количества нерабочих кеш-зеркал.

Литература

1. The Yocto Project [Электронный ресурс]. — URL: https://www.yoctoproject.org (дата обращения: 14.04.2025).
2. Yocto Project Documentation [Электронный ресурс]. — URL: https://docs.yoctoproject.org/index.html (дата обращения: 18.04.2025).
3. BitBake User Manual [Электронный ресурс]. — URL: https://docs.yoctoproject.org/bitbake (дата обращения: 22.04.2025).
4. Yocto Project Git Repositories [Электронный ресурс]. — URL: https://git.yoctoproject.org (дата обращения: 08.04.2025).
5. Salvador O., Angolini D. Embedded Linux Development with Yocto Project [Электронный ресурс]. — URL: https://www.programmer-books.com/wp-content/uploads/2019/12/Embedded-Linux-Development-with-Yocto-Project.pdf (дата обращения: 11.04.2025).

6. Мамчур М. В. Создание Linux дистрибутива на базе Yocto Project [Электронный ресурс] // Научный аспект, 2024. — № 3 (25). — С. 19–25. — URL: https://na-journal.ru/pdf/nauchnyi_aspekt_3-2024_t25_web.pdf#page=19 (дата обращения: 10.04.2025).
7. Yocto Project. Setscene Tasks and Shared State [Электронный ресурс] // Yocto Project Documentation. — URL: https://docs.yoctoproject.org/3.1.8/overview-manual/overview-manual-concepts.html#setscene-tasks-and-shared-state (дата обращения: 25.05.2025).
8. Flaminio A. Embedded Linux Distro Development with the Yocto Project [Электронный ресурс]. Master's Thesis. Politecnico di Torino, 2018. URL: https://webthesis.biblio.polito.it/secure/9085/1/tesi.pdf (дата обращения: 12.04.2025).
9. Dang M. H. Development of Linux Distribution Using Yocto Project [Электронный ресурс]. — Vaasan ammattikorkeakoulu, University of Applied Sciences, 2022. — URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/746135/Development%20of%20Linux%20Distribution%20using%20Yocto%20Project.pdf?sequence=2 (дата обращения: 10.04.2025).
10. Docker Documentation [Электронный ресурс]. — URL: https://docs.docker.com (дата обращения: 24.04.2025).

УДК 004.416.6

Раскрутка доверенных дистрибутивов Linux

Фролов Т. С.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
tima1911@yandex.ru

Рассматриваются проблемы и предлагается решение, подтвержденное экспериментом, для проблемы сборки дистрибутива GNU/Linux доверенным компилятором. Описываются инженерные решения, необходимые владельцу доверенного компилятора на основе GCC/musl, для создания доверенного дистрибутива.

Ключевые слова: bootstrappable builds; trusted computing; Yocto; двойная раздельная компиляция.

В 1984 году Кен Томпсон популяризировал идею о том, что отсутствие уязвимостей в исходном коде программы не гарантирует отсутствие уязвимостей в скомпилированном приложении, поскольку компилятор может намеренно вставлять такие уязвимости [1]. Более того, им был проведен эксперимент по внедрению такого компилятора внутри Unix Support Group at Bell Labs [2].

Как следствие продемонстрированной проблемы, появились исследования, посвященные созданию доверенных компиляторов и решению задачи проверки существующих компиляторов и дистрибутивов, например, посредством двойной раздельной компиляции [3].

Из всех проектов, созданных в целях раскрутки GNU/Linux-окружения с использованием минимума бинарного кода, ближе всего к этой цели находится live-boostrap [4] — он начинает работу с ядра builder-hex0, размер которого менее 512 байт, и в итоге собирает окружение, основанное на musl libc, в котором есть gcc 13.3, binutils 2.41 и многое другое. Проектов, которые занимаются раскруткой полноценных GNU/Linux-дистрибутивов, пока не появилось.

Одной из популярных систем сборки GNU/Linux-дистрибутивов является Yocto [5]. Технические требования Yocto не позволяют собрать дистрибутив на основе компилятора, порождаемого live-bootstrap. При первичном изучении основной проблемой кажется musl libc, поскольку Yocto требуется окружение на glibc. Однако процесс получения функционального работоспособного дистрибутива оказался более трудоемким из-за несовершенства инструментария.

В данной работе рассматриваются проблемы и предлагается решение, подтвержденное экспериментом, для проблемы сборки дистрибутива GNU/Linux доверенным компилятором. Работающее решение доступно в открытом репозитории [6].

Полученные результаты могут использоваться при создании стенда двойной раздельной компиляции в целях проверки существующих GNU/Linux-дистрибутивов на наличие поведения, не заданного их исходным кодом (включая код компилятора).

Литература

1. Thompson Ken. Reflections on trusting trust // Commun. ACM, 1984. Vol. 27. № 8. P. 761–763. URL: https://doi.org/10.1145/358198.358210 (дата обращения: 14 апреля 2025 г.).
2. Li Yifeng. Ken Thompson Really Did Launch His ”Trusting Trust” Trojan Attack in Real Life. URL: https://niconiconi.neocities.org/p osts/ken-thompson-really-did-launch-his-trusting-trust-tro jan-attack-in-real-life (дата обращения: 14 апреля 2025 г.).
3. David A. Wheeler. Fully Countering Trusting Trust through Diverse Double-Compiling. URL: https://arxiv.org/abs/1004.5534 (дата обращения: 14 апреля 2025 г.).
4. live-bootstrap. URL: https://github.com/fosslinux/live-bootstrap (дата обращения: 14 апреля 2025 г.).
5. Yocto Project. URL: https://docs.yoctoproject.org/index.html (дата обращения: 14 апреля 2025 г.).
6. yocto-bootstrap. URL: https://github.com/TimaFrolov/yocto-bootstrap (дата обращения: 14 апреля 2025 г.).

УДК 004.451.34

Исследование проблем алгоритмов блочной компрессии в ядре Linux

Сичкар Г. К., Кутуев В. А., Васенина А. И.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
georgy.sichkar@yandex.ru

Проведен анализ существующих решений для сжатия данных без потерь на уровне блочных устройств. Выявлены ключевые сложности блочной компрессии. Разработано блочное устройство с модульной архитектурой для тестирования алгоритмов компрессии без потерь на базе ядра Linux.
Ключевые слова: хранение данных; сжатие данных без потерь.

Из-за постоянного роста объема обрабатываемых данных их эффективное хранение стало неотъемлемой частью современных систем хранения данных (СХД). Возможным решением для оптимизации объема хранимых данных является использование алгоритмов компрессии без потерь.

На данный момент большинство СХД реализуются на базе ядра Linux и имеют блочный интерфейс взаимодействия. Это означает, что любые манипуляции с данными происходят блоками равного размера. Вследствие этого при разработке такого устройства с компрессией возникает ряд трудностей:

- невозможность статически, без применения сжатия, определить размер уплотненных данных;
- из-за высоких стандартов качества, предъявляемых к СХД, пользовательские данные должны сохраняться без потери качества, а доступ к ним должен осуществляться достаточно быстро;
- инфраструктурные ограничения внутри самого ядра Linux — блочный интерфейс, выделение памяти.

Были рассмотрены наиболее популярные решения, поддерживающие блочную компрессию: файловая система ZFS, а также модуль ядра dm-vdo [1]. В этих реализациях используются алгоритмы сжатия LZ4 [2] и Zstandard [3]. Кроме того, и ZFS, и dm-vdo используют собственные реализации сохранения соответствия между исходными и сжатыми данными.

Для того чтобы иметь возможность на практике исследовать эффективность тех или иных инженерных решений, было разработано отдельное блочное устройство [4] с модульной архитектурой, позволяющей сравнивать различные реализации одних и тех же компонент. Основной упор был сделан на возможности заменять алгоритмы компрессии, а также комбинировать их с разными вариантами отображения исходных данных в сжатые. Также был поддержан сбор статистических данных: число сжатых блоков, коэффициент компрессии, затраченное время.

Тестирование производительности и корректности производилось на корпусе Silesia [5].

В ходе реализации устройства был выявлен ряд характерных для блочной компрессии проблем:

- необходимость использования дополнительного буфера, в который производится компрессия данных. Кроме того, этот буфер должен быть

непрерывным и может по размеру превышать буфер с исходными данными из-за специфики алгоритмов сжатия. При этом выделение таких буферов достаточно большого размера в ядре может быть проблемой;

- появляются дополнительные метаданные, которые необходимо сохранять для корректной работы системы, например размеры данных после сжатия;
- также важна гранулярность блоков, к которым применяется сжатие, так как для получения части оригинальных данных требуется произвести полную декомпрессию, что может сильно повлиять на производительность;
- процесс уплотнения: запись на нижележащее устройство, которое осуществляет хранение, происходит блоками, из-за чего сжатые данные необходимо уплотнять, так как их размер может быть не кратен поддерживаемому размеру блока.

Литература

1. dm-vdo documentation. — URL: https://docs.kernel.org/admin-guide/device-mapper/vdo.html (дата обращения: 2025.04.14).
2. lz4 documentation. — URL: https://github.com/lz4/lz4 (дата обращения: 2025.04.14).
3. Zstandard (RFC8878). — URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8878 (дата обращения: 2025.04.14).
4. bio-comp-dev. — URL: https://github.com/ItIsMrLaG/bio-comp-dev (дата обращения: 2025.04.14).
5. Silesia dataset. — URL: http://sun.aei.polsl.pl/~sdeor/index.php?page=silesia (дата обращения: 2025.04.14).

УДК 004.451.51

Исследование реализаций лог-структурированного блочного устройства в ядре Linux

Гавриленко М., Васенина А. И.
Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9
qrutyq@gmail.com

Реализовано лог-структурированное блочное устройство в ядре Linux. На основе замеров производительности были проанализированы реализации на основе различных структур данных и выявлены особенности их применения в данном подходе.

Ключевые слова: лог-структурированное хранение; блочные устройства; хранение данных; ядро Linux; СХД.

Современные системы хранения данных предъявляют высокие требования к производительности операций ввода-вывода на накопителях. Одной из ключевых проблем является снижение производительности при выполнении большого числа случайных операций записи, что приводит к увеличению времени доступа к данным.

Для решения этой проблемы предлагается применение лог-структурированного подхода, который преобразует случайные записи в последовательные, вследствие чего повышается производительность [2, 3]. Лог-структурированный подход известен давно, однако до сих пор остаются нерешенными вопросы, касающиеся его оптимальной реализации и места интеграции в систему [5, 7]. Для определения наиболее эффективного способа его внедрения необходимы дальнейшие исследования.

В рамках исследования путей интеграции и оценки эффективности лог-структурированного подхода на основе различных структур данных был реализован модуль ядра Linux, предоставляющий интерфейс виртуального блочного устройства с лог-структурированной адресацией. Входящие запросы записи поступают на виртуальное блочное устройство и перенаправляются на конечное блочное устройство, последовательно заполняя накопитель. Чтение осуществляется через таблицу блоков, которая заполняется при операции записи. Таблица хранения содержит данные о соотношении логических и физических адресов запросов. При реализации лог-структурированного подхода важно учитывать такие требования, как высокая скорость записи и чтения данных и минимизация времени доступа к данным.

Поскольку промышленные виртуальные блочные устройства функционируют в многопоточной среде ядра операционной системы, важным аспектом реализации является обеспечение корректного и эффективного конкурентного доступа к его внутренним структурам, прежде всего к таблице блоков. Обработка одновременных запросов требует применения механизмов синхронизации для предотвращения состояния гонки и обеспечения целостности данных. Выбор и реализация этих механизмов напрямую влияют не только на корректность работы, но и на масштабируемость и общую производительность устройства при высоких нагрузках. Учитывая, что системы хранения данных рассчитаны на максимальную производительность и низкие задержки, особое внимание было уделено исследованию

и применению неблокирующих (lock-free) алгоритмов синхронизации [6], которые позволяют избежать узких мест, связанных с традиционными блокировками.

Выбор структуры данных для хранения таблицы влияет на скорость поиска и обновления записей, что критично с точки зрения производительности. На текущем этапе работы была реализована базовая версия устройства, использующая синхронные реализации структур данных. В качестве структур данных были выбраны B+-дерево [1], хеш-таблица, список с пропусками и красно-черное дерево, обладающие оптимальными асимптотическими оценками сложности операций. Для большей гибкости виртуального блочного устройства была реализована обработка блоков разного размера и возможность добавления множественных пар «виртуальное блочное устройство — конечное блочное устройство».

В рамках данной работы было разработано базовое виртуальное блочное устройство с лог-структурированной адресацией. Был внедрен принцип лог-структурированности на основе различных структур данных с неблокирующей синхронизацией [6] и добавлен единый интерфейс взаимодействия со структурами данных. Производительность и корректность итогового блочного устройства были протестированы на сервере. Был проведен анализ производительности и выявлены особенности использования разных структур данных. С реализованной функциональностью можно ознакомиться на GitHub[1].

Литература

1. Curless B. CSE 326: Data Structures B-Trees and B+ Trees. (URL: https://courses.cs.washington.edu/courses/cse326/08sp/lectures/11-b-trees.pdf) (дата обращения: 26 декабря 2024 г.).
2. De Jonge W., Kaashoek M. F., Hsieh W. C. The logical disk: A new approach to improving file systems // Proceedings of the Fourteenth ACM Symposium on Operating Systems Principles, 1993.
3. Hu Y., Yang Q. DCD—disk caching disk: A new approach for boosting I/O performance // ACM SIGARCH Computer Architecture News, 1996. Vol. 24. № 2. P. 169–178.
4. Mohamed S. Sayed El. Analysis and Optimization of Storage IO in Distributed and Massive Parallel High Performance Systems. 2011. (URL: https://www2.informatik.uni-stuttgart.de/bibliothek/ftp/medoc.ustuttgart_fi/MSTR-3196/MSTR-3196.pdf) (дата обращения: 26 декабря 2024 г.).
5. Ousterhout J., Douglis F. Beating the I/O bottleneck: A case for log-structured file systems // ACM SIGOPS Operating Systems Review, 1989. Vol. 23. № 1. P. 11–28.
6. Xie Z., Cai Q., Jagadish H. V. et al. Parallelizing skip lists for in-memory multi-core database systems // 2017 IEEE 33rd International Conference on Data Engineering (ICDE). IEEE, 2017. P. 119–122.
7. Rosenblum M., Ousterhout J. K. The design and implementation of a log-structured file system // ACM Transactions on Computer Systems (TOCS), 1992. Vol. 10. № 1. P. 26–52.

[1] https://github.com/qrutyy/ls-bdd.

УДК 004.457

Организация межпроцессного взаимодействия через разделяемую память

Устюжанина М. А.[1,2], Шиповский В. А.[2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] ПАО «Сбербанк»
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32, корп. 1

Исследуются механизмы межпроцессного взаимодействия с фокусом на разделяемую память. Поднимаются вопросы скорости, безопасности синхронизации и сложности реализации механизмов. Проводится сравнение передачи данных через сокеты и через разделяемую память с использованием разных методов синхронизации: ipc-channel, futex, atomic-операции.
Ключевые слова: межпроцессное взаимодействие; сокет; разделяемая память.

В работе исследуется межпроцессное взаимодействие (Inter-Process Communication, IPC) — механизм обмена данными между изолированными процессами. Поскольку каждый процесс имеет собственное адресное пространство, для их взаимодействия требуются специальные механизмы. Это исследование актуально для задач, связанных с локальной передачей больших объемов данных, где эффективность межпроцессного взаимодействия существенно влияет на общую производительность системы.

Исследование сосредоточено на разделяемой памяти, поскольку теоретически данный подход позволяет минимизировать копирования через адресное пространство ядра, уменьшить задержки на переключение контекста и разгрузить процессор [1].

Проведено сравнение производительности передачи данных через сокеты и разделяемую память. В случае сокетов данные защищаются стандартными сетевыми протоколами, однако требуются два копирования: в пространство ядра и из него; что исключается при использовании разделяемой памяти. Таким образом, от одного копирования можно избавиться при разделении целевой области, но скопировать в нее данные все же придется.

Было выявлено, что использование разделяемой памяти по сравнению с сокетами обеспечивает тем большую пропускную способность, чем больше размер блока и частота передачи, хотя и сильно зависит от аппаратуры.

Применение разделяемой памяти сопряжено с рисками нарушения синхронизации, поэтому в работе детально исследуются методы защиты доступа, балансирующие между эффективностью и надежностью. Были измерены временные характеристики операций отправки/получения для ipc-channel, futex [2], atomic-операции и их комбинаций. Тестирование проводилось с использованием собственной cli-утилиты, которая позволяет запускать настраиваемые тесты на разных платформах.

В результате было разработано программное обеспечение с реализацией через сетевой сокет, сокет домена unix и разделяемую память и сформулированы

практические рекомендации по выбору наиболее безопасного и производительного подхода.

Литература

1. Bocharov A. Every request, every microsecond: scalable machine learning at Cloudflare. URL: https://blog.cloudflare.com/scalable-machine-learning-at-cloudflare.
2. Bos M. Chapter 8. Operating System Primitives. Linux. Futex // Rust Atomics and Locks. O'Reilly, 2023. URL: https://marabos.nl/atomics.

УДК 004.451.36

Обработка исключений режима безопасных вычислений платформы «Эльбрус»

Титов Е. М.[1,2], Ярапов Д. В.[2], Жмурин А. В.[2], к. т. н.
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «МЦСТ»
117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, 108

Разработан обработчик исключений режима безопасных вычислений (РБВ) платформы «Эльбрус» для обхода несовместимостей РБВ с существующими исходными текстами программ и сбора диагностической информации о местах потенциально небезопасной работы с памятью.
Ключевые слова: платформа «Эльбрус»; безопасность памяти; режим безопасных вычислений (РБВ); Linux.

Режим безопасных вычислений (РБВ) платформы «Эльбрус» представляет собой особый режим компиляции и исполнения программного обеспечения (ПО), написанного на языках C и C++. РБВ контролирует исполнение программ, не позволяя эксплуатировать уязвимости при некорректной работе с памятью. На архитектуре «Эльбрус» РБВ использует адресацию 128-битными дескрипторами, содержащими указатель на выделенный фрагмент памяти, размер фрагмента и смещение относительно его начала. Каждое слово (4 байта) данных маркируется аппаратными тегами.

Дескрипторы позволяют выполнять контроль обращений за границы объектов. Теги гарантируют целостность дескрипторов и запрещают использование неинициализированных данных. Дополнительные проверки защищают от потенциального неопределенного поведения и уязвимостей, связанных с небезопасной работой с памятью.

В силу особенностей РБВ к исходным текстам программ предъявляются более строгие требования по сравнению со стандартами языка C [1]. Например, над дескрипторами нельзя проводить побитовые операции для выравнивания обращений в память, числа нельзя переводить в адреса, невозможно адресовать один объект смещением относительно другого. При попытке исполнения несовместимой конструкции вырабатывается прерывание и программа завершается.

Из-за более строгих требований РБВ существующий код зачастую требует портирования. Портирование может потребовать изменения алгоритма работы программы. Если программа использует библиотеки, их также необходимо портировать.

В данной работе исследуется возможность программной обработки исключений РБВ для работы с несовместимым ПО в период его портирования, а также при сборе отладочной информации об участках, где возможна небезопасная работа с памятью во время функционирования программ.

В настоящее время существует четыре класса несовместимостей с РБВ:

1) использование неинициализированных данных арифметико-логической операцией. В данном случае достаточно инициализировать потенциально

доступные для операции неинициализированные слова нулем. Поведение программы в этом случае будет совпадать с таковым в обычном режиме, где на месте неинициализированных данных часто оказываются нули;

2) выход за границу объекта. Для обхода формируется корректно тегированный дескриптор, соответствующий целевому адресу с размером, соответствующим формату команды;
3) поврежденные теги дескриптора объекта. Причина — преобразование из целого в адрес или нарушение правил копирования дескриптора. Выбор из этих двух вариантов осуществляется при помощи внутренних тегов дескриптора и значения поля размера, после чего восстанавливаются корректные теги и значение дескриптора, соответствующего целевому адресу. При необходимости может быть вызван обработчик выхода за границу объекта;
4) поврежденные теги дескриптора функции. Это приводит к некорректному переключению дескрипторов модуля и решается восстановлением их корректных значений из таблицы дескрипторов модулей [2].

В обработчиках РБВ прерываний реализован сбор диагностической информации с возможностью вывода в журнал ядра и в стандартный поток ошибок. Также собирается статистика количества различных ситуаций, отображаемая в виде файла в sysfs.

Обработчики встроены в ядро Linux в виде модуля.

Функционал отлажен на тестах, имитирующих возможные реальные ситуации, и опробован на e2fsprogs — наборе утилит для работы с файловыми системами ext2, ext3 и ext4. Также было проведено тестирование на пакете SPEC INT 1995, 2000, 2006, в ходе которого обработчик исключений обеспечил корректное функционирование 7 из 15 несовместимых тестов.

Литература

1. Нейман-заде М. И., Королёв С. Д. Руководство по эффективному программированию на платформе «Эльбрус». Вып. 1.1 от 2021-05-12, HTML-версия. Глава 11. URL: http://mcst.ru/doc/elbrus_prog/html/chapter11.html (дата обращения: 27.02.2025).
2. Ким А. К., Перекатов В. И., Ермаков С. Г. Микропроцессоры и вычислительные комплексы семейства «Эльбрус». — СПб.: Питер, 2013. — 272 с.: ил.

УДК 004.438

Декларативное программирование в Rust: разработка библиотеки для упаковки и распаковки записей в плотный бинарный формат, сравнение с другими языками и анализ работы на различных архитектурах

Сперанская Я. А.
Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий,
Московский физико-технический институт
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 7
speranskaia.iaa@phystech.edu

Разработана библиотека для упаковки и распаковки записей в плотный бинарный формат. Выполнено сравнение с аналогичными решениями в языках C, Python. Проведен анализ производительности разработанной библиотеки на архитектурах x86 и RISC-V.
Ключевые слова: декларативное программирование; процедурный макрос.

Одной из актуальных задач в системном программировании является надежная и безопасная обработка бинарных данных. Это особенно важно при взаимодействии с периферийными устройствами, системными вызовами, сетевыми протоколами и встраиваемыми системами, где формат данных строго определен и битово задан.

Наиболее распространенный способ описания упакованных структур — использование языка C с атрибутом packed. Однако он имеет ряд существенных ограничений:

- корректно работает только на архитектурах с байтовой адресацией;
- чтение по невыровненному адресу вызывает неопределенное поведение;
- необходимо вручную контролировать байтовый порядок (endianness);

В Rust декларативный подход позволяет преодолеть эти ограничения за счет автоматической генерации кода с помощью derive-макросов [1]. Под декларативным программированием понимается стиль, при котором разработчик описывает, что должно быть сделано, вместо того чтобы указывать, как это реализовать [2]. Это снижает объем шаблонного кода, минимизируя вероятность ошибок при реализации стандартных операций над структурами. Код процедурных макросов анализирует структуру данных во время компиляции и создает соответствующие реализации. Данный подход широко применяется в популярных библиотеках, таких как serde (сериализация и десериализация данных) [3], clap (разбор аргументов командной строки) [4], thiserror (создание типов для ошибок) [5].

В ходе выполненной работы была создана библиотека на языке Rust, использующая декларативный подход к описанию бинарных структур. Основой системы является механизм процедурных макросов, генерирующих код сериализации и десериализации на этапе компиляции. Ключевые особенности библиотеки:

- учет порядка байтов и битов,
- аннотации #[attribute] для задания смещения и размера,
- поддержка вложенных структур и массивов,
- итерационные и модульные тесты,

- генерация документации при помощи cargo doc,
- автоматическое определение reserved-областей и контроль совместимости форматов.

Сравнение с аналогичными средствами в C, C++ и Java по критериям объема ручного кода, гибкости формата, безопасности и поддержки архитектур выявило значительные преимущества разработанной библиотеки на Rust. Для идентичной структуры tcp-пакета в Rust требуется всего 36 строк кода с использованием макроса #[derive(ByteForm)], тогда как в C для ручной сериализации необходимо 64 строки кода, а для битовых полей с __attribute__((packed)) — 43 строки, но с потерей переносимости. В C++ для сериализации с использованием библиотеки bitsery потребовалось 42 строки кода, а при использовании Boost.Endian — 37 строк. При этом только библиотека ByteForm предоставляет декларативный layout-контроль: позволяет явно задавать порядок байтов, смещения полей и отсутствие выравнивания — без ручных вычислений и unsafe-кода, чего не позволяют bitsery и Boost.Endian без дополнительных оберток или соглашений. В Java для сериализации с использованием ByteBuffer и ручного управления байтами необходимо 55 строк, а при использовании JBBP — 27 строк, однако при этом теряется типобезопасность, отсутствует интеграция с системой типов и возникают сложности со сложными типами. Только ByteForm обеспечивает compile-time гарантии корректности, полную интеграцию с системой типов и поддержку декларативных конструкций, что отсутствует в JBBP и аналогах. Тесты на архитектуре x86 и RISC-V подтвердили, что Rust обеспечивает строгую типобезопасность, автоматическую обработку байтового порядка через атрибуты и отсутствие ошибок памяти, в отличие от C, где переносимость и безопасность зависят от программиста. Таким образом, библиотека на Rust сочетает минимальный объем кода, высокую безопасность и кроссплатформенность, что делает ее оптимальной для низкоуровневой бинарной сериализации.

Литература

1. Rust Team. Macros in Rust [Электронный ресурс] // The Rust Programming Language. URL: https://doc.rust-lang.ru/book/ch19-06-macros.html (дата обращения: 06.04.2025).
2. Lloyd J.W. Practical Advtanages of Declarative Programming // GULP-PRODE (1), 1994. P. 18–30.
3. Serde: A serialization framework for Rust // GitHub: [Электронная платформа]. URL: https://github.com/serde-rs/serde (дата обращения: 06.04.2025).
4. Clap: A command-line argument parser for Rust // GitHub: [Электронная платформа]. URL: https://github.com/clap-rs/clap (дата обращения: 06.04.2025).
5. Thiserror: A derive macro for idiomatic error handling in Rust // GitHub: [Электронная платформа]. URL: https://github.com/dtolnay/thiserror (дата обращения: 06.04.2025).

УДК 621.3.049

Фазовращатели СВЧ-диапазона на основе векторных модуляторов

Балашов Е. В., к. т. н., Коротков А. С., д. т. н., Румянцев И. А., к. т. н.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
korotkov@spbstu.ru

Рассматриваются особенности построения приемо-передающих трактов с использованием пассивных и активных фазированных антенных решеток, место фазовращателей в приемо-передающем тракте, основные типы фазовращателей, преимущества фазовращателей на основе векторных модуляторов, опыт построения СВЧ-фазовращателей на основе векторных модуляторов в интегральном исполнении.
Ключевые слова: фазовращатель; векторный модулятор; интегральное исполнение; калибровка.

Радиолокационные станции на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР) обеспечивают многофункциональную работу с адаптацией к сложной помеховой обстановке. Используются АФАР, состоящие из сотен и тысяч приемо-передающих модулей [1]. Как передающий тракт, так и приемный тракт модуля включают фазовращатель и аттенюатор. Фазовращатель и аттенюатор изменяют фазу и амплитуду излучаемого и принимаемого высокочастотного сигнала, обеспечивая сканирование луча антенны и, как следствие, определяя разрешающую способность системы.

Проведена разработка векторного модулятора с цифровым управлением фазой и амплитудой СВЧ-сигнала, интегрирующего функции фазовращателя и аттенюатора. Разработаны и изготовлены кристаллы высокочастотного векторного модулятора в виде интегральной схемы на основе GaAs-технологии и устройства аналого-цифрового управления на основе Si МОП-технологии [2, 3]. Основным фактором, ограничивающим разрешение векторных модуляторов, являются ошибки установки фазы и амплитуды, возникающие из-за разброса технологических параметров при производстве интегральных схем. Для уменьшения ошибок разработана методика калибровки, которая позволяет определять управляющие напряжения (калибровочные коэффициенты), минимизирующие возникающие ошибки [4]. Калибровочные коэффициенты определяются в результате автоматизированных измерений параметров интегральной схемы высокочастотного векторного модулятора.

Литература

1. Rumyancev I. A., Korotkov A. S. Survey on Beamforming Techniques and Integrated Circuits for 5G Systems // Proc. IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), 2019. P. 76–80.
2. Балашов Е. В., Коротков А. С., Румянцев И. А. Высокочастотный векторный фазовращатель. Патент на изобретение № 2647217 от 14.03.2018.

3. Balashov E. V., Korotkov A. S., Rumyancev I. A. An unbalanced transformerless vector-sum phase shifter in 0.18 μM CMOS // Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development. Selected Articles of All Russia Science&Technology Conference MES-2016, Part III, Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2017. — № 3. P. 2–5.
4. Балашов Е. В., Коротков А. С., Румянцев И. А. Калибровка схем фазовращателей на основе векторного сложения сигналов // Известия вузов. Радиоэлектроника (Radioelectronics and Communications Systems), 2018. — Т. 61. — № 11. — С. 645–654.

УДК 621.375.4

Способы реализации широкополосных трансимпедансных усилителей на полупроводниковых технологиях

Коряковцев А. С., к. т. н., Коколов А. А., к. т. н.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
artem.s.koriakovtsev@tusur.ru

Широкополосные СВЧ трансимпедансные усилители являются важным блоком в волоконно-оптических системах передачи аналоговых и цифровых сигналов. Рассмотрены основные полупроводниковые технологии для разработки таких устройств, а также схемы реализации входных каскадов усилителей.
Ключевые слова: трансимпедансный усилитель; КМОП; СВЧ; оптические системы связи.

Широкополосные СВЧ трансимпедансные усилители (ТИУ) являются одним из важных блоков при построении волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) аналоговых и цифровых сигналов, которые используются в современных системах гражданского и специального назначения. Характеристики ТИУ во многом определяют такие важнейшие параметры оптических приемников, как чувствительность, скорость передачи данных, дальность связи, потребляемая мощность, габариты и масса, надежность и стоимость. Чтобы отвечать современным требованиям по скорости передачи данных, современные ВОСП постоянно развиваются: появляются новые стандарты связи (вплоть до 400 Гбит/с и выше), расширяется полоса пропускания одного оптического приемо-передающего канала (до нескольких десятков гигагерц), ужесточаются требования к характеристикам компонентов ВОСП, используются новые технологии изготовления ТИУ и других компонентов и т. п. С ростом требований к оптическим системам передачи растут требования, предъявляемые к комплексу характеристик трансимпедансных усилителей (рабочая полоса частот, коэффициент трансимпедансного усиления, входной шумовой ток, групповое время запаздывания, амплитуда выходного сигнала).

На сегодняшний день известно несколько основных технологий производства таких устройств: кремниевые КМОП и SiGe БиКМОП, а также A^3B^5 (GaAs, InP) техпроцессы. Наилучшими характеристиками обладают интегральные схемы (ИС) ТИУ на основе SiGe БиКМОП-технологии благодаря возможности применения СВЧ гетеробиполярных транзисторов с очень хорошими частотными свойствами.

Варианты решения задачи разработки схемы ИС ТИУ зависят от множества факторов: ширины полосы пропускания, типа сигнала (цифровой или аналоговый), вида модуляции, необходимости регулировки коэффициента трансимпедансного усиления и т. д. Существует большое количество схемных решения входных каскадов ИС ТИУ [1], но можно выделить следующие: 1) каскадное включение схем с общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС) с отрицательной обратной связью (ООС); 2) схема с ОИ с обратной связью; 3) инверторная схема; 4) регулируемый каскод; 5) схема распределенного усиления.

Литература

1. Коряковцев А. С. Автоматизированное проектирование и разработка интегральных трансимпедансных усилителей для быстродействующих оптических приемников: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Томск: ТУСУР, 2025. — 248 с.

УДК 621.3.049.779

Исследование и разработка топологии микросхем программно-определяемого радио-СВЧ-диапазона на одном кристалле

Сердюков В. В., Коротков К. С., Строганова Е. В., Пузановский К. В., Голан А. В., Никитин Д. Д.
Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149
serdyukov-vladimir1996@mail.ru

Проведено исследование возможности разработки микросхем ПОР СВЧ-диапазона на одном кристалле в целях внедрения в устройства связи. Микросхема позволит обрабатывать разные по характеристикам сигналы. Исследована возможность реализации супергетеродинного преобразования частоты с использованием ПЛИС.

Ключевые слова: ПОР; ПЛИС; супергетеродинное преобразование частоты; гетеродин; интегральные микросхемы; СВЧ.

На сегодняшний день перспективным направлением в отечественной микроэлектронной промышленности является миниатюризация существующих аппаратных комплексов. Подобные миниатюрные системы позволяют добиться следующих существенных преимуществ:

- применение микросхем в носимых устройствах;
- упрощение технологического процесса создания комплексных устройств;
- снижение стоимости производства.

Одним из сдерживающих факторов повсеместного использования программно-определяемого радио (ПОР) является сложность подобных устройств и их высокая стоимость. В работе предложена новая топология микросхемы подобного устройства, основанная на объединении существующих модульных решений: цифровых СВЧ-смесителей, аналого-цифровых преобразователей (АЦП), цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), синтезаторов частоты, используемых в программно-определяемом радио. Данная топология позволяет значительно уменьшить размеры конечного программно-аппаратного комплекса, что в конечном счете позволит использовать ПОР в носимых устройствах. Для реализации проекта был проведен ряд исследований, таких как:

- сравнительный анализ существующих на данный момент архитектур микросхем СВЧ-смесителей, АЦП и ЦАП, используемых в полноразмерных ПОР в целях выявления оптимальной топологии каждого элемента микросхемы;
- исследована возможность создания топологии микросхемы, содержащей цифровой СВЧ-смеситель, АЦП, ЦАП, синтезаторы частоты, СВЧ-переключатели и прочие элементы ПОР;
- исследованы различия технических процессов производства модулей существующих неинтегральных ПОР и возможность создания универсального технического процесса для создания ПОР на одной интегральной микросхеме.

Данные работы выполнялись специалистами физико-технического факультета ФГБОУ ВО «КубГУ». В результате была определена возможность создания

технического процесса для реализации топологии ПОР на одной интегральной микросхеме. При этом подобная система может быть изготовлена полностью из отечественных компонентов.

В состав ПОР входит цифровой СВЧ-смеситель для реализации супергетеродинного преобразования частоты СВЧ-сигнала, несколько АЦП для приема сигналов и несколько ЦАП для генерации сигналов произвольной формы.

Литература

1. Кувшинов О. А., Плохих О. В. Применение программно-определяемого радио в системах связи. Ural Radio Engineering Journal. 2022;6(2):140–159. DOI: 10.15826/urej.2022.6.2.002.
2. Николаев, А. В., Медоев В. Э. Выбор и обоснование SDR платформы для реализации модема станции спутниковой связи. Символ науки 1-2 (2020): 20-23.
3. Андросов А., Джуринский К. Герметичные свч-вводы для микроэлектроники. Электрические параметры и методика их измерения // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2013 № 5 с.84-91.
4. Терентьев А. А., Никулин С. М., Долинин В. Я., Куликов Д. С. Техника измерения S-параметров нелинейных СВЧ цепей в режиме большого сигнала.
5. Сорохтин, Е. М., Минеев, С. А. (2010). Распределенные программно-определяемые радиосистемы. Вестник Нижегородского университета им. НИ Лобачевского, (5-2), 383-388.

УДК 621.396.67

Структуры метаматериалов и их свойства

Бучинская Д. Д., Малкин А. И.
УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Разработаны структуры метаматериалов, предназначенных для применения в области СВЧ. Приведены характеристики электродинамических параметров структур, а также результаты испытаний на механическое и электромагнитное воздействие, полученные путем моделирования в соответствующем ПО.
Ключевые слова: метаматериалы; СВЧ.

На сегодняшний день метаматериалы представляют собой одну из наиболее актуальных и перспективных областей в развитии современных радиотехнических и СВЧ-систем. Под метаматериалами понимаются искусственно созданные композиты, структура которых позволяет добиваться необходимых для системы электродинамических параметров [1]. Также благодаря их регулируемому строению возможно обеспечить желательные для среды применения механические свойства.

В рамках разработки структур метаматериалов были спроектированы ячейки, определенные периодической геометрией разных типов (сота, спираль, цилиндр, пирамида). Различные способы сочетания вариантов построения топологии ячеек позволили добиться реализуемых в макромасштабе структур, обладающих свойствами, которые не могут быть воспроизводимы в естественных средах.

Дальнейшее моделирование структур производилось в ПО SolidWorks (анализ механических воздействий, рис. 1) и HFSS (анализ электромагнитных воздействий в различных диапазонах частот). В качестве материала такой структуры использовался разработанный композитный полимерный материал на основе АБС-пластика и наполнителей в виде углеродного волокна и магнетита [2], значения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей которых были использованы при моделировании. Приведены результаты моделирования, позволяющие делать выводы о параметрах данных топологий.

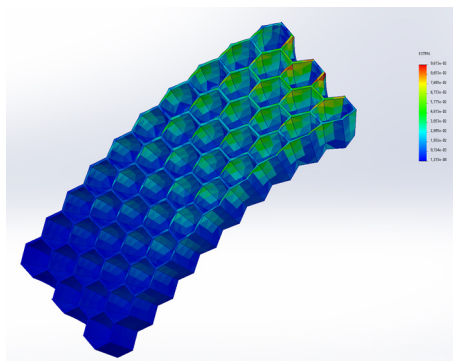


Рис. 1. Моделирование механического воздействия на одну из структур

Литература

1. Семченко Игорь, Хахомов Сергей, Самофалов Андрей, Балмаков Алексей. Метаматериалы и метаповерхности // Наука и инновации, 2020. — № 8 (210).
2. Electrophysical Characteristics of Acrylonitrile Butadiene Styrene Composites Filled with Magnetite and Carbon Fiber Fillers / Lebedeva E. A., Ivanova E. V., Trukhinov D. K. et al. // Polymers, 2024. Vol. 16. № 15. DOI: 10.3390/polym16152153.

УДК 621.382.3

Гетероструктуры InGaAlAs со стоп-слоями InGaP, изготовленные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подожках GaAs, для применений в СВЧ-микроэлектронике

Андрюшкин В. В.[1], к. т. н., Гладышев А. Г.[1], Егоров А. Ю.[1], д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН, Панасенко П. В.[2], д. т. н.
[1] ООО «Коннектор Оптикс»
194292, г. Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, 16, лит. Б
info@connector-optics.com
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В статье представлены результаты разработки технологии изготовления методом молекулярно-пучковой эпитаксии гетероструктур InGaAlAs со стоп-слоями InGaP на подложках GaAs диаметром до 150 мм, которые предназначены для производства СВЧ-транзисторов и СВЧ МИС X- и Ku-диапазонов, а также результаты приборной апробации.
Ключевые слова: молекулярно-пучковая эпитаксия; СВЧ-транзистор; гетероструктура.

Актуальность разработки гетероструктур InGaAlAs на подложках GaAs для производства СВЧ-транзисторов и СВЧ МИС X- и Ku-диапазонов и оптимизации их параметров обусловлена растущим производством электронных компонентов в России, а также общемировым трендом перехода на пластины большей площади для увеличения объема производства и снижения себестоимости конечных устройств [1].

В представленной работе рассмотрены особенности формирования стоп-слоев InGaP, согласованных по параметру кристаллической решетки с подложкой GaAs, в гетероструктурах InGaAlAs, изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на полупромышленной установке Riber49 и предназначенных для производства СВЧ-транзисторов X- и Ku-диапазонов частот на подложках GaAs диаметром до 150 мм, а также приведены результаты приборной апробации гетероструктур малошумящих транзисторов pHEMT, мощных транзисторов DpHEMT, гетеробиполярных транзисторов HBT, интегральных приборов, объединяющих в одной структуре полевой и биполярный транзисторы HEMT/HBT.

При разработке технологии и в процессе эпитаксиального роста с использованием системы дифракции отражения быстрых электронов было обнаружено, что при смене потоков элементов V группы фосфора на мышьяк во время изготовления гетероструктуры AlGaAs/InGaP/AlGaAs, согласованной по параметру кристаллической решетки с подложкой GaAs, возможно формирование двумерного слоя, содержащего квантовые точки (КТ) InGaPAs. При этом исследование методом фотолюминесценции показало, что спектр излучения формирующихся КТ InGaPAs для стоп-слоя InGaP толщиной 2–3 нм, используемого в pHEMT-гетероструктурах, в зависимости от температуры подложки (520–535 °C) и времени выдержки в потоке мышьяка (5–10 минут) лежит в спектральном диапазоне 950–980 нм.

В ходе исследования были отработаны подходы и предложены режимы эпитаксиального роста, подавляющие эффект формирования КТ, что повышает планарность гетерограниц и, как следствие, качество стоп-слоя InGaP в гетероструктуре СВЧ-транзисторов. Показано, что при увеличении температуры подложки до 550 °C во время смены потоков материалов V группы и выдержки слоя InGaP в потоке мышьяка в течение 3–4 минут картина дифракции отражения быстрых электронов меняется, а именно отсутствует уширение линейных рефлексов, характерное для формирования трехмерных КТ InGaPAs, что подтверждает формирование планарного стоп-слоя InGaP. Подобный режим также применим для стоп-слоев InGaP толщиной до 10 нм, используемых в гетероструктурах интегральных приборов HEMT/HBT.

При приборной апробации гетероструктур InGaAlAs со стоп-слоями InGaP на подложках GaAs диаметром до 150 мм было рассмотрено влияние химического состава канального слоя $In_xGa_{1-x}As$ на проводимость канального слоя в pHEMT-структурах. Показано, что уменьшение содержания индия в канальном слое InGaAs до 16 % в гетероструктуре DpHEMT для мощных транзисторов обеспечивает увеличение выходной мощности и пробивного напряжения сток — затвор в изготовленных приборах. Проведенная апробация также показала, что при создании гетероструктур HBT использование эмиттерных слоев на основе InGaP (по сравнению с AlGaAs) обеспечивает большее напряжение пробоя эмиттер — база, при этом для изготовления HBT-транзисторов, работающих на частотах свыше 30 ГГц, целесообразно использовать гетероструктуры HBT с эмиттерным слоем AlGaAs. Для гетероструктур, объединяющих в одной структуре полевой и биполярный транзисторы HEMT/HBT, было показано, что стоп-слой InGaP толщиной 10 нм обеспечивает наилучшую устойчивость к селективному травителю.

Исследование выполнено при финансовой поддержке субсидии Министерства промышленности и торговли № 020-11-2021-1162.

Литература

1. Gunter L. et al. The First 0.1 μm 6 // GaAs PHEMT MMIC process, CS MANTECH conference Digest, 2006. P. 23–26.

УДК 621.315.592

Металлоорганическая газофазная эпитаксия и характеризация III-N-гетероструктур для транзисторов с высокой подвижностью электронов

Артеев Д. С.[1,2], Сахаров А. В.[1,2], Николаев А. Е.[1,2], Заварин Е. Е.[1,2], Родин С. Н.[1], Лундин В. В.[1], Цацульников А. Ф.[1,2], д. ф.-м. н.

[1] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
ArteevDS@mail.ioffe.ru

[2] Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

В работе представлен опыт авторов по созданию технологии металлоорганической газофазной эпитаксии на установках семейства Dragon и применению оптических методов характеризации и контроля при производстве III-N-гетероструктур для транзисторов с высокой подвижностью электронов, включая AlGaN/GaN, InAlN/GaN и композитные InAlN/AlGaN/GaN со значением слоевого сопротивления R_S = 210–300 Ом/□.

Ключевые слова: нитрид галлия; гетероструктура; транзистор; металлоорганическая газофазная эпитаксия; *in situ*.

Нитрид галлия (GaN) представляет значительный интерес для мощной полупроводниковой электроники благодаря уникальной комбинации свойств: широкой запрещенной зоне (~3,4 эВ), высокой насыщенной скорости электронов (~$2{,}5 \cdot 10^7$ см/с [1]), большой пробивной напряженности электрического поля (>3 МВ/см [2]), хорошей химической и радиационной стойкости. В гетероструктурах на основе III-N-соединений разрыв вектора поляризации на гетерогранице индуцирует формирование двумерного электронного газа даже без использования дополнительного легирования. Двумерное ограничение носителей обеспечивает их подвижность, как правило, существенно превышающую подвижность носителей в объемном материале, что лежит в основе работы транзисторов с высокой подвижностью электронов.

Основным промышленным методом получения гетероструктур на основе III-N-соединений является металлоорганическая газофазная эпитаксия (МОГФЭ), при которой в результате пиролиза подаваемых в реактор газов-прекурсоров на поверхности подложки происходит осаждение слоев требуемых материалов. В нашей работе используются разработанные нами установки семейства Dragon с горизонтальным реактором и системой индукционного нагрева. Тщательная оптимизация конструкции реактора с применением методов численного моделирования совместно с компанией «СОФТ-ИМПАКТ» позволила достичь не только высоких скоростей роста слоев без ухудшения их кристаллического качества, но и снижения продолжительности переходных процессов, что существенно уменьшило общее время эпитаксиального процесса по сравнению с коммерческими установками [3], а применение оригинальной системы многозонной инжекции газов позволило добиться высокой однородности параметров по пластине.

Особое место в контроле и характеризации гетероструктур занимают оптические методы благодаря своему неразрушающему характеру, относительной простоте, быстроте и экономичности проведения измерений. Так, все установки Dragon оснащены системой *in situ* многолучевой лазерной рефлекто-/дефлектометрии Burattino, позволяющей контролировать скорости роста и толщины слоев. Кроме того, благодаря широкому расположению оптических преобразователей друг относительно друга возможно не только определение изгиба пластины и возникающих механических напряжений, но и с неплохой точностью реконструкция трехмерного профиля (формы) подложки [4] и оценка величин прогиба и коробления без дополнительных измерений. В качестве основного метода оперативной постростовой характеризации используется спектроскопия оптического отражения (OR), которая вкупе с расчетами методом матриц переноса позволяет быстро и с хорошей точностью определить состав и толщину барьерного слоя, а также общую толщину выращенной структуры. Так, например, расхождение значений толщины барьерного слоя, измеренных методом OR, с данными значительно более трудоемкой и дорогостоящей рентгеновской рефлектометрии (XRR) составляет не более 1 нм [5]. При этом время снятия спектра составляет ~1 с, что делает возможным измерение десятков, даже сотен точек на поверхности пластины и составление карт распределения параметров за разумное время.

На основе разработанной технологии МОГФЭ и методов контроля успешно освоены технологии гетероструктур для транзисторов, которые можно условно разделить на несколько типов:

- «стандартные» AlGaN/GaN-структуры с толщиной барьерного слоя 20–30 нм и мольной долей алюминия 20–30 % на подложках Al_2O_3, SiC и Si. Слоевое сопротивление канала таких структур типично составляет R_S = 280–300 Ом/□;
- AlGaN/GaN с повышенным содержанием алюминия (30–45 %) и более тонкими барьерными слоями со слоевым сопротивлением от R_S ~ 240 и ~220 Ом/□ на подложках Si и SiC соответственно;
- InAlN/GaN-структуры с R_S~210 Ом/□ на SiC;
- InAlN/AlGaN/GaN-структуры с тонким композитным барьерным слоем с R_S = 220–230 Ом/□.

Литература

1. Khurgin J., Ding Y.J., Jena D. Hot phonon effect on electron velocity saturation in GaN: A second look // Appl. Phys. Lett., 2007. Vol. 91. № 25. P. 252104.
2. Dmitriev V.A. et al. Electric breakdown in GaN p-n junctions // Appl. Phys. Lett., 1996. Vol. 68. № 2. P. 229–231.
3. Лундин В.В. и др. МОС-гидридная эпитаксия III—N светодиодных гетероструктур с малой длительностью технологического процесса // ПЖТФ. — Т. 41. — № 5. — С. 9–17.
4. Артеев Д.С. Реконструкция профиля поверхности по данным in-situ рефлектометрии: proof-of-concept моделирование // XXV Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. 27 ноября — 1 декабря 2023 года, Санкт-Петербург.
5. Arteev D.S. et al. Optical reflectance spectroscopy for barrier thickness measurement of AlGaN/GaN heterostructures: comparison with X-ray reflectometry // Saint Petersburg OPEN 2025, May, 20–23th, 2025.

УДК 621.375.026

Усилитель мощности с динамической модуляцией нагрузки

Филипюк И. А., Искаков Б. А., Туральчук П. А., к. ф.-м. н.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
iafilipiuk@etu.ru

В данной работе представлены результаты моделирования и измерений усилителя мощности с динамической модуляцией нагрузки на основе перестраиваемой выходной согласующей цепи с сегнетоэлектрическим конденсатором, рабочая частота которого — 2,5 ГГц.
Ключевые слова: усилитель мощности; сегнетоэлектрический конденсатор; энергоэффективность; модуляция нагрузки.

В настоящее время потребность в высокоэффективных линейных СВЧ-усилителях мощности (УМ) значительно возросла для систем мобильной и спутниковой связи. Современные системы связи для достижения более высокой пропускной способности используют технологии множественного доступа, такие как мультиплексирование с ортогональным разделением поднесущих, при этом используемые сигналы характеризуются высоким пик-фактором [1].Обеспечение высокого коэффициента полезного действия (КПД) при высокой линейности в процессе работы с подобными сигналами осуществляется с использованием методов модуляции нагрузки, например в УМ Догерти [2, 3] или модуляции питания в УМ с отслеживанием огибающей. Другим решением является УМ с динамической модуляцией нагрузки, в котором параметры выходной согласующей цепи управляются в соответствии с изменением входной мощности сигнала для поддержания высокого КПД и линейности.

В работе предложена конструкция усилителя мощности на основе транзистора GaN pHEMT с пиковой мощностью 6 Вт и перестраиваемой выходной цепью на основе сегнетоэлектрического вариконда, предназначенного для работы на частоте 2,5 ГГц. В работе представлены результаты экспериментального исследования характеристик КПД УМ в условиях модуляции нагрузки. В соответствии с результатами измерений при изменении выходной мощности в пределах 8 дБ от своего максимального значения управление нагрузкой УМ с помощью вариконда позволяет обеспечить КПД не хуже 50 %. УМ изготовлен в гибридном исполнении с использованием транзистора CGH40006. Применение модулятора по смещению вариконда, управляющее напряжение на котором изменяется в пределах от 2 до 18 В при изменении входной мощности УМ, позволяет сохранять высокий КПД в широком динамическом диапазоне по выходной мощности (8 дБ). При этом линейность характеристик устройства может корректироваться в соответствии с заданной зависимостью управляющего напряжения от мощности входного воздействия модулятора.

Таким образом, применение методики модуляции нагрузки в УМ позволяет обеспечить КПД не хуже 50 % в широком динамическом диапазоне по выходной мощности более 8 дБ, при этом сохранить линейность устройства, что представляет

практический интерес для использования в радиомодулях современных систем мобильной связи.

Литература

1. Ruan X, Wang Y, Jin Q. A review of envelope tracking power supply for mobile communication systems. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. 2017 Dec;2(4):277-91.
2. Camarchia V., Pirola M., Quaglia R., Jee S., Cho Y. and Kim, B., 2015. The Doherty power amplifier: Review of recent solutions and trends. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 63(2), P. 559–571.B. Kim, J. Kim, I. Kim and J. Cha, “The Doherty power amplifier” IEEE Microw. Mag, Vol. 7, № 5, P. 42–50, Oct. 2006.
3. Grebennikov A, Bulja S. High-efficiency Doherty power amplifiers: Historical aspect and modern trends. Proceedings of the IEEE. 2012 Sep 13;100(12):3190-219.

УДК 621.382

Разработка монолитной интегральной схемы гомодинного приемо-передающего модуля миллиметрового диапазона длин волн

Макарцев И. В.[1,2], Беляков В. А.[1], Дюков Д. И.[1], Власов В. В.[3], Воробьев А. К.[3]
[1] АО «НПП «Салют»
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ларина, 7, корп. 1
makartseviv@nppsalut.ru
[2] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23
[3] ПАО «НПП «Импульс»
129626, г. Москва, просп. Мира, 102

Приведены результаты разработки и экспериментального исследования составной части малогабаритного приемо-передающего модуля — монолитной интегральной схемы на основе базового технологического процесса GaAs pHEMT с длиной затвора транзистора 70 нм.

Ключевые слова: радиолокационный датчик; приемо-передающий модуль; генератор, управляемый напряжением; монолитная интегральная схема; GaAs pHEMT.

Наиболее важным узлом радиолокационного датчика (РД), определяющим его основные технические характеристики, является приемо-передающий модуль (ППМ). Важность ППМ заключается в том, что его параметры и характеристики в значительной степени определяют эффективность всего РД в целом (дальность действия, разрешающую способность, массогабаритные характеристики). Поэтому предъявляемые требования к РД в первую очередь относятся к ППМ.

В общем виде ППМ включает в себя следующие основные функциональные части [1, 2]: антенную систему и приемо-передатчик. Приемо-передатчик состоит из генератора, управляемого напряжением (ГУН), модулятора, усилителя мощности и проходного балансного смесителя. Модулирующее напряжение $U_{упр}$ подается на ГУН. Генерированный СВЧ-сигнал, усиленный с помощью усилителя мощности, проходит через балансный смеситель и подается на антенну. Этот же сигнал используется в качестве опорного (гетеродинного). Отраженный сигнал поступает на антенну и на вход смесителя. В результате смешивания (перемножения) двух гармонических колебаний (отраженного сигнала и гетеродина) в смесителе приемо-передатчика образуется сигнал биений, мгновенная частота которого равна абсолютному значению разности мгновенных частот излученного и принятого сигналов.

В данной работе приведены результаты разработки и экспериментального исследования ППМ на основе монолитной интегральной схемы (МИС). На одном кристалле размером 2,1×2,1 мм размещены ГУН, модулятор, усилитель мощности и проходной балансный смеситель. Построение СВЧ ППМ на основе МИС позволяет повысить технологичность изготовления, стойкость к внешним воздействующим факторам, уменьшить габаритные размеры, массу ППМ и потребляемую мощность по сравнению с классическим подходом при построении ППМ на основе волноводно-гибридной технологии.

На рис. 1 приведены результаты измерений зависимости частоты выходного сигнала МИС от напряжения управления.

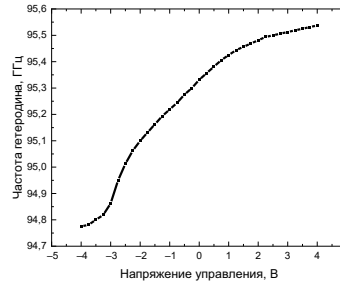


Рис. 1. Зависимость частоты выходного сигнала от напряжения управления

Из рис. 1 видно, что при изменении напряжения от −1,0 до 1,0 В девиация частоты составляет примерно 200 МГц в диапазоне от 95,2 до 95,4 ГГц. Нелинейность модуляционной характеристики в заданном диапазоне не превышает 5%.

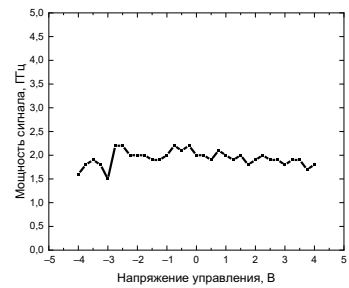


Рис. 2. Зависимость мощности выходного сигнала от напряжения управления

На рис. 2 показана зависимость мощности выходного сигнала МИС ППМ от напряжения управления. Видно, что выходная мощность составляет около 2 мВт при токе потребления МИС около 30 мА и при напряжении питания 5 В. Неравномерность выходной мощности при изменении напряжения управления не превышает 0,5 мВт.

Таким образом, показана возможность реализации малогабаритного приемопередатчика в монолитном интегральном исполнении по базовому технологическому процессу МИС СВЧ с проектными нормами 70 нм.

Литература

1. Климашев Б. М., Петров И. П. Устройства ближней радиолокации с непрерывными сигналами // Методическое пособие. — Куйбышев, 1974. — 51 с.
2. Комаров И. В., Смольский С. М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний. — М.: Горячая линия — Телеком, 2010. — 392 с.

УДК 535.215

Параметры прохождения СВЧ-сигнала субгигагерцевого диапазона через наносекундный фотопроводящий полупроводниковый ключ (PCSS) на основе GaAs

Бармин В. В., д. ф.-м. н. Романченко И. В.
Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, Академический просп., 2/3
valery@barmin.club, barmin@lnes.hcei.tsc.ru

Проведено экспериментальное исследование прохождения СВЧ-сигнала субгигагерцевого диапазона через PCSS в составе коаксиального тракта. В результате эксперимента получено прохождение сигнала с переходом через ноль, что позволяет использовать PCSS в составе импульсных СВЧ-устройств.
Ключевые слова: PCSS; Lock-On; GaAs; СВЧ; CFD.

В работе проведено экспериментальное исследование возможности передачи СВЧ-сигнала субгигагерцевого диапазона через высоковольтный наносекундный фотопроводящий ключ (photoconduction semiconductor switch — PCSS) на основе GaAs. Данный ключ работает на механизме генераций ионизирующих коллапсирующих доменов (collapsing field domain — CFD), позволяющем переходить в проводящее состояние за 0,7 нс с малым сопротивлением. Для реализации исследования был пропущен СВЧ-сигнал через PCSS в проводящем состоянии на согласованную нагрузку и короткое замыкание. Переход в проводящее состояние PCSS достигается путем формирования филамента с плотностью тока ~10 МА/см^2 в кристалле GaAs вследствие создания двух условий запуска CFD. Первым условием является получение носителей заряда за счет облучения области кристалла PCSS из полуизолирующего GaAs лазерным излучением наносекундной длительности. В данных экспериментах использовано излучение с длиной волны 355 нм, оптической энергией 20 мкДж и длительностью 5 нс. Вторым условием является создание напряженности электрического поля в кристалле, превышающей пороговое значение в 4,5 кВ/см, путем приложения высоковольтного сигнала субмикросекундной длительности. Особенностью данных ключей с механизмом CFD является эффект залипания проводимости (Lock-on), он заключается в поддержании проводящего состояния после окончания лазерного импульса за счет приложенного внешнего поля, это объясняется генерацией узких доменов Ганна с полем более 600 кВ/см, которая достаточна для формирования лавинной генерации неравновесной электронно-дырочной плазмы.

Эксперимент проведен по схеме сложения тестового СВЧ-сигнала амплитудой более 500 В с периодом 4 нс, с зарядным высоковольтным сигналом амплитудой 12 кВ в коаксиальном тракте и последующим разрядом через PCSS на коаксиальную нагрузку. В ходе проведения эксперимента с согласованной нагрузкой 50 Ом исходная амплитуда тестового СВЧ-сигнала уменьшилась с 733 до 598 В. При прохождении он претерпел незначительные искажения вследствие наложения выходного сигнала от разряда тракта и, как следствие, смещения по постоянной составляющей на 3 кВ. Для уменьшения постоянной составляющей использована нагрузка с величиной 42 мОм, это привело к получению на выходе тестового СВЧ-сигнала

с переходом через ноль. При коммутации на короткозамкнутую нагрузку амплитуда тестового СВЧ-сигнала снизилась с 463 до 342,5 В с наклоном медианного значения тестового СВЧ-сигнала. В случае изменения временной задержки амплитуда тестового сигнала определялась остаточным сопротивлением PCSS, а искажения формы относились к наложению более длительного выходного сигнала от разряда коаксиального тракта. Влияние момента формирования плазмы за счет лазерного излучения и ее поддержания коллапсирующими доменами на тестовый СВЧ-сигнал после прохождения ключа не выявлено. Полученные результаты позволяют предположить об использовании PCSS в качестве ключевого элемента в резонансном контуре СВЧ-компрессора вместо использования параллельного включения PIN-диодов.

Литература

1. Vainshtein S. N., Yuferev V. S., Kostamovaara J. T. Ultrahigh field multiple Gunn domains as the physical reason for superfast (picosecond range) switching of a bipolar GaAs transistor // Journal of Applied Physics, 2005. Vol. 97. P. 024502.
2. Nikiforov A. A., Chumerin P. Yu. et al. L-band semiconductor sensor with pulse compression // Journal Radio Electronics, 2018. Vol. 12. P. 1684. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.12.18.

УДК 621.382.32

Влияние подзатворного диэлектрика на характеристики силового нормально-закрытого GaN-транзистора

Чуканова О. Б., к. т. н., Царик К. А., к. т. н., Лашков А. В., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
kukhtuaeva@mail.ru

Разработана конструкция нормально-закрытого транзистора с затвором на основе p-GaN и диэлектрика, которая позволит формировать данный транзистор в едином технологическом цикле с нормально-закрытым транзистором с *p*-типом основных носителей. Исследовано влияние диэлектрика на характеристики прибора.

Ключевые слова: нормально-закрытый GaN-транзистор; TCAD-моделирование; силовая микроэлектроника.

Наиболее популярным способом формирования нормально-закрытых AlGaN/GaN-транзисторов является создание транзистора с затвором на основе *p*-GaN-слоя. В рамках задачи расширить электронную компонентную базу необходимо также разрабатывать транзисторы с *p*-типом основных носителей. Возможность формировать такие транзисторы в едином технологическом цикле значительно упростит процесс формирования монолитных интегральных схем на основе GaN.

На сегодняшний день самым простым способом изготовления нормально-закрытого AlGaN/GaN-транзистора с *p*-типом носителей заряда является стравливание части *p*-GaN-слоя под затвором и осаждение подзатворного диэлектрика, как правило, Al_2O_3 [1]. По результатам статьи [2] толщина *p*-GaN под затвором у такого прибора составила 20 нм, поэтому с использованием средств приборно-технологического моделирования и верифицированной физической модели нормально-закрытого транзистора с затвором на основе *p*-GaN-слоя была разработана конструкция нормально-закрытого AlGaN/GaN-транзистора с затвором на основе 20 нм *p*-GaN и подзатворного диэлектрика. Такой подход позволит исключить процесс травления GaN-слоя *p*-типа для формирования *p*-канального транзистора из технологического цикла. Было исследовано влияние подзатворных диэлектриков различного типа, а именно SiO_2, SiN, Al_2O_3 и HfO_2, на электрофизические характеристики нормально-закрытого силового транзистора на основе наногетероструктуры 20 нм *p*-GaN/AlGaN/AlN/GaN.

Для увеличения порогового напряжения прибора подзатворный диэлектрик должен обладать большей величиной запрещенной зоны по сравнению с GaN, но при увеличении величины запрещенной зоны величина диэлектрической константы уменьшается, что может привести к увеличению токов утечек в затвор [3]. По результатам моделирования наиболее подходящими диэлектриками для этих целей являются Al_2O_3 и HfO_2. Транзистор с толщиной подзатворного Al_2O_3 20 нм и *p*-GaN толщиной 20 нм обладает пороговым напряжением около 0,5 В и током стока 500 мА/мм при 5 В на затворе. Транзистор с затвором на основе 50 нм HfO_2 и 20 нм *p*-GaN обладает пороговым напряжением около 0,4 В и током стока 500 мА/мм при 5 В на затворе. В статье [2] показано, что максимально допустимые напряжения на затворе для транзисторов с затвором на основе *p*-GaN — 4 В,

т. к. большие напряжения приводят к деградации *p*-GaN-слоя и появлению токов утечек в затвор. Моделирование таких приборов при помощи верифицированной физической модели показало, что наличие подзатворного диэлектрика позволяет расширить диапазон допустимых напряжений на затворе.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию в рамках проекта FSMR-2025-0004.

Литература

1. Chowdhury N., Lemettinen J., Xie Q. et al. P-channel GaN transistor based on p-Gan/AlGaN/GaN on Si // IEEE Electron Device Letters, 2019. Vol. 40. № 7. P. 1036–1039.
2. Egorkin V. I., Chukanova O. B. Normally off GaN transistor for a complementary pair // Semiconductors, 2024. Vol. 58. № 13. P. 1132–1136.
3. Rocha P., Vauche L., Pimenta-Barros P. et al. Recent developments and prospects of fully recessed MIS gate structures for GaN on Si power transistors // Energies, 2023. № 16. P. 2978.

УДК 621.382.323

Исследование влияния конструктивно-технологических параметров на электрические характеристики силового МДП-транзистора щелевого типа на основе GaN

Беляев А. О.[1,2], Баранов Г. В.[1,2], Дорофеев А. А.[1], Леоненков Е. И.[1], Панасенко П. В.[1], д. т. н.
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Работа посвящена оптимизации конструкции силового вертикального МДП-транзистора щелевого типа на основе GaN в целях повышения напряжения пробоя без увеличения сопротивления открытого состояния.
Ключевые слова: силовой транзистор; лавинный пробой; моделирование широкозонного полупроводника; МДП-транзистор щелевого типа.

Среди множества материалов с широкой запрещенной зоной нитрид галлия (GaN) стал ключевым материалом для создания силовых устройств благодаря балансу электрофизических свойств и технологичности [1]. Одной из перспективных конструкций силовых GaN-транзисторов является вертикальная конструкция, позволяющая управлять напряжением пробоя транзистора без увеличения площади кристалла. Особый интерес представляет МДП-транзистор щелевого типа (англ. trench MISFET) с учетом возможности технологической реализации на отечественных производственных площадках.

Одним из ключевых параметров, определяющих область безопасной работы нормально-закрытых транзисторов, является напряжение пробоя. Повышение напряжения пробоя без ущерба для других параметров, таких как сопротивление в открытом состоянии и скорость переключения, представляет собой актуальную и технически сложную задачу.

Настоящая работа посвящена оптимизации конструкции МДП-транзистора щелевого типа на основе GaN в целях повышения напряжения пробоя без увеличения сопротивления открытого состояния. В качестве исходных данных используются результаты эксперимента из работы [2], где демонстрируется МДП-транзистор щелевого типа на основе GaN с напряжением пробоя 1650 В. В настоящей работе последовательно рассмотрены конструктивно-технологические параметры, определяющие область пространственного заряда и, как следствие, распределение электрического поля в структуре. Использование современной программы приборно-технологического моделирования позволило воспроизводить физические процессы внутри полупроводникового прибора на уровне отдельных структурных элементов.

Продемонстрировано для конструкции из [2], что в зависимости от комбинации параметров дрейфового слоя (концентрация легирования и толщина) напряжение пробоя варьируется в широком диапазоне, но не превышает 1650 В из-за

технологического ограничения эпитаксиальных слоев GaN, которое заключается в сложности получения слоев с низкой концентрацией легирования.

В результате моделирования выявлена оптимальная глубина заглубления щели затвора в дрейфовый слой, которая составляет 400 нм и определяется балансом двух конкурирующих механизмов пробоя: объемного и поверхностного. Показано, что среди нескольких форм щели затвора скругление углов обеспечивает наибольшее напряжение пробоя за счет эффективного снижения напряженности электрического поля в углу и смещения области пробоя на металлургическую границу дрейфового и канального слоев. Оптимизация геометрии щели затвора позволяет повысить напряжение пробоя до 2200 В.

Кроме того, исследовано влияние других факторов — плотности заряда на границе раздела GaN/SiO_2, параметров канального слоя и геометрии мезаобласти, на электрические характеристики транзистора. Анализ позволил сделать важные выводы для проектирования силового МДП-транзистора щелевого типа на основе GaN: концентрация заряда 10^{13} см$^{-2}$ приводит к снижению напряжения пробоя, уменьшение толщины канального слоя до 300 нм позволяет понизить сопротивление открытого состояния до 134,5 Ом·мм, даже слабое изменение концентрации легирования канального слоя при прочих равных приводит к отрицательным или высоким значениям порогового напряжения, оптимальная глубина мезаобласти составляет 2 мкм.

На основе разработанных модельных представлений оптимизированы конструктивно-технологические параметры силового МДП-транзистора щелевого типа на основе GaN за счет изменения глубины залегания и формы щели затвора, толщины канального слоя. Показано, что введенные изменения должны приводить к увеличению напряжения пробоя на 33% (с 1650 до 2200 В) и уменьшению сопротивления открытого состояния на 24% (с 167 до 134,5 Ом·мм).

Литература

1. Баранов Г. В. Анализ приборных требований к гетероэпитаксиальным структурам AlGaN/GaN на Si для силовой СВЧ ЭКБ // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2022. № 4 (188). — С. 5–17.
2. Oka T. et al. Vertical GaN-based trench metal oxide semiconductor field-effect transistors on a free-standing GaN substrate with blocking voltage of 1.6 kV // Applied Physics Express, 2014. Vol. 7. № 2. P. 021002.

УДК 621.3.049

Сравнение переходов NiO/β-Ga_2O_3 и Ni/β-Ga_2O_3, полученных на объемном кристалле оксида галлия

Матрос Н. Р.[1], Поляков А. Я.[1], Николаев В. И.[2], Щемеров И. В.[1], Васильев А. А.[1], Черных А. В.[1], Саранин Д. С.[1], Алексанян Л. А.[1], Романов А. А.[1]
[1] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
matros.nr@misis.ru
[2] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Проведено сравнение переходов NiO/β-Ga_2O_3 и Ni/β-Ga_2O_3 полученных на объемном кристалле и эпитаксиальной структуре. Приведены I-V-, C-V-, C-F-, DLTS-, AS-характеристики образцов. Показаны схожесть и различия образцов, созданных на объемном кристалле и эпитаксиальной структуре.
Ключевые слова: β-Ga_2O_3; гетеропереход; диод Шоттки; глубокие уровни в запрещенной зоне.

Оксид галлия β-полиморфа представляет собой полупроводник с широкой запрещенной зоной около 4,8 эВ, что позволяет создавать силовые устройства, характеристики которых превосходят аналогичные приборы на основе карбида кремния и нитрида галлия. Существенным преимуществом является возможность выращивания монокристаллов Ga_2O_3 из расплава, например, с использованием метода Чохральского. Однако основным ограничением для применения Ga_2O_3 является сложность получения проводимости *p*-типа, что открывает перспективы для разработки *p*-*n*-гетеропереходов с другими широкозонными материалами, обладающими проводимостью *p*-типа, такими как NiO. В исследуемых образцах *p*-NiO/n-Ga_2O_3 использовался β-Ga_2O_3 с *p*-NiO, полученным методом ионного распыления, при этом концентрация дырок в NiO составляла около 10^{19} $см^{-3}$. Разрез структуры представлен на рис. 1. В качестве сравнительных образцов были также сформированы диоды Шоттки и эпитаксиальные структуры аналогичной конструкции.

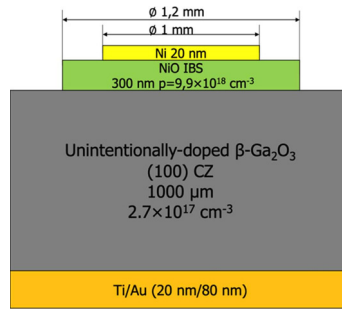


Рис. 1. Разрез структуры гетероперехода

Образцы характеризовались измерениями вольт-амперных (I-V) и вольт-фарадных характеристик (C-V), а также характеристик емкости от частоты (C-F), спектроскопией адмиттанса (AS) и релаксационной спектроскопией глубоких уровней (DLTS).

Поведение CF-характеристик, полученных на объемном кристалле, схоже с поведением спектров, снятых на эпитаксиальных структурах, а именно возникновением ступеньки в емкости, которая сильно смещалась с температурой и связана с наличием дополнительных глубоких центров, вносящих вклад в емкость и проводимость на низких частотах (для диодов Шоттки нет значимой зависимости емкости от частоты). Адмиттанс-спектроскопия показала наличие двух пиков в проводимости, связанных с процессами с энергией активации Ea1 = 0,16 эВ, Ea2 = 0,12 эВ. CV-характеристика, снятая на разных частотах, показала, что в объемной части концентрация доноров в гетеропереходе и диоде Шоттки была одинаковой для структур на объемном β-Ga_2O_3, однако была очень высокой (порядка $2 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$) концентрация глубоких центров с уровнями вблизи Ec — 0,16 эВ в интерфейсной области толщиной около 0,06 мкм. Это опять же очень похоже на поведение, наблюдаемое для эпитаксиального материала хорошего качества. DLTS-спектры гетеропереходов и диодов Шоттки схожи, однако для образцов NiO/β-Ga_2O_3 пик ловушки E1 увеличивается, а также виден пик Ec — 0,16 эВ, наблюдаемый в адмиттанс-спектрах. Сравнение структур на объемном β-Ga_2O_3 при высоком обратном напряжении показало, что для гетероперехода пробой происходил при гораздо более высоком напряжении, вероятно, потому что слой NiO, выходящий за пределы диаметра верхнего металлического контакта, как было показано, действует аналогично полевой плате, уменьшая краевое электрическое поле.

Результаты исследования показывают, что объемный материал с хорошими структурными и электронными свойствами и концентрацией доноров порядка, сравнимого с эпитаксиальным, может быть использован для создания NiO/Ga_2O_3-гетеропереходов с напряжениями пробоя, сравнимыми с эпитаксиальными структурами такого рода. Причины появления межфазных центров явно схожи для объемных кристаллов и эпитаксиальных структур и требуют дальнейшего изучения.

Литература

1. Nikolaev V. I. et al. Trap States in p-NiO/n-Ga_2O_3 heterojunctions on Czochralski β-Ga_2O_3 crystals // ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2024. Vol. 13. № 12. P. 123004.
2. Polyakov A. Y. et al. Trap states and carrier diffusion lengths in NiO/β-Ga_2O_3 heterojunctions // Journal of Applied Physics, 2024. Vol. 135. № 16.

УДК 621.3.049

Аппаратно-программный комплекс для измерения электрических характеристик полупроводниковых компонентов большой мощности

Хлынов П. А., Самбурский Л. М.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
pakhlynov@edu.hse.ru, lsambursky@hse.ru

В статье описывается разработанный комплекс для измерения электрических характеристик мощных МОП-транзисторов. Комплекс основан на базовом лабораторном оборудовании и позволяет использовать импульсный режим измерения. Благодаря модульной структуре оборудование может быть заменено, а измерительная оснастка может быть доработана исходя из целей исследования.

Ключевые слова: средство измерения; LABVIEW; МОП-транзистор; измерение характерестик полупроводниковых приборов.

Для получения информации о характеристиках исследуемых МОП-транзисторов целесообразно использовать результаты натурных измерений партий электронных компонентов. Быстрота и точность массовых измерений на предприятиях — производителях и потребителях электронных компонентов, а также в лабораториях достигается за счет использования автоматизированных измерительных комплексов на основе специализированной современной контрольно-измерительной аппаратуры, например отечественных тестеров серии «Формула» или зарубежных тестеров производства Keysight, Keithley и др. Хорошие результаты могут быть достигнуты и при объединении отдельных контрольно-измерительных приборов в измерительную сеть под управлением ЭВМ (см., напр., [1]). Данные решения очень хорошо показывают себя на предприятиях, когда заранее известно, что требуется от измерительной системы. В случае исследовательской лаборатории уже после начала исследования может возникнуть возможность в дополнительных параметрах измерений. Но перечисленные системы являются закрытыми и не всегда имеют физическую возможность расширения функционала измерительной системы, из-за чего возникают ограничения в возможностях измерения, устранить которые пользователь самостоятельно не может.

Разработанный измерительный комплекс предлагает альтернативу промышленным измерительным комплексам. Благодаря использованию распространенного лабораторного оборудования и дополнительных модулей можно проводить аналогичные измерения исследуемых мощных МОП-транзисторов небольшими партиями компонентов. Структура комплекса приведена на рис. 1.

В состав аппаратной части измерительного комплекса в нашем случае входят: генератор сигналов АКИП-3417, цифровой осциллограф АКИП-4126/3А-Х, источник питания АКИП-1145, камера тепла-холода Climcontrol M-70/180-80 KTX, а также измерительная оснастка из нескольких модулей. С таким измерительным комплексом получена возможность проводить измерения в импульсном режиме измерений в диапазоне напряжения от 0 до 40 В и токах от 100 мА до 20 А.

Для управления измерительным комплексом использовалось ПО, разработанное в LabVIEW. Интерфейс программы позволяет выставить предельные значения по току, напряжению и мощности, выбрать необходимое лабораторное оборудование и указать комбинацию напряжений на затворе и стоке, при которых необходимо провести измерения ВАХ. Также подбирается минимальная ширина импульса, при которой транзистор работает в нормальном режиме, для этого оператор использует экран осциллографа, на котором отображается поведения тока при заданных параметрах импульса. Оператор также может визуально контролировать процесс измерения по осциллографу. После проведения измерений в интерфейсе ПО будут отображены полученные графики ВАХ. Полученные результаты измерений сохраняются в графическом формате и формате MDM, который является одним из промышленных стандартов для хранения и передачи таких данных.

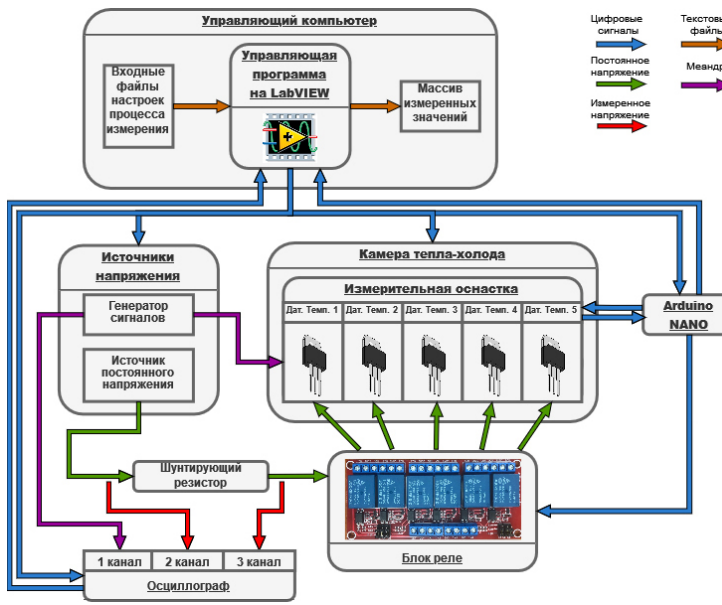


Рис. 1. Схема измерительного комплекса

Разработанный измерительный комплекс позволяет получать достоверные данные о ВАХ МОП-транзисторов без использования дорогостоящего измерительного оборудования, применяя в своем составе распространенное лабораторное оборудование. Благодаря модульной системе комплекс легко дорабатывать и изменять, что важно при проведении исследовательских работ.

Литература

1. Petrosyants K. O. et al. Generalized test automation method for MOSFET's including characteristics measurements and model parameters extraction for aero-space applications // 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). IEEE, 2017. P. 1–8.

УДК 621.383.51

Радиационная стойкость и оптимизация конструкции силовых n-канальных MOSFET Trench-транзисторов технологии 180 нм при гамма-облучении

Степанов М. А.
АО «МИКРОН»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6

В работе исследована радиационная стойкость силовых MOSFET Trench-транзисторов при облучении гамма-квантами разной дозы. Проведен эксперимент, в ходе которого анализировались изменения ключевых параметров: подпорогового напряжения, тока утечки и времени переключения. Выявлены наиболее устойчивые к облучению типы, пригодные для использования в условиях повышенной радиации.
Ключевые слова: радиационная стойкость; MOSFET Trench; Trench-технология; гамма-облучение.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования радиационной стойкости *n*-канальных MOSFET Trench-транзисторов с пробивным напряжением 30 В. Транзисторы изготовлены на пластинах кремния диаметром 200 мм производства АО «Микрон» по технологической норме 180 нм. Образцы подвергались контролируемому гамма-облучению с варьированием поглощенной дозы в целях моделирования условий работы электронных компонентов в радиационно-нагруженных средах.

В ходе исследования проведен комплексный анализ деградации ключевых электрических параметров, включая сдвиг порогового напряжения, увеличение тока утечки в закрытом состоянии и изменение динамических характеристик переключения. Методом сравнения вольт-амперных характеристик до и после облучения идентифицированы наиболее устойчивые технологические варианты транзисторных структур. Установлено, что радиационная деградация параметров обусловлена преимущественно образованием оксидных и интерфейсных зарядов в подзатворном диэлектрике, а также генерацией дефектов в объеме кремния. На основании анализа механизмов радиационных повреждений предложены инженерные решения по модификации конструкции транзисторов, включая оптимизацию геометрии Trench-структур, применение радиационно стойких диэлектриков и совершенствование технологических процессов изготовления.

Полученные результаты имеют важное прикладное значение для разработки электронных компонентов специального назначения, устойчивых к воздействию ионизирующего излучения в космической, ядерной и медицинской технике.

Литература

1. Таперо К. И., Диденко С. И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники: уч. Пособие. — М.: Изд. Дом МИСиС, 2013.
2. A. Holmes-Siedle, L. Adams «Handbook of Radiation Effects» // Oxford University Press, 2002.

3. Fleetwood D. M. «Radiation Effects in a Commercial 180 nm CMOS Process» // IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013. Vol. 60. № 3.
4. Buchner S. et al. «Single-Event Effects in Power MOSFETs» // IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC) Proceedings, 2015.

УДК 621.382.333.34

Исследование механизма деградации тока утечки коллектора высоковольтных IGBT во время HTRB-теста

Абрашин П. С.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
АО «Ангстрем»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Площадь Шокина, 2, стр. 3

В работе проанализирован механизм деградации тока утечки коллектора на основе результатов HTRB-теста кристаллов IGBT в корпусе SOT-227 и моделирования в Sentaurus TCAD. Предложена усовершенствованная конструкция краевой защиты кристаллов с пониженным током утечки коллектора, что позволило транзисторам успешно пройти испытания на надежность.
Ключевые слова: IGBT; надежность; ток утечки; краевая защита; Sentaurus TCAD; HTRB-испытания.

Главной особенностью IGBT является их применение в мощных высоковольтных схемах напряжением до 6500 В при малых потерях в открытом состоянии. В связи с этим при разработке IGBT необходимо уделять внимание не только активной области кристалла, но и конструкции краевой защиты, которая необходима для уменьшения эффекта кривизны *p-n*-перехода и предотвращения преждевременного пробоя. Требования к конструкции краевой защиты включают эффективность занимаемой площади, совместимость с технологическим процессом и надежность. Повышая надежность конструкции краевой защиты, можно обеспечить долговременную работоспособность прибора.

Основным испытанием для проверки высоковольтных приборов на надежность является тест на обратное смещение при высокой температуре (HTRB), при котором прибор подвергается воздействию предельно допустимых режимов напряжения коллектор — эмиттер и температуры. При высоких температурах в объемном кремнии не ожидается деградации, однако тест позволяет выявить слабые места или деградационные эффекты в конструкции краевой защиты и ее пассивации [1, 2]. Такие проблемы, как деградация тока утечки или дрейф напряжения пробоя коллектора после HTRB-теста, могут возникнуть, если заряды в слоях или на границах разделов не контролируется должным образом во время изготовления кристаллов [3].

В качестве испытуемых образцов использовались кристаллы IGBT с номинальным напряжением пробоя 1200 В, изготовленные по стандартной планарной технологии Non Pounch Througth и собранные в корпус SOT-227. При проведении испытаний HTRB была обнаружена деградация тока утечки коллектора до значений более 1 мА. В результате образцы не прошли испытания на надежность.

Для анализа механизма деградации тока утечки коллектора использовалась подробная модель краевой защиты в среде приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD, учитывающая эффекты в сильных электрических полях и саморазогрев прибора. Проведено электрофизическое моделирование пробоя краевой защиты для оценки влияния величины встроенных зарядов в диэлектрических слоях на распределение электрического поля, которое показало, что

наиболее уязвимым местом к деградации является граница раздела межслойной изоляции (МСИ) и пассивации.

Для решения данной проблемы изготовлены экспериментальные образцы, в которых пленка борофосфоросиликатного стекла (БФСС) заменена на пленку тетраэтилортосиликата (ТЭОС). Образцы были протестированы в тех же режимах HTRB, что и в первый раз. Результаты испытаний показали уменьшение тока утечки более чем в 10 раз во время теста и отсутствие деградации статических параметров транзистора после теста.

С помощью комбинации эмпирических испытаний и электрофизического моделирования подтвердились предположения о механизме деградации тока утечки коллектора, вызванной плохой пассивацией поверхности межслойной изоляции. Предложена усовершенствованная конструкция краевой защиты, которая позволила снизить ток утечки коллектора, благодаря чему изделия прошли испытания на надежность. Результаты исследования дают важные сведения для проектирования и испытаний, направленных на разработку высоковольтных IGBT с повышенной надежностью.

Литература

1. Tian X. L. et al. An improved edge termination structure to optimize 3.3 kv igbts ruggedness // 2018 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). — IEEE, 2018. P. 1–3.
2. Research on HTRB Failure Mechanisms of High Voltage IGBT Module // Annual Conference of China Electrotechnical Society. — Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. P. 1001–1010.
3. Ooi A. L., Goh D., Ngwan V. C. High temperature reverse bias (HTRB) & temperature humidity bias (THB) reliability failure mechanisms and improvements in trench power MOSFET and IGBT // IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2021. Vol. 9. P. 1181–1187.

УДК 621.382

Разработка GaAs IPD-ехнологии

Смирнов Ю. Ю., Мишарин Д. М., Шуленков А. С., Драгуть М. В., Лукин В. А.
АО «ОКБ-Планета»
662972, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1н
smirnovyy@okbplaneta.ru

Разработана GaAs IPD-технология. Указаны ее преимущества в сравнении с технологией СВЧ ГИС. Приведены описание маршрута и результаты СВЧ-измерений бескорпусных GaAs-аттенюаторов до 40 ГГц, изготовленных по разработанной технологии.
Ключевые слова: GaAs; IPD; технология; аттенюатор; СВЧ.

Современная электроника требует миниатюризации и упрощения технологии изготовления устройств. В СВЧ-диапазоне значительную площадь занимают пассивные компоненты и схемы, а использование дискретных компонентов требует дополнительных сборочных операций.

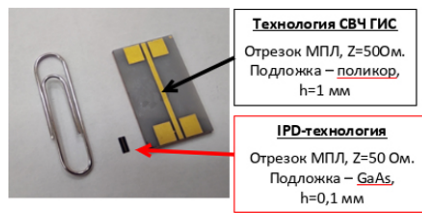


Рис. 1. Сравнение габаритов

IPD-технология позволяет изготовлять пассивные компонентны на одной подложке, уменьшая число сборочных операций и увеличивая надежность готовых устройств. На основе GaAs IPD-технологии можно создавать:

- внутрикорпусные цепи согласования кристаллов мощных GaAs- и GaN-транзисторов;
- фильтры;
- фиксированные аттенюаторы;
- различные ответвители и мосты.

Разработанная в «ОКБ-Планета» IPD-технология использует полуизолирующие подложки арсенида галлия диаметром 76 и 100 мм, толщиной ~650 мкм, два уровня металлизации лицевой стороны. Первый уровень — Ti/Au/Ti (400 нм), второй уровень — гальваническое золото (3 мкм). На основе металлизации второго уровня изготовляются СВЧ-линии передач и катушки индуктивности. Конденсаторы двух видов: МДМ и опционально МДМДМ, с удельными емкостями 200 и 450 пФ/мм^2, с ICPCVD-пленкой нитрида кремния (электрической прочностью ~7 МВ/см). Тонкопленочные резисторы (20 или 50 Ом/□) формируются магнетронным напылением NiCr (80/20 %). Заземление лицевой стороны — сквозные, металлизированные отверстия диаметром 50 мкм, сформированные ICP ПХТ утоненной до 100 мкм GaAs-пластины. Избежать замыкания в местах пересечения

металлизации первого и второго уровня помогло использование воздушных мостов. Пассивация — ICPCVD нитрид кремния.

Специально изготовленные линии передач и тестовые элементы позволили сравнить уровень разработанной IPD-технологии с технологией СВЧ ГИС (табл. 2).

Таблица 1. Сравнение подложек для ГИС и IPD-технологии

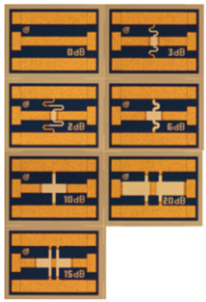
Параметры материала и подложки	Технология	
	СВЧ ГИС	СВЧ IPD
Материал подложки	Поликор (Al_2O_3 99,7 %)	SI-GaAs
Удельное сопротивление, Ом·см	$\geq 10^{14}$	$(10^8–10^9)$
Минимальная ширина проводника, мкм	40	6
ε	9,8 ± 0,25	12,8
tgδ	100	50
ТКЛР, градус$^{-1}$	$(6,7–7,3)\cdot 10^{-6}$	$5,7\cdot 10^{-4}$
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	(25–30)	55

Таблица 2. Сравнение достигнутых параметров элементов МИС ГИС и IPD-технологии

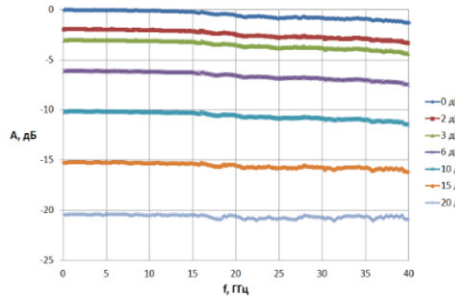
Параметры материала и подложки	Технология	
	СВЧ ГИС	СВЧ IPD
Подложка	Поликор, h = 0,5 мм	SI-GaAs, h = 0,1 мм
Металлизация	на основе меди (общая толщина 10 мкм)	на основе золота (общая толщина 3 мкм)
Минимальная ширина проводника, мкм	40	6
Удельные потери (f = 10 ГГц), дБ/мм	−0,016	−0,047
Диаметр заземляющего отверстия, мкм	100	50
Паразитное сопротивление заземляющего отверстия, мОм	≤60	≤30
Паразитная индуктивность заземляющего отверстия, пГн	≤200	≤30

Была изготовлена линейка фиксированных аттенюаторов с рабочими частотами от 0 до 40 ГГц. На рис. 2 приведены измеренные частотные зависимости коэффициента ослабления аттенюаторов.

Аттенюаторы устанавливались в пластиковый корпус SOT-143, на рис. 3 приведены результаты СВЧ-измерений.

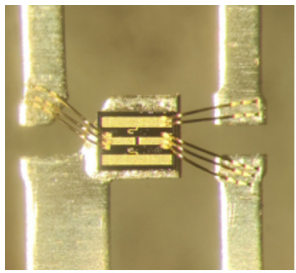


а

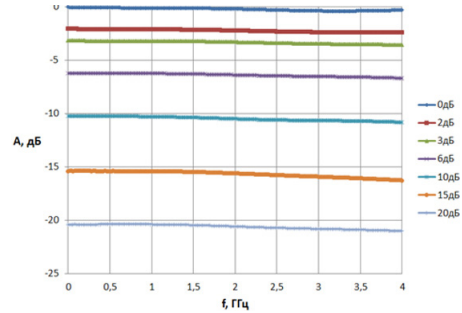


б

Рис. 2. Аттенюаторы (*а*) и результаты измерений (*б*)



а



б

Рис. 3. Корпусированный аттенюатор (*а*) и результаты его измерений (*б*)

Авторы считают, что проведенные измерения тестовых элементов свидетельствуют о сравнимом уровне потерь СВЧ IPD- технологии с СВЧ ГИС-технологией. Измерения аттенюаторов показали возможность изготовления миниатюрных СВЧ-микросхем по разработанной IPD-технологии.

УДК 621.319.4

Разработка технологии плазмохимического осаждения пленки Si_3N_4 для конденсаторов СВЧ МИС различных типов

Рыкова В. В., Смирнов Ю. Ю., Орлова Д. А., Драгуть М. В.
АО «ОКБ Планета»
173004, г. Великий Новгород, ул. Большая Московская, 13а, пом. 1н

В СВЧ МИС использование конденсаторов большой емкости на низких частотах приводит к увеличению занимаемой площади. С распространением GaN-технологий растут требования к пробивному напряжению Uпит: для GaN <27 В. В работе исследуется разработка технологии ПХО пленки Si_3N_4 для конденсаторов СВЧ МИС.
Ключевые слова: плазмохимическое осаждение; нитрид кремния; СВЧ МИС; конденсаторы; GaN; миниатюризация; диэлектрическая прочность.

Диэлектрические пленки нитрида кремния обладают рядом химических и физических свойств, обеспечивающих их применение в производстве СВЧ монолитных интегральных схем в качестве диэлектрического слоя МДМ-конденсаторов:

- высокая диффузионная стойкость по отношению к влаге;
- хорошие электроизолирующие и диэлектрические свойства ($\varepsilon = 7{,}9$);
- низкие токи утечки ($<10^{-8}$ А/см^2 при 1 МВ/см);
- высокая термостабильность;
- высокая электрическая пробиваемость ($E_{пр} = 10^7$ В/см).

В работе решается задача миниатюризации высокоемкостных конденсаторов (1–200 пФ) для СВЧ-микросхем. Представлена оптимизация плазмохимического осаждения диэлектрических пленок Si_3N_4 с улучшенными характеристиками. В ходе работы:

- установлена зависимость основных параметров низкотемпературной пленки Si_3N_4 от технологических режимов ПХО;
- разработаны опытные образцы интегральных СВЧ МДМ и МДМДМ-конденсаторов;
- произведено измерение СВЧ и статистических характеристик опытных образцов;
- получена масштабируемая эквивалентная схема;
- выполнено сравнение опытных образцов с однослойными конденсаторами.

Данные работы выполнялись специалистами АО «ОКБ Планета». В результате были изготовлены миниатюрные высокоемкостные конденсаторы (1–200 пф) для СВЧ МИС.

Литература

1. Грудин Б. В., Козырев А. Б. Тонкопленочные конденсаторы для СВЧ-применений: материалы и технологии // Микроэлектроника, 2018. — Т. 47. — №4. — С. 243–256.
2. Tummala R. R., Swaminathan M. Introduction to System-on-Package (SOP): Miniaturization of the Entire System. New York: McGraw-Hill, 2008. 836 p.
3. Mishra U. K., Parikh P., Wu Y.-F. AlGaN/GaN HEMTs — An Overview of Device Operation and Applications // Proceedings of the IEEE, 2002. Vol. 90. № 6. P. 1022–1031.

УДК 530.145

Использование тензорных сетей для моделирования эволюции квантовых состояний света в элементах нелинейной оптики и фотоники

Капридов Н. А.[1,2], Тиунов Е. С.[3], Чермошенцев Д. А.[1]
[1] *Российский квантовый центр*
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
kapridov.na@phystech.edu
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] *Quantum Research Center, Technology Innovation Institute, Abu Dhabi*

Нелинейные оптические среды способствуют возникновению и эволюции квантовых состояний света. Однако моделирование этих процессов затруднено из-за высокой размерности гильбертова пространства. Тензорные сети могут решить эти вычислительные проблемы, компактно храня и обрабатывая информацию.

Ключевые слова: нелинейная оптика; квантовая эволюция; тензорные сети.

В последнее время активно развиваются оптические и фотонные устройства, обладающие нелинейными свойствами. Данные устройства все шире используют в сфере квантовых технологий [1, 2]. Возникает необходимость уметь предсказывать поведение квантовых состояний света под действием различных нелинейных процессов. При этом моделирование эволюции квантовых состояний является вычислительно сложной задачей из-за высокой размерности гильбертова пространства.

Для моделирования эволюции квантовых состояний необходимо выполнить численное решение уравнения Шредингера (1):

$$i\hbar\frac{d\psi}{dt} = \hat{H}\psi. \tag{1}$$

Чаще всего для этих целей выбирается представление квантовых состояний в дискретном фоковском базисе. Это представление, однако, обладает рядом недостатков. Например, количество базисных векторов, необходимых для кодирования состояния, растет квадратично с амплитудой оптического состояния.

В данной работе мы выполняем моделирование уравнения Шредингера в дискретизованном непрерывном представлении. В дополнение к этому мы кодируем состояния и операторы с помощью тензорных сетей (2) типа Matrix Product State (MPS) [3, 4]:

$$|\psi\rangle = \sum\nolimits_{\sigma_1,\ldots,\sigma_L} A^{\sigma_1}A^{\sigma_2}\ldots A^{\sigma_{L-1}}A^{\sigma_L}|\sigma_1,\ldots,\sigma_L\rangle. \tag{2}$$

В данной записи A^{σ_i} — трехмерная матрица, причем каждый индекс σ_i принимает два возможных значения. Индекс L равен $n = \log_2(N)$, где N — количество значений дискретизованной функции. Таким образом, фиксирование всех индексов σ_i

и перемножение соответствующих матриц позволяет восстановить один конкретный элемент волновой функции $|\psi\rangle$ квантового состояния.

Максимальный размер (максимальное число столбцов/строк) матрицы A^{σ_i} называется бонд-размерностью тензорной сети и определяет сложность производимых с тензорной сетью вычислений. Тензорные сети, кодирующие операторы рождения и уничтожения числа фотонов, а также волновые функции квантовых оптических состояний в координатном представлении имеют низкую бонд-размерность, что положительно сказывается на скорости вычислений.

Результативность нашего подхода мы демонстрируем на примере расчета эволюции квантовых состояний моды накачки и моды сигнала под действием гамильтониана вырожденного спонтанного параметрического рассеяния (SPDC) (3):

$$\hat{H} = i\hbar\chi^{(2)},$$

где $\chi^{(2)}$ — коэффициент квадратичной нелинейности среды, индекс p относится к моде накачки, индекс s — к моде сигнала.

Для решения уравнения Шредингера мы выбрали неявный метод Эйлера. Если оператор и волновая функция заданы в форме MPS, то можно решать систему линейных уравнений вариационным методом [5].

Мы выполнили расчет эволюции состояний как с помощью нашего подхода, так и стандартным методом в фоковском базисе и обнаружили хорошее сходство результатов. График ниже демонстрирует динамику фотонов в модах в ходе эволюции под действием гамильтониана SPDC при расчете обоими методами.

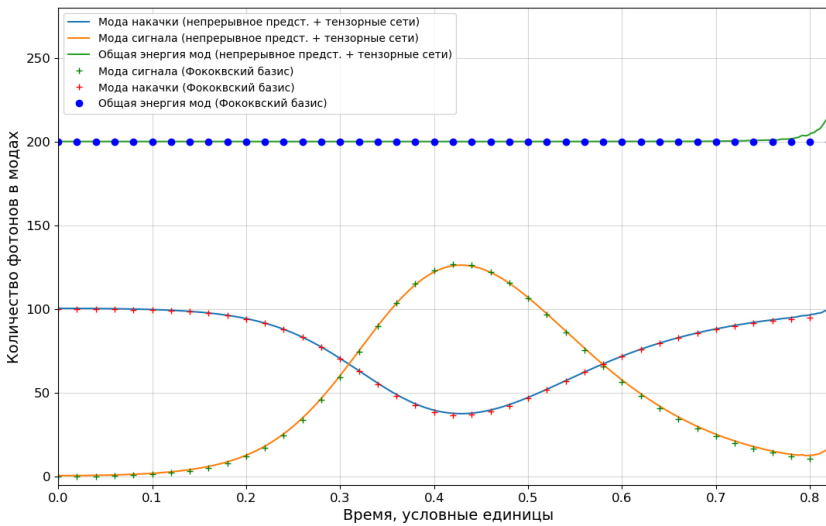


Рис. 1. Динамика числа фотонов в модах сигнала и накачки в ходе эволюции под действием гамильтониана вырожденного спонтанного параметрического рассеяния (SPDC), вычисленной в непрерывном представлении с помощью тензорных сетей и в фоковском базисе

Таким образом, было проведено моделирование квантовой эволюции состояний моды сигнала и моды накачки под действием гамильтониана вырожденного спонтанного параметрического рассеяния с помощью тензорных сетей, показана корректность и эффективность метода.

Литература

1. Wang J. et al. Integrated photonic quantum technologies // Nature Photonics, 2020. Vol. 14. № 5. P. 273–284.
2. Giordani T. et al. Integrated photonics in quantum technologies // La Rivista del Nuovo Cimento, 2023. Vol. 46. № 2. P. 71–103.
3. Oseledets I. V. Tensor-train decomposition // SIAM Journal on Scientific Computing, 2011. Vol. 33. № 5. P. 2295–2317.
4. Schollwöck U. The density-matrix renormalization group in the age of matrix product states // Annals of physics, 2011. Vol. 326. № 1. P. 96–192.
5. Zauner-Stauber V. et al. Variational optimization algorithms for uniform matrix product states // Physical Review B, 2018. Vol. 97. № 4. P. 045145.

УДК 530.145

Исследование итерационного алгоритма максимального правдоподобия в задачах реконструкции квантовых состояний

Шарапов А. Е.[1,2], Голышев И. К.[2,3,4], Богданова Н. А.[3,4], Шарапов А. А.[1,2], Богданов Ю. И.[1,2,3,4]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] НИЦ Курчатовский институт — ФТИАН им. К. А. Валиева
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
[4] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Цель настоящего исследования — развитие итерационной процедуры для нахождения экстремума функции правдоподобия. Показано, что корневой подход совместно со стандартным градиентным методом обеспечивают простое и непосредственное решение данной задачи, эквивалентное решению на основе уравнения правдоподобия.

Ключевые слова: квантовые состояния; квантовая томография; корневой подход; метод максимального правдоподобия; итерационный алгоритм; полнота; адекватность и точность квантовых измерений.

В этом докладе мы представляем итерационный алгоритм для реконструкции квантовых состояний с помощью совокупности взаимно-дополнительных квантовых измерений [1]. На основе процедуры дополнения произвольного смешанного квантового состояния до чистого сформулирован общий итерационный алгоритм максимального правдоподобия в целях статистического восстановления матрицы плотности для произвольных квантовых состояний, рассмотрено универсальное статистическое распределение, описывающее точность восстановления квантовых состояний. Иллюстрируется приложение развитой теории к анализу некоторых актуальных протоколов квантовых измерений. Показано, как на основе информации, возникающей при необратимой регистрации событий при проведении квантовых измерений, можно найти характеристики точности протоколов квантовой томографии. Важно, что такие характеристики, включая универсальное распределение точности протокола квантовых измерений, могут быть получены до проведения самих измерений теоретически (априори) на основе матрицы полной информации, которая является квантовым обобщением классической матрицы информации Фишера в отношении оценки параметров очищенного квантового состояния. Существенно, что для реализации рассматриваемого подхода нет необходимости обращаться к таким методам, как выпуклое программирование, проективный градиент и т. п. Развитый подход корректно оперирует со статистическими флуктуациями квантового состояния и открывает непосредственный путь к построению универсальной теории точности.

Результаты выполненного исследования имеют практическое значение для задач обеспечения качества и эффективности оптических квантовых информационных технологий.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных и поисковых научных исследований в области электронных технологий.

Литература

1. Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Лукичёв В. Ф. Введение в квантовые информационные технологии. — М.: Техносфера, 2025. — 468 с.

УДК 530.145

Линейно-оптическая генерация многокубитных GHZ-подобных состояний с помощью модифицированных операций слияния

Мелкозеров А. А.[1,2], Сайгин М. Ю.[3,2], Страупе С. С.[3,1,2]
[1] *Российский квантовый центр*
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
melkozerov.aa17@physics.msu.ru
[2] *Центр квантовых технологий, физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова*
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
[3] *Центр квантовых технологий «Сбер»*
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32

Представлены линейно-оптические схемы генерации произвольных GHZ-подобных многокубитных состояний одиночных фотонов с использованием модифицированных операций слияния. Схемы позволяют управлять эффективностью генерации высокоразмерных состояний за счет изменения степени их запутанности.
Ключевые слова: квантовая запутанность; квантовые вычисления; линейная оптика.

Эффективная генерация и управление многокубитными запутанными состояниями одиночных фотонов являются необходимым компонентом для реализации современных линейно-оптических квантовых алгоритмов [1]. Исследования в данной области в основном сосредоточены на конкретных типах состояний, таких как графовые и GHZ-состояния. Несмотря на практическую реализуемость, существующие методы их генерации демонстрируют низкую вероятность успеха, что стимулирует разработку новых подходов в рамках линейной оптики.

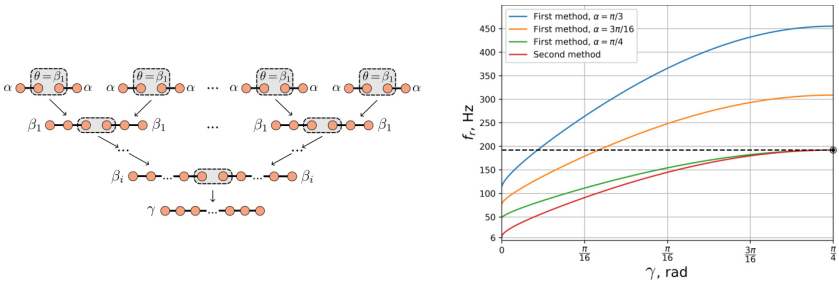
Недавние открытия в теории квантовой информации предлагают новые формализмы, охватывающие более широкий спектр состояний и кодовых пространств [2]. В данной работе мы рассматриваем линейно-оптическую генерацию многокубитных GHZ-подобных состояний, являющихся обобщением хорошо известных GHZ-состояний:

$$|G_n(a)\rangle = \cos(a)|0\rangle^{\otimes n} + \sin(a)|1\rangle^{\otimes n},$$

где угол $a \in [0, \pi/4]$ определяет степень запутанности. Такие состояния находят применение в протоколах квантовой телепортации и являются локально эквивалентными взвешенным гиперграфовым состояниям, описываемым расширениями формализма стабилизаторов Паули [2].

Предложены два протокола генерации произвольных многокубитных GHZ-подобных состояний и проанализирована их эффективность. Первый, представленный на рис. 1*a*, основан на применении операций слияния к состояниям малой размерности с произвольной степенью запутанности. Разработанные модификации известных операций слияния позволяют контролировать запутанность

конечных состояний. Второй алгоритм использует ресурсные состояния с заранее заданной степенью запутанности, но позволяет достичь более высокой частоты генерации.



а *б*

Рис. 1. Схема генерации произвольного целевого GHZ-подобного состояния $|G_n(\gamma)\rangle$ из набора 2-кубитных ресурсных состояний $|G_2(a)\rangle$ с произвольной степенью запутанности. Прямоугольники обозначают операции слияния; углы соответствуют параметрам модифицированных схем слияния (*а*); частота генерации двухкубитных ресурсных состояний, необходимая для генерации 7-кубитных GHZ-подобных состояний $|G_7(\gamma)\rangle$ с целевой частотой $f_t = 1$ Гц (*б*). Пунктирная линия указывает необходимую частоту генерации состояний Белла для получения максимально запутанных состояний $|G_7(\pi/4)\rangle$ с той же целевой частотой для известных методов [3]

Показано, что вероятность успешного слияния GHZ-подобных состояний может превышать 50 %, что является пределом в случае слияния стабилизаторных состояний, включая максимально запутанные GHZ-состояния. Проведен анализ компромисса между степенью запутанности и эффективностью генерации целевых состояний, как иллюстрируется на рис. 1*б*.

Наши оценки демонстрируют, что эффективность генерации высокоразмерных состояний может быть существенно увеличена за счет снижения степени их запутанности. Предложенные схемы позволяют генерировать произвольные высокоразмерные GHZ-подобные состояния с настраиваемой частотой генерации и степенью запутанности, что позволяет рассматривать их как перспективный ресурс для реализации линейно-оптических квантовых алгоритмов.

Литература

1. Bartolucci S., Gimeno-Segovia M., Laing A., Rudolph T. Fusion-based quantum computation // Nature Communications, 2023.
2. Webster M. A., Bartlett S. D., Brown B. J. The xp-stabiliser formalism: a generalisation of the Pauli stabiliser formalism with arbitrary phases // Quantum, 2022.
3. Bartolucci S., Munns J., Gimeno-Segovia M. et al. Creation of entangled photonic states using linear optics, 2021.

УДК 621.372.8, 530.145.82

Генерация трехкубитного запутанного состояния GHZ в интегральном оптическом чипе, изготовленном методом фемтосекундной лазерной записи

Урусова К. Н.[1], Кондратьев И. В.[1], Аргенчиев А. С.[1], Скрябин Н. Н.[1,2], Дьяконов И. В.[1,2], Страупе С. С.[1,2], Кулик С. П.[1,3]

[1] Центр квантовых технологий,
физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
[2] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1
[3] Лаборатория квантовой инженерии света,
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76

Продемонстрирована генерация трехкубитного GHZ-состояния с использованием универсального шестипортового интегрально-оптического интерферометра, изготовленного методом фемтосекундной лазерной печати. Приготовление и томография реализованы в одной структуре.

Ключевые слова: интегральная фотоника; программируемый интерферометр; запутанные состояния.

Интегральная фотоника позволяет создавать компактные перенастраиваемые устройства для линейных оптических преобразований. В отличие от электронных схем, такие устройства управляют светом, обеспечивая обработку как классических, так и квантовых состояний. Универсальные многопортовые интерферометры представляют особый интерес, поскольку они потенциально способны реализовывать произвольные унитарные преобразования и могут использоваться как компоненты квантовых компьютеров [1]. Однако существующие архитектуры таких интерферометров чувствительны к погрешностям при изготовлении, что ограничивает их практическое применение.

В данной работе мы экспериментально исследуем более устойчивую интерферометрическую волноводную структуру, предложенную в [2] (рис. 1, верхняя структура), состоящую из чередующихся многопортовых светоделителей и фазовых сдвигов.

Мы изготовили шестипортовый интегрально-оптический чип на основе архитектуры из [2] методом фемтосекундной лазерной печати и разработали для него аналитическую модель. Все параметры чипа были определены экспериментально, при этом коэффициенты корреляции превысили 0,99.

Для демонстрации универсальности изготовленного интерферометра было реализовано преобразование, эквивалентное структуре из [3] (рис. 2, нижняя структура), генерирующее трехфотонное GHZ-состояние методом постселекции:

$$|\psi\rangle = \frac{|000\rangle_L + |111\rangle_L}{\sqrt{2}} = \frac{|101010\rangle_{Fock} + |010101\rangle_{Fock}}{\sqrt{2}}.$$

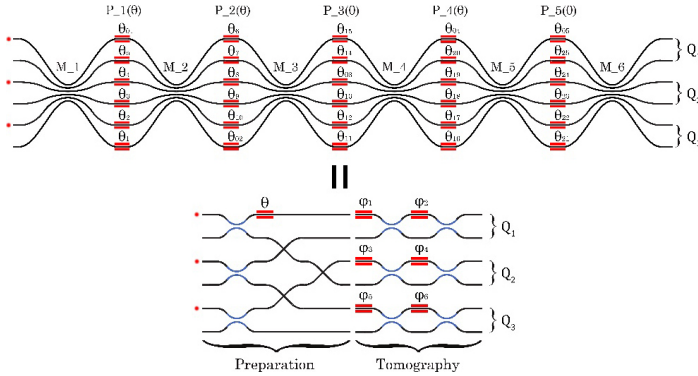


Рис. 1. Исследуемая волноводная структура и известная схема генерации состояния GHZ методом постселекции. Поскольку рассматриваемая структура универсальна, она позволяет реализовать преобразование, включающее в себя как приготовление, так и томографию состояния GHZ

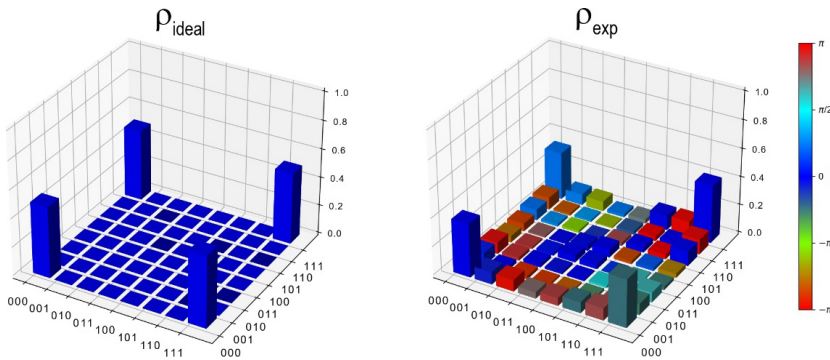


Рис. 2. Матрица плотности идеального GHZ-состояния и матрица плотности состояния, приготовленного с использованием универсального шестипортового интерферометра. Фиделити 0,89

В качестве кубитов использовалась dual-rail-кодировка одиночных фотонов, где логические состояния 0 и 1 соответствовали нахождению фотона в одном из двух волноводов чипа (таким образом, шестипортовый чип кодирует три кубита).

Важно отметить, что благодаря универсальности схемы как запутывание, так и проекционные измерения в заданных базисах были реализованы с использованием только одной структуры без дополнительных интерферометрических элементов. После успешного моделирования преобразования (фиделити между матрицей плотности приготовленного состояния и идеальным GHZ-состоянием составила 0,999) был проведен эксперимент по генерации перепутанного состояния. В качестве источника одиночных фотонов использовалась квантовая точка, а для подачи троек фотонов — пространственный демультиплексор.

В результате эксперимента было получено квантовое состояние, матрица плотности которого совпадает с матрицей плотности GHZ-состояния с фиделити 0,89 (рис. 2). Фиделити было рассчитано по следующей формуле:

$$F_{ampl}(U,V) = \frac{\sum_{i,j} |u_{ij} v_{ij}|}{\sqrt{\sum_{i,j} |u_{ij} u_{ij}| \cdot \sum_{i,j} |v_{ij} v_{ij}|}}.$$

В дальнейших исследованиях планируется повысить точность экспериментального приготовления GHZ-состояния.

Работа выполнена при поддержке Росатома в рамках дорожной карты по квантовым вычислениям (договор № 868-1.3-15/15-2021 от 5 октября и договор № П2154 от 14 ноября 2021 г.).

Литература

1. PsiQuantum Team. A manufacturable platform for photonic quantum computing // Nature, 2025. DOI: 10.1038/s41586-025-08820-7.
2. Kondratyev I. V. et al. Multiport universal unitary interferometer design // AIP Conference Proceedings, 2020. Vol. 2241. P. 020022. DOI: 10.1063/5.0010830.
3. Pont M. et al. High-fidelity four-photon GHZ states on chip // npj Quantum Inf., 2024. Vol. 10. P. 50. DOI: 10.1038/s41534-024-00830-z.

УДК 621.3.049

Приготовление состояний фотонов с переменной перепутанностью путем модифицированного метода многократного отщепления

Флджян С. А.[1,2], Сайгин М. Ю.[3,1], Страупе С. С.[3,1], к. ф.-м. н.
[1] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
[2] Центр квантовых технологий «Сбер»
121170, г. Москва, Кутузовский просп., 32

Нами разработаны эффективные методы создания перепутанных состояний фотонов. Мы подкрепляем новую разработанную теоретическую основу численными вычислениями, демонстрируя ее применение для генерации как максимально перепутанных состояний, так и состояний с различной степенью перепутанности.
Ключевые слова: линейная оптика; квантовые вычисления; перепутанность.

Модель дискретных фотонов, распространяющихся через линейно-оптические схемы и измеряемых детекторами, предоставляет мощный инструментарий для квантовых вычислений и демонстрации квантового преимущества [1, 2]. Перепутанные многочастичные состояния, такие как состояния Гринбергера — Хорна — Цайлингера (GHZ), часто являются ключевыми для вычислительной обработки. Для создания GHZ-состояний в дискретных фотонных системах предложены две техники [3].

Первая техника заключается в пошаговом создании промежуточных перепутанных состояний фотонов, называемых *приматами*. Эти приматы последовательно *сливаются* в более крупные перепутанные состояния с увеличивающимся числом фотонов. В конечном итоге состояние примата может быть преобразовано в GHZ-состояние с помощью одной операции слияния. Вторая техника, известная как метод *многократного отщепления* (bleeding), включает введение 2N фотонов в линейную оптическую схему и их непрерывное распространение и измерение отщепленной части излучения до получения заданных результатов измерений. Корректировки на основе результатов измерений позволяют получить N-фотонное GHZ-состояние с вероятностью успеха 2^{1-N}. В идеальном случае приготовление одного N-фотонного GHZ-состояния требует в среднем $\nu = N2^N$ фотонов. Несмотря на практические трудности, связанные с длительным временем распространения, метод многократного отщепления теоретически эффективнее при пренебрежимо малых потерях.

В нашем исследовании мы изучаем, как поэтапное создание перепутанного состояния на основе приматов и метода многократного отщепления могут быть эффективно объединены для снижения среднего числа фотонов ν, необходимых для приготовления GHZ-состояния. Мы представляем модифицированную версию процедуры истощения, которая использует нововыявленную степень свободы для повышения эффективности. Кроме того, мы показываем, что использование

немаксимально перепутанных приматных состояний на промежуточных этапах может снизить затраты ресурсов. Важно отметить, что этот подход остается высокоэффективным даже тогда, когда целью является приготовление максимально перепутанного GHZ-состояния.

Кроме того, мы рассматриваем возможность создания GHZ-подобных состояний с переменной степенью перепутанности s. Эта дополнительная гибкость позволяет производить состояния с различными уровнями перепутанности, расширяя спектр потенциальных применений. Полученные затраты фотонов, отражающие улучшения, достигнутые благодаря этим оптимизациям, суммированы на рис. 1.

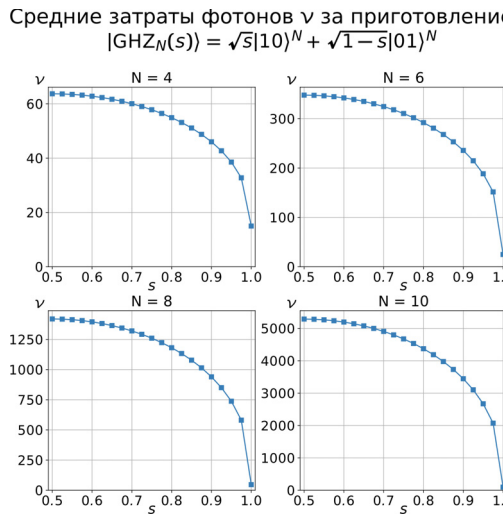


Рис. 1. Улучшенные затраты фотонных ν для приготовление GHZ-подобных состояний с переменной степенью запутанности s для различных чисел кубитов N. Кубиты кодируются в двурельсовом базисе, где однокубитовые состояния представлены фоковскими состояниями фотона, распределенного между двумя модами

С. Фладжян выражает благодарность Фонду развития теоретической физики и математики (БАЗИС) (проект № 23-2-10-15-1) и стипендии Президента РФ для аспирантов и адъюнктов.

Литература

1. Aaronson S., Arkhipov A. The Computational Complexity of Linear Optics // Theory Computing, 2013. № 9 (4). P. 143–252.
2. Knill E., Laflamme R., Milburn G. J. A scheme for efficient quantum computation with linear optics // Nature, 2001. № 409. P. 46–52.
3. Bartolucci S., Birchall P. M., Gimeno-Segovia M., Johnston E., Kieling K., Pant M., Rudolph T., Smith J., Sparrow C., Vidrighin M. D. Creation of entangled photonic states using linear optics [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2021. URL: https://arxiv.org/abs/2106.13825 (дата обращения: 07.06.2025).

УДК 535.93

Эффективная устойчивая к шумам томография многомодовых линейно-оптических интерферометров одиночными фотонами

Бирюков Ю. А.[1], Морозов Р. Д.[1], Дьяконов И. В.[1,2], Страупе С. С.[1,2], Кулик С. П.[1]

[1] Центр квантовых технологий, физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

[2] Российский квантовый центр 121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1

Предложен эффективный метод томографии линейно-оптического интерферометра с использованием двухфотонной интерференции. Метод устойчив к шумам, требует линейного числа измерений и демонстрирует 99,7 % точность на 4-модовом интерферометре.

Ключевые слова: интегральная оптика; квантовая томография; линейно-оптические квантовые вычисления.

Основным элементом квантовых вычислений на линейно-оптической платформе является линейно-оптический (ЛО) многомодовый интерферометр, передаточная матрица которого задает унитарное преобразование когерентных состояний на входе и кодирует целевой квантовый алгоритм. При изготовлении таких интерферометров неизбежно возникают ошибки в преобразованиях, совершаемых его базовыми элементами — светоделителями и фазовращателями, которые ведут к тому, что итоговое преобразование, совершаемое интерферометром, отличается от ожидаемого. Для учета этих отличий при проведении эксперимента необходимо восстановить матрицу изготовленного интерферометра, что и называется томографией ЛО интерферометра. В данной работе предлагается эффективный по числу измерений и устойчивый к экспериментальным шумам (фазовые флуктуации, потери, неточности снятия экспериментальных данных) метод томографии, основанный на использовании двухфотонной интерференции.

Чтобы выявить модули и фазы передаточной матрицы, мы последовательно подаем два одиночных фотона, излученных полупроводниковой квантовой точкой, в пару входных мод интерферометра, одна из которая фиксирована, а другая меняется, и измеряем кросс-корреляционную функцию между всеми парами выходных каналов. Корреляционная функция в нуле определяется элементами передаточной матрицы и неклассической двухфотонной интерференцией неразличимых фотонов, в то время как периодические боковые пики, возникающие из-за периодической накачки квантовой точки, лазерными импульсами, определяются независимым распространением одиночных фотонов в разных временных окнах, т.е. интерференцией различимых фотонов. Оказывается, что соотношение этих пиков, которое мы называем «видностью интерференции», не зависит от выходных потерь и зависит только от соотношения входных потерь и неразличимости подаваемых на вход интерферометра фотонов. В отличие от предыдущих методов [1, 2], нам требуется только одно измерение для оценки видности вместо двух из-за периодичности сигнала от квантовой точки. Используя быструю ПЛИС, можно измерять

все взаимные корреляции одновременно. Таким образом, количество измерений растет линейно с ростом числа мод. После измерения видностей запускается процедура глобальной оптимизации, чтобы получить передаточную матрицу, которая воспроизводит видимости, измеренные экспериментально.

Мы реализовали наш метод на примере 4-модового интерферометра. Было получено 99,7 % соответствия между векторами видности, полученными экспериментально и восстановленными с помощью процедуры оптимизации, что показывает, что восстановленная матрица полностью описывает поведение одиночных фотонов в нашем интерферометре. После этого были проведены эксперименты по 2-фотонному бозонному семплингу с матрицей, восстановленной предложенным методом. Было получено полное согласование теоретического и экспериментального распределений (среднее фиделити по всем распределениям вероятности — 99,8 %).

Литература

1. Laing A., O'Brien J. L. Super-stable tomography of any linear optical device // arXiv preprint arXiv:1208.2868, 2012.
2. Tillmann M., Schmidt C., Walther P. On unitary reconstruction of linear optical networks // Journal of Optics, 2016. Vol. 18. № 11. P. 114002.

УДК 530.145

Высокоточная томография поляризационных квантовых состояний с учетом инструментальных ошибок измерений

Голышев И. К.[1,2,3], Богданова Н. А.[1,2], Шарапов А. А.[3], Богданов Ю. И.[1,2,3]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] НИЦ «Курчатовский институт» — ФТИАН им. К. А. Валиева
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1
[3] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

В настоящей работе предложен алгоритм формирования адекватной модели реконструкции многокубитовых поляризационных квантовых состояний. Показано, что подход на основе нечетких измерений позволяет разработать устойчивые к инструментальным ошибкам протоколы квантовой томографии.
Ключевые слова: кубиты; квантовая томография; нечеткие измерения; декогерентизация.

Для задач контроля качества квантовых технологий и квантовой обработки информации необходимо обеспечить высокую точность и надежность квантовых измерений, учитывая, что применяемые на практике системы измерения квантовых состояний подвержены влиянию инструментальных ошибок [1]. Оказывается, что подход на основе нечетких измерений позволяет существенно повысить точность восстановления квантовых состояний в условиях влияния квантовых шумов и процессов декогерентизации [2, 3, 4].

Состояния поляризационных кубитов измеряют с помощью гаджета, состоящего из полу- и четвертьволновой фазовых пластин, позволяющих изменять измерительный базис. В настоящей работе инструментальные ошибки моделировались посредством равномерно распределенных случайных величин, описывающих неточности в задании углов отклонения быстрых оптических осей фазовых пластинок от вертикали.

Настоящее исследование обобщает ранее разработанные нами модели томографии однокубитовых поляризационных состояний [5] на случай многокубитовых состояний. Исследование проведено с помощью двух различных методов — стандартного подхода на основе идеальных операторов измерения и подхода нечетких измерений. Нами показано, что стандартный подход приводит к насыщению точности реконструкции при увеличении объема выборки, в то время как подход нечетких измерений — к потенциально неограниченному увеличению точности с ростом количества измерений. Применение полученных результатов позволит демпфировать инструментальные ошибки, возникающие при случайном отклонении углов ориентации фазовых пластинок.

Результаты выполненного исследования имеют практическое значение для задач обеспечения качества и эффективности оптических квантовых информационных технологий.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных и поисковых научных исследований в области электронных технологий.

Литература

1. Struchalin G. I., Pogorelov I. A., Straupe S. S., Kravtsov K. S., Radchenko I. V., Kulik S. P. Experimental adaptive quantum tomography of two-qubit states // Physical Review A, 2016. Vol. 93. № 1. P. 012103.
2. Bogdanov Yu. I., Bantysh B. I., Bogdanova N. A., Kvasnyy A. B., Lukichev V. F. Quantum states tomography with noisy measurement channels // International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016. Proc. of SPIE, 2016. Vol. 10224. P. 696 — 705.
3. Bogdanov Yu. I., Dmitriev I. A., Bantysh B. I., Bogdanova N. A., Lukichev V. F. High-precision tomography of ion qubits based on registration of fluorescent photons // Laser Physics Letters, 2023. Vol. 20. № 6. P. 065202.
4. Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Kuznetsov Yu. A., Koksharov K. B., Lukichev V. F. Precise Tomography of Qudits // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № 3. P. 135—143.
5. Голышев И. К., Богданова Н. А., Богданов Ю. И., Лукичев В. Ф. Прецизионная реконструкция поляризационных квантовых состояний в условиях зашумленных измерений // Микроэлектроника, 2025. — Т. 54. — № 5 (в печати).

УДК 621.372.8

Отражатели на направленных ответвителях для слабонаправляющих волноводов

Костюченко Н. С.[1], Журавицкий С. А.[1], Скрябин Н. Н.[1,2], Сайгин М. Ю.[1,3], Дьяконов И. В.[1,2], Калинкин А. А.[1], Корнеев А. А.[1], Страупе С. С.[1,2], Кулик С. П.[1,3]

[1] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
[2] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
[3] Лаборатория квантовой инженерии света, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76

Предложен компактный способ разворота оптических волноводов на 180° с помощью направленного ответвителя и зеркального торца. Метод обеспечивает низкие потери и устойчивость к погрешностям изготовления, что важно для квантовых фотонных схем. Экспериментальная реализация на основе фемтосекундной лазерной записи подтвердила работоспособность подхода.

Ключевые слова: интегральная оптика; квантовые вычисления; фемтосекундная лазерная запись.

Интегрально-оптические чипы широко применяются для реализации квантовых фотонных схем, основу которых составляют многоканальные интерферометры [1]. Однако с увеличением числа каналов возрастает общая длина схемы. Чтобы компактно разместить элементы на чипе и эффективно использовать доступное пространство, применяются изгибы волноводов. Но в технологиях с низким контрастом показателя преломления ($\sim 10^{-3}$) требуются большие радиусы изгибов (десятки миллиметров) [2], что ограничивает миниатюризацию схем и их масштабируемость.

В последние годы предложены конструкции с резкими поворотами волноводов без изгибов [3], основанные на полном внутреннем отражении. Однако они чрезмерно чувствительны к точности изготовления: небольшие отклонения в геометрии приводят к значительным потерям на согласование мод при отражении. В квантовых оптических вычислениях это особенно критично, поскольку потери снижают эффективность передачи квантовых состояний и вероятность успешного выполнения операций. Таким образом, хотя эти методы позволяют компактнее размещать оптические схемы на чипе, их ограничения пока препятствуют широкому применению в интегральной оптике.

В данной работе исследуется новый способ разворота оптических волноводов в интегральных схемах на основе направленного ответвителя и зеркальной торцевой поверхности (рис. 1). Направленный ответвитель, состоящий из двух близко расположенных волноводов, обеспечивает перенос оптического излучения за счет плавной перекачки между каналами, что позволяет избежать высоких потерь

на согласование мод. Параметры, характеризующие взаимодействие между каналами, подбираются таким образом, чтобы добиться полной перекачки излучения из одного волновода в другой. Зеркальная поверхность необходима для перенаправления излучения в обратную сторону. Таким образом, данный элемент (далее — отражатель) позволяет эффективно осуществлять разворот излучения на 180°.

Для изготовления волноводов в настоящей работе используется технология фемтосекундной лазерной записи в кварцевом стекле [4]. На торцевую поверхность образца напыляется металлическое покрытие для реализации зеркала.

На текущий момент было подготовлено теоретическое обоснование эффективности отражателей, а также сделана первая реализация предлагаемого элемента. На первом опытном образце с отражателями была протестирована работоспособность элемента и отработана методика измерений для подобных структур.

В данной работе мы исследовали принципиально новое решение для разворота оптических волноводов на 180° на основе направленного ответвителя и зеркального торца. Ключевое преимущество нашей разработки — минимальные оптические потери при развороте, что критически важно для создания масштабируемых квантовых фотонных устройств.

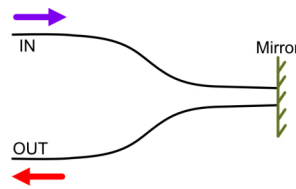


Рис. 1. Схема отражателя

Литература

1. Corrielli G., Crespi A., Osellame R. Femtosecond laser micromachining for integrated quantum photonics // Nanophotonics, 2021. Vol. 10. № 15. P. 3789–3812.
2. Lee T. et al. Low bend loss femtosecond laser written waveguides exploiting integrated microcrack // Scientific Reports, 2021. Vol. 11. № 1. P. 23770.
3. Lv J. et al. Transmission performance of 90°-bend optical waveguides fabricated in fused silica by femtosecond laser inscription // Optics Letters, 2017. Vol. 42. № 17. P. 3470–3473.
4. Skryabin N. N. et al. Femtosecond-laser-written low-loss multiscan waveguides in fused silica // Physical Review Applied, 2024. Vol. 22. № 6. P. 064079.

УДК 538.9

Изучение фазовых переходов в ван-дер-Ваальсовых гетероструктурах: на пути создания квантового симулятора

Чиглинцев Э. О.[1,2], Абрамов А. Н.[3], Кравцов В.[3], Чернов А. И.[1,2]
[1] Российский квантовый центр
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
[2] Центр фотоники и двумерных материалов, Московский физико-технический институт
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] Физико-технический мегафакультет, университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А

Создана и исследована двумерная ван-дер-Ваальсовая гетероструктура из монослоев WS_2/WSe_2. Получена карта значений фотолюминесценции в зависимости от концентрации квазичастичного заполнения муаровой решетки. Обнаружены фазовые переходы в вигнеровский кристалл, фермионный изолятор Мотта и бозонный изолятор. Полученные результаты демонстрируют фазовое разнообразие двумерных материалов для создания квантовых симуляторов.
Ключевые слова: квантовый симулятор; двумерные материалы; фазовые переходы; фотолюминесценция.

В настоящее время расчет сильнокоррелирующей твердотельной квантовой системы является сложной, зачастую невозможной научной задачей в силу ограниченности мощностей вычислительных инструментов. В частности, идея реализации квантового симулятора основывается на решении таких задач для возможности создания материалов с необходимыми характеристиками. Объединяющая концепция аналоговых симуляторов заключается в возможности вариации их квантово-механических параметров: глубины потенциала решетки, взаимодействия частиц и др. На данном этапе уже существуют различные платформы для симуляций: нейтральные атомы в оптической решетке [1], системы из сверхпроводниковых структур [2], ионы в электромагнитных ловушках [3] и другие.

Относительно новой и перспективной платформой для симуляций являются структуры из двумерных материалов [4]. Ниже приведены основные преимущества двумерных систем в качестве платформы для симуляций:

- относительная простота создания устройства и дешевизна реализации;
- наличие новых вариантов регулирования параметров системы;
- широкая база двумерных материалов для реализации различных теоретических моделей, в частности различных типов моделей Хаббарда и др.;
- сравнительно большее число частиц в симуляторе (более 10^5).

На сегодняшний день развитие двумерных систем для квантовых симуляций заключается в исследовании фазовых характеристик различных двумерных объектов и возможности влияния внешних параметров на изменение фазовой диаграммы. В основном подобные исследования проводятся с помощью транспортных и оптических методов. В данной работе мы изучили фазовые переходы бислойной структуры, составленной из контролируемо повернутых монослоев WS_2 и WSe_2, с помощью фотолюминесценции при температуре ~8 K. В качестве активных

«ручек» для изменения концентрации носителей заряда (фермионов), эффективно заполняющих муровую решетку бислоя WS_2/WSe_2, использовались электрические затворы. Для изменения концентрации бозонных квазичастиц на одну ячейку муара изменялась интенсивность возбуждающего лазера. Таким образом, мы зарегистрировали следующие фазы:

- при дробном числе заполнения (ниже единицы) электронами одной муаровой решетки — вигнеровский кристалл;
- при заполнении муаровой решетки одним электроном — моттовский изолятор;
- при единичном бозонном заполнении муаровой решетки — бозонный изолятор.

Фазовое разнообразие и возможность внешнего управления физическими параметрами полученной структуры демонстрируют перспективность двумерных материалов в создании квантового симулятора.

Литература

1. Greiner M., Fölling S. Optical lattices // Nature, 2008. Vol. 453. P. 736–738. https://doi.org/10.1038/453736a.
2. Houck A., Türeci H., Koch J. On-chip quantum simulation with superconducting circuits // Nature Phys., 2012. Vol. 8. P. 292–299. https://doi.org/10.1038/nphys2251.
3. Blatt R., Roos C. Quantum simulations with trapped ions // Nature Phys., 2012. Vol. 8. P. 277–284. https://doi.org/10.1038/nphys2252.
4. Kennes D. M., Claassen M., Xian L. et al. Moiré heterostructures as a condensed-matter quantum simulator // Nat. Phys., 2021. Vol. 17. P. 155–163. https://doi.org/10.1038/s41567-020-01154-3.

УДК 530.145

Исследование спектров ОДМР системы NV-^{13}C в решетке алмаза

Косогорова Т. А., Вергелес С. С., Гусев А. С., Калошин М. М., Маргушин Р. Е., Салказанов А. Т., д. т. н., Каргин Н. И.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
6460tak@gmail.com

Выполнено моделирование спектров ОДМР системы NV-^{13}C, включая димеры ^{13}C-^{13}C на основе метода спинового гамильтониана. Модельные спектры изучаемой системы хорошо согласуются с экспериментально полученными данными.

Ключевые слова: центр азот-вакансия; углерод-13; ОДМР; спиновый гамильтониан.

Развитие квантовых технологий требует надежных методов хранения и обработки квантовой информации. Одним из перспективных направлений является использование твердотельных спиновых систем, в частности азот-замещенных вакансий в алмазе (NV-центров), взаимодействующих с ядерными спинами изотопа углерода-13 (^{13}C). Такие системы обладают длительными временами когерентности и возможностью управления спиновыми состояниями с помощью оптических и микроволновых методов, что делает их привлекательными для реализации квантовой памяти. Недавно для такого применения было предложено использовать димеры ^{13}C—^{13}C в паре с NV-центрами. Они подходят для этой цели, поскольку в синглетном состоянии имеют чрезвычайно длительное время когерентности (минуты при комнатной температуре). При этом для управления таким регистром необходимо знать энергетическую структуру комплекса, которая может быть разной для разных конфигураций NV-^{13}C (определяется относительным расположением NV и ^{13}C). Информацию об энергетической структуре можно получить из спектров оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) таких комплексов. Данная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию спектров ОДМР подобных систем. Спектры ОДМР NV-^{13}C моделировались с использованием метода спинового гамильтониана [1, 2]. Моделирование проводилось численно на языке программирования Python с использованием библиотеки Numpy.

Регистрация экспериментальных спектров ОДМР системы азот-вакансионного центра и изотопа углерода-13 в образцах CVD-алмаза осуществлялась с помощью сканирующей лазерной конфокальной микроскопии. Установка для регистрации спектров ОДМР включала в себя лазер с длиной волны 532 нм для поляризации электронного спина NV-центра, источник микроволнового излучения в диапазоне от 2 до 4 ГГц для управления спиновыми переходами, иммерсионный объектив и лавинные фотодиоды для сбора и регистрации флуоресценции (650–800 нм), источник магнитного поля (постоянный магнит).

В экспериментальном образце были найдены различные конфигурации NV-^{13}C, где атом изотопа углерода-13 находился в третьей и четвертой координационной сфере относительно вакансии. Экспериментальные спектры ОДМР были интерпретированы с помощью модели с использованием данных квантово-химического

моделирования из работы [3]. Построенные модельные спектры ОДМР хорошо согласуются с экспериментом. Также было проведено моделирование спектров ОДМР различных конфигураций, где центр азот-вакансия имеет два близко расположенных изотопа ^{13}C (димер). Таким образом, полученные в данном исследовании результаты могут быть использованы для разработки эффективных импульсных последовательностей для управления рассматриваемыми в работе квантовыми регистрами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-556 от 25 апреля 2024 г.).

Литература

1. Низовцев А. П. и др. Квантовые регистры на одиночных NV^+ n 13-центрах в алмазе. I. Метод спин-гамильтониана // Оптика и спектроскопия, 2010. — Т. 108. — № 2. — С. 260–269.
2. Низовцев А. П., Килин С. Я. Квантовые регистры на одиночных nv+ n 13 центрах в алмазе. II. Спиновые характеристики регистров и спектры оптически детектируемого магнитного резонанса // Оптика и спектроскопия, 2010. — Т. 108. — № 2. — С. 270–277.
3. Nizovtsev A. P. et al. Non-flipping 13C spins near an NV center in diamond: hyperfine and spatial characteristics by density functional theory simulation of the C510 [NV] H252 cluster // New Journal of Physics, 2018. Vol. 20. № 2. P. 023022.

УДК 004.738.2: 004.087.5: 004.056.55

Экспериментальный ключевой центр для мобильных устройств

Зайцев Д. Л.[1], Стрижак Д. В.[1], Задиран Н. В.[1], Сантьев А. А.[2], Кожанов И. А.[1], Приютов А. А.[3], Поздняков А. М.[1,4]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] ООО «Смартс-Кванттелеком»
199178, г. Санкт-Петербург, В.О., 6-я линия, 59, корп. 1, лит. Б, пом. 17/6н
[3] ООО «КуРэйт»
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
[4] АО «ЦИР»
101000, г. Москва, Милютинский пер., 13, стр. 1, пом. I

Представлен экспериментальный диверсификатор — компактный ключевой центр, который запрашивает квантовые ключи у системы распределения ключей (KPK), преобразует их в производные ключи и безопасно передает их мобильным устройствам через защищенный NFC-канал. Устройство объединяет Ethernet-модуль для связи с KPK, встроенный генератор случайных чисел для автономного режима и криптографические алгоритмы ГОСТ для шифрования и имитозащиты [1]. Прототип демонстрирует практическую интеграцию квантового распределения ключей в мобильные приложения, повышая безопасность корпоративной связи.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей; защищенная мобильная связь; защищенный обмен сообщениями; средство криптографической защиты информации.

Представлен экспериментальный диверсификатор — компактное устройство (ключевой центр) для интеграции квантового распределения ключей с мобильными устройствами. Его основная функция — получение квантовых ключевых данных от системы KPK и выдача производных криптографических ключей в пользовательский смартфон для последующего использования в приложении-мессенджере. Устройство поддерживает два режима работы (роли Алиса и Боб) и может выступать инициатором или получателем ключевой информации при взаимодействии двух экземпляров устройств. Это позволяет двум абонентам обменяться общим секретным ключом, сгенерированным квантовым способом, для организации квантово-защищенного канала связи.

Архитектура и компоненты. Диверсификатор реализован на аппаратной платформе с микроконтроллером STM32F429ZI (ARM Cortex-M4) и включает следующие основные узлы:

- MCU STM32F429ZI — центральный процессор, управляющий работой устройства;
- Ethernet-интерфейс — модуль проводной сети (RJ45) для подключения к узлу KPK и обмена данными по TCP/TLS;
- NFC-модуль (TagType4) — для ближней связи со смартфоном (формат сообщений NDEF);

- физический генератор случайных чисел — аппаратный ФГСЧ («Гроссмейстер») для локальной генерации энтропии и автономного режима;
- интерфейс пользователя — дисплей и органы управления для индикации состояния, ввода настроек и аутентификации администратора.

Программная архитектура включает ряд взаимодействующих модулей. Сетевой модуль ProtoQa [2] обеспечивает защищенное соединение с квантовой сетью (UDP/TLS) и реализацию протокола запросов ключей у сервера КРК. Криптографический модуль выполняет алгоритм выработки производных ключей из базового квантового материала [3], генерирует служебные ключи (например, пароль для сеанса NFC) и осуществляет шифрование и имитозащиту служебных сообщений (на базе алгоритмов ГОСТ, в частности режима MGM для шифра «Кузнечик»). NFC-модуль протокола формирует NDEF-сообщения, устанавливает общий сеансовый ключ приложения и устройства (из парольной фразы) и передает ключевую информацию по интерфейсу NFC в зашифрованном виде. Логика пользовательского интерфейса отвечает за инициализацию, выбор режима (Алиса/Боб), управление сертификатами для аутентификации в сети КРК, а также за взаимодействие с пользователем (отображение статусов, PIN-кода, ошибок).

Благодаря открытой архитектуре диверсификатор остается мультивендорным: он уже работает с протоколом ProtoQa, аппаратным ФГСЧ и при необходимости обменивается ключевой информацией по корпоративным интерфейсам ETSI, не теряя совместимости. В его криптомодуль встроены адаптеры, которые позволяют без серьезной доработки подключать новые алгоритмы или сторонние источники ключевого материала. Таким образом, устройство можно интегрировать в гетерогенные инфраструктуры, где сосуществуют решения разных производителей. При этом ProtoQa становится объединяющим стандартом, к которому сейчас стремятся ключевые игроки рынка, обеспечивая единый язык для сервисов квантового распределения ключей.

Предложенный диверсификатор реализует полный цикл получения, криптографической обработки и доставки ключей от квантовых распределителей до конечных мобильных устройств. Созданный прототип, по сути, представляет собой NFC-токен для квантово-защищенной мобильной связи, демонстрируя практическую возможность интеграции инфраструктуры КРК в приложения защищенного мобильного обмена данными. В дальнейших разработках планируется улучшение протоколов взаимодействия и отработка сценариев массового применения таких устройств в корпоративных сетях связи.

Литература

1. Р 1323565.1.046-2023 «Информационная технология. Криптографическая защита информации. Защищенный протокол взаимодействия квантово-криптографической аппаратуры выработки и распределения ключей и средства криптографической защиты информации».
2. Науменко А. П., Бородин М. А. Защищенный протокол взаимодействия квантово-криптографической аппаратуры выработки и распределения ключей и средства криптографической защиты информации (ProtoQa) [Электронный ресурс]. — URL: https://ruscrypto.ru/resource/archive/rc2021/files/07_borodin.
3. РД ТК26 Р 50.1.113-2016 «Крипртографическая защита информации. Криптографические алгоритмы, сопутствующие применению алгоритмов электронной цифровой подписи и функции хэширования».

УДК 519.17+004.8

Обучение тензорной модели квантового состояния с использованием нескольких однокубитных измерений

Кузьмин С. С.[1,2], Михайловна В. И.[1,2], Дьяконов И. В.[1,2], Страупе С. С.[1,2]
[1] *Центр квантовых технологий,*
физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1
[2] *ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий»*
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, 30, стр. 1

Экспоненциальный рост сложности квантовой томографии с увеличением числа кубитов делает ее нереализуемой для больших систем. Методы теневой томографии, основанные на теории PAC, позволяют сделать предсказания вероятностей исходов измерений с линейной сложностью. Мы предлагаем протокол неполной квантовой томографии, использующий тензорные сети для представления оператора плотности квантового состояния и однокубитные измерения, сложность которого линейно масштабируется с ростом числа кубитов.

Ключевые слова: квантовая томография; тензорные сети; PAC-обучение; машинное обучение.

В общем виде смешанное состояние N-кубитного регистра представимо в виде

$$\hat{\rho} = \Sigma \rho_{i_1 \ldots i_N, j_1 \ldots j_N} \vee i_1,$$

где тензор $\hat{\rho}_{i_1 \ldots i_N, j_1 \ldots j_N}$ представлен в формате *matrix product operator* (MPO).

Измерение описывается операторами $\{\hat{E}^{(j)}\}$. Вероятность получить при измерении результат j $p_j = Tr(\hat{E}^{(j)}\hat{\rho})$. Рассматриваются только тензорные произведения однокубитных проективных измерений.

Процесс обучения состоит в поиске модели $\hat{\sigma}$, которая воспроизводит тренировочные данные и предсказывает вероятность успеха $\tilde{p}$ нового измерения.

Оператор $\hat{\Omega}$ представим в виде MPO с максимальным рангом ядер χ_M. Параметры оптимизируются минимизацией MSE.

Результаты для минимального размера обучающей выборки для случайно сгенерированных смешанных состояний показаны на рис. 1.

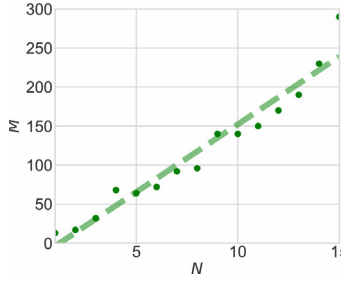


Рис. 1. Минимальный размер обучающей выборки для успеха при $R^2 = 0{,}5$ для $\chi_S = 4$, $\chi_M = 4$

Более подробные результаты представлены в работе [1].

Литература

1. Kuzmin S., Mikhailova V., Dyakonov I., Straupe S. Learning the tensor network model of a quantum state using a few single-qubit measurements // Phys. Rev. A, May 2024. 109:052616.

УДК 537.622.4

Управление распространением спиновых волн в гибридных структурах ЖИГ/ЖР путем термоиндуцированной модуляции намагниченности

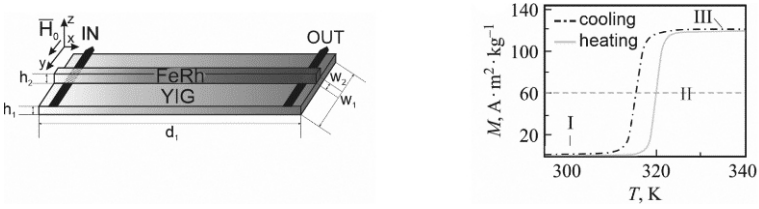
Пташенко А. С., Садовников А. В.
СГУ им. Н. Г. Чернышевского
410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83
andrey.po3@mail.ru

Исследовано термоуправление распространением спиновых волн в структуре ЖИГ/ЖР. Изменение намагниченности слоя ЖР переключает локализацию интенсивности СВ от затухания к концентрации в областях ЖИГ вне ЖР и в канале под ЖР. Показана перспектива для разработки термоуправляемых магнонных устройств.

Ключевые слова: спиновые волны; железо-иттриевый гранат; железо-родий; пространственная локализация.

В настоящее время активно проводятся исследования магнитных материалов с магнитным фазовым переходом первого рода (FOMPT) для потенциального применения в энергоэффективных технологиях, системах контроля температуры и устройствах памяти. Особый интерес вызывает сплав железо-родий (ЖР) [1] с его упорядоченной кристаллической структурой, изменяющейся в диапазоне температур 310–360 K [2, 3, 4]. Магнонные волноводы, включая волноводы из железо-иттриевого граната (ЖИГ), рассматриваются для управления спиновыми волнами (СВ), и комбинированные структуры ЖИГ/ЖР представляют перспективу в разработке новых устройств для вычислений на основе магнонной логики [5, 6].

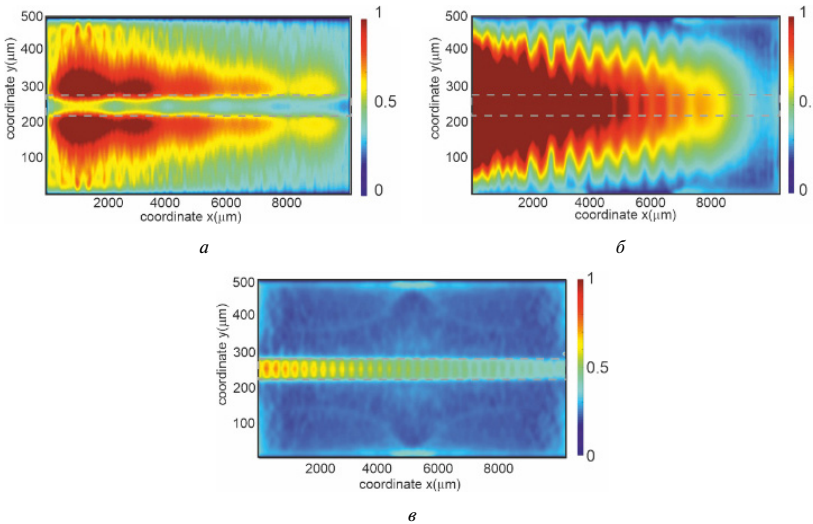
Рассматривается структура, состоящая из микроволновода ЖИГ ($Y_3Fe_5O_{12}$) и слоя ЖР. Микроволновод ЖИГ выращивается на подложке из гадолиний-галлиевого граната. ЖИГ обладает намагниченностью насыщения $M_S = 139$ кА/м и шириной линии ферромагнитного резонанса $\Delta H = 0{,}54$ Э. Размеры ЖИГ/ЖР-микроволновода, приведенного на рис. 1*а*, составляют: $d_1 = 7000$ мкм, $w_1 = 500$ мкм, $h_1 = 10$ мкм, $d_2 = 7000$ мкм, $w_2 = 50$ мкм, $h_2 = 30$ мкм.



а *б*

Рис. 1. Схема рассматриваемой структуры (*а*); экспериментально полученная температурная зависимость намагниченности сплава ЖР (сплошная — нагрев, штрихпунктирная — охлаждение) (*б*)

К структуре вдоль оси *y* приложено внешнее магнитное поле H_0 = 1200 Oe, что обусловлено необходимостью возбуждения ПМСВ [7, 8]. Для данного исследования были использованы характеристики сплава $Fe_{48}Rh_{52}$. Экспериментально полученная в работе [9] зависимость намагниченности от температуры показана на рис. 1*б*. Для численного моделирования были выбраны три характерные точки, обозначенные на рис. 1*б*, соответствующие трем уровням температуры/намагниченности в сплаве ЖР.



а *б*

в

Рис. 2. Карты пространственного распределения интенсивности спиновых волн в структуре с ЖР при различных значениях распределений намагниченности ЖР: *а*) M_{sat} = 0 кА/м, *б*) M_{sat} = 60 кА/м, *в*) M_{sat} = 120 кА/м

На рис. 2*б* представлена карта распределения интенсивности для случая, когда M_{sat} = 0. При возбуждении спин-волнового сигнала в микроволноводе происходит возбуждение ширинных мод структуры с поперечными волновыми числами [10]. При распространении СВ наблюдается интерференция собственных мод и затухание волны. При увеличении температуры слоя ЖР и увеличении намагниченности ЖР Msat = 60 кА/м наблюдается локализация интенсивности СВ в области ЖИГ, свободной от слоя ЖР. При этом интенсивность сигнала концентрируется на границе соприкосновения двух слоев: ЖР и ЖИГ (см. рис. 2*а*). Наблюдается разделение интенсивности СВ на три области: первые две совпадают с областью ЖИГ, не покрытой слоем ЖР, а третья расположена под слоем ЖР, ввиду этого можно сделать предположение о возникновении распределенной продольной связи СВ через область под слоем ЖР, однако в первых двух областях наблюдается значительная концентрация интенсивности СВ. При дальнейшем увеличении намагниченности до M_{sat} = 120 кА/м наблюдается концентрация интенсивности СВ в третьей области, а именно волна начинает распространяться в узком канале внутри ЖИГ под слоем ЖР, что продемонстрировано на рис. 2*в*.

Проведенный анализ метода управления распространением спиновых волн в композитной структуре, содержащей полосу железо-иттриевого граната (ЖИГ) с полосой железа-родия (ЖР), показал потенциал применения данной конфигурации для контроля свойств распространяющихся спиновых волн. Изменяя намагниченность слоя ЖР путем точечного нагрева, можно достичь пространственной локализации мощности спиновой волны в различных областях структуры, что открывает новые возможности для разработки спинтронных устройств и магнетоэлектроники на основе материалов с включением ЖР.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-30027).

Литература

1. Safin A. R., Nikitov S. A., Kirilyuk A. I., Kalyabin D. V., Sadovnikov A. V., Stremoukhov P. A., Logunov M. V., Popov P. A. // Journal of Experimental and Theoretical Physics, 2020. № 158. P. 85.
2. Nikitin S., Myalikgulyev G., Tishin A., Annaorazov M., Asatryan K., Tyurin A. // Phys. Lett., 1990. A148, 363.
3. Lee Y., Liu Z. Q., Heron J. T., Clarkson J. D., Hong J., Ko C., Biegalski M. D., Aschauer U., Hsu S. L., Nowakowski M. E., Wu J., Christen H. M., Salahuddin S., Bokor J. B., Spaldin N. A., Schlom D. G., Ramesh R. // Nature Commun., 2015. 6, 5959.
4. Tohki A., Aikoh K., Iwase A., Yoneda K., Kosugi S., Kume K., Batchu-luun T., Ishigami R., Matsui T. // Appl. Phys., 2012. 111, 07A742.
5. Khitun A., Bao M., Wang K. L. Magnonic logic circuits // Journal of Physics D: Applied Physics, 2010. Vol. 43. № 26. P. 264005.
6. Demidov J., Urazhdin S., Anane A., Cros V., Demokritov S. O. 2017PhR. 673. 1D3607929. Vol. 673. Phys. Rep., 2017.
7. Stancil D. D. and Prabhakar A. New York: Springer, 2009.
8. Gurevich A. G. and Melkov G. A. Magnetization Oscillations and Waves, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1996.
9. Amirov A. A., Baraban I. A., Grachev A. A., Kamantsev A. P., Rodionov V. V., Yusupov D. M., Rodionova V. V., Sadovnikov A. V. AIP Advances, 2020. Vol. 10. P. 025124.
10. Bajpai S. N. Excitation of magnetostatic surface waves:Effect of finite sample width // Journal of Applied Physics, 1985. Vol. 58. P. 910.

УДК 004.738.2: 004.087.5: 004.056.55

Проектирование и реализация схемы безопасного распределения ключей для мессенджера на основе протокола ProtoQa

Зайцев Д. Л.[1], Кожанов И. А.[1], Стрижак Д. В.[1], Задиран Н. В.[1], Сантьев А. А.[3], Поздняков А. М.[1,2]

[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «ЦИР»
101000, г. Москва, Милютинский пер., 13, стр. 1, пом. I
[3] ООО «Смартс-Кванттелеком»
199178, г. Санкт-Петербург, В.О., 6-я линия, 59, корп. 1, лит. Б, пом. 17/6н

Было разработано защищенное устройство для хранения и распределения ключей, полученных из квантово-криптографической системы выработки, и распределения ключей в соответствии с протоколом ProtoQa. Примером использования этой технологии является установление защищенного обмена сообщениями в мессенджере. Приведена реализация прототипа устройства и мессенджера, проанализирована его безопасность и удобство интеграции в существующие решения.

Ключевые слова: квантовое распределение ключей; защищенная мобильная связь; защищенный обмен сообщениями.

Одним из самых перспективных методов распределения криптографических ключей являются квантовые системы — за счет доказанной стойкости их алгоритмов. Однако на сегодня из-за недостатка удобных пользовательских интерфейсов готовых решений для конечного пользователя представлено мало.

В этой работе показано, как на практике организовать взаимодействие системы квантового распределения ключей (КРК) и ключевого центра (КЦ) — системы, отвечающей за генерацию, хранение и распределение ключей. КЦ и система распределения квантовых ключей в данной реализации соединяются через интерфейс Ethernet по протоколу UDP. UDP-нагрузка трафика между КЦ и КРК защищается в соответствии с рекомендациями по стандартизации Р 1323565.1.046-2023 «Информационная технология. Криптографическая защита информации. Защищенный протокол взаимодействия квантово-криптографической аппаратуры выработки и распределения ключей и средства криптографической защиты информации» (протокол ProtoQa) и протоколом по ГОСТ Р 71252-2024 «Информационная технология. Криптографическая защита информации. Протокол защищенного обмена для индустриальных систем» (CRISP — CRyptographic Industrial Security Protocol).

Надежность и защищенность предлагаемой схемы обеспечиваются следующими факторами. Протокол ProtoQa использует российские криптографические алгоритмы и гарантирует защищенную связь между КЦ и КРК. При запросе нового сеансового ключа с мобильного устройства передача 32-байтового ключа идет по короткодействующему зашифрованному радиоканалу NFC, что исключает перехват на расстоянии и упрощает пользовательский опыт. Таким образом,

контролируется каждый этап передачи секретной информации. Используются ГОСТ-сертифицированные алгоритмы, что соответствует российским стандартам шифрования. Устройство не требует сложной настройки, удобно в эксплуатации и стоит значительно меньше полноценных КРК. Это позволяет строить гибкую сеть из магистрального КРК и множества пользовательских КЦ. Универсальность системы позволяет при небольших доработках использовать распределенный сеансовый ключ не только в мессенджерах, но и в других приложениях, например, для генерации банковских одноразовых кодов.

В результате выполненной работы создан прототип устройства на базе микроконтроллера STM32F429ZIT6 с Ethernet-интерфейсом для подключения к КРК- и NFC-модулям для передачи ключевой информации на мобильные устройства. Параллельно разработан Android-клиент мессенджера. На примере двух удаленных центров КРК и нескольких КЦ продемонстрирована схема формирования защищенной сети с распределением сеансовых ключей между конечными пользователями.

Литература

1. ГОСТ Р 71252-2024. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Протокол защищенного обмена для индустриальных систем. — Введен 01.04.2024. — М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2024.
2. Р 1323565.1.046-2023. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Защищенный протокол взаимодействия квантово-криптографической аппаратуры выработки и распределения ключей и средств криптографической защиты информации. Утвержден Приказом Росстандарта № 1510-ст от 30.11.2023, введен в действие 01.01.2024. — Санкт-Петербург: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2023.
3. Науменко А. П., Бородин М. А. Защищенный протокол взаимодействия квантово-криптографической аппаратуры выработки и распределения ключей и средства криптографической защиты информации (ProtoQa) [Электронный ресурс]. — URL: https://ruscrypto.ru/resource/archive/rc2021/files/07_borodin_naumenko.pdf.

УДК 621.383

Способы повышения эффективности преобразования энергии солнечных элементов на основе допированных перовскитных ячеек

Муратова Е. Н.[1], к. т. н., Мошников В. А.[1], д. ф.-м. н., Врублевский И. А.[2], к. т. н., Алешин А. Н.[3], д. ф.-м. н.

[1] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
sokolovaeknik@yandex.ru
[2] Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
220013, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки, 6
[3] Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Рассмотрены вопросы развития наноархитектоники солнечных элементов на основе допированных перовскитных ячеек. В работе использованы особые методики атомно-силовой микроскопии для контроля фрактальности поверхности исследуемых слоев, обладающих деградационной устойчивостью за счет замедления диффузионных процессов.

Ключевые слова: наноархитектоника; межслойный дизайн; перовскит; солнечная энергетика.

Перовскитные солнечные элементы играют большую роль в развитии альтернативной энергетики. Их фотоэлектрические характеристики зависят от электрической проводимости и подвижности носителей заряда. Поэтому при разработке новых материалов на основе гибридных галогенидных перовскитов важны исследования особенностей миграции заряженных дефектов или ионных частиц. Введение добавок обеспечивает гибкое управление принципом толерантности Гольдшмидта и создание особой наноархитектоники поверхностных слоев.

В связи с этим актуальными задачами являются вопросы сочетания материалов в солнечной ячейке, основными составляющими которой являются активный и транспортные слои. В СПбГЭТУ «ЛЭТИ» совместно с объединенным центром СЗМ [1], ФТИ им. Иоффе и БГУИР ведутся активные исследования для повышения КПД ячейки в целом. В работе исследуются активные перовскитные слои (как с неорганическими, так и с органическими катионами (Cs и MA, FA) [2, 3]), транспортные слои *n*- (TiO_2) [4] и *p*-типов (PEDOT:PSS и Spiro-OMeTAD) [5] и элементы прозрачных проводящих электродов.

Задачи уменьшения деградации приводят к новым приемам дизайна активного и транспортных слоев. При определенных условиях синтеза формируются структуры с иерархическим строением, которые обладают более высокими значениями энергии активации диффузионных процессов, а значит, меньше подвергаются деградации. Образование фрактальной поверхности сопровождается изменением электрофизических свойств. Результаты, представленные в [1], показали, что

элементы фрактальной структуры на границе затрудняют диффузию ионов и тем самым потенциально повышают стабильность материала.

Результаты исследования ВАХ и оптических свойств МА перовскитных образцов (в чистом виде и легированные Ba) показали, что при освещении имитатором солнечного света они демонстрируют хорошую линейность в различных диапазонах напряжения и увеличение проводимости в видимом спектральном диапазоне [4]. Улучшение проводимости транспортного слоя *p*-типа PEDOT: PSS за счет различных добавок (аминов, углеродных точек [5]) снижает потери в последовательном сопротивлении, что, в свою очередь, приводит к увеличению эффективности ячеек. Получение пленок TiO_2 с фрактальной структурой сопровождается изменением электрофизических свойств и наличием двух механизмов проводимости в двух различных интервалах температур, что дает возможность использовать такой материал в качестве электронного транспортного слоя в перовскитных фотовольтаических ячейках [4].

Таким образом, на основе проведенных исследований определены направления развития технологических приемов по повышению эффективности преобразования энергии солнечных элементов на основе перовскитных ячеек.

Работа выполнена при поддержке гранта российского научного фонда № 23-42-10029 от 20.12.2022, https://rscf.ru/project/23-42-10029.

Литература

1. Muratova E., Kozodaev D., Moshnikov V., et al. AFM for monitoring interphase interfaces of solar cells // European Materials Research Society. B. Advancing sustainable organic photovoltaics: from experiments and materials to applications and device models, 2024. P. 00370.
2. Muratova E. N., Moshnikov V. A., Aleshin A. N. et al. Research and optimization of crystallization processes of solutions of hybrid halide perovskites of the CH3NH3PbI3 composition // Glass Physics and Chemistry, 2023. Vol. 49. № 6. P. 672–679.
3. Nenashev G. V., Aleshin A. N., Ryabko A. A., et al. Effect of barium doping on the behavior of conductivity and impedance of organic-inorganic perovskite films // Solid State Communications, 2024. Vol. 388. P. 115554.
4. Гагарина А. Ю., Безверхний В. П., Муратова Е. Н. и др. Получение и свойства наноразмерной пленки диоксида титана для транспортного слоя n-типа фотовольтаической ячейки // Физика и техника полупроводников, 2024. — Т. 58. — № 11. — С. 591–593.
5. Spivak Y., Muratova E., Moshnikov V. et al. Improving the Conductivity of the PEDOT:PSS Layers in Photovoltaic Cells Based on Organometallic Halide Perovskites // Materials, 2022. Vol. 15 (3). P. 990.

УДК 538.915

Радиационная устойчивость гибридных перовскитов — материалов солнечных ячеек третьего поколения

Катков Е. В.[1], Жидков И. С.[1,2,3], Озерова В. В.[3], Трошин П. А.[3,4]
[1] УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
[2] Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения РАН
620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
[3] Федеральный исследовательский центр
проблем химической физики и медицинской химии РАН
142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семёнова, 1
[4] Zhengzhou Research Institute of HIT, 26 Longyuan East 7th, Jinshui District, Zhengzhou, China

Работа включает в себя широкий поиск составов гибридных галидных перовскитов, обладающих повышенной радиационной стабильностью. Исследовалось влияние составов и добавок на устойчивость синтезированных материалов к электронному и протонному облучению, что является важным аспектом для применения в космических технологиях.
Ключевые слова: галидные перовскиты; ПСЭ; радиационная стойкость; дефекты; спектроскопия.

Гибридные галидные перовскиты представляют собой группу материалов, которые вызывают большой интерес при разработки солнечных ячеек с высокой эффективность и низкой стоимостью, а также при разработке новых ярких светодиодов. За последние 15 лет коэффициент преобразования энергии в перовскитных солнечных элементах (ПСЭ) значительно возрос — с 3,8 до 26,1 %. Эти устройства с трехмерным активным слоем отличаются дешевизной исходного сырья, простотой технологии изготовления, высокими фотоэлектрическими свойствами, регулируемой шириной запрещенной зоны, хорошей прозрачностью и высокой подвижностью носителей заряда. Кроме этого, такие солнечные элементы имеют гораздо меньший вес в сравнении с наиболее распространенными кремниевыми элементами и могут быть изготовлены на гибких подложках.

Перечисленные выше достоинства перовскитных солнечных элементов делают их особенно интересными для применения в космических технологиях. Однако общим недостатком данных материалов является отсутствие достаточных доказательств их долгосрочной стабильности. Деградация перовскитных солнечных элементов, рассматриваемая как основная проблема стабильности [1], практически отсутствует в космосе. Но в то же время вакуумные условия могут увеличивать выделение газов и способствовать индуцированному светом образованию дефектов и миграции ионов в кристаллах перовскита и на границах зерен. Среди различных подходов, предложенных для решения проблемы внутренней термической, фотохимической и радиационной стабильности перовскитных солнечных элементов, особенно перспективным является применение молекулярных модификаторов — органических молекул (спейсеров), действующих как квантовые ямы с большой шириной запрещенной зоны и препятствующих миграции ионов [2]. Они способны оказывать положительное влияние на свойства фотоактивного материала

и характеристики солнечных батарей на его основе. Кроме того, исследованы такие подходы, как частичное замещение B-катиона, а также частичное анионное смешивание и замещение A-катиона [3].

Для оценки структурных и функциональных изменений в перовските и анализа радиационной стабильности образцов проводилось облучение электронами с энергией 8 МэВ и протонами с энергией 18 МэВ. Облученные материалы изучались с применением методов оптической спектроскопии, рентгеновской дифракции, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), фотолюминесценции и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

В результате исследований установлено, что некоторые ПСЭ обладают повышенной устойчивостью, сохраняют кристаллическую решетку и практически не имеют радиационно-индуцированных дефектов. Такие материалы оказываются устойчивыми вплоть до высоких доз ионизирующего излучения. В то же время в других образцах, наоборот, наблюдается деградация, проявляющаяся в фазовой сегрегации и изменении структуры органического катиона. Полученные данные могут стать основой для создания радиационно-устойчивых ПСЭ в условиях космоса.

Литература

1. Afshari H. et al. Radiation tolerance and self-healing in triple halide perovskite solar cells // APL Energy, 2023. Vol. 1. № 2.
2. Allison J. et al. Geant4 developments and applications // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2006. Vol. 53. № 1. P. 270–278.
3. Chen R. et al. Reduction of bulk and surface defects in inverted methylammonium- and bromide-free formamidinium perovskite solar cells // Nat. Energy, 2023. Vol. 8. № 8. P. 839–849.

УДК 535.375.5

ГКР-подложки на основе металл-диэлектрических микрорезонаторов

Шестопалова М. С.[1,2], Сарычев А. К.[3], Иванов А. В.[3], Быков И. В.[3], Смык А. Ф.[4], Шурыгин А. В.[4], Коржов Д. С.[1,2], Олейников В. А.[1,2], Мочалов К. Е.[1]

[1] Институт биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН
117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10
shestopalova.milena@gmail.com
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
[3] Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН
125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13
[4] ООО «James River Branch»
123458, г. Москва, ул. Твардовского, 8, стр. 1

Изготовлены ГКР-подложки на основе металл-диэлектрических микрорезонаторов из профилированного поликарбонатна, покрытого тонким слоем серебра. ГКР-активность подложек проверена на модельном веществе — 4-меркаптофенилбороновой кислоте. Обнаружено, что предел детекции может достигать 0,5 мкМ.

Ключевые слова: гигантское комбинационное рассеяние; ГКР-подложки; металл-диэлектрические микрорезонаторы; усиление электрического поля.

В настоящее время оптические метаповерхности находят широкое применение в различных областях [1] — от фотовольтаики и нелинейной оптики до сенсорики и нанофотоники. Одним из таких направлений, в частности, является спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) [2], где метаповерхности используются в качестве высокоэффективных подложек, усиливающих локальное электромагнитное поле и повышающих воспроизводимость и селективность метода. В данной работе представлены металл-диэлектрические микрорезонаторы, усиливающие сигнал ГКР за счет возбуждения гибридных металл-диэлектрических резонансов.

Металл-диэлектрические микрорезонаторные метаповерхности были изготовлены на основе профилированных пленок поликарбоната, полученных методом голографической интерференционной литографии и покрытых 50-нм слоем серебра. Характеризация подложек проведена методом атомно-силовой микроскопии: модулированный период составил ~400 нм, высота профиля — ~200 нм.

ГКР-активность изготовленных структур исследовали на модельном аналите — водном растворе 4-меркаптофенилбороновой кислоты (4-MPBA). Для регистрации спектров использовался водно-иммерсионный объектив x0,63/0,9, длина волны возбуждения 785 нм, мощность 0,7 мВт и время накопления 10 с. Спектры были сняты как на гладкой поверхности поликарбонатных матриц, так и на профилированной. Сигнал наблюдался только на профилированной поверхности, усиление составило ~12000 раз, отношение сигнал/шум (S/N) — 60.

Для определения предела детекции использовались растворы 4-MPBA с концентрациями 50, 5 и 0,5 мкМ. Обнаружено, что интенсивность сигнала ГКР практически линейно зависит от концентрации. Соотношение сигнал/шум для концентрации 0,5 мкМ — 3, что является предельно допустимым значением, и, следовательно, 0,5 мкМ является пределом детекции. Кроме того, представленные в данной работе ГКР-подложки могут быть использованы для детектирования реальных биологических объектов — экзосом, что делает их перспективной основой для создания биосенсоров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 23-19-00788.

Литература

1. Ou K., Wan H., Wang G. et al. Advances in meta-optics and metasurfaces: fundamentals and applications // Nanomaterials, 2023. Vol. 13. 1235.
2. Barbillon G. Latest advances in metasurfaces for SERS and SEIRA sensors as well as photocatalysis // Int. J. Mol. Sci., 2022. Vol. 23. 10592.

УДК 537.512

Эффективная температурно-чувствительная ТГц-генерация в структурах на основе сплавов NixCi1-x в парамагнитной и ферромагнитной фазах

Лебедева Е. Д.[1], Авдеев П. Ю.[1], Алферьев А. Л.[1], Караштин Е. А.[2], Пашенькин И. Ю.[2], Сапожников М. В.[2], Буряков А. М.[1]

[1] МИРЭА — Российский технологический университет

119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

[2] Институт физики микроструктур РАН

603087, Нижегородская обл., Кстровский р-н, д. Афонино, ул. Академическая, 7

Lebedeva_ed@mirea.ru

В работе показано, что сплавы Ni_xCu_{1-x} с SHA до 4,1 % и чувствительной к составу точкой Кюри могут не только преобразовывать, но и генерировать спинток. Экспериментальное исследование ТГц-излучения в $Ni_{0,78}Cu_{0,22}$(FM)/ $Ni_{0,64}Cu_{0,36}$(PM) и Co/$Ni_{0,64}Cu_{0,36}$(PM) подтвердило генерацию сигнала через ISHE и переход ферромагнетика в парамагнитное состояние при 330–340 K.

Ключевые слова: терагерцевое излучение; спинтроника; спин-зарядовая конверсия; обратный спиновый эффект Холла; обратный эффект Рашбы — Эдельштейна.

Множество материалов имеют резонансные частоты поглощения в терагерцевом (ТГц) диапазоне, что открывает широкий спектр возможностей для анализа материалов, визуализации, связи и спектроскопии при помощи ТГц-излучения [1]. Разработка эффективных источников ТГц-излучения остается актуальной задачей в данной области [2], а наибольшую перспективу имеют спинтронные источники благодаря своим преимуществам по ширине спектрального диапазона, компактности, интегрируемости и относительно низкой себестоимости [3].

Основной механизм преобразования спинового тока в зарядовый в таких структурах основан на использовании гетероструктур ферромагнитных (FM) и немагнитных (NM) тонких пленок, где задействованы такие механизмы преобразования спина в заряд, как обратный спиновый эффект Холла (ISHE) и обратный эффект Рашбы — Эдельштейна (IREE). В роли немагнитного слоя обычно выступают тяжелые металлы с большим спиновым углом Холла (SHA), такие как Pt, W, Ta. Помимо тяжелых немагнитных металлов, в спинтронном ТГц-генераторе изучались и другие материалы, обладающие обратным спиновым эффектом Холла (ISHE), в том числе полупроводники и 3D-переходные металлы. Но интенсивность ТГц-сигналов от 3D-переходных металлов значительно ниже, чем от тяжелых металлов из-за низкой спин-орбитальной связи (SOC) [4]. Однако Ni_xCu_{1-x} может достичь высокого SHA 4,1 %, сравнимого с Pt [5]. Таким образом, высокоэффективное ТГц-излучение можно генерировать в металле Ni_xCu_{1-x} с помощью ISHE. Кроме того, температура Кюри металлического Ni_xCu_{1-x} чувствительна к стехиометрии состава [6].

Целью данной работы является проверка гипотезы о том, что сплавы Ni_xCu_{1-x} могут служить не только преобразователями спинового тока в зарядовый, но и эффективными генераторами спинового тока. Для этого было изучено ТГц-излучение,

генерируемое серией структур на основе сплавов Ni_xCu_{1-x} в ферромагнитной (FM) и парамагнитной (PM) фазах — $Ni_{0,78}Cu_{0,22}$ [FM]/$Ni_{0,64}Cu_{0,36}$[PM] и Co/$Ni_{0,64}Cu_{0,36}$ [PM]. Эффективность образца $Ni_{0,78}Cu_{0,22}$ [FM]/$Ni_{0,64}Cu_{0,36}$ [PM] оказалась сопоставимой со структурой Co/$Ni_{0,64}Cu_{0,36}$ [PM], что указывает на возможность генерации спинового тока в слое $Ni_{0,78}Cu_{0,22}$. Показано, что в исследуемой структуре генерация ТГц-излучения происходит за счет спин-зарядовой конверсии посредством ISHE. Также продемонстрирован переход FM-слоя $Ni_{0,78}Cu_{0,22}$ в парамагнитное состояние при нагреве выше 330–340 K.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-79-10302.

Литература

1. Ferguson B., Zhang X.-C. Materials for terahertz science and technology // Nat. Mater., 2002. Vol. 1. № 1. P. 26–33.
2. Buryakov A. M. et al. Efficient Co/Pt THz spintronic emitter with tunable polarization // Appl. Phys. Lett., 2023. Vol. 123. № 8. P. 082404.
3. Kampfrath T. et al. Terahertz spin current pulses controlled by magnetic heterostructures // Nat. Nanotechnol., 2013. Vol. 8. № 4. P. 256–260.
4. Zhang H. et al. Laser pulse induced efficient terahertz emission from Co/Al heterostructures // Phys. Rev. B, 2020. Vol. 102. № 2. P. 024435.
5. Varotto S. et al. Independence of the Inverse Spin Hall Effect with the Magnetic Phase in Thin NiCu Films // Phys. Rev. Lett., 2020. Vol. 125. № 26. P. 267204.
6. The spontaneous magnetization of nickel + copper alloys // Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci., 1958. Vol. 248. № 1253. P. 145–152.

УДК 53.07

Прототип источника импульсного питания для низкодобротного винтового ондулятора ТГц-излучателя

Макаренко Ю. А., Крылов А. А., Дмитриев М. С.
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
Новосибирский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Представлена разработка источника импульсного питания для низкодобротного винтового ондулятора ТГц-излучателя. Проанализирована и усовершенствована классическая топология в целях обеспечения импульсного тока 18 кА и минимизации тепловых потерь. Представлена реализация драйверов и системы управления на базе микроконтроллера с 32-битным ARM-ядром.
Ключевые слова: винтовой ондулятор; источник импульсного питания; низкая добротность; линейный ускоритель.

В ИЯФ СО РАН ведутся активные работы по развитию генераторов ТГц-излучения на основе лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Это бурно развивающееся направление имеет перспективные применения в спектроскопии, астрофизике, а также в гражданской и военной радиолокации. ЛСЭ являются источниками когерентного излучения, охватывающими широкий спектральный диапазон. Их работа основана на взаимодействии релятивистского электронного пучка с периодической магнитной структурой — ондулятором. Рассматриваемый ондулятор имеет спиральную конструкцию с бифилярной обмоткой, предназначенной для создания винтового магнитного поля, оптимального для накачки поперечных колебаний электронного пучка. В качестве драйвера предлагается использовать линейный ускоритель с килоамперным электронным пучком и малым нормализованным эмиттансом пучка 1000 □ мм мрад. В данной работе представлен проект высоковольтного источника импульсного питания для винтового ондулятора ЛСЭ, разрабатываемого на базе линейного ускорителя в Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН.

Основными целями работы являются моделирование и создание однополярного импульсного источника питания, обеспечивающего импульс тока, который за 1,5 мс выходил бы на амплитуду 18 кА. Подход основан на представлении ондулятора как индуктивной нагрузки и использовании емкостного накопителя в резонансном контуре для достижения требуемого пикового тока в момент пролета электронного пучка. Этот анализ простой топологии источника питания показывает, что получаемая форма импульса тока представляет собой затухающую синусоиду с относительно низкой добротностью, что может привести к нежелательному нагреву ондулятора. В связи с этим для минимизации тепловых потерь и обеспечения оптимального режима работы ондулятора в работе предлагается и исследуется усовершенствованное схемотехническое решение из двух импульсных источников.

В ходе работы были спроектированы и изготовлены платы драйверов для управления тиристорами, а также создан макет импульсного источника питания с соленоидом, эквивалентным реальному ондулятору, в качестве нагрузки. Функции запуска тиристорных ключей, сбора ошибок с плат драйверов и записи данных на АЦП с датчиков тока реализованы на базе микроконтроллера серии STM32F4.

УДК 621.382

Метод исследования процессов накопления и релаксации радиационно-индуцированного заряда в подзатворных оксидах МОП-структур

Земцов А. Э., Петров А. С., Таперо К. И.
АО «Научно-исследовательский институт приборов»
140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8
m1705366@edu.misis.ru

Описана система регистрации порогового напряжения МОП-транзисторов, позволяющая производить измерения по заданному временному закону в субмиллисекундном интервале после воздействия импульса ИИ, а также при статическом облучении. Представлены результаты измерений с использованием разработанной системы.

Ключевые слова: МОП-транзисторы; пороговое напряжение; ионизирующее излучение; подзатворный оксид; накопление и релаксация заряда.

Изменение порогового напряжения (V_{th}) МОПТ сигнализирует о накоплении или релаксации заряда в подзатворном оксиде транзисторов. Зачастую исследование данных процессов осуществляется при фиксированном значении электрического поля, которое, однако, неизбежно изменяется при измерении V_{th}. Длительность и частота измерений влияют на качество получаемых результатов в связи с зависимостью величины выхода заряда, времени переноса дырок и сечения их захвата на ловушки от электрического поля. Наиболее актуальна эта проблема при исследованиях, связанных с воздействием импульсного ионизирующего излучения (ИИ), когда время облучения и восстановления равновесного состояния системы Si/SiO_2 может составлять менее 10^{-5} секунд. В связи с вышесказанным целью данной работы являлась разработка системы регистрации V_{th} МОПТ, позволяющая проводить исследования процессов накопления и релаксации заряда при статическом и импульсном воздействии ИИ с минимальным искажением результатов эксперимента за счет снижения длительности измерений и их синхронизации с началом облучения.

Блок-схема разработанной системы регистрации V_{th} МОПТ представлена на рис. 1. Синхроимпульс испытательной установки преобразуется в TTL-сигнал посредством схемы, представленной на рис. 2, и подается на вход генератора цифровых сигналов (NI PXIe-7966R, NI 6581). Программа управления модулем, выполненная с помощью LabVIEW, запускает начало отсчета тактовых импульсов и обеспечивает подачу TTL-сигналов на входы осциллографа и генератора сигналов произвольной формы через нужные промежутки времени, определяемые числом тактовых импульсов. Генератор сигналов произвольной формы обеспечивает резкое изменение напряжения на затворе (V_G) МОПТ с последующим линейным восстановлением. Данное напряжение, а также напряжение на токосъемном (V_{R2}) резисторе регистрируется с помощью осциллографа, включенного в режим сегментирования памяти, обеспечивающий сохранение каждого измерения с достаточным разрешением. При этом исследуемый транзистор подключается согласно схеме, представленной на рис. 3.

Рис. 1. Блок-схема системы регистрации порогового напряжения МОПТ

Результатом работы представленной системы является набор пар значений V_{R2} и V_G, на основании которых можно построить зависимость $I_D(V_G)$ и определить значение V_{th} методом линейной экстраполяции. Сбор данных осуществляется за 10 мкс с достаточной точностью при интервале между импульсом ИИ и первым измерением порядка 100 мкс.

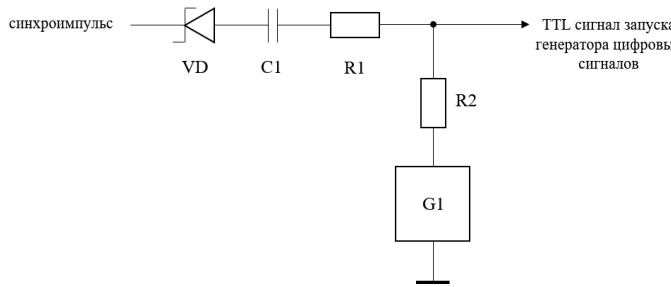


Рис. 2. Схема преобразования синхроимпульса испытательной установки (G1 — источник постоянного напряжения; VD — диод Шоттки)

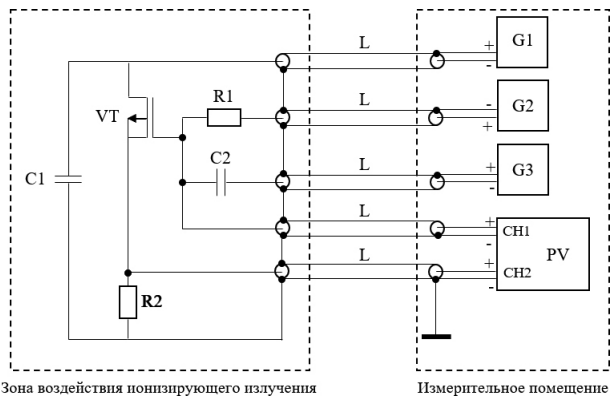
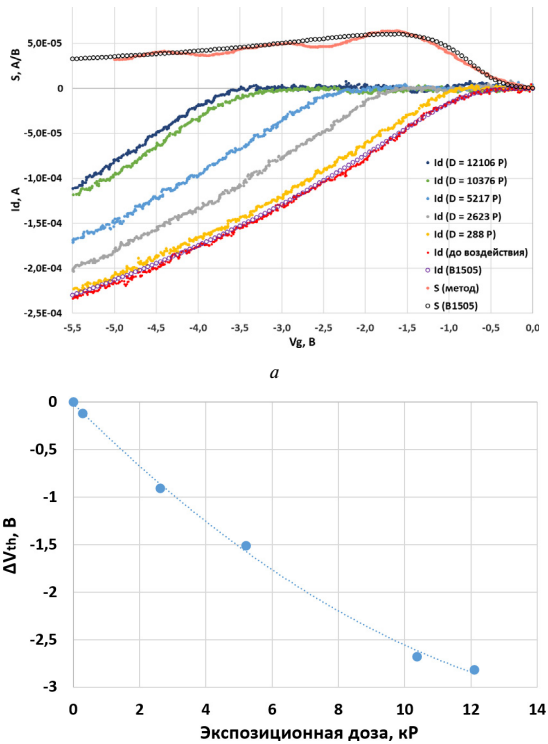


Рис. 3. Схема регистрации порогового напряжения *p*-канального МОПТ после воздействия импульсного ИИ (G1, G2 — источники постоянного напряжения; G3 — генератор сигналов произвольной формы; PV — осциллограф)

Посредством описанной выше системы была исследована дозовая деградация МОПТ с каналом *p*-типа и подзатворным SiO_2 толщиной 400 нм при воздействии гамма-излучения с энергией квантов 1,25 МэВ (рис. 4*а*). Помимо зависимостей $I_D(V_G)$, полученных при различных значениях поглощенной дозы (нижняя часть рис. 4*а*), также была построена исходная зависимость крутизны МОПТ от V_G, значение максимума которой используется при определении V_{th}. Верификация получаемых данных проводилась посредством сравнения результатов измерений, осуществленных с помощью параметрического анализатора Keysight B1505A и разработанным методом, при этом погрешность определения V_{th} не превышала 10 %, погрешность определения крутизны — 5 %.

Зависимость сдвига V_{th} исследуемого образца от величины поглощенной дозы представлена на рис. 4*б*. Отсутствие значительных отклонений экспериментальных значений от линии аппроксимации наглядно демонстрирует возможность использования разработанной системы для данных применений.



а

б

Рис. 4. Результаты измерений сток-затворной характеристики МОПТ посредством разработанной системы (*а*) и зависимость сдвига V_{th} (*б*) при различных значениях экспозиционной дозы ИИ

УДК 621.382.323

Исследование механизма восстановления параметров транзистора *n*-типа после деградации, вызванной инжекцией горячих носителей, путем подачи смещения на затвор

Исаева Ю. С., Соловьев А. В. к. т. н., Арилин Р. А.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
yuisaeva@niime.ru

Исследован механизм восстановления параметров КНИ *n*-МОП-транзистора, после деградации, вызванной HCI, путем подачи смещения на затвор. Исследуемый механизм позволяет частично восстановить электрические характеристики прибора, результаты могут быть использованы для продления срока службы *n*-МОПТ.
Ключевые слова: МОП-транзистор; инжекция горячих носителей; деградация; надежность; восстановление параметров; КНИ-технология.

Деградация, вызванная инжекцией горячих носителей (HCI), приводит к сдвигу основных параметров транзисторов *n*-типа, ограничивает срок службы ИС. Это связано с разрушением Si-H-связей на границе $Si\text{-}SiO_2$ и образованием дефектов и зарядовых состояний в подзатворном окисле и на интерфейсе [1–4].

Соответственно, восстановление требует подходов, направленных на устранение или минимизацию дефектов и зарядовых состояний, образовавшихся на интерфейсе и в объеме подзатворного диэлектрика.

В настоящее время в научной литературе описаны такие подходы к восстановлению, как термические обработки; термическое восстановление, проводимое в атмосферах, содержащих водород или азот; облучение гамма-лучами; применение специально подобранных режимов подачи напряжений [5, 6].

В работе исследован способ восстановления путем подачи отрицательного смещения на затвор. Данный способ не требует использования дополнительного громоздкого оборудования, может быть применен как на уровне схемы, так и в рамках одиночного прибора.

Проведена экспериментальная проверка восстановления путем подачи отрицательного смещения на затвор структуры *n*-канального КНИ МОП-транзистора с длиной затвора 0,18 мкм. В качестве критерия деградации/восстановления выбран ток стока (I_d).

В ходе проведения экспериментального исследования установлено: подача отрицательного смещения на затвор способствует частичному восстановлению I_d, сниженному вследствие HCI-деградации. Ток стока максимально восстановлен при напряжении на затворе и на стоке, равном 0,2 В ($Ug = Ud = 0{,}2$ В), до 81,13 % (↑Id 33,41 %) от первоначального значения.

После проведения повторного цикла «деградация — восстановление» на той же структуре для подпороговых токов в указанном ранее режиме измерения наблюдается восстановление до 93,39 % от значения I_d в начале цикла. Это соответствует более эффективному восстановлению в сравнении с первым циклом.

Установлено, что метод подачи отрицательного смещения на затвор способствует восстановлению параметров транзистора после HCI-деградации. Экспериментальные данные свидетельствуют о продлении времени работы до отказа более чем в три раза для режима измерения $U_g = U_d = 0{,}2$ В.

Литература

1. Maricau E., Gielen G. CMOS Reliability Overview. In: Analog IC Reliability in Nanometer CMOS. Analog Circuits and Signal Processing. Springer, New York, NY, 2013. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6163-0_2.
2. Seelam V. Sai Reliability Analysis of Comparator: NBTI, PBTI, HCI, AGEING // Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019 S. Verma et al. (Eds.): CNC 2018, CCIS 839. P. 606–619. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2372-0_54.
3. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: в 2 ч. — М.: Техносфера, 2002. — Ч. 1. — 416 с.
4. Сивченко А. С., Кузнецов Е. В. Определение основных параметров надежности КМОП-процесса полупроводниковой фабрики // Наноиндустрия, 2018. — № 9.
5. de Jong, Maurits Jelke. Recovery of hot-carrier degraded nMOSFETs. Enschede: University of Twente, 2022. 142 p.
6. Lee Geon-Beom, Kim Choongki, Park Jun-Young, Bang Tewook, Bae Hagyoul, Kim Seong-Yeon, Ryu Seung-Wan, Choi Yang-Kyu. A Novel Technique for Curing Hot-Carrier-Induced Damage by Utilizing the Forward Current of the PN-Junction in a MOSFET. IEEE Electron Device Letters, 2017. P. 1-1. 10.1109/LED.2017.2718583.

УДК 544.032.6

Исследование процессов разложения органо-неорганических гибридных галогенидных перовскитов при облучении низкоэнергетическим электронным пучком

Куланчиков Ю. О., Якимов Е. Е., Вергелес П. С., Якимов Е. Б.
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

Исследовано влияние инжекции неравновесных носителей заряда на свойства монокристаллов перовскита $MAPbBr_3$, $CsPbBr_3$ и $FAPbBr_3$. Методом регистрации спектров катодолюминесценции показано влияние ионизирующего облучения на свойства гибридных перовскитных структур, определена энергия, соответствующая переходу зона — зона в $MAPbBr_3$.
Ключевые слова: РЭМ; перовскит; катодолюминесценция; инжекция; ионизирующие излучение.

В последнее время органо-неорганические перовскиты становятся все более востребованными благодаря своим уникальным и перспективным свойствам. Они могут использоваться при создании светодиодов, транзисторов, дешевых детекторов ионизирующего излучения и солнечных батарей. Создание эффективных и долговечных солнечных элементов на основе перовскитов привлекло внимание множества исследовательских групп, так как они имеют серьезные преимущества перед классическими кремниевыми солнечными элементами —: проще и дешевле в изготовлении, а также имеют возможность использования методов печати на различных типах подложек. Но, как и у любого материала, у них есть и недостатки, например нестабильность при длительном воздействии внешних факторов, таких как кислород, влага и инжекции неравновесных носителей заряда при воздействии ионизирующего излучения. Если учесть, что солнечные элементы на основе перовскитов могут использоваться в космосе для обеспечения энергией спутников и космических станций, вопрос их радиационной стойкости становится особенно важным для прогнозирования работоспособности этих солнечных элементов в экстремальных условиях. Исходя из этого, проведение комплексных исследований влияния инжекции неравновесных носителей заряда путем облучения низкоэнергетическим электронным пучком на деградацию органо-неорганических перовскитов является важным и актуальным направлением исследований. Ключевым преимуществом использования электронного пучка с энергией, недостаточной для прямого выбивания атомов из кристаллической решетки, является возможность разделить эффекты, вызванные генерацией электрон-дырочных пар, от других процессов, индуцированных облучением.

Поскольку ожидалось, что $MAPbBr_3$ будет значительно более стабильным в условиях окружающей среды, чем $MAPbI_3$ [1], интересно более подробно изучить влияние облучения низкоэнергетическим пучком на оптические свойства $MAPbBr_3$, особенно принимая во внимание, что замена неорганических компонентов может повысить стойкость к излучению [2].

В данной работе изучено изменение спектров катодолюминесценции (КЛ) монокристаллов $MAPbBr_3$ под действием облучения низкоэнергетическим электронным пучком (LEEBI — Low-Energy Electron Beam Irradiation). Полученные результаты наглядно демонстрируют, что измерения КЛ могут дать ценную информацию о квазихимических реакциях в $MAPbBr_3$ под действием LEEBI и механизмах разложения. Было показано, что наиболее вероятным механизмом повреждения $MAPbBr_3$ электронным пучком является радиолиз. Этот процесс приводит к разложению $MAPbBr_3$ и последующему удалению летучих продуктов со скоростью, пропорциональной концентрации избыточного носителя. Анализ спектров КЛ при различных дозах облучения LEEBI показывает появление полос излучения с энергией, возрастающей с увеличением дозы, что может свидетельствовать об образовании промежуточных фаз с переменным составом. Показано, что использование больших энергий электронного пучка (>20 кэВ) предпочтительно для минимизации повреждения перовскита при LEEBI. Исследование влияния ускоряющего напряжения на спектры КЛ позволило установить, что излучение с энергией 2,6 эВ соответствует переходу зона — зона в $MAPbBr_3$, что является важной информацией при расчете характеристик приборов, основанных на исследуемом перовските. Проведено сравнение радиационной стойкости $MAPbBr_3$, $FAPbBr_3$ и неорганического перовскита $CsPbBr_3$.

Литература

1. McGovern L., Futscher M. H., Muscarella L. A., Ehrler B. Understanding the Stability of MAPbBr3 versus MAPbI3: Suppression of Methylammonium Migration and Reduction of Halide Migration // J. Phys. Chem. Lett., 2020. Vol. 11. P. 7127.
2. Abdel-Aal S. K. et al. Crystal structure, vibrational spectroscopy and optical prop-erties of a one-dimensional organic-inorganic hybrid perovskite of [NH3CH2CH(NH3) CH2]BiCl5 // Acta Cryst. B, 2019. Vol. 75. P. 880.

УДК 621.382:621.315.592.3

Переходные характеристики и реактивный импеданс кремниевых диодов, облученных высокоэнергетичными ионами

Горбачук Н. И.[1], Поклонский Н. А.[1], Ермакова Е. А.[1], Шпаковский С. В.[2], Скуратов В. А.[3]

[1] Белорусский государственный университет
220030, просп. Независимости, 4, Минск, Республика Беларусь
gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, ermakova.7003@gmail.com
[2] ОАО «Интеграл», управляющая компания холдинга «Интеграл»
220108, ул. Казинца, 121А, Минск, Республика Беларусь
shpaks@tut.by
[3] Объединенный институт ядерных исследований
141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6
skuratov@jinr.ru

Показано, что облучение высокоэнергетичными ионами и гелия, и висмута эффективно снижает время восстановления обратного сопротивления диодов. Установлено, что в случае облучения ионами висмута наблюдаются большие значения импеданса индуктивного типа и структуры могут быть использованы в качестве фазосдвигающих элементов электрических цепей.

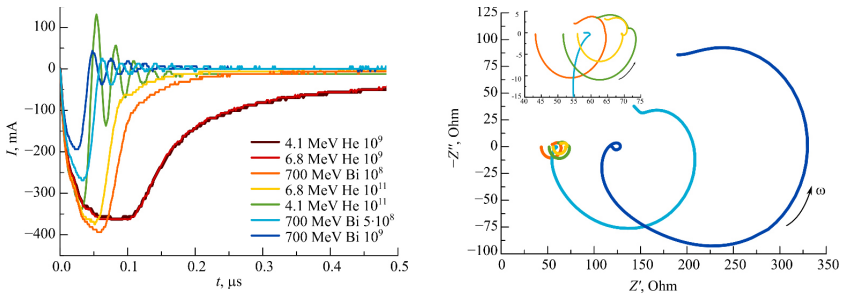
Ключевые слова: p^+-n-диоды; кремний; радиационные дефекты; переходные характеристики; импедансная спектроскопия; импеданс индуктивного типа.

Катушки индуктивности часто используются в устройствах радиоэлектроники, работающих в диапазоне радиочастот: фильтрах, фазосдвигающих устройствах, цепях частотной коррекции и т. д. [1]. Реализация катушек индуктивности в интегральном исполнении сопряжена со значительными трудностями, которые связаны с потерями полезной площади, т. к. приходится реализовывать исключительно планарную технологию. Поэтому для создания элементов, дающих положительный сдвиг фаз, часто используют схемотехнические аналоги, например гираторы [2]. Достаточно давно известен эффект отрицательной емкости, он не связан с «накоплением энергии магнитным полем», но позволяет получить положительный сдвиг фаз колебаний тока относительно напряжения. Эффект наблюдался в тонких пленках, МДП-структурах [3], p^+-n-диодах, облученных электронами [4]. Облучение электронами и ионами применяется для создания быстродействующих приборов. В данном контексте влияние радиационного воздействия на реактивный импеданс может проявляться в качестве дополнительного эффекта, влияющего на переходные характеристики.

Целью работы являлось определение влияния высокоэнергетической имплантации ионов на реактивный импеданс и время восстановления обратного сопротивления p^+-n-диодов.

Исследовались p^+-n-диоды, изготовленные на основе кремния n-типа проводимости с удельным сопротивлением 90 Ом·см. Структуры облучались ионами гелия с энергией 4,1 МэВ, 6,8 МэВ или висмута с энергией 700 МэВ. Флюенс облучения варьировался от 10^8 до 10^{11} см$^{-2}$. Регистрировались переходные характеристики,

зависимости модуля импеданса Z и угла сдвига фаз ф от частоты переменного тока. Действительная Z' и мнимая Z'' части импеданса рассчитывались по стандартной методике [5].



а *б*

Рис. 1. Переходные характеристики (*а*) и годографы (*б*) импеданса p^+-n-диодов, облученных ионами гелия и висмута

Как следует из рис. 1*а*, облучение ионами и гелия, и висмута способно эффективно снижать время восстановления обратного сопротивления диодов. При этом обратные токи диодов, облученных ионами гелия, увеличиваются до уровня не более 100 нА (при 100 В) даже без дополнительной операции отжига. Облучение ионами висмута флюенсом 10^9 см$^{-2}$ приводит к снижению времени восстановления обратного сопротивления приблизительно до таких же значений, что и облучение ионами гелия флюенсом 10^{11} см$^{-2}$, вплоть до величин ~50 нс. В то же время в случае облучения ионами висмута наблюдаются большие значения импеданса индуктивного типа (см. рис. 1*б*), при этом угол положительного сдвига фаз достигает 40°. Исследованные структуры с эффектом отрицательной емкости могут быть использованы в качестве фазосдвигающих элементов электрических цепей.

Литература

1. Степанова Л. Н. Полупроводниковые аналоги индуктивности и радиоэлектронные устройства на их основе // Зарубежная радиоэлектроника, 1991.— № 5.— С. 79–91.
2. Kunikiyo T. Active inductor: пат. 6737944 B2 США, МПК7 H03H 11/00; заявл. 15.03.2001; опубл. 18.05.2004.
3. Болтаев А. П., Бурбаев Т. М., Курбатов В. А., Рзаев М. М., Пенин Н. А., Сибельдин Н. Н. Эффекты накопления заряда и отрицательная емкость в гетероструктурах на основе кремния // Известия РАН, 1999. — Т. 63. — № 2.— С. 312–316.
4. Поклонский Н. А., Горбачук Н. И., Шпаковский С. В. Температурная и частотная зависимости реактивных составляющих импеданса pn-переходов на кремнии // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы V Междунар. конф., Минск, 6–9 окт. 2003 г., Минск.— Мн.: БГУ, 2003.— С. 288–290.
5. Barsoukov E., Macdonald J. R. Impedance spectroscopy: Theory experiment and applications. N.Y.: Wiley, 2005. 595 p.

УДК 537.312

Влияние газовой среды, температуры и облучения на электрофизические свойства наноструктурированного TiO_2

Кружалина М. Д., Сорокина Л. И., Якубов А. О., Федянина М. Е., Дубков С. В., Громов Д. Г.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
kruzalina43@gmail.com

Исследовано комплексное воздействие газовой атмосферы, температуры и облучения на электрические свойства наноструктурированных слоев TiO_2. Показаны температурные зависимости электропроводности слоев TiO_2 в атмосферах O_2 и CO_2 при периодическом УФ-видимом облучении и без него.
Ключевые слова: наноструктурированный TiO_2; газовая атмосфера; УФ-видимое облучение.

Наноструктурированные оксидные полупроводники, такие как TiO_2 в 0D-, 1D- и 2D-конфигурациях, находят широкое применение в микроэлектронике, включая сенсорику, оптоэлектронику и фотовольтаику [1, 2]. Однако существует проблема, связанная со стабильностью TiO_2: его электрофизические свойства значительно изменяются под воздействием газовой среды [3]. Помимо взаимодействия адсорбированных молекул, на электропроводность также существенно влияют температура и облучение в ультрафиолетовом (УФ) и видимом диапазоне спектра [4, 5]. Для эффективной и стабильной работы микроэлектронных устройств на основе TiO_2 важно понимать механизмы, происходящие на его поверхности, и влияние внешних факторов на электрофизические характеристики при его практическом применении. Однако в большинстве научных исследований эти факторы рассматриваются отдельно. В данной работе исследуется комплексное воздействие газовой атмосферы, температуры и облучения на свойства наноструктурированных слоев TiO_2. Показаны температурные зависимости электрофизических параметров TiO_2 в атмосферах O_2 и CO_2 при периодическом воздействии УФ-видимого облучения и без него.

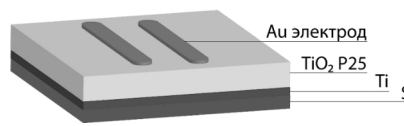


Рис. 1. Схематическое изображение изготовленного образца

В целях проведения данного исследования был разработан специализированный образец, состоящий из чувствительного слоя TiO_2 P25 с золотыми электродами на диэлектрической подложке (рис. 1). Для этого на кремниевой подложке методом магнетронного распыления был сформирован наноструктурированный слой титана толщиной 100 нм. Данный слой был необходим в качестве проводящей основы для проведения последующего электрофоретического осаждения слоя TiO_2 P25. Методом электрофоретического осаждения был сформирован слоя толщиной 10 мкм. Затем методом вакуум-термического испарения были сформированы золотые электроды

с фиксированной геометрией, обеспечивающие омический контакт. После этого образец подвергался термической обработке в муфельной печи, в результате чего нижний слой титана был окислен до TiO_2. Были проведены экспериментальные исследования влияния таких газов, как CO_2 и O_2, температуры и облучения в УФ-видимом спектре на электропроводность наноструктурированного слоя TiO_2. На рис. 2 представлено схематическое изображение измерительного стенда.

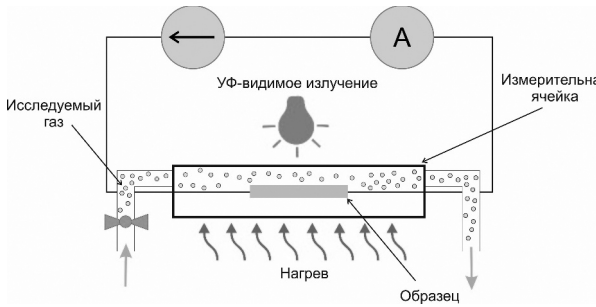


Рис. 2. Схема измерительного стенда

Получены зависимости значений электрического тока нанопорошкового слоя TiO_2 от температуры в атмосферах CO_2 и O_2 с предварительной обработкой УФ-видимым излучением в течение двух часов и без обработки. Также построены зависимости значений фотоотклика от температуры ячейки для предварительно обработанного и необработанного УФ-видимым излучением образцов. Выявленные результаты позволят глубже понять механизмы изменения свойств TiO_2 и оптимизировать его использование в функциональных устройствах.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2023–2025 гг., соглашение FSMR-2023-0003.

Литература

1. Tee S. Y., Kong J., Koh J. J., Teng C. P., Zu Wang X., Wang X., Teo S. L., Thitsartarn W., Han M. Y. Structurally and surficially activated TiO_2 nanomaterials for photochemical reactions // Nanoscale, 2024. Vol. 16. P. 18165–18212.
2. Zhang L., Xiong J., Ding B., Fan C., Liu G., Li H. Metal-organic framework-derived oxygen-rich vacancies and porous TiO_2 nanotablets for hydrogen detection with high response at room temperature // Sensors and Actuators B: Chemical, 2024. Vol. 407. P. 135471.
3. Rzaij J. M., Abass A. M. TiO_2 thin film as a metal oxide gas sensor // J. Chem. Rev., 2020. Vol. 2. № 2. P. 114–121.
4. Shooshtari M., Salehi A., Vollebregt S. Effect of temperature and humidity on the sensing performance of TiO_2 nanowire-based ethanol vapor sensors // Nanotechnology, 2021. Vol. 32. № 32. P. 325501.
5. Nur A. S. M., Sultana M., Mondal A., Islam S., Robel F. N., Islam A., Sumi M. S. A. A review on the development of elemental and codoped TiO_2 photocatalysts for enhanced dye degradation under UV–vis irradiation // Journal of Water Process Engineering, 2022. Vol. 47. P. 102728.

УДК 621.382

Исследование влияния подслоя титана и длительности финишного отжига на ресурс переключений элемента хранения FeRAM на основе оксида гафния

Прищепчук Г. А.[1,2], Захаров П. С.[2], Быковский К. С.[1,2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
gprischepchuk@niime.ru

В данной работе предлагается исследование влияния подслоя титана и различного времени финишного отжига структуры на ресурс переключения элементов хранения сегнетоэлектрической памяти на основе $Hf_{0,5}Zr_{0,5}O_2$. Выдвинута и верифицирована гипотеза о причинах характерного влияния данного буферного слоя на количество циклов переключения ЭХ.
Ключевые слова: FeRAM; HZO; сегнетоэлектрик; ресурс переключения.

В связи с развитием информационных технологий в индустрии все более остро ощущается потребность в создании нового типа энергонезависимой памяти, основными характеристиками которой будут являться длительное время хранения, ресурс перезаписи, быстродействие, а также объем и энергоэффективность. Наиболее подходящим кандидатом на эту роль на данный момент является FeRAM. В настоящее время активно используется и продолжает развиваться сегнетоэлектрическая память на основе цирконата-титаната свинца (PZT) [1]. Тем не менее с ее производством сопряжен ряд трудностей. Одной из ключевых, например, является плохая совместимость с КМОП-технологией, поэтому в качестве перспективной альтернативой сейчас считается применение сегнетоэлектрика сплавных пленок HfO_2: ZrO_2 (HZO) [2]. Данный материал все еще находится на стадии научно-исследовательских работ, направленных на улучшение желаемых характеристик, препятствием чему служат такие паразитные явления, как эффекты импринта и пиннига [3], а также миграция кислородных вакансий [4].

В представленной нами работе проведено исследование влияния буферного слоя из титана и длительности финишного отжига на ресурс переключения ЭХ на основе HZO посредством трехэтапного эксперимента. Ранее было замечено благотворное влияние титановой вставки на время хранения, поэтому в рамках первого этапа было проведено сравнение структур с наличием вставки и без нее. Результат показал ухудшение ресурса перезаписи в структурах с титаном. Нами была выдвинута гипотеза о том, что титан как материал, обладающий высоким сродством к кислороду, геттерирует его из HZO, тем самым уменьшая его эффективный слой. Дополнительно сделаны модельные оценки предполагаемого слоя окисла титана на основе литературных данных. В связи с этим на втором этапе было проведено сравнение структур с наличием титана, но как со стандартной, так и с увеличенной толщиной сегнетоэлектрической пленки. В данном случае увеличение толщины, направленное на компенсацию предположенного нами эффекта,

дало положительный результат и увеличило количество циклов перезаписи ЭХ. На третьем этапе для оценки влияния финишного отжига на уменьшение эффективной толщины сегнетоэлектрика на границе с титаном было проведено измерение ресурса структур с увеличенным временем финишного отжига. В завершение исследования для верификации предложенной гипотезы был проведен элементный анализ вблизи интерфейса сегнетоэлектрик/титан и обнаружен окисел последнего.

Литература

1. Krasnikov G. Ya. et al. Физико-технологические особенности формирования сегнетоэлектрической пленки для ячейки запоминающих устройств // Электронная техника, 2016. — № 161. — С. 42–47.
2. Fengler F. P. G. et al. Comparison of hafnia and PZT based ferroelectrics for future non-volatile FRAM applications // European Solid-State Device Research Conference, 2016. P. 369–372.
3. Chouprik A. et al. Origin of the retention loss in ferroelectric $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$-based memory devices // Acta Materialia, 2021. Vol. 204. P. 116515.
4. Li X. et al. Understanding fatigue and recovery mechanisms in $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ capacitors for designing high endurance ferroelectric memory and neuromorphic hardware // Nanoscale, 2025. DOI: 10.1039/d4nr04861j.

УДК 53.043

Экспериментальное исследование резистивного переключения биомемристора на основе крови

Клюкина Е. В.[1,3], Ванькаев А. С.[1,2], Ковешников С. В.[1]
[1] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
skoveshnikov@iptm.ru
[2] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
s.vankaev14@gmail.com
[3] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
katerina-klyukina@mail.ru

В работе представлены результаты исследования резистивного переключения, его характера в образцах коагулированной крови в вертикальном и латеральном электрических полях. Также исследовалось явление фоторезистивного переключения под действием ультрафиолета и видимого света.

Ключевые слова: резистивное переключение; биомемристор; УФ-излучение; диагностика; фотомемристор; кровь.

В настоящее время явление резистивного переключения является предметом интенсивных научных исследований [1, 2, 3]. Главным образом резистивное переключение используется в новых типах запоминающих устройств, таких как CBRAM и RRAM, в которых в качестве функциональных слоев используются оксиды переходных металлов и твердотельные электролиты. Однако резистивное переключение обнаружено и в органических материалах [4, 5], одним из которых является кровь [6]. Изучение параметров резистивного переключения в крови является важной научной задачей, поскольку этот феномен может послужить основой для новых методов диагностики заболеваний и мониторинга состояния человека.

В работе мы исследовали резистивное переключение в тонких пленках коагулированной крови от трех разных доноров. Кровь наносилась на два типа подложек: Al и SiO_2, и высушивалась при комнатных условиях. Электрофизические параметры переключения регистрировались в режиме вертикального и горизонтального электрических полей. В вертикальном поле использовались алюминиевые подложки (нижний электрод), а в роли верхнего электрода служил вольфрамовый зонд. В горизонтальном поле вольфрамовые электроды располагались на расстоянии около 10 мкм друг от друга, контактируя при этом с пленкой коагулированной крови.

В ходе эксперимента получены следующие результаты. В вертикальном электрическом поле все образцы крови продемонстрировали классическое биполярное резистивное переключение. Однако образцы крови от разных доноров показали различия в характере перехода из низкоомного в высокоомное состояние (процесс Reset). Для одного из образцов переключение носило резкий характер, а в другом наблюдался плавный Reset с несколькими промежуточными резистивными состояниями. Однако наиболее интересным результатом стало наличие

фотомемристорного эффекта в образце крови одного из доноров. Данный эффект заключается в резком увеличении проводимости (на несколько порядков) при облучении жестким ультрафиолетом (УФ) с длиной волны 253 нм. После УФ-стимулированного перехода в низкоомное состояние обратное переключение происходило электрическим способом — с помощью приложения напряжения обратной полярности. Фотомемристорный эффект наблюдался и в латеральном поле. Воздействие белого света приводило к увеличению проводимости у всех образцов, но с разной интенсивностью. УФ-излучение также вызывало рост тока в латеральном поле, и аналогично переключению в вертикальном поле характер роста тока отличался от донора к донору.

Исследование демонстрирует, что человеческая кровь обладает свойствами, которые могут быть использованы для создания биомемристоров и разработки новых методов диагностики. Наблюдаемые различия между образцами указывают на возможность использования электрофизических тестов для оценки состояния здоровья, однако для подтверждения этой гипотезы необходимы исследования с большим количеством образцов. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение связи между электрофизическими характеристиками крови и конкретными заболеваниями, а также на разработку практических методов диагностики на основе этих эффектов.

Литература

1. Niloufar R. H., Lee J. S. Resistive switching memory using biomaterials // Journal of Electroceramics, 2017. Vol. 39. P. 223–238.
2. Wang H. et al. Resistive switching memory devices based on proteins // Adv. Mater., 2015. Vol. 27 (46). P. 7670–7676.
3. Meena J., Sze S., Chand U., Tseng T. Overview of emerging nonvolatile memory technologies // Nanoscale Res. Lett., 2014. Vol. 9.
4. Wang L. and Wen D. Resistive Switching Memory Devices Based on Body Fluid of Bombyx mori L // Micromachines, 2019. Vol. 10 (8). P. 540.
5. Cheong K., Tayeb I., Zhao F., Abdullah J. Review on resistive switching mechanisms of bio-organic thin film for non-volatile memory application // Nanotechnology Reviews, 2021. Vol. 10 (Issue 1). P. 680–709.
6. Gao K. et al. Blood-based biomemristor for hyperglycemia and hyperlipidemia monitoring // Materials today, 2024. Bio, 28, 101169.

УДК 538.911

Особенности спектров фотолюминесценции в гетероструктурах со связанными слоями квантовых колец и квантовых ям GaAs/AlGaAs

Романов Н. Р., Васильевский И. С.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
romanov.nr10@yandex.ru

Измерены спектры фотолюминесценции гетероструктур с квантовыми кольцами и квантовыми ямами GaAs/AlGaAs. При 77 K от слоя колец обнаружен интенсивный пик 1,66 эВ и исследована зависимость его интенсивности от мощности излучения. Рассчитан показатель k степенной зависимости фотолюминесценции.

Ключевые слова: гетероструктуры; низкоразмерные наносистемы; квантовые кольца; арсенид галлия; фотолюминесценция.

В настоящее время одним из важнейших направлений развития электроники и фотоники являются системы с пониженной (и даже промежуточной) размерностью, например системы «квантовые кольца (КК) + квантовые ямы (КЯ)». Оптические, магнитные и электронные транспортные свойства ансамблей КК изучены недостаточно. Особую новизну представляют наносистемы, в которых возникает туннельная связь носителей тока между слоями КК и КЯ, что обуславливает актуальность работы как с фундаментальной, так и с прикладной стороны.

В работе были исследованы гетероструктуры с КК GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$ (x = 0,27), изготовленные методом молекулярно-лучевой эпитаксии в НИЯУ МИФИ (табл. 1). Образцы содержат КЯ (6,5 и 12 нм толщиной) и слой КК с различным временем эпитаксии Ga и As.

Таблица 1. Общая слоевая структура исследуемых гетероструктур

Образцы	1	2	3	4
	…	…	…	…
	СР-4 AlGaAs 4 нм	СР-4 AlGaAs 6 нм	СР-4 AlGaAs 4 нм	СР-4 AlGaAs 4 нм
Слой КК	Ga 30 с As 180 с	Ga 30 с As 180 с	Ga 90 с As 210 с	Ga 90 с As 210 с
	КЯ GaAs 12 нм	КЯ GaAs 6,5 нм	КЯ GaAs 12 нм	КЯ GaAs 12 нм
	СР-3	СР-3	СР-3	СР-3
	СР-2	СР-2	СР-2	СР-2
	СР-1	СР-1	СР-1	СР-1
	Подложка	Подложка	Подложка	Подложка

Измерены спектры фотолюминесценции образцов при различной мощности лазера (532 нм в CW-режиме) при двух температурах — 77 и 300 K. При комнатной температуре пиков от КК не наблюдается. При 77 K у образцов 1 и 2 обнаружен интенсивный пик 1,66 эВ. В работе [1] авторы отмечают, что принадлежность данной спектральной линии именно слою КК не установлена точно и требует дополнительной экспериментальной проверки, а другим источником этого пика может быть сверхрешетка $Al_xGa_{1-x}As$/GaAs СР-4 с толщиной КЯ 4 нм.

Для пар образцов 1–2 и 3–4 существенно различается время эпитаксии Ga и As в слое КК (табл. 1), тогда как СР-4 формировалась при идентичных условиях для образцов 1, 3 и 4. В случае если линия 1,66 эВ действительно появляется в спектре от СР-4, она должна наблюдаться у всех образцов, однако это не так (рис. 1*а*), что позволяет сделать однозначный вывод о принадлежности линии именно слою КК.

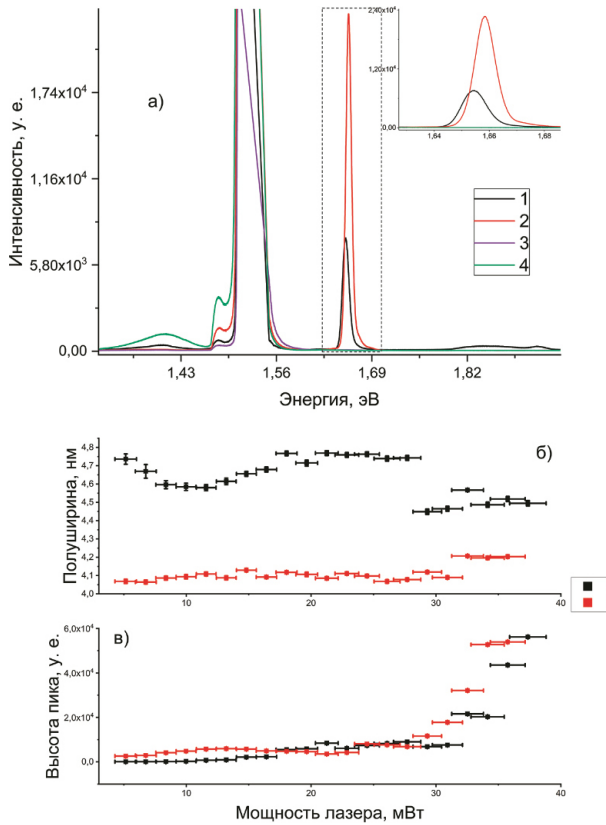


Рис. 1. Сравнение спектров фотолюминесценции № 1–4 (*а*) образцов; зависимости полуширины и высоты пика 1,66 эВ соответственно от мощности излучения лазера (*б*, *в*)

Для образцов 1 и 2 при различной мощности лазера были измерены спектры фотолюминесценции и рассчитаны высота и полуширина пиков 1,66 эВ (аппроксимация нормальным распределением, $\alpha = 95\,\%$). Зависимости приведены на рис. 1*б* и 1*в*.

Для квантовых точек (как представителей 0D-систем размерного квантования) типичное поведение интенсивности I от мощности лазера P может быть выражено формулой $I \sim P^k$, где $k = 0{,}5...2$ — показатель числа рекомбинирующих экситонов [2, 3].

Исследуемые в работе структуры представляют из себя системы КК+КЯ, то есть системы с промежуточной (0D—2D)-размерностью. Чтобы проанализировать образцы и сравнить их поведение, например, с типичным для квантовых точек, были построены зависимости интенсивности пика от мощности лазера в двойном логарифмическом масштабе (рис. 2). Для обоих образцов наблюдается похожее поведение, графики содержат три явных области: прямая с меньшим наклоном, после которой следует насыщение, а затем прямая с большим наклоном. Такая зависимость выглядит нетипично, а потому представляет особый интерес и потенциально может содержать научную новизну.

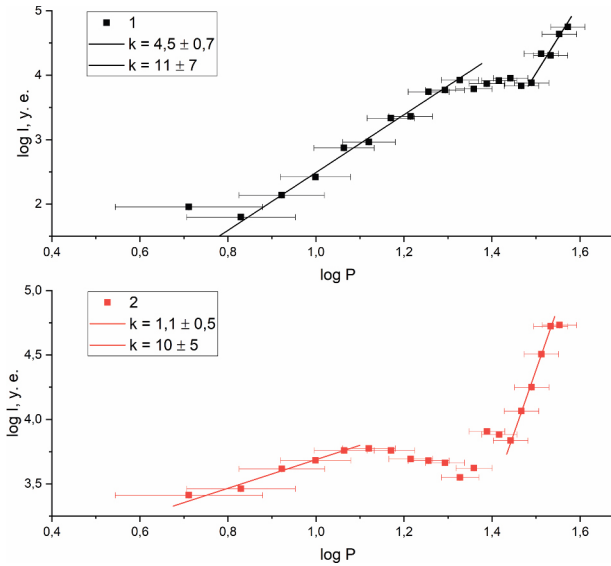


Рис. 2. Зависимости интенсивности пика от мощности в двойном логарифмическом масштабе

Литература

1. Sibirmovskii Y. D. et al. Photoluminescence of GaAs/AlGaAs quantum ring arrays // Semiconductors, 2015. Vol. 49. P. 638–643.
2. Basset F. B. et al. Spectral broadening in self-assembled GaAs quantum dots with narrow size distribution // Journal of Applied Physics, 2019. Vol. 126.
3. Wang Y. et al. Temperature and excitation density dependent photoluminescence of sputtering-induced GaAs/AlGaAs quantum dots // IOP Publishing: Nanotechnology, 2019. Vol. 19. P. 015602.
4. Sanguinetti S. et al. Carrier dynamics in individual concentric quantum rings: Photoluminescence measurements // Phys. Rev. B, 2008. Vol. 77. P. 125404.

УДК 538.91

Исследование влияния обработки поверхности и наночастиц LSP на характеристики синих микро- и наносветодиодов GaN/InGaN

Алексанян Л. А.[1], Поляков А. Я.[1], к. т. н., Ли И.-Х.[2], Ph.D, Чо Ё.-Х.[2], Скориков М. Л.[3], Якимов Е. Б.[1,4], д. ф.-м. н., Васильев А. А.[1], Романов А. А.[1], Матрос Н. Р.[1], Пиртон С. Дж.[5], Ph.D

[1] Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, г. Москва, Ленинский просп., 4, стр. 1
laleksanian@misis.ru
[2] Университет Корё
145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, Республика Корея
[3] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
119991, г. Москва, Ленинский просп., 53
[4] Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6
[5] Университет Флориды
Gainesville, FL 32611, Соединенные Штаты

Представлены результаты исследования электрических и люминесцентных свойств микро- и наносветодиодов на основе GaN/InGaN, подвергнутых различным методам обработки поверхности и модифицированных наночастицами локализованных поверхностных плазмонов (LSP) Ag/SiO_2.

Ключевые слова: наносветодиоды; нитрид галлия; сухое травление; локализованные поверхностные плазмоны; квантовая эффективность.

Наноструктуры на основе GaN/InGaN обладают значительным потенциалом для применения в микро- и наносветодиодах благодаря их высокой квантовой эффективности (IQE) и возможности модификации электрических и оптических свойств [1]. В рамках данного исследования были изготовлены массивы микро- и наностолбиков методом сухого травления и последующей обработки травлением KOH с пассивацией SiO_2, а также изучено влияние добавления наночастиц локализованных поверхностных плазмонов (LSP) Ag/SiO_2 на характеристики наносветодиодов.

Планарные светодиодные структуры на сапфировой подложке, содержащие квантовые ямы $In_{0,1}Ga_{0,9}N$, были преобразованы в массивы наностолбиков диаметром 800 нм и высотой 900 нм. Обработка поверхности включала травление в растворе KOH, пассивацию слоем SiO_2, нанесенным методом золь-гель, а также введение LSP-наночастиц Ag/SiO_2. Микросветодиодные структуры с диаметром столбика от 5 до 100 мкм были получены аналогичным методом, обработаны в растворе KOH с последующей пассивацией PECVD (SiO_2).

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) наносветодиодов показали, что обработка поверхности травлением KOH и пассивацией SiO_2 значительно снижает ток утечки, но увеличивает последовательное сопротивление. Добавление LSP-наночастиц улучшает последовательное сопротивление и уменьшает его разброс (рис. 1).

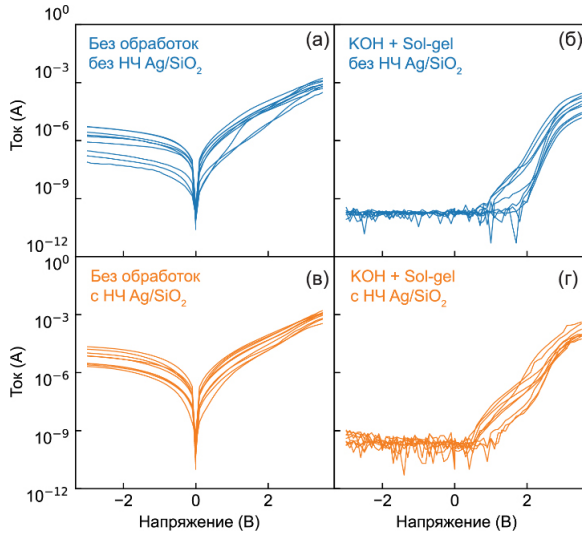
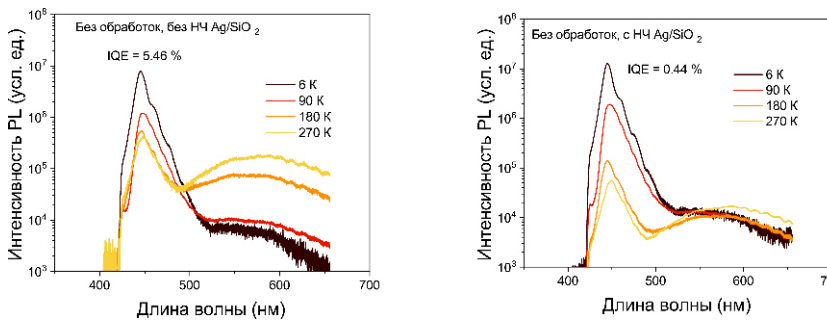


Рис. 1. ВАХ наносветодиодов

Стационарные спектры фотолюминесценции (ФЛ) показали наличие пика квантовых ям около 2,7 эВ и широкого пика дефектов около 2,1 эВ, связанных с рекомбинацией через состояния V_{Ga}. Обработка KOH увеличивает внутреннюю квантовую эффективность (IQE), которая достигает 5,46 % для протравленных образцов и до 6,8 % при пассивации SiO_2. Однако введение LSP-наночастиц в полимер SOG снижает IQE из-за паразитного поглощения света диспергированными наночастицами (рис. 2).



а *б*

Рис. 2. Стационарные спектры ФЛ при различных температурах

Результаты показывают, что оптимизация концентрации наночастиц может значительно повысить эффективность люминесценции. Прогнозируемое

увеличение IQE до 10,5 % для обработанных образцов демонстрирует перспективность использования LSP-наночастиц при условии их равномерного распределения вблизи квантовых ям (рис. 3).

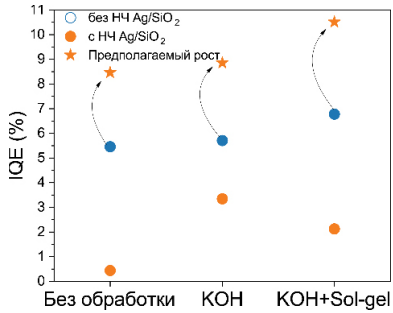
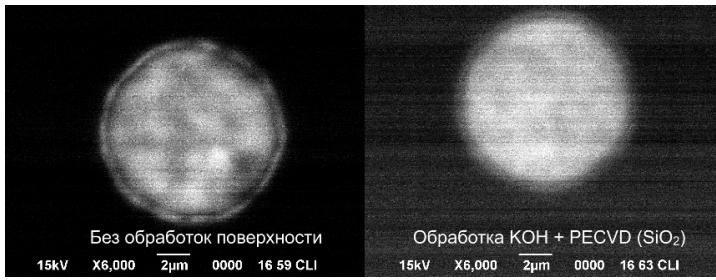


Рис. 3. Сравнение эффективности образцов с разными методами обработок

Для микросветодиодов были проведены измерения микрокатодолюминесценции (рис. 4). На левом изображении представлен микросветодиод без постобработки боковой поверхности после сухого травления. Видна неоднородная картина люминесценции с ярко выраженной «мертвой зоной» — областью с пониженной интенсивностью излучения по периферии устройства. Эта область характеризуется значительным снижением эффективности излучательной рекомбинации, что проявляется в виде более темного кольца по краям структуры. Внутренняя часть микросветодиода демонстрирует неравномерное распределение интенсивности люминесценции, что свидетельствует о неоднородности оптических свойств активной области. Правое изображение демонстрирует микросветодиод после обработки поверхности KOH и последующего осаждения SiO_2 с помощью PECVD. Визуально наблюдается значительное улучшение однородности катодолюминесценции и заметное уменьшение «мертвой зоны». Распределение интенсивности излучения стало более равномерным по всей площади устройства, что указывает на эффективное подавление поверхностной безызлучательной рекомбинации.



а *б*

Рис. 4. Результаты измерений микрокатодолюминесценции для микросветодиодов 10 мкм

Литература

1. Kim H. M., Ryu M., Cha J. H. J., Kim H. S., Jeong T., Jang S. J. Ten micrometer pixel, quantum dots color conversion layer for high resolution and full color active matrix micro-LED display // Journal of the Society for Information Display, 2019. Vol. 27. № 6. P. 347–353.
2. Polyakov A. Y., Jeon D., Smirnov N. B., Govorkov A. V., Kozhukhova E. A., Yakimov E. B., Lee I. Electrical and luminescent properties and deep traps spectra in GaN nanopillar layers prepared by dry etching // Journal of Applied Physics, 2012. Vol. 112. № 7.

УДК 537.862

Пьезоэлектрическое управление генерацией ТГц-излучения в структуре W/FeGa/Pt на подложке PMN-PT

Авдеев П. Ю.[1], Лебедева Е. Д.[1], Алферьев А. Л.[1], Климов А. А.[1], Караштин Е. А.[2], Гусев Н. С.[2], Сапожников М. В.[2], Буряков А. М.[1]
[1] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
[2] Институт физики микроструктур РАН
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105
pasha.avdeev.2000@mail.ru

Экспериментально продемонстрировано управление терагерцевым излучением в структуре W/FeGa/Pt на сегнетоэлектрической подложке PMN-PT (011) — достигнута модуляция амплитуды ТГц-сигнала до 50%, а также наблюдается поворот поляризации до 52° при подаче напряжения 200 В к подложке PMN-PT.
Ключевые слова: терагерцевое излучение; спинтронный эмиттер; пьезоэлектрическое управление; магнитострикция; сегнетоэлектрик PMN-PT; структура W/FeGa/Pt; поляризация ТГц-излучения.

Спинтронные эмиттеры терагерцевого (ТГц) излучения являются одними из наиболее перспективных структур стремительно развивающейся спинтроники [1, 2]. Благодаря высокой напряженности и большой ширине генерируемого ТГц-излучения [3], а также уникальной возможности управления ТГц-поляризацией при помощи магнитного поля [4] эти источники ТГц-излучения значительно опережают нелинейные оптические кристаллы и фотопроводящие антенны. Огромным шагом к созданию высокоэффективных управляемых ТГц-источников является пьезоэлектрическое управление процессами ТГц-генерации в спинтронных эмиттерах, расположенных на сегнетоэлектрических подложках [5–7]. Такое управление достигается за счет магнитострикции, возникающей в магнитном слое структуры в результате обратного пьезоэффекта, при подаче электрического напряжения на сегнетоэлектрическую подложку. По результатам многих исследований в данной области оптимальным сегнетоэлектриком для данной цели оказался PMN-PT [5–7]. Однако материалы, входящие в состав спинтронного эмиттера, являются неоптимизированными. В частности, по нашему мнению, незаслуженно обделен вниманием один из лучших магнитострикционных материалов — FeGa.

В своей работе мы исследуем пьезоэлектрическое управление в структуре W/FeGa/Pt с толщиной каждого слоя 3 нм на подложке PMN-PT в ориентации (011). Для обеспечения лучшего электрического контакта с обратной стороны сегнетоэлектрической подложки были нанесены контактные площадки,состоящие из слоев Ti и Au толщиной 2 и 10 нм соответственно. Кривые намагниченности, полученные методом экваториального магнитооптического эффекта Керра, подтвердили наличие одноосной магнитной анизотропии в плоскости магнитной структуры W/FeGa/Pt. Эксперимент проводился при помощи методики терагерцевой эмиссионной спектроскопии временного разрешения (THz-TDS) в геометрии на пропускание. Подробное описание экспериментальной установки приведено в работе [8].

Были получены зависимости пикового ТГц-сигнала от величины магнитного поля (ТГц-гистерезис) при приложении к образцу электрического напряжения

различной величины. В петлях ТГц-гистерезиса были обнаружены точки, в которых наблюдается наибольшая деформация пленки W/FeGa/Pt при подаче электрического напряжения на подложку PMN-PT — 26 и −10 Э. В данных магнитных полях была продемонстрирована модуляция ТГц-амплитуды до 50 % при приложении электрического напряжения от 0 до 200 В с шагом 50 В. С помощью электрических петель ТГц-гистерезиса, полученных при фиксированной величине магнитного поля, было показано различие величины механической деформации в результате магнитострикции при приложении электрического напряжения различной полярности. В частности, величина деформации при приложении положительного электрического напряжения гораздо выше, чем при приложении аналогичного отрицательного напряжения. Также был продемонстрирован поворот поляризации ТГц-излучения на 52° при приложении электрического напряжения величиной 200 В к образцу.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-19-00849) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание для университетов № FSFZ-2025-0002).

Литература

1. Pawar A. Y. Terahertz technology and its applications // Drug Invent. Today, 2013. Vol. 5. № 2. P. 157–163.
2. Wu W. et al. Principles of spintronic THz emitters // J. Appl. Phys., 2021. Vol. 130. № 9.
3. Seifert T. et al. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation // Nat. Photonics. Nature Publishing Group UK London, 2016. Vol. 10. № 7. P. 483–488.
4. Khusyainov D. et al. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure // Sci. Rep., 2021. Vol. 11. № 1. P. 697.
5. Agarwal P. et al. Electric-field control of nonlinear THz spintronic emitters // Nat. Commun., 2022. Vol. 13. № 1. P. 4072.
6. Lezier G. et al. Fully reversible magnetoelectric voltage controlled THz polarization rotation in magnetostrictive spintronic emitters on PMN-PT // Appl. Phys. Lett., 2022. Vol. 120. № 15.
7. Khusyainov D. et al. Composite Multiferroic Terahertz Emitter: Polarization Control via an Electric Field // Phys. Rev. Appl., 2022. Vol. 17. № 4. P. 044025.
8. Buryakov A. M. et al. Efficient Co/Pt THz spintronic emitter with tunable polarization // Appl. Phys. Lett., 2023. Vol. 123. № 8. P. 082404.

УДК 621.382.3+621.317.72

Двухфункциональный сенсор температуры и света на основе монокристаллического кремния, легированного марганцем

Ибодуллаев Ш. Н., Зикриллаев Н. Ф.
Ташкентский государственный технический университет
100174, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Университетская, 4

Разработан двухфункциональный сенсор на основе монокристаллического кремния, легированного марганцем, позволяющий одновременно измерять температуру и интенсивность света. Полученный материал проявляет высокую чувствительность как к тепловым, так и к оптическим воздействиям. Достигнуто значение температурной чувствительности $\beta = 8600$ K в диапазоне температур $T = 273–315$ K и фоточувствительности до 2 мкА/лк. Сенсор может быть использован в качестве компактного многофункционального элемента для систем мониторинга окружающей среды и интеллектуальных датчиков.

Ключевые слова: сенсор; кремний; марганец; терморезистор; фоточувствительность; двухфункциональность.

Современные требования к сенсорам физических величин включают повышенную точность, стабильность и многофункциональность. Одним из перспективных подходов является использование монокристаллического кремния, легированного атомами марганца, что позволяет реализовать чувствительность к температуре и свету в одном устройстве.

В работе использовался *p*-тип кремния с удельным сопротивлением 3 Ом·см, в который осуществлялась диффузия атомов марганца в условиях вакуума. После обработки получен высокоомный материал ($\rho \sim (5...8) \cdot 10^3$ Ом·см при 300 K), проявляющий высокую чувствительность к температуре и оптическому излучению. Измерения выполнялись методами эффекта Холла и Ван дер Пау.

Сенсор состоит из двух функциональных областей. Левая часть чувствительна к свету и температуре, правая — только к температуре. Оптическая изоляция обеспечивается покрытием на основе эпоксидной смолы с добавками сажи и оксида железа. Измерения показали, что сопротивление сенсора снижается с ростом температуры, максимальное значение температурной чувствительности β достигает 8600 K при 300 K. Фотоотклик возрастает в 1500 раз при освещенности 2000 лк. Специфическая фоточувствительность составляет 3,2 мкА/лм·В.

Таким образом, разработанная структура Si<Mn> демонстрирует свойства, позволяющие использовать ее в качестве компактного многофункционального сенсора для систем мониторинга и автоматики.

Литература

1. Bakhadyrkhanov M. K. et al. Transport Properties of Silicon Doped with Manganese via Low Temperature Diffusion // Inorg. Mater., 2011.
2. Baxadirxanov M. K., Ibodullaev Sh. N. et al. Infrared Radiation Photoresistor Based on Silicon with Mn Nanoclusters // Tech. Phys. Lett., 2021.
3. Rud N. A., Sergeev A. N. Изучение терморезистора: метод. указания. — Ярославль: ЯрГУ, 2012.

4. Slepsova O.V. Повышение эффективности хим. никелирования // Научн. вестник, 2009.
5. Lin K. Effect of thiourea and lead acetate on electroless nickel // Mater. Chem. Phys., 2002.

УДК 546.26 — 537.226.86

Разработка датчика деформации на основе легированных азотом углеродных нанотрубок

Соболева О. И.[1], Ильин О. И.[1], к. т. н., Ильина М. В.[2], д. ф.-м. н.
[1] Южный федеральный университет, научно-исследовательская лаборатория технологии функциональных наноматериалов
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2
osotova@sfedu.ru
[2] Южный федеральный университет,
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2

Разработана конструкция пьезоэлектрического датчика деформации на основе N-УНТ. Представлены результаты исследования стабильности работы чувствительного элемента на основе N-УНТ, проведены оценка величин тензометрического коэффициента и чувствительности к деформациям чувствительного элемента.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; легирование азотом; датчик деформации; пьезоэлектричество.

Активное развитие носимой электроники и Интернета вещей дало стимул к разработке датчиков деформации, которые могут детектировать малейшие деформации для применения в медицине и робототехнике [1]. Наиболее перспективными стали пьезоэлектрические датчики из-за высокой эффективности, однако продолжается поиск функциональных материалов. Легированные азотом углеродные нанотрубки (N-УНТ) хорошо показали себя в качестве функционального материала для разработки таких датчиков [2]. Целью данной работы является создание пьезоэлектрического датчика деформации на основе N-УНТ.

Конструкция разработанного датчика деформации на основе N-УНТ (рис. 1.) состоит из подложки 1, на которой сформирован проводящий слой из Mo 2 и методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (ПХОГФ) выращен массив N-УНТ 3, выступающий чувствительным элементом, и верхнего профилированного электрода 4, на котором сформированы проводящий слой 5 и диэлектрические опоры 6, удерживающие верхнюю часть датчика над нижней таким образом, чтобы вершины N-УНТ не были жестко закреплены. В исходном состоянии N-УНТ не испытывают деформацию. При приложении внешней силы верхний электрод изгибается и контактирует с вершинами N-УНТ. В результате деформации на вершинах N-УНТ формируется поверхностный потенциал из-за проявления пьезоэлектрических свойств и между заземленным верхним электродом и вершинами N-УНТ возникает разность потенциалов, величина которой зависит от величины пьезоэлектрического модуля (d_{33}) N-УНТ.

Также были проведены исследования стабильности работы чувствительного элемента (ЧЭ) датчика и оценка величин чувствительности к деформации и тензометрического коэффициента (ТК). В качестве экспериментального образца ЧЭ выступал массив N-УНТ. Величина d_{33} массива определялась методом силовой микроскопии пьезоотклика атомно-силовой микроскопии (АСМ)

и составила 91,6 ± 12,9 пм/В. Средние диаметр и длина массива оценивались на основе изображений растровой электронной микроскопии и составили 66,8±21,1 нм и 2,13±0,13 мкм.

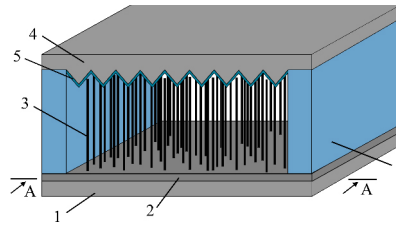


Рис. 1. Схема датчика деформации на основе N-УНТ

Исследование стабильности работы ЧЭ на основе N-УНТ проводилось методом силовой спектроскопии АСМ. АСМ-зонд давил на нанотрубку с заданной силой, и встроенный осциллограф детектировал ток, генерируемый при деформации N-УНТ. Установлено, что N-УНТ способна стабильно генерировать ток в течение 1760 циклов воздействия (рис. 2).

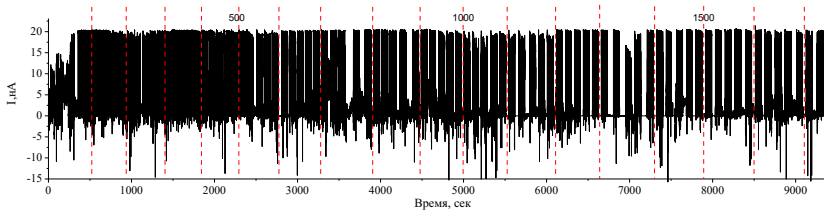


Рис. 2. Стабильность работы ЧЭ на основе N-УНТ

Величина ТК ЧЭ на основе N-УНТ оценивалась как отношение относительного изменения сопротивления к относительному изменению длины N-УНТ при деформации с заданной силой. Таким образом, величина ТК ЧЭ изменяется от 28000 до 1300 при изменении приложенной силы от 0,5 до 10,5 мкН, что значительно превышает значения ТК для датчиков на основе полупроводников (50–200). Также была проведена оценка чувствительности к деформации, которая оценивалась как отношение величины поверхностного потенциала, формируемого при деформации N-УНТ, и величины приложенной силы. Величина чувствительности к деформациям изменялась от $2{,}8 \cdot 10^6$ до $6{,}7 \cdot 10^6$ мВ/Н при изменении внешней силы от 0,5 до 10,5 мкН.

Таким образом, в данной работе представлены конструкция и принцип работы датчика деформации на основе N-УНТ, измерена стабильность работы ЧЭ и проведена оценка величин ТК и чувствительности к деформации, которые составили 1300 и $6{,}7 \cdot 10^6$ мВ/Н при силе воздействия 10,5 мкН. Полученные результаты могут быть использованы при разработке пьезоэлектрических устройств на основе N-УНТ.

Исследование стабильности генерации тока выполнено при поддержке гранта РНФ № 25-79-10302; разработка конструкции и измерение ТК и чувствительности к деформациям проводились за счет средств гранта «УМНИК», договор №№ 20ГУЭС18/91357.

Литература

1. Hu J. et al. Recent progress in flexible micro-pressure sensors for wearable health monitoring // Nanoscale Adv. Royal Society of Chemistry, 2023. Vol. 5. № 12. P. 3131–3145.
2. Il'ina M. V. et al. Study of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes for Creation of Piezoelectric Nanogenerator // J. Low Power Electron. Appl., 2023. Vol. 13. № 1. P. 11.

УДК 538.975

Импульсное лазерное осаждение тонких пленок оксида ванадия для нейроморфных приложений

Трунов К. Б., Ханас А. Р., Зенкевич А. В., Лебединский Ю. Ю., Завидовский И. А.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Оптимизирован процесс роста пленок диоксида ванадия методом импульсного лазерного осаждения. Изготовлены резистивные переключатели на основе полученных пленок.

Ключевые слова: оксиды ванадия; импульсное лазерное осаждение; пороговые резистивные переключатели; нейроморфные вычисления.

В последние годы все больший интерес начинают представлять нейроморфные вычислительные системы, однако их развитие затрудняется гигантским потреблением энергии для обучения новых моделей. Одним из способов решения данной проблемы является создание специализированного аппаратного обеспечения для ускорения нейросетевых операций. Для реализации энергоэффективных аппаратных нейросетевых ускорителей необходима соответствующая элементная база — искусственные нейроны (нейристоры) и синапсы. Нейристоры могут быть созданы на основе пороговых резистивных переключателей, в том числе с использованием материалов, обладающих переходом диэлектрик — металл (ПДМ) при температуре выше комнатной, поскольку джоулев нагрев при приложении напряжения вызывает резкое изменение сопротивления и обуславливает наличие на вольт-амперной характеристике (ВАХ) участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС), что является необходимым свойством релаксационного осциллятора, реализующего простейшие функции нейрона.

Диоксид ванадия (VO_2) является широко используемым в нейроморфной электронике материалом [1], обладающим переходом диэлектрик — металл при температуре около 70 °C. В работе исследуется возможность роста тонких пленок диоксида ванадия методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО). Ключевой трудностью является наличие большого количества фаз оксидов ванадия с различными стехиометрией и кристаллической структурой, из-за чего требуется тщательный подбор параметров осаждения [2].

В работе были получены поликристаллические пленки диоксида ванадия толщиной около 100 нм. Рост проводился при помощи установки ИЛО IVO-250-0.3-15 из мишени металлического ванадия. Использовался лазер с активным телом Nd:YAG. Энергия излучаемых импульсов — около 250 мДж, длина волны — 1064 нм, количество импульсов — 10000. Осаждение проводилось при комнатной температуре в атмосфере кислорода, при этом давление кислорода в камере подбиралось так, чтобы получить оксид нужной фазы. Было получено, что наиболее подходящее значение давления — 1,65 Па. После роста для кристаллизации образца и уменьшения содержания кислорода проводился отжиг образца в высоком вакууме (≈10-6 мбар) при температуре около 490 °C в течение 20 минут.

Микроструктура образцов была изучена с помощью просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, рамановской спектроскопии. В структурах металл/VO_2/металл получены пороговые переключения вследствие температурного ПДМ, наблюдаемые как в виде скачков проводимости на ВАХ, так и по локальным качественным изменениям оптических свойств VO_2. Наблюдаемые эффекты объясняются различием удельных сопротивлений и показателей преломления высокотемпературной металлической и низкотемпературной полупроводниковой фаз [3]. ПДМ обратим, устройство возвращается в состояние с высоким сопротивлением.

В ходе работы были оптимизированы процессы роста пленок диоксида ванадия и изготовления резистивных переключателей на их основе. Данные результаты будут использованы для создания нейристоров и аппаратных нейронных сетей.

Литература

1. Yi W., Tsang K. K., Lam S. K. et al. Biological plausibility and stochasticity in scalable VO_2 active memristor neurons // Nature communications, 2018. Vol. 9 (1). P. 4661. DOI: 10.1038/s41467-018-07052-w.
2. Pergament A., Stefanovich G., Velichko A. Oxide Electronics and Vanadium Dioxide Perspective: A Review // Journal on Selected Topics in Nano Electronics and Computing, 2013. Vol. 1. № 1. P. 24–43. DOI: 10.15393/j8.art.2013.3002.
3. Khandelwal U. et al. Large electro-opto-mechanical coupling in VO_2 neuristors // Applied Physics Reviews, 2024. Vol. 11. № 2. P. 021410. DOI: 10.1063/5.0169859.

УДК 621.3.049

1D/0D-гетероструктура ZnO/g—C_3N_4: синтез и сенсорные свойства

Буй К. Д., Налимова С. С.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
congdoan6997@gmail.com

Настоящее исследование посвящено разработке и оценке газового сенсора на основе гетероструктуры наностержней ZnO и квантовых точек g—C_3N_4. Данный композит продемонстрировал значительно более высокие характеристики газочувствительности по сравнению с НС ZnO. Коэффициент отклика композита достигает около 20 при температуре 250 °C для 2000 ppm пара изопропанола, что 8 раз выше, чем на основе НС ZnO. Это свидетельствует о существенном повышении эффективности сенсора благодаря использованию гетероструктуры.

Ключевые слова: газовый сенсор; гетероструктура; наностержни ZnO; квантовые точки g—C_3N_4; пары органических растворителей.

Оксид цинка (ZnO) с вюрцитной структурой и шириной запрещенной зоны 3,3 эВ обладает высокой подвижностью электронов, а его наностержни обеспечивают увеличенную площадь поверхности для адсорбции газов, что делает их особенно чувствительными в газовых сенсорах [1]. В то же время g—C_3N_4 представляет собой двумерный полимер с косвенной шириной запрещенной зоны 2,7 эВ и богатой нитридной структурой, способствующей активному взаимодействию с газовыми молекулами. В виде квантовых точек (~10 нм) g—C_3N_4 проявляет квантово-размерные эффекты, регулируя электронные свойства. Высокая удельная поверхность обоих материалов усиливает их сенсорную активность, делая их перспективными для применения в чувствительных газоанализаторах.

Сначала на подложке методом центрифугирования формируют зародышевый слой ZnO, обеспечивающий прочное сцепление будущей структуры. Затем вертикально ориентированные наностержни ZnO выращивают гидротермальным методом при 85 °C в течение 1 часа. Для получения квантовых точек g—C_3N_4 исходно синтезируют объемный g—C_3N_4 путем термической обработки мочевины при 550 °C, после чего проводят его гидротермальную обработку в растворе этанола с добавлением KOH при 550 °C в течение 16 часов. Наконец, готовые квантовые точки g—C_3N_4 осаждаются на поверхность наностержней ZnO, формируя гетероструктуру ZnO/g—C_3N_4.

В ходе экспериментов сенсор на основе ZnO/g—C_3N_4 продемонстрировал высокую газочувствительность к летучим органическим соединениям. При рабочей температуре 250 °C коэффициент отклика достигал 20 для 2000 ppm изопропанола, что значительно превосходило показатели чистого ZnO. Также наблюдалась улучшенная селективность к изопропанолу по сравнению с ацетоном и этанолом. Сенсор сохранял стабильность и воспроизводимость отклика в ходе нескольких циклических тестов при концентрации 500 ppm. Подобное усиление газочувствительности объясняется синергетическим эффектом между ZnO и квантовыми

точками g—C_3N_4, способствующим увеличению числа активных центров адсорбции и улучшению переноса электронов. В результате при адсорбции целевого газа наблюдались более резкие изменения электрического сопротивления. Исследования энергетической зонной диаграммы показали, что взаимодействие изопропанола с адсорбированным кислородом высвобождает электроны и снижает потенциальный барьер.

Проведенное исследование подтвердило высокий потенциал созданного композита ZnO/g—C_3N_4 для эффективного и чувствительного обнаружения газов. За счет формирования гетероструктуры сенсор достиг высоких показателей отклика и селективности при детекции паров органических растворителей. Полученный материал перспективен для применения в газовых датчиках, в частности в системах мониторинга воздуха, в реальном времени. В дальнейшем планируется оптимизация состава и структуры композита, а также дополнительные исследования для оценки длительной стабильности сенсора. Такие шаги необходимы для подготовки разработки к практическому внедрению, однако уже полученные результаты показывают, что гетероструктура ZnO/g—C_3N_4 является многообещающим направлением в создании высокочувствительных селективных газовых сенсоров.

Литература

1. Рябко А. А., Бобков А. А., Налимова С. С., Максимов А. И. и др. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации // Журнал технической физики, 2022. — Т. 9. — № 5. — С. 758–764.
2. Рябко А. А., Налимова С. С., Мазинг Д. С., Корепанов О. А. и др. Сенсибилизация наностержней ZnO коллоидными квантовыми точками $AgInS_2$ для адсорбционных газовых сенсоров с фотоактивацией // Журнал технической физики, 2022. — Т. 92. — № 6. — С. 845.

УДК 538.9

Сравнительный анализ многочастичных возбуждений в поверхностно-легированных коллоидных нанокристаллах CdSe и CdS

Ипатов А. Н.[1,2], д. ф.-м. н., Куприянов Г. А.[1]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
henryweis3@gmail.com

[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

Исследованы оптические спектры коллоидных нанокристаллов CdSe и CdS. Выявлено, что в спектрах присутствует в высокой степени коррелированная доминирующая резонансная мода, которая может быть с высокой степенью точности описана в рамках двухуровневой модели.

Ключевые слова: коллективные возбуждения; плазмоны; коллоидные нанокристаллы; легирование; селенид кадмия; сульфид кадмия.

В настоящее время происходит активное развитие электроники, что обусловило интерес к созданию новых материалов на основе нанокристаллов, чьи свойства принципиально отличаются от свойств аналогичных объемных материалов. К числу перспективных направлений в данной сфере относится наноплазмоника, изучающая процессы взаимодействия света с веществом на квантовом уровне. Так, в оптических спектрах коллоидных легированных нанокристаллов существуют дипольные плазмонные резонансы, частоты которых зависят от ряда параметров, таких как геометрические размеры нанокристалла, число свободных носителей заряда, высота потенциального барьера на границе кристалла, тип легирования, который может быть разделен на поверхностный и объемный.

В данной работе производился сравнительный анализ спектров оптических переходов в поверхностно-легированных нанокристаллах CdSe и CdS. Расчеты проводились для систем с заданной высотой потенциального барьера на основе приближения случайных фаз как с учетом всех одночастичных переходов, так и в рамках двухуровневой модели, учитывающей переход только между HOMO- и LUMO-орбиталями.

В результате расчетов было установлено, что в спектрах коллоидных нанокристаллов как из селенида кадмия, так и сульфида кадмия присутствует доминирующая резонансная линия, положение которой при описании в рамках двухуровневой модели практически идентично положению, полученному при расчетах с учетом полного базиса одночастичных переходов. При этом положение моды отличается от положения соответствующих одночастичных каналов, что говорит о ее высокой степени коррелированности. Тем не менее характер доминирующей резонансной моды для двух рассмотренных материалов существенно различается. В случае нанокристаллов CdSe достаточно малого радиуса с увеличением числа свободных носителей для данного возбуждения не происходит перехода от режима размерного квантования к классическому режиму. В то же время данная резонансная

мода в нанокристаллах CdS имеет характер дипольного плазмонного перехода для любых геометрических размеров системы и числа свободных носителей.

Следует также отметить, что в оптическом спектре нанокристаллов CdSe, помимо доминирующей моды, присутствуют еще две линии, обусловленные одночастичными переходами, однако имеющие значительно меньшие силы осцилляторов. В случае же нанокристаллов CdS, помимо доминирующего дипольного перехода, существует еще и вторая резонансная линия, появление которой связано с наличием потенциального барьера на границе системы.

Таким образом, оптические спектры возбуждения поверхностно-легированных коллоидных нанокристаллов CdSe и CdS имеют ряд сходств и различий. Так, доминирующая линия в обоих случаях является коррелированной и может быть описана в рамках двухуровневой модели. Однако характер этой моды для них оказывается различным. В случае нанокристаллов CdSe сохраняется режим размерного квантования для любого числа свободных носителей. Для нанокристаллов CdS данная линия имеет характер дипольного плазмонного резонанса.

Литература

1. Zhang H., Kulkarni V., Prodan E., Nordlander P., Govorov A. O. Theory of quantum plasmon resonances in doped semiconductor nanocrystals // The Journal of Physical Chemistry C, 2014. Vol. 118. № 29. P. 16035–16042.
2. Schimpf A. M., Thakkar N., Gunthardt C. E., Masiello D. J., Gamelin D. R. Charge-tunable quantum plasmons in colloidal semiconductor nanocrystals // ACS Nano (The American Chemical Society), 2014. Vol. 8. № 1. P. 1065–1072.

УДК 621.382

Газочувствительные сенсоры на основе полупроводниковых слоев станната цинка, декорированных серебряными наночастицами

Рыбина А. А., Бузовкин С. С.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
arinasvg02@gmail.com

Выполнен синтез наночастиц станната цинка методом соосаждения и их отжиг при различных температурах, а также модификация структуры наночастицами серебра, что позволило увеличить чувствительность сенсора к изопропиловому спирту в 20 раз, к этанолу в 16 раз. Это связано с двумя механизмами — химической и электронной сенсибилизацией.
Ключевые слова: газочувствительный сенсор; станнат цинка; наночастицы.

Полупроводниковые газовые сенсоры являются важным инструментом для мониторинга окружающей среды и промышленной безопасности благодаря своей высокой чувствительности, низкой стоимости и компактности. Они применяются для обнаружения токсичных и взрывоопасных газов, представляющих угрозу для здоровья человека и экологии. Их применение особенно актуально в химической промышленности. Наиболее распространенными и опасными газами, встречающимися в промышленности, являются углекислый газ, угарный газ, аммиак, сероводород, летучие органические соединения (ЛОС).

Станнат цинка — одно из перспективных соединений, используемых в газовых сенсорах [1–5]. Преимуществами станната цинка являются высокая подвижность носителей заряда, высокая проводимость и стабильность, большая ширина запрещенной зоны (3,6 эВ).

В данной работе синтез проводился методом осаждения в водном растворе [6]. Прекурсоры — ацетат цинка и станнат натрия 3-водный. Полученный порошок был отожжен при трех температурах: 300, 500 и 700 °C. Полученные наночастицы наносились на сенсорные платформы со встречно-штыревыми электродами для исследования газочувствительных характеристик к парам ЛОС (изопропиловый спирт, ацетон, этанол). Измерения проводились при рабочей температуре 250 °C и концентрации газов 1000 ppm. Отклики структур, отожженных при различных температурах, отличаются: структура, отожженная при 300 °C, показала избирательность к изопропиловому спирту, при 500 °C — к ацетону, при 700 °C отклик практически не наблюдался.

Для повышения чувствительности сенсоров было выполнено декорирование серебряными наночастицами [7]. Исследование их взаимодействия с газообразными аналитами показало, что отклик к парам изопропилового спирта при 250 °C вырос в 20 раз. Тогда были еще проведены измерения при 150 °C, что также позволило увидеть хорошую чувствительность.

Таким образом, на сегодняшний день стоит задача создать датчики, которые могут обнаруживать очень малые концентрации опасных газов при низких рабочих

температурах. Декорирование серебряными наночастицами — один из методов повышения чувствительности газовых сенсоров. Это можно объяснить химической и электронной сенсибилизацией [8].

Литература

1. Налимова С. С., Максимов А. И., Матюшкин Л. Б., Мошников В. А. Современное состояние исследований в области синтеза и применения станната цинка // Физика и химия стекла, 2019. — Т. 45. — № 4. — С. 311–325.
2. Налимова С. С. и др. Исследование формирования слоев станната цинка методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // Журнал технической физики, 2020. — Т. 90. — № 7. — С. 1132–1135.
3. Levkevich E. A. et al. Synthesis, investigation and gas sensitivity of zinc stannate layers // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020, 2020. P. 984–986.
4. Налимова С. С. и др. Синтез и исследование газочувствительных наноструктур системы Zn-Sn-O // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, 2021. — № 13. — С. 910–918.
5. Levkevich E. A. et al. Study of interaction between H_2O molecules and ZTO-ZHS surface // AIP Conference Proceedings, 2020. Vol. 2280. P. 0018936.
6. Ge Q. et al. Phase evolution in preparing $ZnSnO_3$ powders by precipitation method // Applied Physics A, 2021. Vol. 127. P. 1–8.
7. Nogami K. et al. Self-growth of silver tree-like fractal structures with different geometries // Applied Physics A, 2022. Vol. 128. № 10. P. 860.
8. Zhu L. Y. et al. Advances in noble metal-decorated metal oxide nanomaterials for chemiresistive gas sensors: overview // Nano-Micro Letters, 2023. Vol. 15. № 1. P. 89.

УДК 621.382

Влияние концентрации поверхностных состояний на стойкость мощных МОПТ к электростатическому разряду

Бакеренкова Д. М., Петров А. С.
АО «Научно-исследовательский институт приборов»
140080, г. Лыткарино, промзона Тураево, стр. 8
DMBakerenkova@niipribor.ru

Описан физический механизм влияния накопления поверхностных состояний (ПС) на стойкость мощных МОПТ к электростатическому разряду (ЭСР). Представлен метод расчета концентрации поверхностных состояний из подпороговой ВАХ. Показана корреляция увеличения концентрации ПС и улучшения стойкости к ЭСР.

Ключевые слова: электростатический разряд; радиационные эффекты; поверхностные состояния.

В работе [1] было показано, что облучение гамма-квантами мощных МОПТ приводит к улучшению стойкости к ЭСР, причем чем больше поглощенная доза, тем больше пробивное напряжение (V_{ESD}). Это было связано с деградацией коэффициента усиления паразитного биполярного транзистора (h_{21e}), как следствие, для его срабатывания и отказа МОПТ требовалось все большее напряжение ЭСР. Деградация h_{21e} при гамма-облучении происходит из-за накопления ПС на границе Si/SiO_2 и проявляется ростом тока базы при фиксированном смещении эмиттера. Радиационно-индуцированные ПС являются центрами рекомбинации, и их накопление приводит к увеличению темпа рекомбинации преимущественно в местах выхода области пространственного заряда (ОПЗ) перехода эмиттер — база на границу раздела Si/SiO_2, что и проявляется ростом двух компонент базового тока: тока рекомбинации ОПЗ эмиттер — база и тока рекомбинации в нейтральной базе. Существующие методы измерения h_{21e} в структуре МОПТ [2] с закороченным выводом подложки подразумевают нагрев образцов до 150 °C. При нагреве до таких температур большая часть ПС отжигается, следовательно, h_{21e} меняется в процессе измерения. Для подтверждения гипотезы, что стойкость мощных МОПТ к ЭСР после гамма-облучения определяется накоплением ПС, необходимо было облучить образцы до нескольких значений поглощенной дозы, затем рассчитать плотность ПС и исследовать стойкость к ЭСР в каждом случае.

В качестве исследуемых образцов были выбраны два типа мощных МОПТ: IRFR4615PbF (далее — 4615) и IRFR3710ZPbF (далее — 3710). До и после облучения снимались сток-затворные ВАХ в подпороговой области. Облучение гамма-квантами ^{60}Co происходило в режиме измерения порогового напряжения: $V_{GS} = V_{DS}$ и $I_D = 100$ мкА для 4615 и $I_D = 250$ мкА для 3710. Образцы 4615 облучались до значений поглощенной дозы 1,78 и 3,18 крад, образцы 3710 облучались до 2 и 3,9 крад.

Для области слабой инверсии поверхностный потенциал находится в диапазоне $\varphi_B \le \varphi_s \le 2\varphi_B$, где

$$\varphi_B = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right), \quad (1)$$

где N_d и n_i — концентрация легирующей примеси и собственная концентрация в подложке соответственно.

Зависимость тока стока от поверхностного потенциала описывается как [3]

$$I_D = \frac{qDWn_i^2}{\sqrt{2}L_C N_d}\sqrt{\frac{\varepsilon_{si}\varepsilon_0\varphi_T}{qN_d}}\left(\frac{\varphi_S}{\varphi_T}\right)^{-1/2}\exp\left(\frac{\varphi_S}{\varphi_T}\right), \quad (2)$$

где D — коэффициент диффузии, L_C — длина канала, W — ширина канала, ε_{Si} — диэлектрическая проницаемость кремния, ε_0 — электрическая постоянная, $\varphi_T = kT/q$.

Напряжение исток — затвор можно выразить как

$$V_{GS} = \varphi_S + \varphi_{OX} + \left[\frac{1}{q}\left(\chi_{Si} + \frac{E_G}{2}\right) + \varphi_B - \Phi_м\right], \quad (3)$$

где φ_{OX} — падение напряжения на окисле, χ_{Si} — сродство к электрону в кремнии, Φ_M — работа выхода из металла.

Зная распределение радиационно-индуцированного положительного заряда ρ_{ox} и поля в окисле — E_{ox}, можно записать:

$$\varphi_{OX} = -E_{OX}d_{OX} - \frac{1}{\varepsilon_{OX}\varepsilon_0}\int_0^{d_{OX}}(d_{OX} - x)\rho_{OX}(x)dx, \quad (4)$$

где d_{OX} — толщина окисла, x — постоянная интегрирования.

Из теоремы Гаусса

$$\varepsilon_{OX}\varepsilon_0 E_{OX} - \varepsilon_{Si}\varepsilon_0 E_S = qN_{it}\frac{(\varphi_s - \varphi_B)}{E_G/q}, \quad (5)$$

где N_{it} — плотность ПС.

Значение поля в кремнии E_S получено из уравнения Пуассона:

$$E_S = \sqrt{\frac{2q\varphi_T N_d}{\varepsilon_{Si}\varepsilon_0}\frac{\varphi_S}{\varphi_T} + \exp\left(-\frac{\varphi_S}{\varphi_T}\right) - 1 + \frac{n_i^2}{N_d^2}\left[\exp\left(\frac{\varphi_S}{\varphi_T}\right) - 1\right]}. \quad (6)$$

Уравнения (2)–(6) прямо связывают V_{GS} и φ_S. Используя этот метод, по результатам экспериментальных исследований рассчитали концентрацию ПС и затем нашли V_{ESD}.

3710			4615		
Доза, крад	N_{it}, см$^{-2}$	V_{ESD}, кВ	Доза, крад	N_{it}, см$^{-2}$	V_{ESD}, кВ
0	$2{,}5\cdot10^{11}$	4,5	0	$1{,}93\cdot10^{11}$	3,5
2	$6\cdot10^{11}$	5,5	1,78	$2{,}25\cdot10^{11}$	3
3,9	$7\cdot10^{11}$	5,5	3,18	$2{,}4\cdot10^{11}$	3

Литература

1. Арзамасцева Д. М., Петров А. С., Таперо К. И. Влияние предварительного гамма-облучения на деградацию мощных n-МОПТ при воздействии электростатического разряда // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2023. — № 3. — С. 19–22.

2. Reichert G. et al. Temperature dependence (300–600 K) of parasitic bipolar effects in SOI-MOSFETs // Proceedings of the 7th European Solid-State Device Research Conference, 1997.
3. McWhorter P. J., Winokur P. S. Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal-oxide-semiconductor transistors // Applied Physics Letters, 1986. Vol. 48. № 2. P. 133–135.

УДК 57.089.67:621.38

Имплантируемая медицинская электроника: от фундаментальных исследований к технологическому лидерству

Пожар К. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
pozhar@bms.zone

Рассмотрены вызовы и возможности по развитию технологий создания электронных медицинских изделий нового поколения, достижению технологической независимости и лидерства в области медицинской электроники. Представлен комплекс фундаментальных и прикладных исследований по разработке первого отечественного нейростимулятора.
Ключевые слова: биомедицинская инженерия; микроэлектроника; имплантируемая электроника; нейростимуляция; технологическое лидерство.

Технологии разработки медицинских изделий нового поколения, включая биогибридные, бионические технологии и нейротехнологии, являются одними из важнейших наукоемких технологий (Указ Президента России от 18.06.24 № 529). Новые вызовы, связанные с недоступностью в Российской Федерации передовых медицинских решений и растущей потребностью в некоторых классах таких устройств, а также бурное развитие отечественной микроэлектроники вкупе с имеющимся научным заделом мирового уровня в области медицинской электроники делают актуальной и достижимой задачу построения новой системы разработки и производства высокотехнологичных медицинских электронных устройств, которая смогла бы обеспечить новый уровень качества лечения пациентов, предусмотренный национальным проектом «Новые технологии сбережения здоровья».

Для достижения технологической независимости и технологического лидерства в данной области требуется синхронизация усилий ведущих научных, научно-производственных, медицинских, промышленных и технологических предприятий для ускоренного перехода результатов научных исследований в технологические инновации с высоким коммерческим потенциалом и значительным влиянием на общество, актуальные для российского здравоохранения на момент выхода на рынок. Данная концепция, в частности, заложена в обновленную программу развития НИУ МИЭТ — в стратегический технологический проект «Обеспечение технологического лидерства в области создания имплантируемой медицинской микроэлектроники».

Одним из примеров комплекса исследований в рамках стратегического технологического проекта является разработка систем электрической стимуляции центральной и периферийной нервной системы для реабилитационной индустрии. Ключевым элементом являются именно фундаментальные исследования микроэлектронных технологий формирования мультимасштабных имплантируемых нейроинтерфейсов живых — технических систем для управления передачей болевых сигналов в мозг. В рамках исследований разрабатываются фундаментальные основы для построения первого отечественного нейростимулятора

с биологической обратной связью, затрагивающие разработку микроэлектронных технологий стимуляции нервной системы и регистрации вызванных потенциалов, совершенствование биосовместимых материалов, разработку систем высокоэффективного беспроводного энергообеспечения медицинских имплантов, применение технологий искусственного интеллекта для автоматизации управления нейростимуляцией, доклинические исследования разрабатываемых решений. Другой частью является отработка технологий создания специализированных микроэлектронных компонентов для системы нейростимуляции в партнерстве с отечественными производителями микроэлектроники.

Важной особенностью такого комплекса исследований является высокое вовлечение в исследования на всех уровнях молодых ученых, от бакалавров до молодых кандидатов наук, с различных направлений подготовки, из различных лабораторий и исследовательских групп с ускоренным внедрением новых знаний в учебный процесс и практическую подготовку. Предлагаемый комплексный подход позволяет решить сразу несколько проблем, таких как создание отечественных технологий для обеспечения технологической независимости разработки и производства систем нейростимуляции, формирование базиса фундаментальных знаний для создания в перспективе передовых технологических решений и нейроинтерфейсов нового поколения, а также подготовка кадрового обеспечения формируемых рынков.

Предлагаемый подход способствует созданию платформы разработки и производства отечественных имплантируемых медицинских микроэлектронных устройств с учетом специфики потребностей российского здравоохранения и технологических особенностей российской промышленности, а также внедрению междисциплинарной опережающей подготовки кадров в области медицинской электроники.

Работы выполняются в рамках крупного научного проекта при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

УДК [004.5+004.8]:[621.391.7+004.056.53]

Эксплуатация уязвимостей нейроморфных чипов

Тишин А. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1

С развитием нейроморфных вычислительных архитектур, имитирующих работу человеческого мозга, растет интерес к их применению в системах искусственного интеллекта, робототехнике и особенно в имплантируемых нейроустройствах. Однако наряду с функциональными преимуществами такие устройства обладают уникальными уязвимостями, связанными с их архитектурой и способами обработки данных. В докладе рассматриваются потенциальные векторы атак на нейроморфные чипы, интегрированные в нейроимпланты, включая физические и программные уязвимости, утечки по боковым каналам, а также приводятся рекомендации по обеспечению их безопасности.
Ключевые слова: нейрочип; атаки по боковым каналам; информационная безопасность.

Введение

Нейроморфные чипы представляют собой специализированные интегральные схемы, спроектированные для имитации структуры и принципов функционирования нейронных сетей мозга. Они используют спайковые нейроны и асинхронные механизмы передачи сигнала, что позволяет значительно повысить энергетическую эффективность по сравнению с традиционными архитектурами [1].

Особый интерес к нейроморфным вычислениям проявляется в области нейроинтерфейсов и имплантируемых медицинских устройств, таких как:

- стимуляторы мозга для лечения болезни Паркинсона и эпилепсии;
- интерфейсы мозг — компьютер (BCI) с обратной связью;
- интеллектуальные протезы с возможностью адаптации к мозговой активности.

Однако эти устройства подвергаются уникальным угрозам безопасности, особенно в условиях ограниченных аппаратных возможностей, отсутствия стандартных средств защиты и биофизической интеграции с живыми организмами.

Архитектура и особенности уязвимостей

Нейроморфные чипы, такие как Loihi (Intel), TrueNorth (IBM) и SpiNNaker, используют параллельные вычислительные блоки с высоким уровнем асинхронности. В случае их использования в составе имплантов уязвимости усиливаются следующими факторами:

- невозможностью физического доступа для обслуживания и обновления ПО;
- жесткими ограничениями по энергопотреблению и тепловому излучению;
- опосредованной связью с нейронными структурами мозга.

В отличие от стандартных цифровых процессоров, нейроморфные схемы:

- обрабатывают информацию на основе событий;
- используют временные параметры в качестве ключевых характеристик передачи данных;

- хранят чувствительные параметры обучения прямо в устройствах.

Такие особенности делают их уязвимыми к следующим типам атак:

- атаки по боковым каналам, включая анализ энергопотребления и электромагнитных наводок, позволяющих реконструировать активность нейронов;
- модификация весов синапсов через несанкционированный доступ к памяти или внутренним шинам импланта;
- утечки данных через временные характеристики сигнала, особенно при обучении на устройстве;
- физическое вмешательство, например, при хирургических процедурах, предполагающих временную трепанацию черепной коробки и прямой доступ к импланту.

Потенциальные сценарии эксплуатации

Одним из наиболее опасных векторов является компрометация нейроморфных процессоров, встроенных в нейроимпланты или интерфейсы мозг — компьютер. В частности, возможно:

- считывание мозговой активности пользователя, нарушающее приватность и когнитивную автономию [2];
- подмена или искажение стимулов, направляемых в кору головного мозга, с непредсказуемыми поведенческими последствиями;
- создание долговременных когнитивных изменений путем незаметной модификации весов в слоях нейросети [3–5];
- использование SCA-методов для извлечения паттернов нейроактивности при диагностике или терапии.

Кроме того, в случае внешнего управления имплантом (например, с использованием беспроводных интерфейсов) возможно проведение атак типа brainjacking [2], особенно при недостаточно защищенных каналах связи.

Методы защиты

В текущих разработках предлагаются следующие меры по усилению безопасности нейроимплантов на базе нейроморфных чипов:

- внедрение механизмов защиты конфиденциальности на уровне спайковых сигналов;
- аппаратное шифрование внутренней памяти и каналов связи с внешними устройствами;
- защита от атак по времени исполнения и случайное варьирование задержек;
- внедрение безопасных зон исполнения внутри нейропроцессоров;
- регулярный мониторинг активности и поведенческой реакции пациента в целях выявления аномалий, вызванных потенциальной атакой.

Заключение

Безопасность нейроморфных чипов, особенно в составе имплантируемых нейроустройств, становится все более актуальной с ростом их применения в медицине и нейротехнологиях. Проведенный анализ показывает, что большинство традиционных подходов к защите требуют адаптации к специфике архитектур на основе спайковых нейронов и особенностям биофизической интеграции. Разработка

защищенных нейроимплантов требует междисциплинарного подхода, объединяющего схемотехнику, нейронауки, криптографию, биомедицинскую инженерию и нейроэтику.

Литература

1. Тельминов О. А., Горнев Е. С., Теплов Г. С. Процессоры, память и программное обеспечение для эффективной реализации нейронных сетей // Наноиндустрия, 2020. — № S96-2. — С. 580–584. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.580.584. EDN INOCLT.
2. Davies M. et al. Loihi: A Neuromorphic Manycore Processor with On-Chip Learning // IEEE Micro, 2018. № 1 (38). P. 82–99.
3. Dubljević V. Policy, Identity, and Neurotechnology: The Neuroethics of Brain-Computer Interfaces, 1st ed. Cham: Springer International Publishing AG, 2023. 1 p.
4. Merolla P. A. et al. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface // Science, 2014. № 6197 (345). P. 668–673.
5. Tarkhani Z. et al. Enhancing the Security Privacy of Wearable Brain-Computer Interfaces, 2022.

УДК 004.421:616-073

Система детекции эпизодов глубокого сна и эпилепсии у крыс линии WAG/Rij с использованием ЭКоГ-данных

Ковалёв А. Е., Тарасенко А. В.
Сибирский (Томский) центр по изучению искусственного интеллекта и цифровых технологий
634050, г. Томск, просп. Ленина, 67
siberianai@mail.tsu.ru

Разработано приложение, предназначенное для детекции эпизодов эпилепсии и глубокого сна у крыс линии WAG/Rij. В качестве детектора выступает модель классического машинного обучения на основе метода градиентного бустинга — Catboost. Приводится краткое описание данных, подходов к их предобработке, обработке, а также значения метрик по результатам детекции эпизодов.
Ключевые слова: машинное обучение; ЭКоГ-данные; эпилепсия; глубокий сон; вейвлет-преобразование.

На сегодняшний день обретают актуальность препараты, предназначенные для снижения эпилептической активности у людей. Тестирование таких препаратов производится на животных, склонных к возникновению таких активностей. Поскольку припадки непродолжительны по времени и возникают относительно нечасто, рутинной работой эксперта предметной области является визуальное определение таких эпизодов по всей записи.

Для автоматического выявления эпилепсии был предложен алгоритм Twin Peaks [1], который объединяет в себе временной и частотный критерий обработки сигнала. Точность такого алгоритма составляет F1-score 0,84. Однако данный алгоритм имеет нестабильную точность. К тому же он требует подбора индивидуальных значений параметров, необходимых для работы алгоритма, для каждой крысы.

Для автоматического выявления глубокого сна было проведено исследование Simple method for detecting sleep episodes in rats ECoG using machine learning [2], в котором использовали artificial neural network (ANN), состоящую из одного линейного слоя и функции активации. Точность такого подхода составляет 0,84 по accuracy.

Настоящая работа была проведена в целях создания системы, не требующей ручного подбора параметров для алгоритмов детекции, а также повышения общей точности детекции искомых эпизодов.

Были собраны и вручную размечены ЭКоГ-данные различных крыс линии WAG/Rij. Данные собирались с трех электродов — лобный слева, лобный справа, затылочный справа. Возраст и пол крыс разнообразны. Также не все крысы являются близнецами. Данные пяти из одиннадцати крыс были размечены на протяжении приблизительно 6 часов. Данные остальных крыс были размечены на протяжении одного часа.

Полученные сигналы были предобработаны при помощи вейвлет-преобразования. Данные разбивались на эпохи по одной секунде. Для каждой эпохи в частотно-временном представлении сигнала были собраны следующие статистики энергии сигнала по каждой частоте для каждого электрода: среднее значение, среднеквадратическое отклонение, межквартильный размах. Электрод «затылочный

справа» показал свою неэффективность на этапе экспериментов, поэтому признаки, полученные с данного электрода, были удалены.

По причине ограниченных вычислительных ресурсов, которые предоставляются готовой системе, использование таких архитектур, как CNN, LSTM или Transformer, предназначенных для работы с time-series-данными, невозможно. К тому же сложность самой задачи на ее физическом уровне не требует применения таких архитектур, что было выявлено экспериментальным путем.

Альтернативный подход, не требующий большого количества вычислительных ресурсов, представляет собой использование методов градиентного бустинга (CatBoost). Такой подход подразумевает под собой детекцию эпизодов глубокого сна или эпилепсии для каждой секунды записи с использованием дополнительных «окон видимости», предназначенных для улавливания значений признаков соседних элементов.

Характеристики работы текущей системы:

- скорость обработки 6-часовой записи в среднем составляет 2 минуты;
- средняя, минимальная и максимальная точность предсказания эпизодов глубокого сна по метрике F1-score — 0,88, 0,80, 0,93;
- средняя, минимальная и максимальная точность предсказания эпизодов эпилепсии по метрике F1-score — 0,88, 0,81, 0,96;
- не требует ручного подбора параметров.

Авторы работы выражают благодарность Ивану Лазаренко (Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН) за оказанную помощь со сбором данных и их разметкой, а также постановку гипотез и консультацию в построении методологии работы системы.

Литература

1. Iotchev I. B. et al. The “Twin Peaks” method of automated Spike-Wave detection: A two-step, two-criteria Matlab application // Journal of Neuroscience Methods, 2024. Vol. 409. P. 110199.
2. Sergeev K. et al. Simple method for detecting sleep episodes in rats ECoG using machine learning // Chaos, Solitons & Fractals, 2023. Vol. 173. P. 113608.

УДК 616-77

Искусственные органы: сделано в России, или Введение в биомедицинскую инженерию искусственных органов

Пьянов И. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
biomedik@bk.ru

Рассмотрены вопросы создания отечественных конкурентоспособных разработок в области биомедицинской инженерии искусственных органов, в т. ч. систем длительной механической поддержки кровообращения, аппаратов «искусственная почка», кардиостимуляторов, миниатюризация которых способствует повышению качества жизни пациентов.
Ключевые слова: биомедицинская инженерия искусственных органов; искусственные органы; аппарат вспомогательного кровообращения; аппарат «искусственная почка»; электрокардиостимулятор; миниатюризация.

Медицинские приборы, аппараты и системы значительно различаются как по функционалу, так и по массогабаритным характеристикам: от довольно тривиальных диагностических приборов (термометр, тонометр и т. д.) до мультиспиральных компьютерных томографов и искусственных органов. Несмотря на различное назначение медицинских устройств (профилактика, диагностика, лечение или реабилитация), все они связаны с системой «медицинский работник — пациент». При разработке медицинского устройства, независимо от его сложности, важнейшими факторами являются его функционал, качество, безопасность и удобство использования как врачом, так и пациентом. Одной из актуальных задач, стоящих перед инженерами и архитекторами медицинского оборудования при создании персонализированных, носимых и имплантируемых биомедицинских систем, является их миниатюризация.

Современные технологии позволяют создавать миниатюрные имплантируемые устройства. Хорошо зарекомендовал себя самый маленький в мире электрокардиостимулятор Medtronic Micra длиной всего 24 мм. Стоит отметить и разработки отечественных эпикардиальных электрокардиостимуляторов совместно с НМИЦ сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева.

Особенно следует отметить эволюцию биомедицинской электроники на примерах систем длительной механической поддержки кровообращения, которые за последние 40 лет прошли путь от частично имплантируемых насосов весом свыше 1 килограмма и массивным блоком электронного управления, для перемещения которого были необходимы колесная база и посторонняя помощь, до современных аппаратов вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца весом менее 100 граммов с компактным блоком управления, располагающимся на поясе или в наплечной сумке. А разработанная в России уменьшенная (педиатрическая) модель аппарата вспомогательного кровообращения АВК-Н «Спутник», успешно применяемого в России с 2012 года для взрослых, дает возможность имплантировать его даже самым маленьким пациентам [1].

Разработка носимых аппаратов «искусственная почка» позволяет пациентам с хронической почечной недостаточностью проводить диализ «на ходу»,

преодолевая проблему долгих часов терапевтической процедуры и необходимости подключения к крупногабаритным стационарным аппаратам гемодиализа.

Миниатюризация биомедицинской электроники не только положительно повлияла на имплантируемые устройства, но и повысила качество и эффективность других медицинских устройств, включая портативные и мобильные системы визуализации, хирургическую робототехнику и диагностику *in vitro*.

Вместе с тем следует отметить, что в области биомедицинской инженерии искусственных органов актуальным остается ряд проблем, в частности вопросы рассеяния тепла и потребления энергии. Учеными и инженерами разрабатываются новые аккумуляторные технологии, ведутся работы по созданию систем беспроводной передачи энергии для питания имплантируемых медицинских устройств.

Таким образом, разработки российских ученых в области искусственных органов, а также миниатюризация носимой биомедицинской электроники на отечественной ЭКБ являются актуальными задачами биомедицинской инженерии, от решения которых зависит успешность исхода лечения, а также комфорт врачей и пациентов.

Литература

1. Первый российский аппарат вспомогательного кровообращения левого желудочка сердца «Спутник». — URL: http://lvad.ru (дата обращения: 09.04.2025).

УДК 620.22

Технология изготовления фантома церебральных сосудов с аневризмой для исследования характеристик кровотока методами оптической визуализации потока

Горина А. В.[1], Галястов А. А.[1,2], Ставцев Д. Д.[1,2], Коновалов А. Н.[1,3], Гребенев Ф. В.[1,3], Телышев Д. В.[1,2]

[1] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
gorina_a_v@staff.sechenov.ru
[2] Институт биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] Нейрохирургический центр им. Бурденко
125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16

Разработана технология создания фантомов церебральных аневризм для верификации компьютерных моделей. Предложен способ контроля толщины стенок фантомов, обеспечивающий точность результатов стендовых испытаний, что позволит прогнозировать риск разрыва аневризм.

Ключевые слова: церебральный кровоток; церебральная аневризма; модель фантома сосуда; вычислительная гидродинамика; цифровая трассерная велосиметрия.

Разрыв внутричерепных аневризм представляет серьезную медицинскую проблему, являясь причиной 85% нетравматических субарахноидальных кровоизлияний [1]. Церебральные аневризмы встречаются у 3,2 % населения, при этом риск разрыва достигает 8 % [2]. Предсказание разрыва аневризмы является важной задачей, а оценка гемодинамических параметров, которые признаны ключевыми факторами прогрессирования и разрыва, является ключевым моментом в анализе риска [3]. В данной работе представлена методика создания физических моделей церебральных аневризм и их экспериментального исследования для верификации результатов компьютерного моделирования.

Для изготовления фантомных моделей сосудов были применены три технологических подхода: LCD-печать прозрачной фотополимерной смолой с последующей постобработкой, литье из полидиметилсилоксана (Sylgard 184) по мастер-моделям, а также комбинированная технология послойного наложения с контролируемой толщиной стенки [4]. Технология послойного наложения является трудновоспроизводимой, поэтому предложена альтернатива способа для получения тонкостенного фантома. Для получения прозрачного фантома, воспроизводящего реальную геометрию сосуда, была получена матер-модель для заливки, в которую помещалась реальная по геометрическим размерам модель, что позволило контролировать толщину стенки фантома. Тонкая прозрачная стенка фантома позволила без искажений получить результаты стендовых испытаний оптическими методами визуализации потока жидкости.

В заключение следует отметить, что представленный подход, сочетающий современные технологии изготовления фантомных моделей, передовые методы оптической визуализации и компьютерное моделирование, создает надежную основу для углубленного изучения гемодинамики церебральных аневризм. Полученные результаты не только способствуют лучшему пониманию механизмов формирования и роста аневризм, но и имеют практическое значение для прогнозирования риска разрыва и планирования хирургических вмешательств. Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть сосредоточены на разработке более точных моделей, учитывающих механические характеристики сосудистой стенки.

Работа выполнена при поддержке РНФ 22-65-00096.

Литература

1. Etminan N., Rinkel G.J. Unruptured intracranial aneurysms: development, rupture and preventive management // Nature Reviews Neurology, 2016. Vol. 12. № 12. P. 699–713.
2. Vlak M. H. M., Algra A., Brandenburg R., Rinkel G. J. E. Prevalence of unruptured intracranial aneurysms, with emphasis on sex, age, comorbidity, country, and time period: a systematic review and meta-analysis // Lancet Neurology, 2011. Vol. 10. № 7. P. 626–636.
3. Cebral J. R., Castro M. A., Burgess J. E., Pergolizzi R. S., Sheridan M. J., Putman C. M. Characterization of cerebral aneurysms for assessing risk of rupture by using patient-specific computational hemodynamics models // American Journal of Neuroradiology, 2005. Vol. 26. № 10. P. 2550–2559.
4. Wang K., Wu C., Qian Z. et al. Dual-material 3D printed metamaterials with tunable mechanical properties for patient-specific tissue-mimicking phantoms // Annals of Biomedical Engineering, 2020. Vol. 48. № 1. P. 456–467.

УДК 538.955

Исследование и разработка спинтронного сверхчувствительного датчика на основе магнитных туннельных переходов для сканирования магнитных полей мозга

Лобкова М. Д.[1], к. т. н., Скирдков П. Н.[1,2], Звездин К. А.[1], д. ф.-м. н.
[1] ООО «Новые спинтронные технологии»
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
[2] Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38
m.shkanakina@nst.tech

Проведено аналитическое исследование конструкционных и электрических характеристик магнитного туннельного перехода для его использования в проектировании сверхчувствительного биосенсора. Разработана поведенческая модель спинтронного компонента на VerilogA, учитывающая свойства магнитных материалов в его составе. С использованием модели спроектирован сверхчувствительный сенсор магнитного поля, предназначенный для сканирования магнитных полей мозга.

Ключевые слова: спинтроника; магнитный туннельный переход; МТП; биосенсор; магнитоэнцефалография; МЭГ; сверхчувствительный сенсор.

В настоящее время актуальной является разработка малоинвазивных сверхчувствительных датчиков на основе магнитных туннельных переходов (МТП) для сканирования слабых магнитных полей мозга. Использование малоинвазивных методов диагностики позволит выявить опухолевые процессы и неврологические патологии мозга, включая эпилепсию, на ранней стадии заболевания. При этом традиционные неинвазивные методы диагностики, такие как магнитоэнцефалография (МЭГ) [1] и электроэнцефалография (ЭЭГ), сталкиваются с существенными ограничениями, связанными с затуханием и искажением сигналов при прохождении через биологические ткани, а также высокой чувствительностью к внешним электромагнитным помехам [2]. Переход к инвазивным методикам, в частности к ЭЭГ-мониторингу с использованием имплантируемых электродов, хотя и позволяет повысить чувствительность измерений, тем не менее сопровождается рядом существенных недостатков, включая ограниченное пространственное разрешение из-за искажения электрических потенциалов окружающими тканями, а также повышенные риски для пациентов, связанные с инвазивным характером вмешательства. Эти технологические ограничения подчеркивают острую необходимость разработки принципиально новых решений, которые смогли бы обеспечить высокую точность измерений локальных магнитных полей мозга при минимальном инвазивном воздействии на организм пациента, что особенно актуально для современной неврологической практики, требующей максимально точной диагностики при минимальных рисках для больного.

Основными требованиями к разработке малоинвазивного датчика выступают высокая чувствительность сенсора и малая площадь, которая ограничивается

площадью зонда игольчатой формы [3]. Для обеспечения данных требований в работе проведено аналитическое исследование конструкционных и электрических характеристик МТП, выявлены основные параметры, влияющие на чувствительность сенсора. В рамках работы создана поведенческая модель МТП на языке VerilogA, что делает ее совместимой с современными САПР. С использованием модели спроектирован сверхчувствительный сенсор магнитного поля, предназначенный для сканирования магнитных полей мозга.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00367).

Литература

1. Hämäläinen M. et al. Magnetoencephalography—theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain // Reviews of modern Physics, 1993. Vol. 65. № 2. P. 413.
2. Brookes M. J. et al. Magnetoencephalography with optically pumped magnetometers (OPM-MEG): the next generation of functional neuroimaging // Trends in Neurosciences, 2022. Vol. 45. № 8. P. 621–634.
3. Luo J. et al. Development and Comprehensive Evaluation of TMR Sensor-Based Magnetrodes // ACS Applied Materials & Interfaces, 2024. Vol. 16. № 24. P. 31677–31686.

УДК 621.3.049

Усиление чувствительности инвазивного датчика магнитного поля до фемтопорядков для определения патологий мозга на ранних стадиях

Киктева В. Р.[1], Лобкова М. Д.[1], к. т. н., Кичин Г. А.[1], Скирдков П. Н.[1,2], Звездин К. А.[1], д. ф.-м. н.

[1] ООО «Новые спинтронные технологии»
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 30, стр. 1
v.kikteva@nst.tech
[2] Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

Рассмотрены различные формы и положение концентраторов магнитного поля как способ увеличения чувствительности магнитного сенсора. Оценен способ сохранения оптимальности всех критериев и ее применение для инвазивных измерений.

Ключевые слова: TMR-сенсор; спинтроника; инвазивные датчики; чувствительность.

Одна из фундаментальных задач в области диагностики нейродегенеративных заболеваний лежит в точности детектирования импульсов мозговой активности. Подавляющее количество существующих датчиков демонстрируют линейную зависимость чувствительности от его размера, высокий уровень шума и требуют дополнительных внешних условий, что усложняет возможность сделать их встраиваемыми. Наиболее перспективными по параметрам и тенденции к инвазивности являются TMR-сенсоры [1–2], основанные на магнитных туннельных переходах. В зависимости от состава слоев, соединений в электрической схеме, количества используемых магнитных туннельных контактов в массиве и добавления концентратора магнитного поля чувствительность датчиков может быть увеличена на порядок [3].

В рамках данной работы анализируются концентраторы магнитного поля различной геометрии и материала в системе с TMR-сенсором и их влияние на его чувствительность, в том числе:

- подбор материала концентратора и конфигурации магнитного туннельного перехода;
- варианты форм и толщины концентратора в зависимости от чувствительной оси сенсора;
- аналитическая оценка коэффициента сигнал/шум в системе без и с концентратором;
- потенциал биосовместимости системы концентратор — датчик.

Дополнительно рассматриваются способы уменьшения размеров системы сенсор — концентратор для предотвращения повреждения тканей при инвазивном подходе.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-12-00367.

Литература

1. Vimala Gayathri S., Subbulekshmi D. Comprehensive Introspection of Magnetoresistive Sensors Applied in Biomedical Diagnostics // Current Medical Imaging, 2024. Vol. 20. P. 1573.
2. Zhao D. et al. Temperature dependence of tunnel magnetoresistance in serial magnetic tunnel junctions // AIP Advances, 2022. Vol. 12.
3. Murzin D. et al. Ultrasensitive Magnetic Field Sensors for Biomedical Applications // Sensors (Basel), 2020. № 20 (6). P. 1569.

УДК 620.3

Формирование сложных атомно-молекулярных топологий на нано- и микроуровнях на основе углеродных наноматериалов, используемых для формирования биоподобных интерфейсов

Мурашко Д. Т.[1], Курилова У. Е.[1,2], Суетина И. А.[3], Руссу Л. И.[3], Мезенцева М. В.[3], Герасименко А. Ю.[1,2]

[1] Институт биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
skorden@outlook.com
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
[3] Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н. Ф. Гамалеи Минздрава РФ
123098, г. Москва, ул. Гамалеи, 18

Были сформированы образцы со сложной атомно-молекулярной топологией на нано- и микроуровнях из лазерно-структурированных углеродных наноматериалов. За счет лазерного структурирования было получено увеличение электропроводности для всех образцов. Получено увеличение количества клеток в сравнении с обычными условиями в чашке Петри.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; графен; лазер; электропроводность; цитотоксичность.

Биоэлектронные устройства, сопряженные с электропроводящими клетками, такими как нейроны или кардиомиоциты, могут записывать и/или стимулировать биоэлектрическую активность в клетках или соответствующих тканях путем взаимного преобразования ионных и электронных токов на границе раздела устройство — клетка. Особый интерес представляют биоподобные интерфейсы для электрической стимуляции клеточной адгезии, выравнивания, пролиферации и дифференцировки, способствующие регенерации поврежденных тканей, таких как кожа, кости, нервы, ткани миокарда и другие.

Перспективными материалами для создания сложных атомно-молекулярных топологий на нано- и микроуровнях могут являться углеродные наноматериалы за счет высокой механической прочности и стабильности sp2-гибридизованной структуры при высоком аспектном соотношении размеров. Углеродные наноматериалы характеризуются высокой тепло- и электропроводностью, при том что размеры и структура сопоставимы с размерами и структурой основных белков внеклеточного матрикса [1]. С помощью внешнего воздействия возможно создавать каркасные структуры с соединениями, которые характеризуются sp3-гибридизацией [2]. К внешнему прецизионному воздействию можно отнести обработку лазерным излучением. Такая обработка слоев на основе углеродных нанотрубок на подложке и в объеме биосовместимой матрицы позволяет добиться управления структурой, механическими и электрофизическими характеристиками [3–5].

При электростимуляции важно доставлять заряд для активации потенциала действия без негативного воздействия на клетки. По этой причине необходимо обеспечить тесный контакт между нейроинтерфейсом и нервной тканью со взаимным соответствием структур с обеих сторон [6].

Для формирования сложных атомно-молекулярных топологий на нано- и микроуровнях были использованы одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), восстановленный оксид графена (вОГ), а также гибридный состав из ОУНТ+вОГ. Формирование атомно-молекулярных топологий осуществлялось при помощи лазерного структурирования с мощностью лазерного излучения в диапазоне 0,07–0,27 Вт и длиной волны 1064 нм. В результате было получено формирование сложных древообразных приподнятых структур вОГ, включающих взаимные сети из ОУНТ, которые образуют мостовые соединения с чешуйками вОГ. Такие наноматериалы обладают повышенной электропроводностью, особенно хорошо данный эффект проявляется для образцов, состоящих из гибридных структур ОУНТ и вОГ.

Исследования электропроводности показали, что при лазерном структурировании с мощностью 0,07 Вт значения электропроводности для образцов ОУНТ, вОГ и ОУНТ+вОГ увеличивались в диапазоне от 1,2 до 3,5 раз и составили 30,03±0,78, 15,35±0,16 и 37,84±1,16 мСм соответственно. Электропроводность сложных атомно-молекулярных топологий на нано- и микроуровнях оказалась не ниже значений для соединительных и нервных тканей, что является одним из ключевых требований к биоподобным интерфейсам для стимулирующих устройств.

Продемонстрирован положительный эффект влияния на рост клеток сложных атомно-молекулярных топологий на нано- и микроуровнях на основе углеродных наноматериалов. При этом электрическая стимуляция в процессе культивирования обеспечивает увеличение количества клеток. Получено увеличение количества клеток в 4,3 раза для клеток ФЭЧ и 2,9 раз для Neuro 2A в сравнении с обычными условиями. Таким образом, исследования сформированных сложных атомно-молекулярных топологий на нано- и микроуровнях на основе углеродных наноматериалов указывают на перспективность использования их в качестве биоподобных интерфейсов для эффективной передачи электрических сигналов, устройств для культивирования клеток и других имплантируемых приборов.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-555 от 25 апреля 2024 года.

Литература

1. Ku S. H., Lee M., Park C. B. Carbon-Based Nanomaterials for Tissue Engineering // Adv. Healthc. Mater, 2013. Vol. 2. № 2. P. 244–260.
2. Kim J., Kim G. G., Kim S., Jung W. Plasmonic welded single walled carbon nanotubes on monolayer graphene for sensing target protein // Appl. Phys. Lett., 2016. Vol. 108. № 20.
3. Gerasimenko A. Y. et al. Hybrid carbon nanotubes–graphene nanostructures: Modeling, formation, characterization // Nanomaterials, 2022. Vol. 12. № 16. P. 2812.
4. Gerasimenko A. Y. et al. Electrically conductive networks from hybrids of carbon nanotubes and graphene created by laser radiation // Nanomaterials, 2021. Vol. 11. № 8. P. 1875.

5. Gerasimenko A. Y. et al. Laser fabrication of composite layers from biopolymers with branched 3D networks of single-walled carbon nanotubes for cardiovascular implants // Composite Structures, 2021. Vol. 260. P. 113517.
6. Kang B. C., Ha T. J. Wearable carbon nanotube based dry-electrodes for electrophysiological sensors // Japanese Journal of Applied Physics, 2018. Vol. 57. № 5S. P. 05GD02.

УДК 538.91

Нитевидные нанокристаллы кремния для детектирования биологических маркеров здоровья человека: эксперимент и DFT-модель

Кондратьев В. М.[1,2], Большаков А. Д.[1,2,3,4], д. ф.-м. н.
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
kvm_96@mail.ru
[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
[3] Ереванский государственный университет
0025, Алека Манукяна, 1, Ереван, Республика Армения
[4] Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Работа посвящена созданию высокочувствительного газового сенсора на основе нитевидных нанокристаллов кремния (ННК). Сенсоры были использованы для детектирования биологических маркеров здоровья человека на примере аммиака и соляной кислоты. Разработана DFT-модель, обладающая прогностической способностью к оценке электронных свойств ННК при наличии аммиака и соляной кислоты. Результаты работы интересны в превую очередь с точки зрения возможности их использования для развития персонифицированной медицины и систем экологического мониторинга.
Ключевые слова: кремний; сенсор; биологические маркеры здоровья; аммиак; соляная кислота.

Работа посвящена созданию высокочувствительного газового сенсора на основе нитевидных нанокристаллов кремния (ННК), получаемых методом плазмохимического травления пластин кремния. Показана возможность селективного анализа состава жидких проб, содержащих аммиак (NH3) и соляную кислоту (HCl), с помощью косвенного подхода на основе спектроскопии электрического импеданса. Аммиак и соляная кислота являются биологическими маркерами здоровья человек, повсеместно встречающимися в моче, поте, крови и желудочном соке соответственно. Отклонение уровня этих маркеров в пробах человека от индивидуальной нормы может свидетельствовать о протекании в организме человека патологических процессов. Наилучшая чувствительность была достигнута с помощью сенсоров на основе ННК, которые показали предел обнаружения 4 мкмоль·л$^{-1}$. Кроме того, эти сенсоры продемонстрировали резистивную чувствительность 0,8 % на мкмоль·л$^{-1}$ для HCl и −0,2 % на мкмоль·л$^{-1}$ для NH_3. Обработка плавиковой кислотой (HF) усилила поверхностное окисление ННК, что привело к увеличению числа адсорбционных центров на поверхности ННК и позволило детектировать аммиак и соляную кислоту в широком диапазоне концентраций (0–1000 мкмоль·л$^{-1}$). Кроме того, модификация ННК наночастицами коллоидного серебра значительно повысила отклик сенсора на соляную кислоту. Экспериментальные данные были

подтверждены с помощью моделирования в рамках теории функционала плотности (DFT). В рамках разработанной модели рассматривались процессы адсорбции и окислительно-восстановительные взаимодействия между молекулами аммиака и соляной кислоты и поверхностью ННК. Результаты работы интересны в превую очередь с точки зрения возможности их использования для развития персонифицированной медицины и систем экологического мониторинга [1–2].

Литература

1. Kondratev V. M. et al. Silicon Nanowire-Based Room-Temperature Multi-environment Ammonia Detection // ACS Appl. Nano Mater., 2022. Vol. 5. № 7. P. 9940–9949.
2. Kondratev V. M. et al. Si Nanowire-Based Schottky Sensors for Selective Sensing of NH_3 and HCl via Impedance Spectroscopy // ACS Appl. Nano Mater., 2023. Vol. 6. № 13. P. 11513–11523.

УДК 620.3

Сухие электроды на основе углеродных наноматериалов для электроэнцефалографии

Куксин А. В.[1], Морозова А. С.[1], Василевская Ю. О.[1], Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
nix007@mail.ru
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Разработаны сухие электроды на основе углеродных наноматериалов углеродных нанотрубок и восстановленного оксида графена, сформированные в матрице полидиметилсилоксана под воздействием лазерного излучения. Сформированные электроды являются безгелевой альтернативой традиционным металлическим электродам. Проведены экспериментальные исследования особенностей структурных и электрофизических свойств сформированных электродов. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света подтверждено формирование связей между углеродными наночастицами. Продемонстрирована возможность применения электродов для регистрации электроэнцефалограммы.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; графен; лазер; электроды; электроэнцефалограмма.

На сегодняшний день стремительно расширяется круг направлений, использующих материалы на основе аллотропных форм углерода. Среди наиболее многообещающих наноструктурных модификаций выделяются нити из атомов углерода — углеродные нанотрубки. Они рассматриваются как перспективная основа для разработки пьезорезистивных компонентов, солнечных батарей, аккумуляторов, электродов и эмиттеров электронов. Еще одной важной формой углерода для электронной техники служит графен. Благодаря своим выдающимся свойствам сам графен и его производные активно изучаются в качестве ключевых материалов для производства суперконденсаторов, сенсорных датчиков и аэрогелей. Разработка технологий формирования гибридных наноструктур, сочетающих преимущества обоих типов углеродных наноматериалов, позволит интегрировать их индивидуальные особенности и создать устройства с высокой эффективностью. Ключевыми технологиями становятся методы объединения углеродных наночастиц в проводящие сети с созданием контактных зон, выполняющих роль узлов проводимости между нанотрубками и слоями графена [1, 2].

Высокая электропроводность углеродных наноматериалов и созданных на их основе гибридных наноструктур открывает большие перспективы для разработки компонентов гибкой электроники. Интеграция углеродных нанотрубок и графена в полимерные матрицы обеспечит создание эластичных биомедицинских интерфейсов, таких как гибкие сухие электроды, которые смогут заменить традиционные электроды на основе соединений металлов. Эти электроды обладают рядом преимуществ: отсутствие гелевого проводящего слоя позволяет поддерживать высокое качество сигнала длительное время, а низкий коэффициент упругости

соответствует характеристикам человеческой кожи. Такие гибкие электроды пригодны для измерения биоэлектрической активности тела, например регистрации электроэнцефалограммы.

Разработана методика формирования сухих электродов на основе углеродных наноматериалов одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и восстановленного оксида графена (ВОГ). Формирование производилось путем интеграции углеродных наноматериалов в матрицу полидиметилсилоксана. Создание гибридных наноструктур в виде разветвленных электропроводящих сетей из ОУНТ и ВОГ производилось импульсным лазерным воздействием с длиной волны 1064 нм. Сформированные электроды являются безгелевой альтернативой традиционным металлическим электродам. Проведены экспериментальные исследования особенностей структурных и электрофизических свойств сформированных электродов. Методом спектроскопии комбинационного рассеяния света подтверждено формирование связей между углеродными наночастицами. Продемонстрирована возможность применения электродов для регистрации электроэнцефалограммы. Качество регистрируемого с помощью сформированных электродов сигнала ЭЭГ соотносится с качеством сигнала, регистрируемого с помощью классических электродов на основе Ag/AgCl. Поводилось исследование биосовместимости сформированных электродов путем выращивания клеток на их поверхности.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ № 25-29-00938 от 26.12.2024).

Литература

1. Kumar R., Singh R. K., Dubey P. K., Singh D. P., Yadav R. M. // ACS applied materials & interfaces, 2015. Vol. 7. № 27. P. 15042–15051.
2. Kuksin A. V., Gerasimenko A. Yu., Shaman Y. P., Kitsyuk E. P., Shamanaev A. A., Sysa A. V., Eganova E. M., Slepchenkov M. M., Poliakov M. V., Pavlov A. A., Glukhova O. E. Improving the emission properties of graphene–carbon nanotube hybrid nanostructures through functionalization with BaO nanoparticles and laser treatment // Applied Surface Science, 2024. Vol. 664. P. 160222.

УДК 616-089.844

Лазерно-индуцированное восстановление биологических тканей с использованием нанокомпозитных материалов на основе углеродных нанотрубок

Сучкова В. В.[1,2], Галиченко К. А.[2], Рябкин Д. И.[1,2], Блинова Е. В.[2,3], Телышев Д. В.[1,2], Селищев С. В.[1], Герасименко А. Ю.[1,2]

[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
[3] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
molodykh1999@gmail.com

Разработана технология лазерно-индуцированной реконструкции биологических тканей с использованием нанокомпозитного материала на основе белков и углеродных нанотрубок совместно с лазерной системой на основе лазерного излучения с длиной волны 810 нм и обратной связи по температуре. Метод обеспечивает прочность соединения 4,0±0,4 МПа, полную эпителизацию за 30 суток и отсутствие фиброзных рубцов.

Ключевые слова: лазерная биопайка; нанокомпозитные материалы; углеродные нанотрубки.

Современная хирургия сталкивается с необходимостью разработки инновационных методов соединения биологических тканей, которые бы сочетали минимальную инвазивность с высокой эффективностью и оптимальными регенеративными свойствами [1]. Традиционные методы сшивания тканей, несмотря на их повсеместное применение, обладают рядом существенных недостатков: механическое повреждение тканей иглой и нитью, риск развития воспалительных реакций, формирование грубых рубцов и возможные осложнения в послеоперационном периоде [2]. Особенно остро эти проблемы стоят в пластической и реконструктивной хирургии, где важны не только функциональные, но и эстетические результаты вмешательства.

Разработанная технология лазерной реконструкции тканей с применением биокомпозитных материалов предлагает новый подход к решению этих проблем. Основой метода является использование нанокомпозитного материала на основе углеродных нанотрубок, который под воздействием лазерного излучения образует прочное соединение тканей без необходимости механического сшивания. Важным преимуществом технологии является возможность точного контроля температуры в зоне воздействия, что минимизирует риск термического повреждения окружающих тканей.

В работе использовалась специализированная лазерная система, включающая диодный лазерный источник (808 нм) с регулируемой мощностью излучения и систему прецизионного температурного контроля (±0,5 °C), основанную на болометрическом ИК-датчике и ПИД-регуляторе [3]. Для достижения прочности

и активной пролиферации клеточных структур в область дефекта наносился нанокомпозитный материал, в состав которого входят: бычий сывороточный альбумин (25 масс. %) в качестве биоплимерной матрицы сформированного нанокмпозита, индоцианин зеленый (0,1 масс. %) — хромофора, одностенные углеродные нанотрубки (0,008 масс. %) — в качестве армирующего каркаса и халат натрия (0,067 масс. %) — в качестве стабилизатора исходной дисперсии.

Экспериментальная часть была выполнена на крысах линии Wistar (n = 19), разделенных на две группы: контрольная — соединение тканей узловыми швами; экспериментальная — лазерная пайка с использованием нанокомпозитного материала. На всех животных выполнялась пластика по Лимбергу встречными лоскутами (Z-пластика) как универсальная техника пластической хирургии [4]. Оценивались макро- и микроморфология, косметические характеристики и прочность соединения на 30-е, 60-е и 90-е сутки.

Гистологические исследования выявили существенные различия в процессах регенерации между экспериментальной и контрольной группами. В группе, где применялась лазерная пайка с нанокомпозитным материалом, уже к 30-м суткам наблюдалось полное восстановление как эпидермиса, так и дермы. В контрольной группе, где использовались традиционные узловые швы, гистологическая картина характеризовалась наличием выраженных воспалительных инфильтратов и нарушением структуры соединительной ткани. Оценка косметических характеристик лазерных швов продемонстрировала отсутствие патологических изменения кожи, депигментации, сохранение нормального кожного рельефа, отсутствие рубца. В контрольной группе рубец сохранялся и на 90-е сутки.

Также в ходе эксперимента доказано, что использование углеродных нанотрубок позволяет увеличить прочность сварных швов на 80 %, до 4,0 ± 0,4 МПа.

Предложенная технология демонстрирует потенциал для клинического применения в пластической и реконструктивной хирургии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Kramer E. A., Rentschler M. E. Energy-based tissue fusion for sutureless closure: applications, mechanisms, and potential for functional recovery // Annual Review of Biomedical Engineering, 2018. Vol. 20. № 1. P. 1–20.
2. Yag-Howard C. Sutures, needles, and tissue adhesives: a review for dermatologic surgery // Dermatologic Surgery, 2014. Vol. 40. P. S3–S15.
3. Gerasimenko A. Y. et al. Reconstruction of soft biological tissues using laser soldering technology with temperature control and biopolymer nanocomposites // Bioengineering, 2022. Vol. 9. № 6. P. 238.
4. Ali M. A. To Study the Surgical Outcome of Z Plasty Versus Limberg Flap in the Management of Pilonidal Sinus Disease: Rajiv Gandhi University of Health Sciences (India), 2019.

УДК 539.231

Оценка влияния органических поверхностно-активных веществ на гомогенность углеродной дисперсной среды для разработки биосовместимых покрытий в биомедицинской электронике

Попович К. Д.[1,2], Кузнецова Е. А.[1], Василевский П. Н.[1], Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
kristal_p@mail.ru
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Показано влияние поверхностно-активных веществ на гомогенность углеродных дисперсных сред в целях разработки покрытий в биоэлектронике. С помощью метода динамического рассеяния света и оптической спектроскопии показано, что дезоксихолат натрия обеспечивает высокую гомогенность среды и высокие электрические свойства конечного покрытия.
Ключевые слова: углеродные нанотрубки; поверхностно-активные вещества; дезоксихолат натрия; холат натрия; гомогенность дисперсии; динамическое рассеивание света; оптическая спектроскопия; биосовместимые покрытия.

Создание высокоэффективных проводящих покрытий для биоэлектронных устройств является одной из ключевых задач в области биомедицинской инженерии. Одними из наиболее перспективных материалов для решения представленной задачи являются углеродные наноструктуры, среди которых особое внимание уделяется углеродным нанотрубкам (УНТ). УНТ отличаются уникальными механическими и электрофизическими свойствами, однако их практическое использование ограничено в связи с низкой степенью гомогенности в дисперсных средах. Для получения стабильных и однородных дисперсных сред на их основе необходимо использование вспомогательных веществ, в частности поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые могут способствовать равномерному распределению нанотрубок в объеме, обеспечивая формирование разветвленной высокоэффективной проводящей перколяционной сети.

В настоящем исследовании изучалось влияние двух типов ПАВ (холата натрия и дезоксихолата натрия), а также параметров ультразвуковой обработки на свойства дисперсных сред и конечных покрытий на основе одностенных УНТ. Для достижения необходимого уровня диспергирования использовался гомогенизатор, время обработки которого варьировалось от 20 до 80 минут. Оценка соотношения крупных и мелких частиц в дисперсии, а также их размеров проводилась методом динамического рассеяния света (ДРС), а исследование оптической плотности — методом оптической спектроскопии. Для анализа электрофизических свойств конечных покрытий полученные дисперсные среды наносились на подложки с титановой поверхностью, имитирующие поверхность медицинских устройств.

Установлено, что ПАВ дезоксихолат натрия обеспечивает более равномерное распределение нанотрубок в объеме дисперсной среды по сравнению с холатом

натрия, что выражается в уменьшении среднего размера частиц в дисперсной среде до 141,5 нм и увеличении рассеяния от них до 86 % от общего рассеяния частиц после 80 минут ультразвуковой обработки. Результаты оптической спектроскопии свидетельствуют о том, что оптическая платность дисперсной среды с холатом натрия даже при 80 минутах обработки на 5,2 % меньше, чем оптическая плотность образца с дезоксихолатом натрия при 40 минутах обработки. Кроме того, оптическая плотность с дезоксихолатом натрия при 80 минутах перемешивания на 27,5 % больше оптической плотности дисперсной среды с ПАВ холат натрия при аналогичных условиях обработки. Полученные покрытия на основе дисперсной среды с дезоксихолатом натрия показали превосходные электрические характеристики, достигая удельной электропроводности 58,65 См/м, что в 4,3 раза превышает аналогичный показатель для систем с холатом натрия и в 15,3 раза — для чистого титана.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-555 от 25 апреля 2024 года.

Литература

1. Defillet J. et al. The role of the bile salt surfactant sodium deoxycholate in aqueous two-phase separation of single-wall carbon nanotubes revealed by systematic parameter variations // Carbon, 2022. Vol. 195. P. 349–363.

УДК 621.3.049

Методика создания тонкопленочного нейроимплантата для задач биосенсорики и нейромодуляции

Исаев Н. Р.[1], Юсуповская Е. А.[1], Марков А. Г.[1], Телышев Д. В.[1,2]
[1] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
isaev_n_r@staff.sechenov.ru; markov_a_g@staff.sechenov.ru
[2] Институт биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Представлена методика создания тонкопленочных нейроимплантатов для биосенсорики и нейромодуляции. Рассмотрено применение парилена С, обладающего улучшенными диэлектрическими параметрами и биологической инертностью.

Ключевые слова: биоэлектроника; имплантируемое устройство; нейростимуляция.

Современные нейротехнологии требуют разработки миниатюрных, гибких и биосовместимых имплантатов, способных длительно функционировать в организме. Тонкопленочные нейроимплантаты представляют собой перспективное направление в биосенсорике и нейромодуляции, поскольку позволяют регистрировать нейронную активность и стимулировать нервные ткани с высокой точностью. Основное внимание концентрируется на полиимидных нейростимуляторах, демонстрирующих оптимальные механические и биологические характеристики для нейроинтерфейсов, включая гибкость, обеспечивающую конформное прилегание, доказанную биосовместимость с минимальным воспалительным ответом, а также превосходную нейроинтеграцию, что в совокупности обеспечивает долговременную функциональную стабильность устройства в условиях *in vivo* [1, 2]. Кроме того, рассматривается перспективность использования парилена С в качестве подложки и изоляционного материала, что делает его одним из альтернативных вариантов для разработки нейроимплантатов.

Для задач биосенсорики и нейростимуляции была отработана технология изготовления гибких тонкопленочных нейроимплантов. Такие импланты являются биосовместимыми системами, которые обеспечивают проводную стимуляцию нейронов, возбуждая потенциал на устройстве. Имплант представляет собой полиимидную подложку с контактами для стимуляции, дорожками и контактами для проводного подключения к источнику питания. Металлические проводящие структуры были сформированы из меди методом вакуумного напыления, рисунок контактов и дорожек выполнен с помощью оптической безмасковой литографии.

Представлен сравнительный анализ полиимидных и париленовых подложек с учетом их механических, электрических и биологических свойств. Эти характеристики имеют решающее значение для производительности и долговечности имплантатов. Оценка подчеркивает уникальные достоинства и ограничения каждого материала, предлагая ценную информацию об их пригодности для нейроимплантатов нового поколения. В работе также рассматриваются ключевые проблемы,

такие как повышение долговечности, оптимизация эффективности и минимизация иммунного отторжения. На основе сравнительного анализа выполнен нейростимулятор на основе парилена С.

Кроме того, в исследовании рассматривается долгосрочная функциональность имплантатов в биологических средах с учетом таких критических факторов, как деградация, реакция тканей и механический износ с течением времени. Обсуждаются различные потенциальные решения, включая применение передовых материалов и технологий производства, для повышения стабильности и общей производительности этих устройств.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-79-00155.

Литература

1. Chung J. E., Joo H. R., Fan J. L., Liu D. F., Barnett A. H., Chen S., Geaghan-Breiner C., Karlsson M. P., Karlsson M., Lee K. Y., Liang H., Magland J. F., Pebbles J. A., Tooker A. C., Greengard L. F., Tolosa V. M., Frank L. M. High-Density, Long-Lasting, and Multi-region Electrophysiological Recordings Using Polymer Electrode Arrays // Neuron, 2019. Vol. 101. № 1. P. 21–31.
2. Tintelott M., Schander A., Lang W. Understanding Electrical Failure of Polyimide-Based Flexible Neural Implants: The Role of Thin Film Adhesion // Polymers (Basel), 2022. Vol. 14. № 18.

УДК [537.31: 543.421/.424]:616-089

Исследование свойств электропроводящего композиционного гидрогеля для биомедицинской электроники

Оцупко Е. П.[1], Савельев М. С.[1,2], Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
ekaterinaotsupko@mail.ru
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Проведены исследования электропроводности композиционного гидрогеля на основе биополимеров, созданного методом фотополимеризации. Представлены результаты ИК-спектроскопии. Оценена способность к биодеградации и степень набухания.

Ключевые слова: композиционный гидрогель; биополимер; углеродные нанотрубки; электропроводность; ИК-спектроскопия; биодеградация.

Для успешной интеграции электроники в медицину необходимо преодолеть ограничения традиционных жестких материалов. Перспективным решением являются гидрогели, способные объединить биодеградацию, биосовместимость и электропроводность [1]. В работе представлены результаты исследования композиционного гидрогеля для биомедицинской электроники. Состав материала включает бычий сывороточный альбумин, желатин, одностенные углеродные нанотрубки (УНТ) и эозин Н. Гидрогель создан методом фотополимеризации с помощью наносекундного лазера на длине волны 1070 нм. Под воздействием лазерного излучения в биополимерной матрице формируется перколяционная сеть УНТ, обеспечивающая проводимость. Средняя электропроводность материала, измеренная четырехзондовым методом, составляет 15 мСм/см, что сопоставимо со значениями биологических тканей [2]. Анализ результатов ИК-спектроскопии и спектрофотометрии подтверждает композиционную структуру материала. Изучена биодеградация композиционного материала. Образцы демонстрировали стабильность при пассивном гидролизе. За 91 день потеря массы постепенно увеличивалась с 18 до 52%. Материал сохранял высокую гидрофильность в течение деградации: степень набухания снизилась с 319 до 110%. Разработанный композиционный гидрогель перспективен для создания проводящих каркасов для регенеративной медицины [3].

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FSMR-2024-0003).

Литература

1. Hu L. et al. Hydrogel-based flexible electronics // Advanced Materials, 2023. Vol. 35. № 14. P. 2205326.
2. Gabriel C., Peyman A., Grant E. H. Electrical conductivity of tissue at frequencies below 1 MHz // Physics in medicine & biology, 2009. Vol. 54. № 16. P. 4863.
3. Nekounam H. et al. Electroconductive scaffolds for tissue regeneration: current opportunities, pitfalls, and potential solutions // Materials Research Bulletin, 2021. Vol. 134. P. 111083.

УДК 534.8.081.7, 53.084.82

Автоматизированный стенд для измерения проводимости жидкости с использованием акустоэлектронного датчика на волнах в пластинах

Дацук Е. Р., Горбачев И. А., Смирнов А. В., Кузнецова И. Е.
ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7
datsuk.elizaveta@yandex.ru

Созданный автоматизированный стенд позволяет упростить и ускорить измерение электропроводности жидкости. Акустоэлектронный датчик показывает высокую чувствительность в диапазоне электропроводности жидкости от 0 до 2,5 См/м, что делает его подходящим для использования в биомедицинских применениях.

Ключевые слова: акустоэлектронный сенсор; датчик проводимости жидкости; автоматизация измерений.

Датчики электропроводности жидкости используются для оценки качества питьевой воды, анализа жидкостей в промышленности, сельском хозяйстве, медицине [1–3]. Акустоэлектронные датчики обладают такими преимуществами, как высокая чувствительность, малый размер, долговечность, отсутствие контакта среды с электродами и отсутствие воздействия на исследуемую среду. Автоматизация измерений является актуальной тенденцией последних лет [2, 3]. Целью данной работы было создать автоматизированный стенд для измерения проводимости жидкости с использованием акустоэлектронного датчика на волнах в пластинах.

В качестве чувствительного элемента в работе использовалась акустоэлектронная линия задержки на волнах в пластинах. Для ее создания на пластину YX ниобата лития с толщиной 350 мкм были нанесены встречно-штыревые преобразователи с длиной волны 320 мкм.

Автоматизированная установка (рис. 1) позволяла постепенно изменять концентрацию водного раствора хлорида натрия в ячейке и непрерывно снимать показания датчика. Измерения амплитудных и фазовых параметров производились с помощью векторного анализатора цепей.

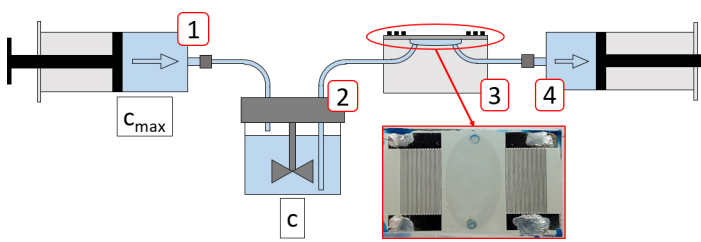
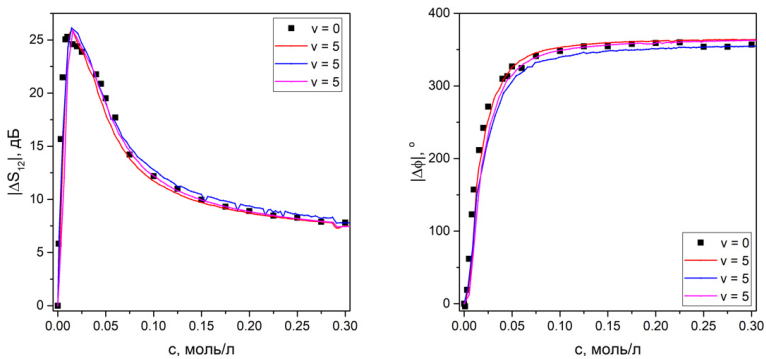


Рис. 1. Схематичное изображение системы подачи жидкости в ячейку: 1, 4 — шприцы, регулируемые шприцевым насосом, 2 — емкость для перемешивания, 3 — полимерная ячейка, прикрепленная к акустоэлектронному датчику

Для проведения измерений была выбрана частота 13,2 МГц, соответствующая наиболее чувствительной к изменению проводимости моде. Автоматизированные измерения были произведены для различных скоростей потока жидкости: 1, 5, 10 мл/мин. Результаты сравнивались с эталонными показаниями датчика, полученными с использованием калибровочных растворов хлорида натрия при нулевой скорости потока. На рис. 2 показаны полученные зависимости амплитудных и фазовых характеристик акустического сигнала от концентрации раствора хлорида натрия в ячейке при скорости потока 5 мл/мин.



а *б*

Рис. 2. Графики зависимости (*а*) параметра S_{12} и (*б*) фазы φ акустического сигнала на частоте f = 13,2 МГц от концентрации водного раствора хлорида натрия в ячейке; скорость течения жидкости — 5 мл/мин. Черные квадраты — эталонные показания при нулевой скорости потока

При использовании скорости потока не более 5 мл/мин показания, полученные на автоматизированной установке, соответствуют эталонным с погрешностью 1 дБ и 5° для значений амплитуды и фазы акустического сигнала соответственно. Такая погрешность параметров позволяет определять электропроводность раствора с точностью до 0,05 См/м. На скорости 5 мл/мин установка производит измерения показаний датчика для 90 различных концентраций раствора за 6 минут. Датчик показывает высокую чувствительность к изменению электропроводности жидкости в диапазоне от 0 до 2,5 См/м. Данный диапазон соответствует значениям проводимости биологических жидкостей, таких как кровь, плазма крови, спинномозговая жидкость, моча.

Таким образом, использование разработанной установки дает возможность ускорить и автоматизировать процесс измерения показаний акустоэлектронного датчика жидкости. В отличие от аналогов, полученная установка позволяет производить измерения для малых объемов жидкости как в статическом состоянии, так и в потоке, при этом отсутствует контакт с электродами, что делает устройство надежнее. Подходящий диапазон чувствительности и небольшой размер устройства делают его актуальным для биомедицинских применений.

Литература

1. Xianhong Y., Shijun L., Jian H., Jie X. Application analysis of conductivity in drinking water quality analysis. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. Vol. 784 (1). P. 012028.
2. Herrmann F., Jakoby B., Rabe J. Büttgenbach S. Microacoustic sensors for liquid monitoring // Sensors, 2001. Vol. 9 (1). P. 105–160.
3. Matzeu G., Florea L., Diamond D. Advances in wearable chemical sensor design for monitoring biological fluids // Sensors and Actuators B: Chemical, 2015. Vol. 211. P. 403–418.

УДК 620.3

Закономерности формирования нейроинтенфейсов из наноматериалов и органических материалов для создания пассивных и активных устройств

Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
gerasimenko@bms.zone
[2] *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)*
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Выявлены закономерности изменения структурных свойств углеродных наноматериалов, в том числе при наличии биополимеров, при их взаимодействии с лазерным излучением, что позволило сформировать нейроинтерфейсы с управляемой микро- и наноструктурой для создания пассивных и активных устройств для диагностики и стимуляции нервной ткани.
Ключевые слова: углеродные нанотрубки; графен; лазерное излучение; нейроинтерфейсы; электропроводность.

В настоящее время развитие микроэлектронных технологий привело к новому уровню нейродиагностики, нейропротезирования и нейростимулирования при заболеваниях нервной системы, в том числе и болевых синдромах. Устройства, обеспечивающие контакт с нервной тканью для выполнения диагностических и терапевтических функций, должны быть имплантируемыми. При этом для управления передачей болевых сигналов в мозг такие устройства имплантируются в область спины, а их электродная часть выступает в качестве биоподобного интерфейса между генератором или приемником электрических сигналов и нервной тканью спинного мозга. Миниатюризация нейроинтерфейсов диктует уменьшение площади контактов электродной части за счет увеличения удельной поверхности, а также увеличение их количества для обеспечения селективности воздействия на спинной мозг. Обеспечение таких требований может быть достигнуто за счет изготовления электродной матрицы интерфейса из углеродных наноматериалов (графен, нанотрубки) и их композиций с биополимерами. Достижение превосходных механических и электрических свойств таких композитов обусловлено способностью наноматериалов образовывать sp2- и sp3-гибридизованные связанные структуры с делокализованными электронами. Ранее получено эффективное использование слоев из наноструктур на основе углеродных нанотрубок и восстановленного оксида графена для формирования электропроводящих межсоединений с разными топологиями на кремниевой подложке, а также увеличение их электропроводности на три порядка в результате формирования лазерным воздействием каркасных наноструктур [1]. Такие слои могут быть сформированы на металлических поверхностях и внедрены в биополимерную матрицу в виде перколяционной сети. В связи с этим в работе рассмотрены методы формирования биоподобных нейроинтерфейсов пассивных и активных устройств на основе композитных материалов со сложной атомно-молекулярной топологией на микро- и наноуровнях

с высокой плотностью расположения носителей заряда, а также получены зависимости электропроводности от структуры и состава сформированных биоподобных интерфейсов. Установлено, что под действием лазерного излучения с плотностью энергии в диапазоне 0,001–0,4 Дж/см^2 образуется каркасная структура в неупорядоченных и в вертикальных массивах на подложке и в матрице биополимера альбумина. Лазерное воздействие обеспечивает удаление поверхностной части альбумина, формирование каркасной структуры и вертикальную ориентацию нанотрубок перпендикулярно поверхности. Таким образом, лазерное воздействие позволило увеличить электропроводность вертикальных массивов многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в четыре раза до 20 кСм/м, неупорядоченных массивов одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в восемь раз до 80 кСм/м, а также удельную поверхность в 7 и 12 раз для двух типов нанотрубок. Формирование биополимерного композита способствовало повышению биосовместимости, увеличению переноса заряда в нервные ткани при стимуляции и при регистрации биопотенциалов. Емкость инжекции заряда для всех исследованных образцов находилась на высоком уровне 1–2 мКл/см^2. Проведенные исследования с использованием клеток нервных тканей показали превышение клеточной выживаемости на образцах композитных материалов по сравнению с контрольным образцом. Предложена методика электрической стимуляции роста клеток нервных тканей, позволяющая управлять их жизнедеятельностью за счет изменения трансмембранного потенциала. Проведенные исследования позволили установить закономерности формирования нейроинтерфейсов для создания пассивных и активных устройств в целях диагностики и восстановления нервных тканей.

Литература

1. Kuksin A. V., Gerasimenko A. Yu., Shaman Y. P., Kitsyuk E. P., Shamanaev A. A., Sysa A. V., Eganova E. M., Slepchenkov M. M., Poliakov M. V., Pavlov A. A., Glukhova O. E. Improving the emission properties of graphene–carbon nanotube hybrid nanostructures through functionalization with BaO nanoparticles and laser treatment // Applied Surface Science, 2024. Vol. 664. P. 160222.

УДК 007.51+681.31.

Состояние исследований в области проектирования и производства нейрочипов

Гончарова А. В.[1,2]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
agoncharova@niime.ru

Представлены результаты исследования в области нейропротезирования. Освещены основные проблемы и перспективы проектирования и производства нейрочипов, в частности, кортикального типа как наиболее перспективного для реализации малоинвазивных нейроинтерфейсов и построения крупномасштабных нейропротезов памяти.

Ключевые слова: нейропротезирование; нейрочип; малоинвазивные нейросистемы; нейроинтерфейсы.

Нейрон — основная структурная клетка нервной ткани, способная возбуждаться и передавать нервные импульсы к другим нейронам и исполнительным органам. Адаптивный потенциал нервной системы позволяет мозгу восстановиться после травм и нарушений (ЧМТ, инсульт), а также может уменьшить последствия структурных изменений, вызванных такими патологиями, как рассеянный склероз, болезнь Паркинсона, когнитивное расстройство, болезнь Альцгеймера, дислексия, бессонница [1]. В работе предлагается рассмотреть нейропротезные технологии электронных имплантатов, как двигательных, так и соматосенсорных — переферических и кортикальных, для восстановления двигательных, чувствительных и познавательных функций, если они были утрачены в результате травмы или болезни.

Наиболее перспективным направлением нейропротезирования является применение кортикальных имплантатов — микроэлектродных матриц Юта и матриц электрокортикограмм (ЭКОГ). Однако данные микроэлектродные системы облают рядом недостатков, таких как контактная площадь электрода, недостаточная для корректного захвата электроактивности группы нейронов и эффективности выборочной электростимуляции структур головного мозга; проблема проводного питания и размеры имплантируемой системы [2]. Необходимость в альтернативном решении рассмотренных проблем, снижении инвазивности и минимизации тепловых эффектов при миниатюризации системы открывает перспективы в проектировании гибких нейроинтефесов на основе альтернативных материалов с уменьшением площади поперечного сечения электродных нитей для минимизации смещения в структурах головного мозга и сохранения высокого числа активных каналов на считывание и стимуляцию нейронных групп [3, 4].

Примером такого перехода может выступать ЭКОГ-матрица по тонкопленочной технологии на полиимиде толщиной в 20 мкм из восстановленного оксида графена. В сравнении с классической полосой ЭКОГ на металле число каналов такого кортикального имплантата увеличивается в 10 раз. Сохраняя высокое число каналов при получении пленки с субмикронным разрешением, используют пошаговую проекционную литографию и другие методы микрообработки.

Литература

1. Живолупов С.А., Самарцев И.Н. Нейропластичность: патофизиологические аспекты и возможности терапевтической модуляции // Журнал неврологии и психиатрии, 2009. — Т. 109. — № 4. — С. 78–85.
2. Dunlap C.F. et al. Classifying intracortical brain-machine interface signal disruptions based on system performance and applicable compensatory strategies: a review // Frontiers in Neurorobotics, 2020. Vol. 14. P. 558987.
3. Mokienko O.A. Invasive Brain–Computer Interfaces: 25 Years of Clinical Trials, Scientific and Practical Issues // Annals of the Russian academy of medical sciences, 2024. Vol. 79. № 5. P. 424–431.
4. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано-и микросистемная техника, 2009. — № 1. — С. 2–5.

УДК 004.896:617.57-77

Разработка нейросетевого алгоритма управления бионическим протезом руки при повышении каналов входных данных

Алямовская А. А.[1,2], Гончарова А. В.[2,3]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
aalyamovskaya@niime.ru

В данной работе выдвинута гипотеза улучшения качества протезных устройств. Предполагается, что при увеличении каналов входных данных с помощью гибких электродов и внедрении Wi-Fi-блока станет возможно интуитивное управление каждым пальцем протеза кисти. На основании данной гипотезы была разработана и протестирована нейросетевая модель на базе сверточной нейронной сети. Кроме того, в данной работе решена задача релевантности использования существующих весов модели при добавлении нового пользователя.

Ключевые слова: CNN; нейросетевой алгоритм; бионический протез; биоинформатика.

На данный момент в мире остро стоит проблема интуитивного управления бионическими протезами [1]. На современных протезах кистей обычно автономно может быть исполнено два жеста, остальные жесты переключаются с мобильного устройства. Предполагается, что при увеличении каналов входных ЭМГ-данных и применении нейросетевого алгоритма станет возможно управление каждым пальцем бионического протеза. Таким образом, будет осуществлен переход от задачи классификации жестов бионического протеза к полноценной задаче регрессии. ЭМГ-данные, использованные в данной работе, были получены инновационным стартапом ALVI Labs с помощью браслета MYO Armban [2]. Алгоритм, разработанный в данной работе, включает в себя три сверточных слоя с возрастающим количеством фильтров (64, 128, 256) и ядрами размера 3×3, после каждой свертки следует операция MaxPooling с ядром 2×2 и шагом 2. Для решения задачи регрессии использованы два полносвязных слоя. Первый преобразует данные в пространство размерности 512 с применением функции активации ReLU, второй формирует окончательный выход, размерность которого зависит от числа суставов и длины прогноза. В качестве метрики была выбрана нормированная абсолютная средняя ошибка (nMAE). Наиболее распознаваемым жестом оказалось движение средним пальцем из положения «кулак» (суммарное по всем суставам кисти nMAE для движения средним пальцем из положения «кулак» 78 ± 17). Наибольшая точность в данном жесте была достигнута для среднего пальца: $\mathrm{nMAE} \in (0{,}18; 1{,}57)$. Худшие предсказания наблюдались для большого пальца: $\mathrm{nMAE} \in (1{,}55; 4{,}02)$.

Также в данной работе подтверждается гипотеза релевантности использования существующих весов модели при добавлении данных о новом пользователе.

Результаты работы алгоритма при добавлении здорового пользователя значительно не ухудшились (nMAE равно 52 ± 16 и 64 ± 19 для алгоритма с данными о пользователе и без них соответственно). А при добавлении пользователя с ампутацией не изменились (nMAE остается на уровне 78 ± 17).

Благодарности

Автор выражает благодарность Горневу Евгению Сергеевичу, заместителю руководителя приоритетного технологического направления по электронным технологиям АО «НИИМЭ», доктору технических наук, профессору, члену-корреспонденту РАН, и Гончаровой Александре Владимировне, научному руководителю, за ценные советы и поддержку в проведении исследования.

Литература

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
2. BCI Initiative & ALVI labs — HCI Challenge [Электронный ресурс] // Kaggle. URL: https://www.kaggle.com/competitions/bci-initiative-alvi-hci-challenge/data (дата обращения: 04.12.2024).

УДК 617.57-77:004.67

Разработка алгоритма непрерывного распознавания движений на основе многоканальных данных в системах протезирования верхних конечностей

Павлова Т. Д.[1,2], Гончарова А. В.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
tpavlova@niime.ru

Актуальность работы обусловлена потребностью в более естественном управлении протезами благодаря усовершенствованию методов классификации жестов. Основная проблема — отсутствие методов для устойчивого распознавания движений. Предлагается решение на основе непрерывной нейронной классификации многоканальных данных, повышающей плавность управления и адаптивность.
Ключевые слова: ЭМГ-сигнал; бионический протез; классификация жестов; нейронные сети; непрерывная классификация.

Современные исследования демонстрируют возрастающую актуальность бионических и роботизированных протезов, которые не только заменяют внешний вид утраченной конечности, но и выполняют точные и координированные движения, максимально приближенные к естественной функциональности [1].

Бионический протез — это высокотехнологичное устройство, которое работает на основе использования электрической активности мышц, или поверхностных электромиографических (ЭМГ) сигналов, которые представляют собой разность потенциалов, возникающую в мышцах в покое и при их сокращении.

ЭМГ-сигналы нестационарны во времени, и поэтому анализ таких данных является нетривиальной задачей. Методы машинного обучения служат основным инструментом для классификации жестов по ЭМГ-сигналам. В случаях, когда необходима простота реализации, традиционные методы (дерево решений, случайный лес, наивный байесовский классификатор и т. д.) демонстрируют хорошую эффективность на ограниченных объемах данных [2]. Однако такие методы не учитывают сложную динамику ЭМГ-сигналов и потому менее адаптивны к многоканальным данным.

Для более сложных задач, близких к реальным условиям, когда необходима высокая точность и скорость распознавания, нейронные сети являются наиболее действенными. Сверточные нейросети используются для автоматического вычисления полезных частотных характеристик из сигнала, которые необходимы для классификации. Рекуррентные нейронные сети направлены на вычисление зависимостей временных рядов [3]. Гибридные нейросети, представляющие собой совокупность сверточных и рекуррентных сетей, являются актуальным решением для формирования управляющего сигнала бионических протезов.

Актуальной проблемой бионических протезов остается недостаточная надежность распознавания жестов. Это обусловлено низкой адаптивностью методов

классификации к изменениям сигналов, которые возникают в результате усталости мышц, индивидуальных особенностей пациентов, внешних помех.

По этой причине в работе рассмотрен метод непрерывной классификации в нейронной архитектуре EMGHandNet для классификации жестов по ЭМГ-сигналам. Данный метод представляет собой разделение сигнала на мелкие временные окна, каждому из которых динамически присваивается прогнозируемый класс движения.

Применение такого подхода позволит обеспечить меньший уровень задержки в управлении благодаря динамической адаптации модели к изменениям сигнала, а также плавность выполнения движений за счет учитывания предыдущих состояний. Помимо этого, применение непрерывной классификации может повысить точность, особенно в условиях большого объема данных, что актуально в современных бионических системах.

Благодарности

Автор выражает благодарность Горневу Евгению Сергеевичу, заместителю руководителя приоритетного технологического направления по электронным технологиям АО «НИИМЭ», члену-корреспонденту и академику РАН, Гончаровой Александре Владимировне и Карнупу Герману Александровичу, научным руководителям, за ценные советы и поддержку в проведении исследования.

Литература

1. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Наноэлектроника: состояние, проблемы и перспективы развития // Нано- и микросистемная техника, 2009. — № 1 (102). — С. 2–5.
2. Luppescu G., Lowney M., Shah R. Classification of Hand Gestures using Surface Electromyography Signals For Upper-Limb Amputees. — Technical report, Stanford University, Stanford, CA, United States, 2016. URL: http://cs229. stanford. edu/proj2016spr/report/040.pdf.
3. Masood F. et al. A novel application of deep learning (convolutional neural network) for traumatic spinal cord injury classification using automatically learned features of EMG signal // Sensors, 2022. Vol. 22. № 21. P. 8455.

УДК 621.3.049

Стимулятор на базе органического полупроводника для восстановления периферических нервов

Юсуповская Е. А.[1], Исаев Н. Р.[1], Марков А. Г.[1], Телышев Д. В.[1,2]
[1] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
yusupovskaya_e_a@staff.sechenov.ru
[2] Институт биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлена оптоэлектронная манжета на основе органических полупроводников для стимуляции регенерации периферических нервов. Результаты *in vivo* исследований демонстрируют высокую эффективность трехслойной конфигурации устройства.
Ключевые слова: нейростимуляция; органический полупроводник; имплантируемое устройство.

На сегодняшний день повреждения периферических нервов остаются серьезной клинической проблемой, составляя 2–5 % всех травматических повреждений в мировой практике. Согласно данным ВОЗ за 2023 год, глобальная частота таких повреждений достигает 13–20 случаев на 100 000 населения ежегодно, при этом в развитых странах этот показатель может превышать 30 случаев. Для ускорения процессов регенерации нервной ткани разработана специализированная манжета, обеспечивающая оптоэлектронную стимуляцию на основе органического полупроводника. Устройство функционирует за счет беспроводной активации посредством световых импульсов от внешнего источника. Конструкция манжеты включает гибкую полимерную пленку, на которой расположен золотой электрод толщиной 9 нм и полупроводниковый пиксель, генерирующий стимулирующий сигнал при воздействии светового импульса с длиной волны 625 нм.

Полупроводниковый слой устройства состоит из двух органических материалов: фталоцианина без металла (H2Pc) и N,N'-диметилперилен-3,4,9,10-тетракарбонового диимида (PTCDI), каждый из которых имеет толщину 30 нм. Выбор данных материалов обусловлен их высокой эффективностью при воздействии световых импульсов в диапазоне, соответствующем окну прозрачности биологических тканей.

Для инициации потенциала действия в клетках необходимо обеспечить изменение мембранного потенциала на величину порядка 50 мВ. Помимо базовой однослойной конфигурации, были разработаны трехслойные полупроводниковые структуры. Индуцируемое фото-ЭДС устройства достигает значений около 250 мВ для однослойного полупроводника и 350–400 мВ для трехслойной конфигурации, что значительно превышает пороговый уровень и позволяет эффективно стимулировать клетки даже на некотором расстоянии от полупроводникового пикселя.

Эксперименты *in vivo* на седалищном нерве крыс линии Wistar проводились с использованием трехслойной конфигурации устройства и включали ежедневную стимуляцию в течение трех месяцев. В ходе эксперимента еженедельно

регистрировали ЭЭГ с иннервируемой лапы животных, а также фиксировали двигательный ответ конечности на мигающий красный свет ($\lambda = 625$ нм). В первые 6 недель наблюдения у всех подопытных животных отмечался четкий двигательный ответ (подергивание лапы) на световую стимуляцию. Однако после 7–8 недель у большинства крыс двигательная реакция полностью исчезала, что, вероятно, связано с образованием рубцовой ткани в области имплантата.

Параллельно проводился мониторинг функционального состояния нервной ткани с использованием электроэнцефалографии (ЭЭГ), что позволило оценить динамику восстановления нервной проводимости. Для количественной оценки степени регенерации нерва измерялась латентность — временной интервал между подачей стимулирующего сигнала и возникновением ответной реакции. У животных, подвергшихся стимуляции, наблюдалось значительное сокращение латентности по сравнению с контрольной группой, где стимуляция не применялась. Это свидетельствует о более эффективном восстановлении проводимости нервных волокон под воздействием оптоэлектронной стимуляции при использовании трехслойной конфигурации устройства.

Полученные данные подтверждают, что разработанная манжета способствует ускоренной регенерации поврежденных периферических нервов, улучшая функциональные показатели и сокращая время восстановления. Результаты экспериментов демонстрируют перспективность применения данного устройства в клинической практике для лечения повреждений периферической нервной системы, при этом трехслойная конфигурация показала наибольшую эффективность *in vivo*.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-79-00155.

Литература

1. Noble J., Munro C. A., Prasad V. S., Midha R. Peripheral nerve injuries: international survey of current treatments // The Lancet Neurology, 2016. Vol. 15. № 6. P. 671–683.
2. Taylor K. S., Zhelyazkov N., Fawcett J. W. Global epidemiology of peripheral nerve injuries // Journal of Neurosurgery, 2021. Vol. 135. № 2. P. 512–525.
3. World Health Organization. Neurological Disorders: Public Health Challenges [Электронный ресурс]. Geneva: WHO, 2023. URL: https://www.who.int (дата обращения: 15.10.2023).

УДК 621.317.39.084.2

Сверхчувствительные тонкопленочные сенсоры для носимых и имплантируемых устройств непрерывного мониторинга физиологических сигналов и состояния внутренних органов

Морозова А. С.[1], Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
anastasiyamors@gmail.com
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Разработан метод повышения тензочувствительности тонкопленочных сенсоров из гибридных углеродных наноструктур методом лазерной литографии. Исследованы цитотоксичность сенсоров и стабильность характеристик сенсоров во время деформации. Осуществлен мониторинг объема левого желудочка с использованием силиконовой модели сердца.
Ключевые слова: лазерная литография; углеродные нанотрубки; восстановленный оксид графена; биосовместимость; гибкая носимая электроника; имплантируемые сенсоры.

Носимые и имплантируемые сенсорные системы являются ключевыми элементами современной биомедицинской электроники, обеспечивая непрерывный мониторинг физиологических параметров в режиме реального времени. Эти устройства находят широкое применение в диагностике и лечении сердечно-сосудистых заболеваний, обеспечивая регистрацию сократительной активности миокарда, дыхательных движений и других параметров [1, 2]. Перспективным направлением в области разработки имплантируемых сенсоров являются гибкие тонкопленочные сенсоры на основе углеродных наноматериалов, так как они обладают высокой электропроводностью, повторяемостью и биосовместимостью [3]. Тем не менее сохраняется необходимость повышения стабильности характеристик сенсоров и увеличения коэффициента тензочувствительности.

В данной работе сенсоры изготавливались методом спрей-осаждения дисперсии многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) и гибридной дисперсии МУНТ с восстановленным оксидом графена (ВОГ) на подложки из полидиметилсилоксана. Все материалы предварительно обрабатывались в УФ-бактерицидной камере в течение 1 ч. Чтобы сделать сенсоры более стабильными, необходимо было систематизировать тензорезистивные пути, так как в напыленном слое МУНТ и МУНТ-ВОГ при растяжении образование электропроводящих связей происходило хаотично и разнонаправленно. Для этого с помощью лазерной литографии импульсным наносекундным лазером с длиной волны 1064 нм при мощности 0,887 Вт формировались различные топологии пленок. При исследовании механических и электрических характеристик пленок с различными топологиями было выявлено, что топология в виде параллельных проводящих путей шириной 0,4 мм обладает наиболее эффективными характеристиками. Вольтамепрограммы сенсоров на основе пленок с топологией, полученные двухзондовым методом при генерации

напряжения до 7 В, показали линейный вид зависимости, который сохранялся при растяжении сенсоров до 10%, причем гистерезис сопротивления составил менее 3%. Коэффициент тензочувствительности GF сенсоров увеличился в 5,5 раз по сравнению с коэффициентом тензочувствительности сенсоров без топологии и составил 110±5. При сравнении сенсоров на основе МУНТ и МУНТ-ВОГ было выявлено, что сопротивление сенсоров МУНТ-ВОГ в среднем в два раза меньше, чем у сенсоров на основе МУНТ. Кроме того, сенсоры МУНТ-ВОГ проявляли чувствительность к давлению с GF ≈ 54.

Для исследования биосовместимости сенсоров использовались клетки-фибробласты эмбриона человека (ФЭЧ). Клеточные линии ФЭЧ суспензировались в питательной среде (1:10) при температуре 37°C, затем к суспензии добавлялись телячья сыворотка и антибиотик. Через 4 дня пробирки с клетками изучались с помощью оптического микроскопа: клетки были жизнеспособны, имели четкие границы и типичную морфологию. Посадочная доза составляла $3{,}5 \cdot 10^5$ мл клеток. После инкубации в течение 48 часов на поверхности сенсоров МУНТ и МУНТ-ВОГ клетки окрашивались красителем Hoeschst 33342 и наблюдались во флуоресцентный микроскоп Olympus BX43. Наблюдалась высокая плотность клеточного роста, которая подтверждает, что клетки прикреплялись к поверхности сенсоров и активно делились. Результаты указывают на высокую степень биосовместимости сенсоров обоих видов.

Высокая тензочувствительность разработанных сенсоров при малом значении гистерезиса и их биосовместимость определили возможность использования сенсоров в качестве имплантируемых устройств для мониторинга объема сердца и ритма сердечных сокращений. В данной работе была создана силиконовая модель сердца, на которой в области левого желудочка закреплялись два сенсора с параллельной топологией. Изменение объема сердца осуществлялось за счет накачивания воздуха системой шприцевого насоса. Изменение сопротивления сенсоров соответствовало объему накачиваемого или откачиваемого воздуха и, соответственно, объему сердца.

Литература

1. Kim D. H., Lu N., Ma R. et al. Epidermal electronics // Science, 2011. Vol. 333. № 6044. P. 838–843.
2. Gao W., Emaminejad S., Nyein H. Y. Y. et al. Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis // Nature, 2016. Vol. 529. № 7587. P. 509–514.
3. Amjadi M., Yoon Y. J., Park I. Ultra-stretchable and skin-mountable strain sensors using carbon nanotubes-Ecoflex nanocomposites // Nanotechnology, 2015. Vol. 26. P. 375501.

УДК 621.318.433

Влияние корпуса катушки на выходные параметры системы индуктивной передачи энергии к имплантатам

Аубакиров Р. Р., Данилов А. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
Rafael1994@mail.ru

Было исследовано влияние наличия корпуса из материала Titanium beta-21S вокруг принимающей катушки системы индуктивной передачи энергии к имплантатам на выходные параметры. Было проведено моделирование двух систем, полученных с помощью разработанного ранее алгоритма, с перепадом мощности не более 10 % и рабочими частотами 500 кГц и 1 МГц, с последовательной-последовательной компенсационной схемой. Моделирование принимающей катушки с корпусом проводилось в COMSOL Multiphysics. Было показано влияние корпуса различной толщины (0,01–0,5 мм) на выходную мощность систем и сделаны рекомендации по применению разработанного ранее алгоритма с учетом корпуса на принимающей катушке.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии; катушечная пара; титан; имплантируемая медицинская техника; алгоритм оптимизации.

На сегодняшний день беспроводное питание с помощью систем индуктивной передачи энергии является устоявшимся методом энергообеспечения имплантатов. Смещения катушечной пары, являющиеся особенностью данного метода, делают необходимой разработку систем с компенсацией их влияния или систем с повышенной устойчивостью к ним [1].

Существуют различные методы и алгоритмы для разработки систем, устойчивых к смещениям катушек [2]. Они позволяют получить систему с заданным уровнем выходной мощности и его перепадом для заданных параметров системы для определенного диапазона значений смещений катушек (осевых, боковых, угловых).

Имплантируемая катушка, как правило, изолируется от окружающей среды корпусом. Одними из наиболее распространенных материалов корпуса являются различные сплавы титана. Наличие такого корпуса может повлиять на работу системы, разработанной под определенный уровень мощности и его перепад.

Целью данной работы являлось исследование влияния наличия корпуса вокруг принимающей катушки на выходные параметры системы индуктивной передачи энергии, полученной с помощью разработанного ранее алгоритма. Было проведено моделирование двух систем с рабочей частотой резонанса 500 кГц и 1 МГц с перепадом мощности до 10 % и уровнем мощности 1 мВт для случаев при отсутствии корпуса вокруг принимающей катушки и при наличии с толщиной от 0,01 до 0,5 мм с использованием материала Titanium beta-21S. Проводилось численное моделирование схемы с последовательно-последовательной компенсацией с сопротивлением источника 5 Ом, сопротивлением нагрузки 20 Ом. Емкости компенсирующих конденсаторов были рассчитаны соответственно общей резонансной частоте приемного и передающего контура. Моделирование принимающей катушки с корпусом в воздухе проводилось в COMSOL Multiphysics. Было показано влияние толщины титанового корпуса на системы, различие в силе влияния в зависимости

от системы, а также были сформулированы рекомендации по использованию алгоритма для разработки систем индуктивной передачи энергии, устойчивых к смещениям катушек, с учетом титанового корпуса.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-555 от 25 апреля 2024 года.

Литература

1. Karimi M. J., Schmid A., Dehollain C. Wireless power and data transmission for implanted devices via inductive links: A systematic review // IEEE Sensors Journal, 2021. Vol. 21. № 6. P. 7145–7161.
2. Danilov A. A. et al. An algorithm for the computer aided design of coil couple for a misalignment tolerant biomedical inductive powering unit // IEEE Access, 2019. Vol. 7. P. 70755–70769.

УДК 535.015

Формирование пространственного профиля лазерного луча в дисперсных средах с углеродными нанотрубками для трехмерной печати биосовместимых композитов

Василевский П. Н.[1], Савельев М. С.[1,2], Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] *Институт биомедицинских систем,*
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
skorden@outlook.com
[2] *Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России*
(Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

В работе исследована возможность преобразования формы лазерного излучения с помощью методов нелинейной оптики. Показано преобразование лазерного луча с гауссовой формой в луч с пространственным профилем в виде распределения Бесселя. За счет проявления свойств нелинейного преломления в дисперсии углеродных нанотрубок возникает явление пространственной фазовой кроссмодуляции, которое приводит к изменению формы луча. Продемонстрированы уникальные свойства бесселева луча, что делает их перспективным кандидатом для трехмерной печати биосовместимых конструкций с помощью методов многофотонной полимеризации.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки; нелинейное преломление; лазерное излучение; луч Бесселя; пространственная фазовая кроссмодуляция.

Нелинейная оптика является перспективным инструментом для использования в различных областях применений [1]. Одной из таких областей является модуляция пространственной формы лазерного излучения. Создание лучей разной формы используется для специализированной обработки материалов, для управления сигналом в системах связи, в системах спектрального анализа веществ, а также для применений в области биомедицины. В биомедицине лучи с необычной формой используются в микроскопии со сверхвысоким разрешением [2], в оптических пинцетах — для наведения частиц и создания сложных частиц для адресной доставки лекарств [3], а также для печати трехмерных биосовместимых конструкций уникальной формы [4].

Одной из перспективных пространственных форм лазерного излучения является луч с формой Бесселя. Форма данного луча схожа с гауссовой формой, однако, помимо центрального пика, луч Бесселя также содержит несколько концентрических колец, которые окружают центральный пик. Благодаря такой особой форме луч Бесселя обеспечивает некоторые уникальные свойства, такие как недифрагируемость и самовосстановление после взаимодействия с непрозрачной частицей. Вышеописанные свойства луча Бесселя позволяют печатать биосовместимые гибкие композиты с высоким аспектным соотношением (отношением диаметра структуры к длине).

Для формирования пространственного профиля луча разной формы использована жидкая дисперсная нелинейно-оптическая среда на основе углеродных

нанотрубок. Углеродные нанотрубки обладают высокой фото- и термостабильностью, что обеспечивает возможность работы с высокоинтенсивным лазерным излучением. Стабильная жидкая дисперсия была сформирована с помощью методов ультразвуковой обработки. В качестве основного источника лазерного излучения использован фемтосекундный лазер «ТЕМА-3». Данная установка генерирует импульсное излучение с фемтосекундной длительностью импульса и частотой повторения импульсов 1 МГц. В качестве лазера накачки использован генератор суперконтинуума, позволяющий проводить исследования с разными длинами волн в диапазоне от 420 до 800 нм.

По результатам исследований показано, что лазер накачки способен вызывать в дисперсии углеродных нанотрубок неоднородность с переменным показателем преломления. Данная фазовая неоднородность влияет на распространение основного луча и приводит к преобразованию его формы [5]. При мощности луча накачки более 25 мВт наблюдается образование кольцевой формы для основного луча. При этом дальнейшее увеличение приводит к расширению кольца.

Фокусировка образованного луча в виде кольца приводит к формированию в фокусе линзы луча с пространственным распределением Бесселя. Показано, что, в отличие от гауссовой формы, луч Бесселя обладает значительно большей длиной Рэлея. В фокусе обе формы имеют диаметр 50 мкм, однако луч Бесселя через 10 мм от фокуса расширяется только до 63 мкм, тогда как гауссов луч расширяется до 150 мкм. Данное свойство луча Бесселя называется недифрагируемостью и приводит к формированию вытянутой области с высокой интенсивностью света. Это открывает новые перспективы к созданию биосовместимых конструкций с высоким аспектным соотношением методами лазерной 3D-печати.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-555 от 25 апреля 2024 года.

Литература

1. Munn R.W., Ironside C.N. Principles and applications of nonlinear optical materials. London: Blackie Academic & Professional, 1993. P. 20–34.
2. Liu M. et al. Super-resolution optical microscopy using cylindrical vector beams // Nanophotonics, 2022. Vol. 11. № 15. P. 3395–3420.
3. Moura T.A. et al. Modulating the trapping and manipulation of semiconductor particles using Bessel beam optical tweezers // Optics and Lasers in Engineering, 2023. Vol. 170. P. 107778.
4. Yang L. et al. Two-photon polymerization of microstructures by a non-diffraction multifoci pattern generated from a superposed Bessel beam // Optics letters, 2017. Vol. 42. № 4. P. 743–746.
5. Vasilevsky P.N. et al. Spatial self-phase modulation of light in liquid dispersions based on conjugates of phthalocyanines and carbon nanotubes // St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics, 2023. Vol. 68. № 3.1. P. 31–35.

УДК 621.389

Формирование структур на основе коллоидных сверхрешеток для SERS-подложек

Ибрагимова О. М., к. т. н., Панфилова Е. В., Ибрагимов А. Р.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
mom-bmstu@mail.ru

Фотонные кристаллы, получаемые методами самоорганизации коллоидных частиц полистирола, являются перспективными структурами для повышения точности отклика сенсорных датчиков. В работе рассматривается формирование таких структур методом центрифугирования, позволяющим формировать пленки с контролируемым параметром решетки для применения их в сенсорах гигантского комбинационного рассеяния.

Ключевые слова: природоподобные технологии; SERS-подложки; рамановская спектроскопия; самоорганизация; коллоидные фотонно-кристаллические структуры; центрифугирование.

Фотонные кристаллы (ФК) — это структурированные материалы с периодически изменяющимся показателем преломления [1]. В зависимости от периодичности этих структур в них запрещено распространение определенных длин волн света. Коллоидные фотонные кристаллы (КФК), представляющие собой упорядоченные массивы коллоидных монодисперсных частиц, являются хорошо известным типом трехмерных фотонных кристаллов, формируемых за счет явления самосборки — технологичного способа получения микро- и наноразмерных сверхрешеток. Использование КФК в качестве шаблона для микросферной литографии в технологии получения сенсоров, работа которых основана на явлении гигантского комбинационного рассеяния [2], обеспечивает равномерное распределение плазмонных частиц по поверхности подложки.

В данной работе исследуется процесс формирования описываемых структур с помощью классического центрифугирования — метода коллоидной самоорганизации, основанного на осаждении коллоидных микросфер на подложку под действием центробежных сил [3]. Рассматриваемый метод обеспечивает высокую воспроизводимость процесса формирования КФК и позволяет контролировать параметры получаемой коллоидной сверхрешетки в относительно широком диапазоне по сравнению с другими методами. В частности, изменение плотности упаковки микросфер в кристалл, а следовательно, и изменение периодичности расположения плазмонных частиц на подложке будет влиять на величину плазмонного резонанса. Внедрение функционального материала в ФК-структуру осуществлялось методом магнетронного распыления в вакууме, а дальнейшее удаление сфер производилось с помощью химического травления. В результате были получены структуры, в которых массив металлических частиц функционального материала равномерно распределен по поверхности образца. Результаты работы будут использованы для задач ГКР-сенсорики.

Литература

1. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // Physical review letters, 1987. Vol. 58 (23). P. 2486. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486.
2. Jiang L., Hassan M. M., Ali S., Li H., Sheng R., Chen Q. Evolving trends in SERS-based techniques for food quality and safety: A review // Trends in Food Science & Technology. Vol. 112. 2021. P. 225–240.
3. Ibragimov A. R. et al. Technology of Producing Photonic Crystal Colloidal Films by Centrifugation // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE, 2024. P. 1–5.

УДК 681.723.25:004.932

Калибровка проточного счетчика — анализатора субмикронных частиц

Герасименко А. Ю., Паскалов С. И.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе представлены результаты калибровки прибора для измерения параметров наночастиц в потоке жидкости, включая оценку различительной способности метрик в зависимости от диаметра частиц. Установлено, что интеграл яркости является ключевой метрикой, а также определены оптимальные диапазоны применения других метрик для анализа частиц размером 100–500 нм.
Ключевые слова: наночастицы; различительная способность метрик; микродозатор.

В работе представлены результаты калибровки прибора для измерения параметров наночастиц в потоке жидкости. Описаны методы калибровки, использованные метрики и результаты анализа данных. Особое внимание уделено оценке различительной способности метрик в зависимости от диаметра частиц. Результаты показали, что интеграл яркости является основной метрикой для оценки параметров частиц, в то время как другие метрики также продемонстрировали свою эффективность в определенных диапазонах диаметров частиц.

Исследование параметров наночастиц в потоке жидкости имеет важное значение для различных областей науки и техники, включая нанотехнологии, медицину и экологию. Точное измерение размеров и других параметров частиц позволяет улучшить качество и эффективность различных процессов и продуктов. В данной работе представлены результаты калибровки прибора, позволяющего измерять параметры частиц в потоке со скоростью до 50 мл/мин. Основной целью исследования является оценка различительной способности метрик в зависимости от диаметра частиц.

Процедура калибровки производилась с использованием микродозатора, подключенного через тройник с минимизированным паразитным объемом к магистрали деионизированной воды. Дисперсия латексных частиц добавлялась в поток, измерялись траектории частиц. Параметры частиц сохранялись в базе данных для последующего анализа. В ходе экспериментов использовались частицы латекса с диаметрами 100, 170, 200, 300 и 500 нанометров.

В ходе исследования была проведена калибровка прибора для измерения параметров латексных частиц. Результаты показали, что использованные метрики позволяют эффективно различать частицы в зависимости от их диаметра. Дальнейшие исследования будут направлены на улучшение точности измерений и расширение диапазона измеряемых частиц.

Литература

1. Maguire C. M. et al. Characterisation of particles in solution–a perspective on light scattering and comparative technologies // Science and Technology of Advanced Materials, 2018. Vol. 19. № 1. P. 732–745.
2. Walker J. G. Improved nano-particle tracking analysis // Measurement Science and Technology, 2012. Vol. 23. № 6. P. 065605.

УДК 615.841

Модификация поверхности стимулирующего имплантируемого электрода при помощи наносекундного лазерного излучения

Круковский Н. С.[1], Попович К. Д.[1,2], к. т. н., Герасименко А. Ю.[1,2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский университет)
119048, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2
krukovskijn@inbox.ru

В результате серии экспериментов была проведена реструктуризация поверхности базовой подложки из медицинской стали габаритами 20×10×0,5 мм при помощи наносекундного лазерного излучения с дальнейшим напылением покрытий из одностенных углеродных нанотрубок. Оценка качества полученной поверхности проводилась при помощи оптической профилометрии, а степень ее влияния на электрохимические свойства — при помощи циклической вольт-амперометрии.

Ключевые слова: фантомно-болевой синдром; стимуляция спинного мозга; лазерная реструктуризация; одностенные углеродные нанотрубки; оптическая профилометрия; циклическая вольт-амперометрия.

На сегодняшний день нейропатические боли являются одной из главных угроз для качества жизни пациентов, особенно у онкобольных и ампутантов. Лечение данного заболевания может быть осуществлено при помощи стимуляции тканей спинного мозга инвазивным электродом.

Одними из фундаментальных проблем существующих и применяющихся на данный момент времени устройств для нейростимуляции являются низкие значения накапливаемого заряда и высокое сопротивление.

Одним из способов решения вышеупомянутых проблем может считаться абляция поверхности электрода лазерным излучением. Подобный метод в конечном итоге может значительно увеличить электроемкость проводника и снизить сопротивление при частоте пропускаемого тока до 10^3 Гц [1].

В ходе серии экспериментов по модификации базовой подложки из медицинской стали габаритами 20×10×0,5 мм ее поверхность была аблирована наносекундным импульсным иттербиевым лазерным излучением. В ходе работы были изготовлены образцы, реструктуризированные лазером, мощность которого находилась в диапазоне от 3,16 до 5,8 Вт, а частота равнялась 25 кГц. Дальнейший этап предусматривал напыление покрытия на основе одностенных углеродных нанотрубок при помощи аэрографа на полученный проводник.

Оценка качества полученной таким образом поверхности проводилась посредством оптической профилометрии и сканирующей электронной микроскопии, химический состав определялся с задействованием энергодисперсионной спектроскопии, а степень ее влияния на электрохимические свойства — при помощи циклической вольт-амперометрии. Наилучшее качество модифицированной поверхности и наибольшие значения шероховатости протекаемого тока были зафиксированы при мощности излучения в 4,3 Вт: 18,7 мкм и 60 мкА соответственно.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-555 от 25 апреля 2024 года.

Литература

1. Amini S. et al. Femtosecond laser hierarchical surface restructuring for next generation neural interfacing electrodes and microelectrode arrays // Scientific Reports, 2022. Vol. 12. № 1. P. 13966.

УДК 612.821.75

Система мониторинга фаз сна на основе анализа электроокулограммы с использованием классификатора XGBoost и характеристик движений глаз

Козырев Г. В., Ефремов И. О.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разрабатывается универсальная система мониторинга фаз сна на основе метода электроокулографии (ЭОГ) и алгоритма классификации XGBoost. Реализация планируется на платформе STM32 с возможностью интеграции в IoT-устройства для применения в телемедицине.
Ключевые слова: электроокулография; Интернет вещей; STM32; XGBoost.

Нарушения сна негативно влияют на качество жизни, когнитивные функции и общее состояние здоровья. Недостаток сна связан с повышенным риском сердечно-сосудистых заболеваний, метаболических нарушений и депрессии. Хотя полисомнография остается золотым стандартом диагностики, ее высокая стоимость и необходимость специализированных условий ограничивают широкое применение.

Коммерческие устройства (фитнес-трекеры, умные часы), основанные на акселерометрии и фотоплетизмографии, обеспечивают лишь ориентировочную оценку сна, поскольку используют косвенные физиологические показатели (движения, пульс).

Одним из перспективных биосигналов для классификации фаз сна является электроокулограмма (сигнал, регистрируемый методом ЭОГ). Он отражает электрическую активность, возникающую при движении глаз, и может содержать информативные признаки, связанные с фазами сна. Электроокулограмма регистрируется с помощью относительно простого оборудования, в связи с чем подходит для миниатюрных устройств.

Предлагается устройство на базе микроконтроллера STM32, регистрирующее электроокулограмму и обрабатывающее ее в реальном времени, предусмотрена возможность беспроводной передачи данных для интеграции в IoT-среду. Для классификации фаз сна применяется алгоритм машинного обучения (МО) XGBoost, показавший высокую точность при работе с биомедицинскими данными.

Проект включает разработку аппаратного прототипа, алгоритмов цифровой обработки сигналов и программного интерфейса. В статье подробно рассматривается анализ режимов работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и их согласование с аппаратной схемой. Планируется сбор экспериментальных данных, проверка адекватности модели, анализ и публикация научных результатов с проработкой возможности патентной защиты.

Ключевая особенность проекта — сочетание ЭОГ, алгоритма классификации МО и встраиваемой платформы — позволит получить решение для задачи мониторинга сна в бытовой, клинической и научной сферах.

Литература

1. STMicroelectronics. RM0434: Multiprotocol wireless 32-bit MCU Arm®-based Cortex®-M4 with FPU, Bluetooth® Low Energy and 802.15.4 radio solution: Reference manual [Electronic resource]. URL: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0434-multiprotocol-wireless-32bit-mcu-armbased-cortexm4-with-fpu-bluetooth-lowenergy-and-802154-radio-solution-stmicroelectronics.pdf.
2. American Academy of Sleep Medicine. (2017). The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events: Rules, Terminology and Technical Specifications (Version 2.4) [Electronic resource]. Darien, IL: AASM. URL: https://aasm.org/clinical-resources/scoring-manual.

УДК 004.312

Исследование эффективности мер защиты аппаратной реализации криптографического алгоритма AES от анализа энергопотребления

Алексеев В. Д.[1,2], Тишин А. С.[1,3], Михайлов В. Ю.[1,3]
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
valekseev@niime.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Исследованы механизмы утечки информации по каналам энергопотребления в интегральных схемах. На примере моделирования аппаратной реализации алгоритма AES представлена модель информационной утечки расстояния Хэмминга. Предложены схемотехнические решения для противодействия анализу энергопотребления.

Ключевые слова: анализ энергопотребления; AES; расстояние Хэмминга; маскирование энергопотребления.

В настоящее время задачи обработки конфиденциальной пользовательской информации в микроэлектронных устройствах решаются посредством реализации на их базе различных криптографических алгоритмов как программным, так и аппаратным образом [1]. Наиболее эффективным с точки зрения обеспечения высокого быстродействия устройства при минимальных аппаратных затратах является применение специализированных сопроцессоров в составе цифровой части микросхемы, в задачи которых входит реализация конкретных вычислительных алгоритмов. Математическая стойкость таких алгоритмов преобразования информации доказана и обуславливается невозможностью раскрытия секретного ключа алгоритма в обозримый интервал времени на текущем уровне развития вычислительной техники. Вместе с тем стойкость любого алгоритма напрямую связана с физическими характеристиками реализующего его устройства, т. е. интегральной схемы [2]. В рамках данной работы на примере моделирования характеристики энергопотребления аппаратного сопроцессора криптографического алгоритма AES продемонстрирована возможность значительного сокращения количества вариантов секретного ключа с использованием модели расстояния Хэмминга, а также предложены эффективные меры противодействия такому анализу [3].

Возможность раскрытия внутренних данных чипа посредством анализа энергопотребления обусловлена особенностями КМОП-схем, на базе которых построена его цифровая часть. Их ключевое свойство с точки зрения энергопотребления заключается в значительном преобладании динамической компоненты в сравнении со статической. Таким образом, в процессе переключения логических элементов вычислительного блока возникают кратковременные всплески энергопотребления, амплитуда которых указывает на количество разрядов битового

вектора, изменивших значение, т.е. на его расстояние Хэмминга. Поскольку преобразование информации в криптографическом алгоритме регламентировано спецификацией и соответствует заданной последовательности операций, анализируя расстояние Хэмминга аппаратной реализации вычислительного блока на каждом такте его работы во временном интервале выполнения определенных преобразований, можно значительным образом сократить количество потенциальных вариантов ключа алгоритма, что делает задачу их перебора разрешимой в обозримом интервале времени.

В рамках данной работы созданы эффективные схемотехнические решения для противодействия анализу энергопотребления, не требующие длительного перепроектирования микросхемы и реализуемые внутри цифровой части вычислительного блока с использованием языков аппаратного проектирования. К их числу относятся подходы с использованием балансировки энергопотребления и рандомизации переключательной активности. Полученные в результате моделирования разработанных решений кривые энергопотребления демонстрируют значительную эффективность предложенных подходов для задачи сокрытия переключательной активности аппаратного блока. Дополнительное исследование аппаратных характеристик каждой из представленных реализаций позволило выявить среди них оптимальные для задачи обеспечения сокрытия переключательной активности при минимальном возрастании энергопотребления устройства и площади, занимаемой им на кристалле.

Литература

1. Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Мытник К. Я. Перспективы развития универсальной защищенной программно-аппаратной платформы со сверхнизким потреблением для устройств Интернета вещей // Наноиндустрия, 2019. — № S(89). — С. 328–329.
2. Standaert F. X. Introduction to side-channel attacks // Secure integrated circuits and systems, 2010. P. 27–42.
3. Lathrop L. Differential power analysis attacks on different implementations of AES with the ChipWhisperer Nano // Cryptology ePrint Archive, 2020.

УДК 621.382.3

Применение подходов непрерывной интеграции и доставки (CI/CD) из методологии DevOps в маршруте разработки PDK

Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
knasibullin@niime.ru

Применение подходов непрерывной интеграции и доставки (CI/CD) из методологии DevOps в маршруте разработки PDK (Process Design Kit) позволит значительно ускорить процесс создания и улучшить качество комплекта средств проектирования. При разработке PDK создают множество компонентов, таких как SPICE-модели, SKILL-файлы, файлы физической верификации и библиотека технологических элементов. CI/CD позволит автоматизировать тестирование всех компонентов после каждой компиляции. Также CI/CD обеспечивает быструю обратную связь для разработчиков. Это позволит выявлять ошибки на ранних стадиях, что особенно важно для сложных технологических процессов.

Ключевые слова: СБИС; PDK; верификация; тестирование; технологические библиотеки; маршрут верификации; CI/CD; DevOps.

Введение

В данной статье рассматривается применение подходов непрерывной интеграции и доставки (CI/CD) из методологии DevOps в маршруте разработки PDK. Автоматизация тестирования и верификации компонентов PDK с использованием CI/CD позволит сократить цикл разработки, повысить надежность и минимизировать влияние человеческого фактора.

Основные компоненты PDK и их тестирование:

- библиотека технологических элементов — иерархический набор файлов, описывающий поддерживаемую элементную базу, технологические слои, их свойства и ограничения;
- файлы физической верификации (DRC, LVS, PEX) — набор правил и проверок, обеспечивающих корректность проектируемых топологий;
- SPICE-модели — математические модели электронных компонентов, используемые для схемотехнического моделирования;
- SKILL-файлы — файлы, автоматизирующие процессы проектирования в среде Cadence.

Для интеграции CI/CD в разработку PDK необходимо создать процесс, включающий следующие этапы.

1. Разработчики вносят изменения в репозиторий с PDK.
2. Система CI/CD автоматически фиксирует новые изменения и запускает процесс тестирования:
   - библиотека технологических элементов — проверка целостности и корректности файлов;
   - SPICE-модели — автоматический запуск симуляции и проверка результатов;

- SKILL-файлы — проверка работоспособности и совместимости с Cadence;
- файлы верификации (DRC, LVS, PEX) — запуск на тестовых структурах.

3. После успешного тестирования обновленный PDK автоматически становится доступным для пользователей. Если же в процессе проверки выявляются ошибки, выпуск новой версии приостанавливается, а разработчик получает уведомление с их описанием
4. Система CI/CD формирует отчет с результатами тестов.

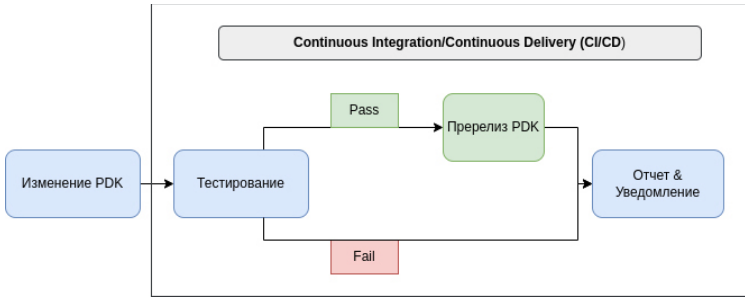


Рис. 1. Обобщенная диаграмма CI/CD-процесса для PDK

Преимущества применения CI/CD в разработке PDK:

- сокращение времени разработки — автоматизированное тестирование позволяет быстро выявлять ошибки и исправлять их на ранних этапах;
- быстрая обратная связь — разработчики сразу получают отчеты об ошибках и могут оперативно внести исправления;
- снижение трудозатрат — автоматизация процессов уменьшает количество ручных проверок;
- гибкость — возможность адаптации CI/CD под разные технологические процессы;
- актуальная версия — CI/CD-метод предоставляет разработчику самую актуальную версию, которой можно воспользоваться, не дожидаясь релиза.

Заключение

Применение подходов CI/CD в разработке PDK открывает новые возможности для автоматизации процессов тестирования, ускоряет цикл разработки и улучшает качество конечного продукта. Это позволяет сократить время выхода на рынок новых технологических процессов и минимизировать ошибки на поздних стадиях производства.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — №4 (168). — С. 16–41.

2. Красников Г. Я., Шелепин Н. А. Состояние и перспективы развития технологий и элементной базы СБИС с энергонезависимой памятью // Проектирование систем на кристалле: тенденции развития и проблемы: Тезисы докладов, Москва—Зеленоград, 19–21 октября 2010 года. — Москва—Зеленоград: МИЭТ, 2010. — С. 55.
3. Красников Г. Я., Орлов О. М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128.
4. Загидуллина О. Р., Надин А. С. Исследование LDE-эффектов и методов аттестации файлов DRC для субмикронных технологий 90–28 нм // Наноиндустрия, 2020. — № S96-2. — С. 619–622.
5. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 3. Уровень технологической операции // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 3 (171). — С. 63–93.
6. Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С. Разработка системы быстрых тестов для проверки качества и функциональности файлов и инструментов pdk // Российский форум «Микроэлектроника-2024». 10-я научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов.— Москва, 2024. — С. 1100–1102.
7. Насибуллин К. М., Загидуллина О. Р., Надин А. С. Маршрут процесса верификации при проектировании современных технологических библиотек // Наноиндустрия, 2024. — Т. 17. — № S10-2 (128). — С. 793–796.

УДК 621.384.3

Алгоритмы цифровой коррекции ошибок в SAR АЦП

Ямалиев С. И., Лобанков Д. С., Головин Д. О., Двинских П. Д., Громов И. С., Аткин Э. В.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31

Предложены алгоритмы цифровой коррекции ошибок SAR АЦП, выполненные в технологии КМОП 180 нм. Они обеспечивают точность 40–60 % выше аналогов при энергопотреблении ≤200 мкА и частоте ≥4 МГц. Методы применимы в гибридных АЦП для высокоскоростной оцифровки.
Ключевые слова: SAR АЦП; цифровая коррекция ошибок; КМОП; гибридный АЦП; емкостная матрица.

Современные АЦП играют ключевую роль в гетерогенных микросхемах, выполняя функцию интерфейса между аналоговой и цифровой областями. Особую актуальность это приобретает в многоканальных системах обработки сигналов, таких как фоточувствительные матрицы с параллельным аналоговым трактом и системы детекторных массивов. В канальных структурах гибридных АЦП [1] SAR-ядро является критическим элементом, определяющим точность и линейность преобразования. Основные источники ошибок в SAR АЦП связаны с паразитными эффектами в конденсаторных матрицах и нестабильностью компаратора [2], что требует эффективных методов цифровой коррекции.

Описание алгоритмов цифровой коррекции (рис. 1):

- Simple — классический алгоритм SAR без коррекции [3];
- Accurate — корректировка ошибок в конце преобразования путем повторного выставления кодов;
- Exact — коррекция на каждом такте преобразования с последовательным сбросом и уточнением кода ЦАП.

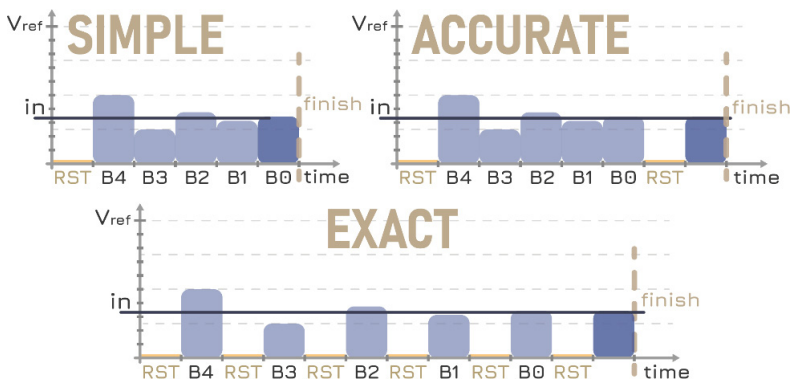


Рис. 1. Хронограммы работы SAR АЦП

Заключение

Применение цифровых методов коррекции ошибок в SAR АЦП позволяет значительно повысить точность преобразования без изменения аппаратной части. Наилучшие результаты показали адаптивные алгоритмы, снижающие ошибку на 40–60 % при минимальных вычислительных затратах. Таким образом, цифровая коррекция является перспективным направлением для разработки высокоточных АЦП в встраиваемых и мобильных приложениях.

Литература

1. Hong J. et al. Large-Scale Terahertz Sensor Array Module With Antenna-Coupled Microbolometers on Glass Substrate With Sigma–Delta ADC Readout ASIC // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, May 2023. Vol. 13. № 3. P. 200–208. DOI: 10.1109/TTHZ.2023.3263629.
2. Abhishek Kumar. CMOS Bootstrap Driver // Electronic Devices and Circuit Design, New York, 2022. P. 51–66. DOI: 10.1201/9781003145776.
3. Kim J.-S., Yoon J.-O. and Choi B.-D. Low-power counter for column-parallel CMOS image sensors // 2016 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS), Jeju, 2016. P. 554–556. DOI: 10.1109/APCCAS.2016.7804028.

УДК 621.3.049

Сложнофункциональный блок однократно программируемой ПЗУ

Головин И. О., Громов И. С., Ямалиев С. И., Лобанков Д. С., Двинских П. Д.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
IOGolovin@mephi.ru

Представлена разработка матрицы однократно программируемого ПЗУ объемом 64 бита на основе пробоя подзатворного диэлектрика. Описана архитектура ячейки из трех транзисторов, логическое окружение матрицы и режимы работы. Приведены данные моделирования: время записи — до 100 мс, чтение — 1,2 мкс на 8-битное слово. Разработанная матрица предназначена для хранения идентификационных параметров микросхем, обеспечивая энергонезависимость и устойчивость к внешним воздействиям.
Ключевые слова: OTP; ПЗУ; пробой диэлектрика; матрица памяти; интегральные схемы.

Актуальность работы связана с потребностью в компактных энергонезависимых решениях для хранения идентификационных данных в микросхемах. Ячейка OTP на основе пробоя диэлектрика обеспечивает высокую надежность и минимальные габариты. Ключевые преимущества — отсутствие необходимости в дополнительных масках при производстве и устойчивость к внешним воздействиям.

Разработана 1-битовая ячейка, состоящая из:

1) **транзистора AF** — обеспечивает пробой диэлектрика при напряжении >3·VDD;
2) **транзистора AC** — адресация ячейки;
3) **транзистора BT** — защита от перенапряжений [1].

На базе ячеек собрана матрица 8×8 бит с управляющей логикой (демультиплексоры, элементы И/ИЛИ, чувствительные усилители [2]). Технические характеристики:

- объем: 64 бита;
- время записи: 20–100 мс (определяется экспериментально) [3];
- чтение: 1,2 мкс;
- напряжение питания: 1,2 В (логика) и 2,8 В (питание).

Режимы работы:

- **чтение**: активация строки и столбца через демультиплексоры, детектирование тока через чувствительный усилитель;
- **запись**: подача напряжения 4–6 В на VPP, побитовое программирование [3].

Матрица OTP демонстрирует высокую эффективность для задач хранения конфигурационных данных. Перспективы включают испытания блока в лабораторных условиях.

Литература

1. Cha H.-K., Yun I., Kim J. et al. A 32-KB Standard CMOS Antifuse One-Time Programmable ROM Embedded in a 16-Bit Microcontroller // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006. Vol. 41. № 9. P. 2115–2124.
2. Liu Z., Zheng R., Sun J. A Gate-Oxide-Breakdown Antifuse OTP ROM Array Based on TSMC 90 nm Process // Proceedings of IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits, 2015. P. 1–3.
3. Cha H.-K., Kim J., Lee K. A High-Density 64k-Bit One-Time Programmable ROM Array with 3-Transistor Cell Standard CMOS Gate-Oxide Antifuse // Journal of Semiconductor Technology and Science, 2004. Vol. 4. № 2. P. 106–109.

УДК 621.382

Сложнофункциональный блок POR с функцией BOR

Громов И. С., Юровский В. О., Лобанков Д. С., Ямалиев С. И., Двинских П. Д., Головин И. О.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
ISGromov@mephi.ru

В работе рассматриваются разработка и особенности применения сложнофункционального блока Power-On Reset с функцией Brown-Out Reset для современных электронных устройств. В контексте систем с низким энергопотреблением и высокой надежностью использование Power-On Reset и Brown-Out Reset позволяет обеспечить правильную и стабильную работу микроконтроллеров и других цифровых компонентов при изменениях напряжения питания и его нестабильности.
Ключевые слова: POR; BOR.

Представленный блок POR разработан для интеграции в цифровые системы, для ее инициализации после подачи питания. Когда напряжения питания повышается до необходимого уровня, POR активируется и сбрасывает систему. Он обеспечивает надежное и корректное включение микросхем и других компонентов, предотвращая их неправильную работу из-за неопределенных состояний в момент включения. Кроме того, блок POR оснащен функцией BOR, необходимой для предотвращения некорректной работы системы в условиях пониженного напряжения питания. Когда напряжение питания падает ниже определенного порога (но еще не отключается полностью), BOR активируется и сбрасывает систему.

Основные функции POR:

- **инициализация**: PoR гарантирует, что все внутренние регистры и состояния компонентов сброшены в известное начальное состояние при включении питания;
- **защита от сбоев**: при подаче питания может возникнуть временная нестабильность. PoR помогает избежать неправильной работы системы в этот критический момент;
- **устойчивость к шуму**: PoR может фильтровать кратковременные помехи на линии питания, которые могут вызвать случайное срабатывание системы;
- **синхронизация**: обеспечивает синхронный запуск различных компонентов системы, чтобы они начали работать в нужный момент.

Основные функции BOR:

- **защита от сбоев**: при понижении напряжения могут возникнуть ошибки в работе микросхем и других компонентов. BoR предотвращает их некорректное функционирование, инициируя сброс;
- **сохранение данных**: при падении напряжения может произойти повреждение данных, хранящихся в памяти. BoR позволяет избежать таких ситуаций, сбрасывая систему до того, как произойдет ошибка;

- **стабильность работы**: BoR обеспечивает стабильное функционирование системы, так как гарантирует, что она работает только при достаточном уровне напряжения;
- **энергоэффективность**: в некоторых случаях BoR может помочь оптимизировать потребление энергии, отключая систему, когда напряжение становится слишком низким для нормальной работы;
- **улучшение надежности**: системы с механизмом Brown-out-reset имеют более высокую надежность, так как они могут предотвращать возможные сбои и ошибки, связанные с нестабильным питанием;
- напряжение питания, при котором выход блока переключается из 0 в 1 — 1,1 В;
- напряжение питания, при котором выход блока переключается из 1 в 0 — min — 0,45 В, max — 0,9 В;
- задержка переключения выхода блока из 0 в 1 — min — 1 мс.

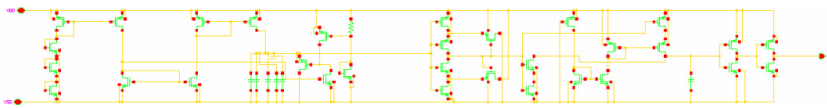


Рис. 1. Схема блока POR

Литература

1. Solis-Bustos S., Silva-Martinez J., Maloberti F. and Sanchez-Sinencio E. A 60-dB dynamic-range CMOS sixth-order 2.4-Hz low-pass filter for medical applications // IEEE Trans. Circuits Syst. II, Analog Digit. Signal Process, Dec. 2003. Vol. 47. № 12. P. 1391–1398.
2. Huy-Binh Le, Xuan-Dien Do, Sang-Gug Lee, Seung-Tak Ryu. A Long Reset-Time Power-On Reset Circuit With Brown-Out Detection Capability // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs 58-II (11). P. 778–782.

УДК 621.382:621.373.5

Разработка и исследование стабильного генератора тактового сигнала с частотой 10 МГц и низким энергопотреблением

Исаченко Д. А., Ермаков И. В.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
disachenko@niime.ru

Представлены результаты разработки и исследования блока стабильного кремниевого генератора тактового сигнала с низким энергопотреблением на базе отечественной КМОП-технологии 180 нм. Спроектированный блок генератора имеет частоту 10 МГц с погрешностью менее 10 % и ток потребления 18–25 мкА в температурном диапазоне от −40 до 85 °С при крайних значениях технологических углов в широком диапазоне напряжения питания от 2 до 10 В, площадь топологии — 186×142 мкм^2.

Ключевые слова: тактовый генератор; осциллятор; ГУН; КМОП; калибровка частоты; температурная компенсация.

Одними из важных компонентов электронных цифровых устройств являются источники тактового сигнала — генераторы (осцилляторы), которые по способу конструктивного исполнения можно разделить на два вида: полностью интегральные и с использованием внешних компонентов. Полностью интегральные генераторы представляют собой сложнофункциональные (СФ) блоки, которые входят в состав микросхем (СБИС, СнК) и располагаются с ними на одном кристалле. Если сравнивать эти два вида генераторов, то наиболее точными и стабильными являются генераторы с использованием внешних компонентов, например кварцевые генераторы, использующие механический резонанс [1]. Несмотря на это, существует множество применений, в которых полностью интегральные генераторы остаются востребованными, например микросхемы для банковских и транспортных приложений, идентификационных RFID и контактных меток, электронных документов [2].

Для указанных применений также важным параметром является низкое энергопотребление.

Таким образом, актуальной задачей является повышение стабильности частоты кремниевого генератора тактового сигнала и снижение его энергопотребления. Повышение стабильности частоты достигается за счет снижения ее зависимости от внешних воздействующих факторов, таких как разброс параметров технологического процесса, напряжения питания и температуры (PVT), для чего используются различные схемотехнические и конструктивные решения. Стабильный кремниевый генератор обязательно должен содержать дополнительные блоки, снижающие влияние воздействия PVT за счет подстройки (калибровки) внутренних параметров, стабилизации питающего напряжения и компенсации температурной зависимости [3].

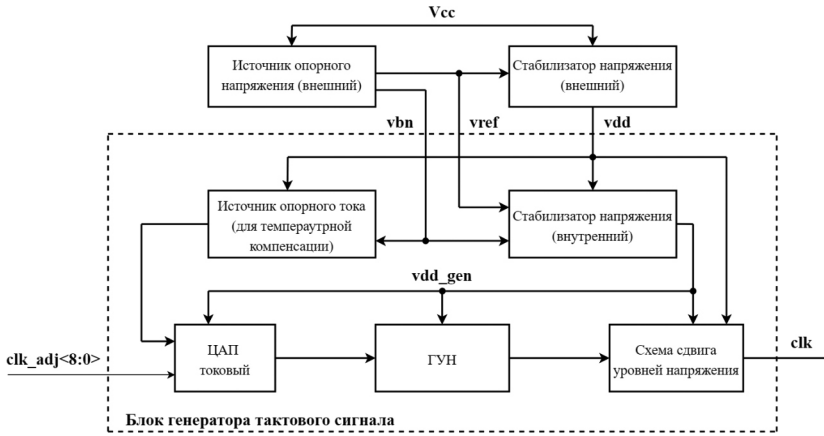
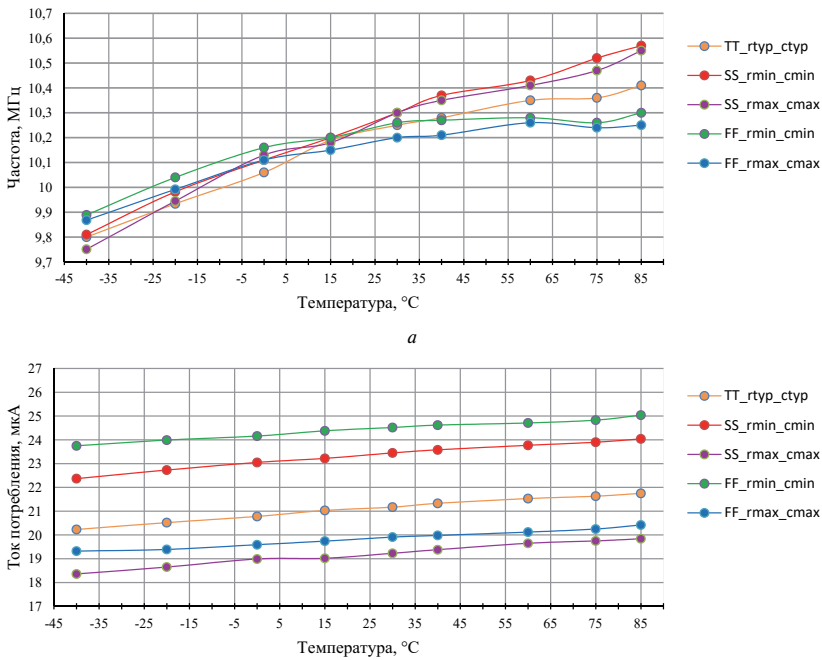


Рис. 1. Структурная схема блока генератора тактового сигнала



а

б

Рис. 2. Зависимость опорной частоты (*а*) и тока потребления (*б*) от температуры при крайних технологических углах и напряжении питания Vcc = 2–10 В

В докладе рассматриваются особенности реализации и повышения стабильности частоты полностью интегрального кремниевого генератора тактового сигнала с низким энергопотреблением на базе отечественной КМОП-технологии 180 нм. Структурная схема разработанного блока генератора представлена на рис. 1, он построен на базе генератора, управляемого напряжением (ГУН), и содержит ЦАП с двоично-взвешенными источниками тока, который служит одновременно для калибровки частоты и реализации функции плавающей частоты. В целях снижения температурной зависимости частоты был разработан источник опорного тока компенсации и подобран опорный ток, который максимально нивелирует температурную зависимость частоты генератора. Для снижения зависимости частоты от напряжения питания используется как внешний, так и внутренний стабилизатор напряжения. Блок генератора использует доступные в проекте напряжения: vref — опорное напряжение, vbn — напряжение смещения и vdd — напряжение внешнего стабилизатора.

Результаты моделирования генератора с учетом паразитных элементов при различных отклонениях PVT приведены на рис. 2. Спроектированный блок имеет частоту 10 МГц с погрешностью менее 10 % и ток потребления 18–25 мкА в температурном диапазоне от −40 до 85 °C при крайних значениях технологических углов в широком диапазоне напряжения питания Vcc от 2 до 10 В. Площадь топологии блока составляет 186×142 мкм^2.

Литература

1. Иванов Ю. Современные кварцевые и рубидиевые генераторы // Современная электроника, 2024. — № 1. — С. 32–38.
2. Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Васильев Е. С., Гордиенко А. В. Развитие защищенной аппаратной платформы NE32 на базе архитектуры RISC-V для применения в составе доверенных микроконтроллеров // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 76–78.
3. Белоусов Е. О., Кочетков Д. В., Моленкамп К. М., Эннс А. В. Термостабильный генератор с подавлением температурных эффектов первого и второго порядка // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2018. — № 4 (172). — С. 24–30.

УДК 621.382

Маломощный динамический компаратор с полным диапазоном входных сигналов для канальных применений

Лобанков Д. С., Ямалиев С. И., Двинских П. Д., Головин И. О., Громов И. С.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
DSLobankov@mephi.ru

В работе представлен двухступенчатый динамический компаратор, разработанный для интеграции в канальные АЦП, где критичны минимизация энергозатрат и площади кристалла. Архитектура основана на динамическом методе управления питанием. Блок работает в полном диапазоне входных напряжений.

Ключевые слова: АЦП; динамический компаратор; низкое энергопотребление.

Представленный компаратор разработан для интеграции в энергоэффективные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) канального типа, используемые в системах с жесткими требованиями к площади, быстродействию и энергопотреблению. Архитектура компаратора, изображенная на рис. 1, основана на [1–2]. За счет динамического управлениея питанием в режиме покоя схема потребляет менее 1 мкВт. Monte-Carlo-моделирование напряжения смещения топологии с экстракцией паразитов дает результат в 1,2 мВ.

Проведена оптимизация параметров блока, включая анализ компромиссов между точностью, быстродействием и паразитными эффектами. В частности, исследован эффект kick-back шума.

Методы для минимизации эффекта:

- коррекция фронтов тактовых сигналов;
- оптимизация размеров входных транзисторов.

Методика оптимизации параметров, включая подавление kick-back-эффектов, может быть масштабирована для других классов динамических компараторов. Сохранение высокой скорости при компактной площади делает решение перспективным для применения в IoT-устройствах и портативной электронике.

Ключевые особенности:

- технология — 180 нм;
- работа с заявленной точностью во всем диапазоне входных сигналов;
- напряжение смещения не превышает 1,2 мВ;
- высокое быстродействие — до 400 МГц;
- низкое энергопотребление в основном режиме работы при 100 МГц — 140 мкВт;
- компактная площадь — 36×24 мкм^2.

Разработка велась в технологии «Микрон» 180 нм. Компаратор запущен в производство как часть АЦП, предназначенного для обработки сигналов матричных болометрических детекторов. Образцы ожидаются в последнем квартале 2025 года.

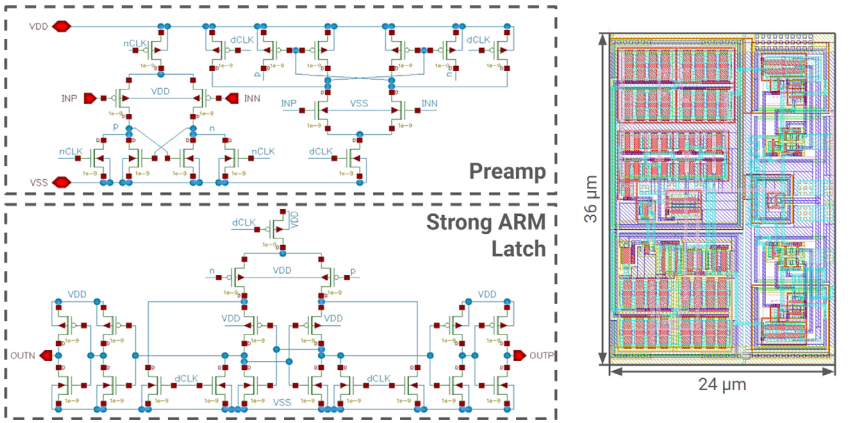


Рис. 1. Схема и топология компаратора

Литература

1. Siukaeva M. R. and Bellavin M. A. Comparator circuits for successive approximation register based analog-to-digital converters // 2023 Seminar on Networks, Circuits and Systems (NCS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023. P. 152–155. DOI: 10.1109/NCS60404.2023.10397528.
2. Chin S. M., Hsieh C. C., Chiu C. F. and Tsai H. H. A new rail-to-rail comparator with adaptive power control for low power SAR ADCs in biomedical application // Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Paris, France, 2010. P. 1575–1578. DOI: 10.1109/ISCAS.2010.5537421.

УДК 621.317

Разработка микросхемы квадратурного энкодера положения

Лоос В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
loos.vladislav@yandex.ru

Разработана топология интегральной микросхемы квадратурного энкодера положения для работы с СКВТ. В статье описана архитектура, приведены технические характеристики и результаты моделирования микросхемы. Приведен анализ решений и обоснован выбор архитектуры разработанной микросхемы.

Ключевые слова: энкодер положения; СКВТ; топология интегральной микросхемы.

В современном мире множество устройств оснащено тем или иным датчиком положения или датчиком угла поворота, преобразующим угол поворота детали в электрический сигнал. Подобные датчики называются энкодерами положения и применяются в системах точного перемещения и позиционирования, в измерительном оборудовании, в робототехнике и автомобилестроении и иных областях. Таким образом, в состав энкодера входят микросхема или устройство преобразования физического угла поворота в электрическую энергию, а также микросхема преобразования электрического тока или напряжения в код угла поворота.

С начала прошлого века известно достаточное число машин и трансформаторов для преобразования физического угла поворота в электрическую энергию, которые уверенно справляются с этой задачей. Среди них сельсины, вращающиеся трансформаторы, AMR-сенсоры и сенсоры, работающие на эффекте Холла. Среди вращающихся трансформаторов распространенным вариантом является синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ), выходное напряжение обмоток которого пропорционально паре сигналов синус и косинус. При использовании пары гармонических сигналов позиционирование текущего положения СКВТ выполняется с достаточной точностью как в течение одного периода, так и при подсчете множественного числа поворотов ротора.

В этой работе представлен обзор разработанной микросхемы, предназначенной для обработки сигналов от синусно-косинусных датчиков положения. Эта микросхема совместима с различными типами датчиков, включая синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы и линейные дифференциальные трансформаторы. Преобразование сигнала в микросхеме происходит с разрешением 16 бит на один период входного сигнала. Для эффективного взаимодействия с трансформаторными датчиками микросхема оснащена встроенным программируемым синтезатором синусоидального сигнала возбуждения первичной обмотки, который работает по принципу прямого цифрового синтеза. Кроме того, в микросхеме предусмотрен блок квадратурной демодуляции, благодаря которому извлекается информация из сигналов, поступающих с вторичных обмоток датчика.

В статье описана архитектура, приведены технические характеристики и результаты моделирования микросхемы. Приведен анализ решений преобразователей угол — код и обоснован выбор архитектуры разработанной микросхемы

на основе цифрового следящего преобразователя. На основе алгоритмов разработана топология интегральной микросхемы по технологии отечественной фабрики АО «Микрон» HCMOS8D, выполнен запуск в рамках работы сервиса MPW НИУ МИЭТ. Разработанная микросхема функционирует на частоте 32 МГц и потребляет 70 мА, преобразование угол — код выполнено с разрешением 16 бит и точностью 0,01 градуса. Время преобразования не превышает 300 нс.

УДК 621.382.2/.3

Источник опорного напряжения для линейного стабилизатора напряжения

Лукьянова Я. А.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Разработана принципиальная схема и топология источника опорного напряжения на основе ширины запрещенной зоны, реализованная на отечественной технологии 250 нм. Предложенное решение применимо в линейных стабилизаторах напряжения.

Ключевые слова: ИОН; САПР; интегральная схема; аналоговый СФ-блок.

Источники опорного напряжения — принципиально важные компоненты современной электроники. От того, насколько точно воспроизводится абсолютное значение опорного напряжения, зависит работа схем АЦП и ЦАП и, соответственно, комплексов оборудования для проведения измерений, привязки к координатам местности. Источники опорного напряжения (ИОН) нужны во многих случаях, и область их применения постоянно расширяется [1]. Это измерительные приборы, системы связи, даже зарядные устройства литиевых батарей, но чаще всего необходимость в них возникает при построении аналого-цифровых преобразователей (АЦП), представляющих на выходе отношение входного напряжения к опорному в цифровой форме, и цифроаналоговых (ЦАП), на выходе которых получают напряжение опорного источника в масштабе, определяемом кодом на его цифровом входе. Некоторые приборы имеют встроенный опорный источник, другим требуется внешний; часто возможна работа как с внутренним, так и с внешним источником. Стоимость ИОН обычно составляет малую часть системы в целом, но может оказать существенное влияние на ее результирующие характеристики.

Данный проект разрабатывается в рамках минимально жизнеспособного продукта (MVP), что позволяет воспользоваться актуальной электронной компонентной базой. В качестве технологической основы будет использована библиотека PDK от компании «Микрон» на основе технологического процесса 250 нм с рабочим напряжением 3,3 В.

ИОН реализован со следующими характеристиками:

- выходное напряжение 1,25 В, что соответствует стандартным требованиям для большинства цифровых и аналоговых приложений;
- основная погрешность ±1 %, обеспечивающая высокую точность регулирования напряжения для точных и чувствительных приложений;
- температурная погрешность 50 ppm/°C, что свидетельствует о стабильности работы устройства в условиях изменения температуры, минимизируя отклонения выходного напряжения;
- температурный диапазон от −60 до 125°C, позволяющий использовать устройство в обычных рабочих условиях, охватывающих широкий диапазон температур;
- принцип работы bandgap, который обеспечивает надежную и предсказуемую работу устройства за счет использования биполярных технологий для

создания стабильного выходного напряжения, практически не зависящего от температуры.

Литература

1. Русанов А. В., Сопина Л. В. Источник опорного напряжения на ширине запрещенной зоны для отечественного технологического процесса // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2023. — № 3. — С. 84–89.

УДК 621.3.049.771.14+004.312.42

Особенности проектирования многоразрядных триггеров для уменьшения потребляемой мощности в базисе отечественной полупроводниковой технологии с проектными нормами 250 нм

Ильин С. А., Ласточкин О. В., к. т. н., Харламова М. В.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
mkharlamova@niime.ru

В работе представлены основные подходы к проектированию многоразрядных триггеров по отечественной технологии с проектными нормами 250 нм. Проведен анализ и сравнение характеристик одно- и многоразрядных триггеров. Уменьшена мощность утечки и площадь элемента.

Ключевые слова: многоразрядный триггер; потребляемая мощность; топологический конструктив; библиотеки стандартных цифровых элементов.

В связи с постоянным ростом плотности упаковки интегральных схем и увеличением тактовой частоты одной из ключевых задач разработчиков остается минимизация площади и энергопотребления отдельных блоков и кристалла в целом [1]. Одним из перспективных методов решения данной задачи является применение многоразрядных триггеров — устройств, позволяющих снизить суммарную мощность и значительно сократить количество отдельных нагрузок на дерево тактовых сигналов. Требуемые характеристики могут достигаться за счет временных параметров и соблюдения более строгих условий для размещения таких элементов при проведении физического синтеза. Многоразрядные триггеры широко применяются в различных энергоэффективных устройствах, схемах специального назначения, сдвиговых регистрах, счетчиках и т. д. [2].

В работе [3] описаны принципы проектирования многоразрядных триггеров и показана эффективность их применения в базисе полупроводниковой технологии КМОП 28 нм. Задача минимизации площади и снижения энергопотребления также актуальна для технологий уровня 250–180 нм.

При разработке многоразрядных триггеров за основу берется схема одноразрядного триггера. В результате объединения одноразрядных триггеров в один многоразрядный путем сокращения количества инверторов снижается суммарная динамическая мощность и общая площадь, занимаемая триггером. Многоразрядные триггеры подразделяются на два вида: со встроенной сканирующей цепью и с раздельными сканирующими входами. В данной работе за основу была взята схема одноразрядного D-триггера со сканирующим входом.

В ходе исследования в базисе технологии КНИ 250 определен топологический конструктив, основанный на расположении разрядов триггера не в ряд по горизонтали, а в высоту. Сформированные таким образом «этажи» обеспечивают минимизацию использования второго металла в топологии схемы, сохраняя при этом исходную площадь.

Для разработанных многоразрядных триггеров были проведены измерения основных параметров в сравнении со своими одноразрядными аналогами в пересчете

на разряд. Результаты исследования показали, что мощность утечки 2-разрядного триггера уменьшилась на 13%, при этом наблюдается увеличение занимаемой площади на 3%. В 4- и 8-разрядных триггерах мощность утечки сократилась 27% при уменьшенной площади на 6%.

Получены результаты по проектированию многоразрядных триггеров в базисе отечественной технологии с нормами 250 нм. Проведенное исследование закладывает базис для дальнейшего поиска и реализации более эффективных по площади, потреблению питания и повышению быстродействия реализаций многоразрядных триггеров с перспективой адаптации выработанных решений на отечественные технологии с проектными нормами 180/90 нм. Основные направления для улучшения характеристик находятся в области модификации общей структуры и трассировки внутренних цепей топологии, а также в масштабировании количества разрядов триггера.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.
2. Sai Krishna K., Bhanuprakash B., Shakthi Ganesh P., Sudha D. Probability Driven Double-Edge Triggered Multibit Flip Flop and Clock Gating Integration // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), May 2024. Vol. 12 (Issue V). P. 1193–1201. DOI: 10.1109/TVLSI.2016.2614004.
3. Ильин С. А., Копейкин Д. Ю., Ласточкин О. В., Шипицин Д. С. Основные принципы проектирования и методика применения многоразрядных триггеров на примере технологии КМОП 28 нм // Российский форум «Микроэлектроника-2022». Сборник тезисов 8-й научной конференции, Роза Хутор, 02–08 октября 2022 года. — М.: Техносфера, 2022. — С. 305–307.

УДК 621.3.049.771.14

Подход к разработке библиотек стандартных цифровых элементов для проектирования энергоэффективных ИС с использованием методологии Logical Effort

Ильин С. А.[1], Кобышев А. Е.[1,2], Ласточкин О. В.[1], к. т. н.
[1] АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
silin@niime.ru, akobyshev@niime.ru, lastochkin@niime.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В статье рассмотрен подход к разработке библиотек стандартных цифровых элементов для проектирования энергоэффективных интегральных схем (ИС). Предлагается метод одновременной оптимизации мощности и задержки переключения с использованием пониженного напряжения питания и методологии Logical Effort.

Ключевые слова: Logical Effort; PDP; энергоэффективность; динамическая мощность; библиотека стандартных ячеек; задержка переключения.

Одним из наиболее популярных подходов к проектированию цифровых ИС является использование библиотек стандартных элементов [1]. Библиотека стандартных элементов — это совокупность ячеек в количестве от нескольких сотен до нескольких тысяч, каждая из которых реализует конкретную логическую функцию, обладает уникальными электрофизическими характеристиками и в совокупности формирует полный логический базис. В зависимости от назначения библиотеки могут быть использованы для построения быстродействующих, энергоэффективных или универсальных ИС. В процессе разработки важным этапом является поиск оптимального соотношения между ключевыми характеристиками (в первую очередь задержками и потребляемой мощностью).

Одним из существующих методов построения быстродействующих логических вентилей является Logical Effort [2]. Главная особенность метода — быстрая оценка задержки без схемотехнического моделирования. Задержка представляется в виде $t = (gh + p) \cdot \tau$, где где τ — внутренняя задержка минимального инвертора, g — константа для конкретного класса логических функций, h — отношение выходной и входной емкостей, p — нормализованная паразитная задержка.

Помимо задержки необходимо учитывать потребляемую мощность, которую принято делить на динамическую и статическую. Динамическая связана с зарядом/разрядом емкостных структур КМОП и квадратично зависит от напряжения питания [3]. Статическая постоянна и зависит от состояния входов. В работах [3, 4] показано, что снижение напряжения питания на 15 % снижает потребляемую мощность на 41 %, утечку на 28 % и увеличивает задержку на 28 %. Компромисс может быть найден посредством изменения архитектуры логического вентиля или размеров транзисторов.

В качестве целевой функции было выбрано произведение средней задержки переключения входов на среднюю потребляемую мощность за период или PDP (от англ. *Power-Delay Product*). Применение такой функции и объединение метода

Logical Effort с пониженным напряжением питания позволяет найти баланс между снижением энергопотребления и уменьшением производительности [4, 5].

Была спроектирована экспериментальная библиотека стандартных ячеек по технологии КМОП 90 нм из 20 логических элементов и триггеров, представляющих основные классы логических вентилей с разными коэффициентами разветвления по выходу. Анализ результатов структурного синтеза на тестовых проектах показал уменьшение энергопотребления на 51 %, площади на 17 % и метрики PDP на 10 % в сравнении с исходной библиотекой стандартных элементов, что подтверждает обоснованность предлагаемых решений.

В работе рассмотрены актуальные способы снижения энергопотребления стандартных ячеек. Предложен подход, объединяющий преимущества одновременной оптимизации динамической мощности и средней задержки переключения, на основе целевой функции PDP, использования пониженного напряжения питания и методологии Logical Effort.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 4 (168). — С. 16–41.
2. Sutherland I., Sproull B., Harris D. Logical Effort: Design Fast CMOS Circuits. Morgan Kaufmann publishers, 1999. 256 p.
3. Ильин С. А., Коршунов А. В., Гарбулина Т. В. Сравнительный анализ энергоэффективности библиотек по технологии FinFET 7 нм // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2020. — № 4. — С. 169–173. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-169-173.
4. Заплетина М. А., Ильин С. А., Ласточкин О. В. Алгоритм оптимизации энергопотребления стандартных ячеек на основе методологии Logical Effort // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2021. — № 3. — С. 34–38. DOI: 10.31114/2078- 7707-2021-3-34-38.
5. Maheshwari S., Patel J., Nirmalkar S. K., Gupta A. Logical effort based power-delay-product optimization // 2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2014. DOI: 10.1109/icacci.2014.6968530.

УДК 621.3.061

Разработка отечественного импортозамещающего программного средства LVS-верификации топологии интегральных схем

Живчикова Ю. А.[1], Любимцев Д. О.[2], Смирнов С. А.[2], Старостин Н. В.[2], д. т. н.
[1] Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
607188, г. Саров, просп. Мира, 37
zhivchik96@mail.ru
[2] Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

В рамках создания отечественной САПР аналоговых ИС ведется разработка системы LVS-верификации (сравнения топологии со схемой электрической принципиальной). Приведены функциональные требования к системе, архитектура, описание основных алгоритмов, результаты апробации на индустриальных кейсах.
Ключевые слова: LVS; сравнение со схемой электрической принципиальной; топология аналоговых интегральных схем; верификация; САПР; ИС.

На этапе проектирования топологии интегральной схемы возможно возникновение ошибок соединения цепей между элементами. Данные ошибки могут приводить как к нарушениям работы исходной схемы электрической принципиальной (например, изменению логики работы для цифровых схем или неправильному режиму работы для аналоговых схем), так и к полной неработоспособности изделия (например, замыканию цепей питания).

Для исключения подобных ошибок и обеспечения гарантии работоспособности микросхемы необходимо выполнять LVS-верификацию. Ее цель — выявление несоответствий разработанной топологии и схемы электрической принципиальной. Учитывая указанные негативные последствия, данный этап проектирования интегральных схем критически важен.

В настоящее время на отечественном рынке программного обеспечения отсутствуют продукты для LVS-верификации аналоговых интегральных схем. Использование широко применяемого ранее зарубежного ПО под запретом.

В рамках создания отечественной САПР аналоговых интегральных схем совместным научным коллективом филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова» и ННГУ им. Н. И. Лобачевского ведется разработка отечественной системы LVS-верификации, нацеленной на замещение таких программных продуктов, как Calibre (ф. Mentor Graphics), Diva, Assura, PVS (ф. Cadence Design Systems), IC Validator (ф. Synopsys). Достигнуты следующие результаты:

- разработана архитектура, предусматривающая возможность интеграции системы в другие программные решения;
- разработан алгоритм извлечения электрической связности (цепей) из топологии аналоговой интегральной схемы (с учетом одно- и двунаправленных соединений);

- разработан алгоритм извлечения полупроводниковых приборов из топологии аналоговой интегральной схемы;
- разработан алгоритм формирования списка связей, извлеченного из топологии аналоговой интегральной схемы;
- разработаны алгоритмы предварительной обработки списков связей топологии и схемы электрической принципиальной для уменьшения размерности (редукции): объединение параллельно/последовательно соединенных приборов с пересчетом их характеристик, удаление лишних элементов;
- выполнена реализация прототипа системы.

На индустриальных проектах (технология КМОП-КНИ 0,35 мкм) проведена апробация функционала по извлечению списка полупроводниковых приборов и их связей из топологии, функционала по редукции списков связей. Подтверждение корректности разработанных алгоритмов производилось путем сравнения результатов работы прототипа системы с результатами работы референсной САПР (Calibre, Mentor Graphics).

УДК 004.42

Алгоритм размещения СБИС на ПЛИС на основе метода группировки путей с учетом архитектурных особенностей

Шокарев Д. Б., Чочаев Р. Ж., Железников Д. А., к. т. н.
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1
shokarev.d.b@yandex.ru

Разработан алгоритм размещения на ПЛИС, позволяющий оптимизировать задержки проектируемых схем, и описан принцип его работы. Выполнена программная реализация алгоритма и проведено его тестирование. Результаты экспериментов показали, что разработанный алгоритм позволяет в среднем на 5,6 % сократить задержку критического пути.
Ключевые слова: ПЛИС; размещение; автоматизация проектирования.

Благодаря тому что логика работы программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) задается не при производстве, а посредством программирования пользователем, они нашли свое применение как в прототипировании, так в изготовлении полноценных устройств. Поскольку доступ к зарубежным ПЛИС затруднен, возрастает необходимость в разработке российских аналогов. Ввиду того что каждая ПЛИС обладает своими архитектурными особенностями, необходимость использования отечественных ПЛИС требует разработки собственных систем автоматизированного проектирования (САПР) [1].

Одним из ключевых этапов маршрута проектирования в базисе ПЛИС является этап размещения. Задачей данного этапа является назначение элементов проектируемой СБИС таким образом, чтобы обеспечить трассируемость и наилучшие значения параметров схемы, одним из которых является быстродействие.

Одними из основных трудностей разработки современных САПР для проектирования на ПЛИС являются:

1) сложность учета архитектуры ПЛИС ввиду наличия иерархии и различных сложнофункциональных (СФ) блоков;
2) сложность архитектуры ПЛИС приводит к необходимости наложения разнообразных временных ограничений.

Проблема заключается в том, что классические алгоритмы размещения элементов не позволяют учесть ни сложность архитектуры ПЛИС, ни пользовательские временные ограничения. Алгоритмы, применяемые в коммерческих САПР, в свою очередь направлены на максимальную оптимизацию схем для архитектур зарубежных ПЛИС, поэтому их реализация в российских САПР будет неэффективной. В данной работе для решения проблемы были разработаны:

- метод группировки путей для учета пользовательских временных ограничений, позволяющий корректно оценивать критичность путей в проектируемых схемах;
- алгоритм размещения на ПЛИС на основе метода группировки путей, позволяющий оптимизировать задержки проектируемых схем.

Предложенный алгоритм был программно реализован и протестирован на различных тестовых схемах, включая схемы из наборов ISCAS-85 [2], ISCAS-89 [3], IWLS 2005 [4]. Эксперименты показали, что разработанный алгоритм размещения

на основе метода группировки путей позволяет сократить задержки критических путей проектируемых схем в среднем на 5,6 % по сравнению с размещением без оптимизации задержек, в то время как классическая реализация алгоритма дает сокращение в среднем на 1,28 %.

Литература

1. Гаврилов С. В., Железников Д. А., Заплетина М. А., Тиунов И. В., Хватов В. М., Чочаев Р. Ж., Шокарев Д. Б. Разработка доверенных средств проектирования ИС в базисе гетерогенных ПЛИС // Труды Института системного программирования РАН, 2023. — Т. 35. — № 5. — С. 107–126. https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-35(5)-8.
2. Brglez F. A neutral netlist of 10 combinational benchmark circuits and a target simulator in Fortran // International Symposium on Circuits and Systems, 1985. P. 695–698.
3. Brglez F., Bryan D., Kozminski K. Combinational profiles of sequential benchmark circuits // 1989 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). IEEE, 1989. P. 1929–1934.
4. Albrecht C. IWLS 2005 benchmarks // International Workshop for Logic Synthesis (IWLS), 2005. Vol. 9.

УДК 621.382

Методика проверки аутентичности микросхем на основе анализа динамического энергопотребления

Рогачев В. А., Горбоконенко П. А., Гераськин А. А., Певцов Е. Ф.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Предложен неинвазивный метод контроля аутентичности микросхем, основанный на регистрации временных изменений тока потребления в начальный момент времени работы микросхемы. В качестве объектов исследования выбраны коммерческий микроконтроллер STM32F107 и его бинарно совместимый аналог GD32F107
Ключевые слова: контрафакт; интегральные схемы; ток энергопотребления; STM32; GD32.

Важный этап при разработке аппаратной части электронного устройства — это выбор электронной компонентной базы (ЭКБ). Во многом качество и безопасность аппаратуры определяются надежностью и функциональностью выбранной ЭКБ [1]. В текущих условиях, когда прямая работа с зарубежными производителями фактически заблокирована, а цепочка поставок непрозрачна и уязвима, актуальной проблемой является выявление контрафактной ЭКБ [2].

Исследования в этой области делятся на два основных подхода — разработка и встраивание контрольных блоков в микросхему на этапе разработки [3], а также выявление сигнатурных особенностей микросхемы после ее производства [4].

В настоящей работе предложен метод контроля аутентичности микросхемы на основе анализа тока потребления. Так как изменение тока потребления в конечном счете определяется совокупностью переключающихся транзисторов с учетом их электрических параметров, можно выдвинуть тезис о явной зависимости его от топологии интегральной схемы.

В результате работы показана применимость метода как для оценки аутентичности образцов микросхем одного типономинала, так и для проведения поиска контрафактных микросхем среди функционально идентичных копий.

Литература

1. Рыков И. Как выявить контрафактные электронные компоненты? // Технологии в электронной промышленности, 2013. — № 4 (64). — С. 38–42. EDN QASLLD.
2. Покатаева Е., Петровская Е. Импортозамещение и обеспечение качества // Электроника: Наука, технология, бизнес, 2018. — № 4 (175). — С. 34–41. DOI: 10.22184/1992-4178.2018.175.4.34.41. EDN UQEFZS.
3. Дураковский А. П., Кессаринский Л. Н., Ширин А. О. Развитие терминологии нормативной базы испытаний на выявление признаков контрафакта в изделиях электронной компонентной базы аппаратуры объектов критической информационной инфраструктуры // Безопасность информационных технологий, 2020. — Т. 27. — № 1. — С. 19–27. DOI: 10.26583/bit.2020.1.02. EDN DNXOAT.
4. Guin Ujjwal, Daniel DiMase and Mohammad Tehranipoor. Counterfeit integrated circuits: Detection, avoidance, and the challenges ahead // Journal of Electronic Testing, 2014. Vol. 30. P. 9–23. DOI: 10.1007/s10836-013-5430-8.

УКД 004.942

Способ повышения точности моделирования специализированных вычислений с плавающей запятой в маршруте цифрового проектирования

Кузнецова Е. Ю.[1,2], Гаращенко А. В.[2,3], Крюков П. И.[1,2]
[1] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[2] ПАО «Сбербанк России»
117312, г. Москва, ул. Вавилова, 19
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

На основе обзора и сравнения подходов к разработке бит-точных моделей арифметических операций типов с плавающей запятой пониженной точности в работе предложен способ повышения точности, базисом которого является формальная модель вычислений операций в стандартных типах IEEE 754 с применением линейного оператора.

Ключевые слова: моделирование; арифметика с плавающей запятой; FP8.

Введение

Для повышения производительности вычислений современные специализированные устройства активно применяют нестандартные типы с плавающей запятой пониженной точности, такие как FP8 [1] или BrainFP [2]. Отсутствие бит-точных моделей арифметических операций усложняет разработку и валидацию программных инструментов и алгоритмов, поэтому ставится задача моделирования гостевой арифметики с плавающей запятой, отличающейся от хозяйской [3], которая должна отвечать заданным характеристикам по бит-точности, скорости работы и сложности интеграции в существующие симуляторы. В настоящее время для моделирования нестандартных типов используются следующие методы: эмуляция через FP32, библиотека Berkeley Softfloat, специализированные бит-точные модели, трансляция Verilog HDL.

На основе анализа в работе предложен новый способ, базисом которого является вычисление операций в FP32 с последующим округлением и применением линейного оператора, представляющего из себя выбор режима округления.

Формирование эталонного набора данных FP8

Рассмотрим матричное умножение GPU Nvidia с поддержкой тензорных вычислений. Декомпозиция на базовые арифметические операции позволяет формализовать модель вычислений матричного умножения и создать эталонные данные, являющиеся результатом операций с входными аргументами, покрывающими весь диапазон значений. В качестве предмета исследования из-за малой размерности были выбраны типы FP8_E4M3 и FP8_E5M2. Важно отметить, что результатом матричных операций в FP8 является матрица в формате FP16.

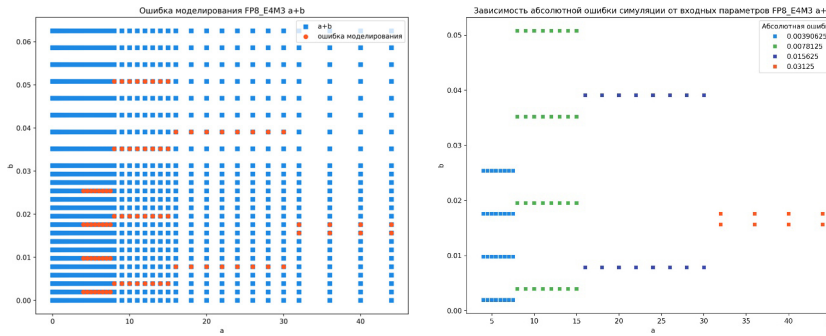
Результаты моделирования для FP8 получены с использованием эмуляции операций в формате FP32 с последующим округлением на тех же входных аргументах. Ошибкой моделирования назовем количество отклонений результатов

моделирования от эталонных данных (табл. 1, рис. 1). Из таблицы следует, что сложение в FP8_E4M3 представляет больший интерес для исследования [6]:

$$a \oplus b \neq ToFP32(a) \oplus ToFP32(b), \quad \forall a,b \in FP8_{E4M3}.$$

Таблица 1. Ошибка моделирования FP8

Тип	Операция	Тип	Ошибка моделирования	Относительная ошибка
FP8_E4M3	+	FP8_E5M2	2010	3,09 %
FP8_E4M3	+	FP8_E4M3	2016	3,10 %
FP8_E4M3	*	FP8_E5M2	60	0,09 %
FP8_E4M3	*	FP8_E4M3	0	0,00 %



а *б*

Рис. 1. Визуализация ошибки моделирования FP8_E4M3 для ограниченного диапазона (*а*) и зависимость значения абсолютной ошибки моделирования от входных параметров FP8_E4M3 (*б*)

В данной работе демонстрируется, что весь диапазон вычислений можно охватить четырьмя режимами округления. Режимы можно представить как элементы множества $Rm = \{R_1, R_2, R_3, R_4\}$, где каждому элементу соответствует определенный тип округления. Для формального описания данной системы предлагается линейный оператор $\mathcal{L}$: $R^2 \rightarrow Rm$, ставящий в соответствие каждым входным операндам $(a, b) \in R^2$ режим округления $R_i \in Rm$. Этот подход обеспечивает полное покрытие всех возможных значений при выполнении арифметических операций.

Эксперименты с большей размерностью показали, что при моделировании операций с размером экспоненты меньше, чем у формата FP32, возникают ограничения, связанные с выходом промежуточных результатов вычислений за границы представимости целевого формата с меньшей точностью. Для успешного моделирования типов данных, соответствующих стандарту IEEE 754 и имеющих одинаковый размер экспоненты с FP32, необходимо использовать тип округления, согласованный со стандартом.

Заключение

На основании проведенного исследования предлагается подход моделирования арифметики с плавающей запятой, ключевым результатом которого является формализация процесса моделирования FP8 с использованием различных режимов округления. Экспериментально доказано, что моделирование BrainFP16 и FP16 (с добавлением дополнительной проверки) через FP32 с режимом округления RNE обеспечивает бит-точность при минимальных вычислительных затратах (см. табл. 2).

Таблица 2. Итоговый сравнительный анализ

Метод	Точность	Во сколько раз скорость работы больше относительно метода FP32 +округление
Предложенный способ	99,8 %	1,04
FP32 + округление	95 %	1,00
SoftFloat	95 %	1,27
Собственные бит-точные модели	100 %	>2,5
Verilator	100 %	>10,0

Литература

1. Micikevicius P. et al. FP8 Formats for Deep Learning // arXiv:2209.05433, 2022.
2. Dhiraj Kalamkar et al. A Study of BFLOAT16 for Deep Learning Training // arXiv:1905.12322, 2019.
3. Речистов Г. Программное моделирование вычислительных систем: учебное пособие, 2023. — 396 с.
4. Berkeley SoftFloat-3 // GitHub — 2017. URL: https://github.com/ucb-bar/berkeley-softfloat-3.
5. IEEE Std 754-2019 IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic, 2019. URL: https://standards.ieee.org/ieee/754/6210.
6. Valpey B., Li X., Pai S., Gopalakrishnan G. An SMT Formalization of Mixed-Precision Matrix Multiplication Modeling Three Generations of Tensor Cores // arXiv:2502.15999, 2025.

УДК 621.382.3

Методика контроля воспроизводимости via/contact-структур в аналого-цифровом маршруте при разработке комплектов средств проектирования (КСП)

Девятков В. Ю., Надин А. С., Загидуллина О. Р.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
vdevyatkov@niime.ru, anadin@niime.ru, ozagidullina@niime.ru

В докладе рассмотрена методика контроля воспроизводимости контактных окон (via/contact) структур в аналого-цифровом маршруте в жизненном цикле выпуска комплекта средств проектирования (КСП).
Ключевые слова: КСП; тестирование; via/contact; регрессионное тестирование; обратная совместимость; интегральные схемы.

Чаще всего под регрессионным тестированием PDK подразумевают ограниченный круг задач в части верификации изменений в конструкторско-технологических ограничениях (КТО, DRC — Design Rule Check) [1–2]. Однако изменения в остальных модулях КСП также могут повлиять на обратную совместимость. Рассмотрим, например, изменения в технологическом файле, которые приводят к увеличению минимального расстояния между via. Это не вызовет ошибок по DRC, но может нарушить целостность проекта, разработанного на предыдущей версии КСП, и потребует полной его переработки (перепроектирования). Для решения данной задачи коллективом авторов была разработана процедура контроля воспроизводимости via/contact, которая позволяет контролировать изменения в генерации контактных окон, а также сократить временные затраты на проверку контактных структур и минимизировать человеческий фактор. Контактные окна via/contact являются частью технологической библиотеки, они определяются в технологическом файле, затем компилируются в топологические ячейки. Ранее для тестирования данных структур на соответствие техническим требованиям осуществлялась мануальная проверка: в ручном режиме проверялись контактные окна для каждого набора параметров во множестве их вариаций. Данный подход сопровождался существенными временными затратами на процедуру тестирования, сложностью реализации регрессионного тестирования и риском пропуска ошибки из-за большого объема анализируемых данных и человеческого фактора. Для устранения этих проблем была разработана и внедрена процедура автоматической генерации тестовых ячеек с контактными окнами (via/contact), что существенно повышает производительность труда, а также снижает время, необходимое для тестирования, и, как следствие, сводит к минимизации риска человеческого фактора.

Процедура построчно анализирует технологический файл и составляет перечень структур, которые необходимо протестировать. На основе полученных данных она генерирует тестовые ячейки, содержащие контактные окна (via/contact) структуры с различными вариациями их параметров. Затем в автоматическом режиме эта процедура запускает проверку на соответствие конструкторско-технологическим нормам (DRC) и экспортирует полученные результаты в формате GDS для дальнейшего проведения регрессионного анализа полученных структур. Это позволяет в кратчайшие сроки увидеть изменения технологического файла

по сравнению с предыдущей версией в части секции контактных окон (via/contact) и верифицировать полученные результаты в удобном для пользователя формате.

Разработанная процедура обеспечивает контроль изменений в технологическом файле, связанных с генерацией контактных окон (via/contact), помогает снизить время, необходимое на проверку данных структур, а также минимизирует влияние человеческого фактора за счет автоматизации процесса генерации тестовых ячеек и контроля их обратной совместимости.

Литература

1. Загидуллина О. Р., Надин А. С. Анализ «ложных» ошибок DRC при регрессионном тестировании командных файлов // Наноиндустрия, 2021. — Т. 14. — № S7 (107). — С. 817–818.
2. Загидуллина О. Р., Надин А. С., Трифанихина И. Е., Шипицин Д. С. Специализированное программное обеспечение для автоматизированного тестирования и верификации PDK // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук, 2019. — Т. 9. — № 4. — С. 80–84. DOI: 10.25682/NIISI.2019.4.0011. EDN TYGPQW.

УДК 621.3.049.7

Разработка микроэлектромеханических логических вентилей

Соловьев А. А.[1], к. т. н., Певцов Е. Ф.[1], к. н., Колчужин В. А.[2]
[1] МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78
solovev_aa@mirea.ru
[2] QORVO Munich GmbH,
81829, Германия, г. Мюнхен, площадь Конрада Цузе, 1

Разработаны прототипы логических микроэлектромеханических вентилей на основе гребенчатых резонаторов, выполняющие логические операции ИЛИ-НЕ, Исключающее ИЛИ, И. Предложен сквозной маршрут проектирования МЭМС и методика разработки системных моделей микрорезонаторов на языках VHDL-AMS и Verilog-A.

Ключевые слова: МЭМС; микроэлектромеханические системы; резонаторы; системные модели.

Для работы микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков ускорения и угловой скорости необходимы управляющие схемы, обеспечивающие возбуждение чувствительного элемента, обработку сигнала, калибровку и передачу данных. Схемы на традиционной КМОП-технологии имеют ограничения по масштабируемости и энергоэффективности, особенно в экстремальных условиях эксплуатации [1]. Актуальной задачей является поиск альтернативных вычислительных технологий. Перспективным направлением является разработка логики, совместимой с технологией изготовления МЭМС-датчиков.

В работе представлены результаты моделирования, разработки и экспериментального исследования прототипов логических МЭМС-вентилей на основе гребенчатых резонаторов. Маршрут конструирования МЭМС-вентилей состоит из пяти этапов [2].

1. Аналитический расчет. Разработаны модели МЭМС-резонаторов с электростатическим приводом на языке VHDL-AMS. Модели интегрированы в схемотехнический симулятор для анализа статических, частотных и динамических характеристик на системном уровне. Оценена физическая реализуемость и определены требования к параметрам устройства.
2. Создание трехмерной модели. Разработана геометрическая конструкция перепрограммируемого логического элемента на основе МЭМС-резонатора с перфорированной Н-образной инерционной массой, закрепленной на неподвижных анкерах с помощью четырех упругих П-образных подвесов с ограничителями максимального перемещения. Конструкция содержит 324 емкостные ячейки с поперечным перемещением, работающие по принципу перекрытия зазора, которые образованы с помощью гребенчатых структур с начальным смещением электродов, расположенных на инерционной массе и симметричных неподвижных боковых электродах.
3. Моделирование на уровне схемы. Созданы компактные модели МЭМС-резонаторов на языке Verilog-A для анализа динамических характеристик логических МЭМС-вентилей с управляющей и считывающей электроникой на системном уровне. Разработана библиотека моделей многовходовых

МЭМС-вентилей для реализации функционально полного набора логических операций (И, ИЛИ-НЕ, Исключающее ИЛИ, инвертор) и проектирования цифровых схем. Библиотека интегрирована в отечественные и зарубежные современные системы проектирования интегральных схем. Результаты моделирования продемонстрировали возможность перепрограммирования выполнения логических операций во время работы.

4. Топологическое проектирование. Разработан топологический чертеж с учетом технологических норм, правил производства и с уменьшенными паразитными емкостями между электродами. Произведена коррекция фотолитографических масок для компенсации эффекта подтравливания.
5. Изготовление прототипов с использованием технологии глубокого реактивного ионного травления. Проведено экспериментальное исследование характеристик МЭМС-вентилей, анализ выхода годных, сравнение с результатами моделирования и корпусирование.

Результатом работы является кремниевая интегральная схема с Н-образными гребенчатыми многовходовыми резонаторами (рис. 1), функционирующими при атмосферном давлении в частотном диапазоне 40 и 110 кГц. Интегральные схемы помещены в отечественные металлокерамические корпуса.

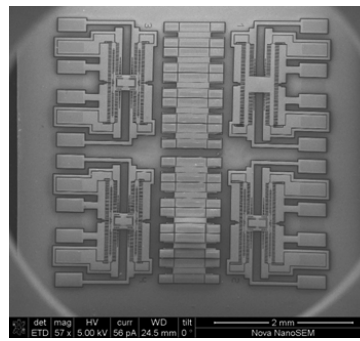


Рис. 1. Изображение интегральной схемы с Н-образными гребенчатыми резонаторами сканирующего электронного микроскопа

Н-образная форма инерционной массы и П-образные подвесы обеспечили режим колебаний преимущественно только вдоль продольной оси и позволили увеличить частотный интервал между основной (первой) и паразитной (второй) модами колебаний. Устройства демонстрируют добротность порядка 20 при атмосферном давлении и чувствительность к изменению емкости, обусловленной движением инерционной массы, на уровне 930 пФ/мкм.

Литература

1. Fariborzi H. et al. Relays do not leak: CMOS does // Proc. 50th Annu. Design Automat. Conf. (DAC), 2013. P. 1–4.
2. Kolchuzhin V. Methods and Tools for Parametric Modeling and Simulation of Microsystems based on Finite Element Methods and Order Reduction Technologies // Dissertation. Technische Universität Chemnitz, 2010.

УДК 519.718.2+004.332.3

Разработка каскадного кода коррекции ошибок в матрицах энергонезависимой памяти ReRAM

Петрова С. И.[1,2], **Теплов Г. С.**[1,2]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
[2] *Московский физико-технический институт*
(национальный исследовательский университет)
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Разработана модель каскадного кода, построенная на основе самокорректирующихся кодов Хэмминга и Рида — Соломона. Исходя из статистики возникновения ошибок в матрицах памяти ReRAM расчитано необходимое количество аппаратной избыточности. Реализован каскадный код для матриц размерами 3 Кбита и 1 Мбит.

Ключевые слова: матрицы памяти; каскадный код; код Хэмминга; код Рида — Соломона.

В настоящее время исследовательскими технологиями энергонезависимой памяти ReRAM обладают порядка десятка компаний во всем мире [1], однако переход к коммерческим технологическим решениям на основе данного типа памяти затруднен в связи с различными факторами, влияющими на надежность устройств. Одним из таких факторов является разброс по количеству операций записи от устройства к устройству. Повышение отказоустойчивости ReRAM при наличии разброса данного параметра является одним из необходимых условий перевода технологии ReRAM из экспериментальной в промышленную. Данную задачу возможно решить аппаратно, используя самокорректирующиеся коды [2], которые за счет добавления избыточных битов позволяют обнаружить и исправить ошибки, возникающие в ячейках матрицы памяти.

Базовый подход к использованию самокорректирующихся кодов в матрицах памяти предполагает использование кода Хэмминга как наиболее легко реализуемого схемотехнического решения [3], однако классическая версия кода Хэмминга позволяет исправить не более одной ошибки в слове матрицы памяти. В одной из предыдущих работ [4] была получена статистика возникновения ошибок, согласно которой даже при высоких процентах выхода годных ячеек существует вероятность возникновения множественных ошибок в словах матрицы памяти. Такие ошибки впоследствии приводят к отказу всей матрицы. Существуют различные модификации кода Хэмминга, позволяющие исправлять множественные ошибки в словах матрицы памяти. Однако они не подходят для решения нашей задачи, поскольку либо исправляют смежные множественные ошибки [5], либо позволяют лишь обнаружить множественную ошибку в слове, не исправляя ее [6].

Для исправления множественных ошибок в слове возможно использование кодов Боуза — Чоудхури — Хоквингема (БЧХ), частным случаем которых является код Рида — Соломона [7]. Данный код работает не с отдельными битами, а с блоками битов, благодаря чему появляется возможность коррекции сразу нескольких отдельных битов в пределах одного блока. Однако для коррекции одного такого

блока необходимо добавить еще два избыточных, именно поэтому нерационально исправлять одинарные ошибки в слове при помощи кода Рида — Соломона.

Таким образом, для коррекции всех ошибок в матрице памяти с оптимальными затратами аппаратной избыточности был построен каскадный код. На внешней ступени каскадного кода используется код Рида — Соломона, способный исправлять множественные ошибки в словах матрицы памяти и декодирующийся по авторегрессивному спектральному методу [8], являющемуся оптимальным для решения поставленной задачи. На внутренней ступени каскадного кода — классический код Хэмминга, позволяющий исправить одинарные ошибки с минимальными затратами аппаратной избыточности.

Литература

1. Choe J. Memory technology 2021: Trends & challenges // SISPAD. IEEE, 2021. P. 111–115.
2. MacWilliams F. J., Sloane N. J. A. The theory of error-correcting codes. Elsevier, 1977. Vol. 16.
3. Rurik W., Mazumdar A. Hamming codes as error-reducing codes // 2016 IEEE ITW. IEEE, 2016. P. 404–408.
4. Петрова С. И., Теплов Г. С. Расчет вероятности возникновения множественных ошибок при циклировании в словах матриц памяти ReRAM в зависимости от выхода годных ячеек // Труды 66-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Электроника, фотоника и молекулярная физика. — М.: Физматкнига, 2024. — С. 300.
5. Еремеев П. М. Использование кода Хэмминга для исправления двойных сбоев в смежных разрядах памяти в аппаратуре космического назначения // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2015. — Т. 20. — № 3. — С. 321–322.
6. Тельпухов Д. В. и др. Применение кода Хэмминга в задаче повышения сбоеустойчивости комбинационных схем // Известия Южного федерального университета, 2021. — № 4 (221). — С. 220–231.
7. Wicker S. B., Bhargava V. K. (ed.). Reed-Solomon codes and their applications. John Wiley & Sons, 1999.
8. Гришко А. К. Управление достоверностью передачи данных в информационных системах // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2015. — Т. 1. — С. 218–219.

УДК 004.5

Способы реализации тактильной обратной связи между оператором и робототехническим комплексом

Гладченко А. А., Тельминов О. А., к. т. н.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
agladchenko@niime.ru

В работе рассматриваются современные методы реализации тактильной обратной связи в системах человек — машина для робототехнических комплексов. Проведен сравнительный анализ актуаторов, а также предложены комбинированные схемы для повышения точности и адаптивности интерфейсов управления.

Ключевые слова: оператор; робот; обратная связь; ЧМИ; актуаторы.

Современные человеко-машинные интерфейсы (ЧМИ) в условиях высокой сенсорной нагрузки и ограниченного внимания оператора требуют поиска дополнительных каналов взаимодействия. Тактильная обратная связь (ТОС) представляет собой перспективный способ передачи информации через кожные рецепторы, обеспечивая параллельную и немедленную подачу сигналов вне зависимости от визуального и акустического восприятия [1].

Однако актуальность ТОС выходит за рамки чисто сенсорного взаимодействия. Тактильные стимулы могут оказывать влияние на физиологические параметры, непосредственно связанные с состоянием центральной нервной системы (ЦНС), включая пульс, дыхание, глазодвигательные реакции и мышечный тонус. Эти параметры определяют уровень бдительности, когнитивной активности и готовности оператора к действию.

Целью настоящей работы является исследование влияния различных видов тактильной стимуляции на физиологическое состояние оператора в контексте управления робототехническими комплексами (РТК).

Сформулированы следующие гипотезы:

1) электрическая стимуляция активирует симпатическую нервную систему, вызывая учащение пульса и дыхания, усиливая мышечный ответ и повышая точность глазодвигательных реакций;
2) вибрационная стимуляция способствует активации сенсорных рецепторов кожи, что ведет к усилению внимания и снижению признаков умственной усталости [2];
3) комбинированное воздействие (вибрация + электрический сигнал) вызывает синергетический эффект, обеспечивая более быстрое восстановление концентрации и устойчивость к сенсорной нагрузке;
4) тактильная имитация текстур помогает оператору интуитивно различать состояния интерфейса, снижая когнитивную нагрузку и повышая адаптивность к изменяющимся условиям работы.

ТОС может быть реализована с использованием различных технологий:

1) микромеханических виброактуаторов (ERM, LRA);
2) пьезоэлектрических элементов с высокой локализацией;
3) электростатических поверхностей для создания текстур;

4) бесконтактной ультразвуковой стимуляции.

Каждый тип стимуляции требует индивидуального подхода к размещению, управлению и оценке эффективности. Предлагается построение адаптивной системы, в которой параметры стимуляции автоматически подстраиваются под физиологические реакции оператора.

В качестве экспериментальных задач предложено:

1) проводить регистрацию физиологических параметров до, во время и после стимуляции;
2) оценивать скорость восстановления внимания и точность управления;
3) проводить сравнение с контрольной группой без ТОС.

Тактильная обратная связь может быть рассмотрена не только как средство передачи информации, но и как активный инструмент воздействия на физиологическое и когнитивное состояние оператора. Внедрение адаптивных и мультимодальных систем ТОС, сочетающих вибрационную и электрическую стимуляцию, открывает новые перспективы в области нейроэргономики и интерфейсов следующего поколения. Предлагаемый подход требует дальнейших экспериментальных исследований, но уже демонстрирует потенциал повышения эффективности и безопасности управления РТК [3].

Литература

1. Красников Г. Я. Микро- и наноэлектроника: технологии и компоненты. — М.: Техносфера, 2020. — С. 427.
2. Kim S., Wang Y. Soft tactile interface for human–robot interaction // Nature Electronics, 2023. Vol. 6 (2). P. 87–96.
3. Tsai Y., Li Y. Development of Vibrotactile Feedback Using Piezoelectric Actuators // Sensors, 2024. Vol. 24 (3). P. 1321.

УДК 621.382

Исследование топологической структуры локальных тактовых сеток при проектировании системы синхронизации тактового сигнала в интегральных микросхемах

Кузьмин П. А., Коршунов А. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
kuzminpaa@gmail.com, korshunov@org.miet.ru

В исследовании сравниваются топологические структуры распределения тактовых сигналов (buffer tree, single/local clock mesh) в условиях миниатюризации интегральных микросхем. Анализируется влияние вариаций на clock skew и IR-Drop при плотности элементов 30/50/70 %, разном числе тактируемых элементов и техпроцессах 28 и 90 нм.
Ключевые слова: тактовая сеть; тактовая сетка; локальная тактовая сетка; буферное дерево; потребление тактовой сети; падение напряжения; топология; физическое проектирование.

В условиях стремительного роста сложности и миниатюризации интегральных микросхем (ИМС) обеспечение точной синхронизации тактовых сигналов становится критической задачей. Современные процессоры, GPU и специализированные ускорители (например, для искусственного интеллекта) объединяют миллиарды транзисторов, работающих на гигагерцевых частотах, что усиливает риски возникновения clock skew (разброса задержек) и jitter (дрожания сигнала). Учитывая растущие требования к повышению надежности, производительности и ограничению по энергопотреблению современных ИМС, традиционный метод проектирования Buffer tree не всегда способен удовлетворить данные требования, поэтому вопрос о разработке новых методов и алгоритмов проектирования тактовой сети остается открытым. При проектировании тактовой сети учитывается неидеальность схемы и условий, при которых эксплуатируется схема. Это явление называется вариациями на кристалле (variations). Они влияют на временные и мощностные характеристики элементов схемы. А при уменьшении размера технологического процесса влияние вариаций на clock skew становится сильнее. Основные недостатки clock mesh в сравнении с buffer tree:

- использование бóльших трассировочных ресурсов;
- использование бóльших затрат энергопотребления;
- полуавтоматизированный маршрут создания.

В данной работе проводился сравнительный анализ для топологических структур buffer tree, single clock mesh и local clock mesh для следующих выходных характеристик:

- зависимость clock skew от вариаций;
- IR-Drop.

Особенностью данной работы является то, что выходные параметры сравниваются при следующих условиях:

- дизайны имеют плотность заполнения библиотечными элементами на этапе до размещения (prePlace) 30, 50 и 70 %;

- дизайны имеют разное количество тактируемых элементов;
- рассматривается несколько размеров технологических процессов (28 нм и 90 нм).

В будущем планируется применить метод проектирования тактовой сети в виде сетки (clock mesh) на кристалле.

Литература

1. Cheng W. K. et al. Cross-Mesh Clock Network Synthesis // Electronics, 2023. Vol. 12. № 16. P. 3410
2. Marcelo de Oliveira J. Clock mesh optimizati: Doctoral dissertation, 2010.

УДК 004.31

Высокоуровневое моделирование перспективных топологий для сетей на кристалле

Мирошниченко Л. И., к. т. н. Американов А. А., Ромашихин М. Ю.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
limiroshnichenko@edu.hse.ru

В настоящее время сети на кристалле становятся все более популярным способом увеличения производительности вычислительных устройств. Важнейшим параметром сети на кристалле, который определяет многие ее характеристики, является топология. Данная работа посвящена высокоуровневому моделированию СтнК с различными топологиями и сравнительному анализу их характеристик.

Ключевые слова: СнК; СтнК; высокоуровневое моделирование.

Для повышения производительности вычислительных устройств разрабатываются многопроцессорные системы на кристалле (СнК), содержащие в себе множество компонентов, между которыми должна быть организована коммуникация. С ростом количества компонентов в СнК организация механизма передачи данных становится более трудоемкой. Сети на кристалле (СтнК) — это один из способов решения этой проблемы. В СтнК организация связи между компонентами выполняется путем передачи данных между ними через маршрутизаторы, а не напрямую [1–2].

Топология является важным параметром СтнК, влияющим на пропускную способность всей системы [3]. Именно топологией определяется то, как будут соединены узлы между собой. Целью данной работы является проведение исследований различных топологий СтнК и выбор оптимальных топологий для различного вида сетей. Для этого используется высокоуровневое моделирование СтнК. В работе промоделированы классические ячеистые топологии (mesh [4], torus [5]), а также циркулянтная топология [6]. Статья состоит из следующих разделов:

- исследование и выбор инструментов для высокоуровневого моделирования СтнК;
- модификация выбранного симулятора для работы с новыми видами топологий;
- проведение моделирования топологий с различными параметрами СтнК.

В ходе работы проведен сравнительный анализ результатов моделирования и сделаны выводы о применимости конкретных топологий для различных конфигураций сетей на кристалле.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-11-00248, https://rscf.ru/project/25-11-00248.

Литература

1. Gepner P., Kowalik M. F. Multi-core processors: New way to achieve high system performance // International Symposium on Parallel Computing in Electrical Engineering (PARELEC'06). IEEE, 2006. P. 9–13.

2. Lee H. G. et al. On-chip communication architecture exploration: A quantitative evaluation of point-to-point, bus, and network-on-chip approaches // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems (TODAES), 2008. Vol. 12. № 3. P. 1–20.
3. Goossens K., Hansson A. The aethereal network on chip after ten years: Goals, evolution, lessons, and future // Proceedings of the 47th Design Automation Conference, 2010. P. 306–311.
4. Mubeen S., Kumar S. Designing efficient source routing for mesh topology network on chip platforms // 2010 13th Euromicro Conference on Digital System Design: Architectures, Methods and Tools. IEEE, 2010. P. 181–188.
5. Chang W., Yubai L., Song C. Design and simulation of a Torus topology for network on chip // Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008. Vol. 19. № 4. P. 694–701.
6. Мячин Н. М., Романов А. Ю., Монахова Э. А. Свободная от дедлоков маршрутизация в сетях на кристалле с циркулянтными топологиями // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС), 2021. — № 3. — С. 99–105.

УДК 004.031.6

Разработка реконфигурируемого программно-аппаратного комплекса для работы с отладочными платами

Американов А. А., Фролов К. Д.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
aamerikanov@edu.hse.ru; kdfrolov@edu.hse.ru

Представлена архитектура реконфигурируемой программно-аппаратной платформы для дистанционного взаимодействия с различными отладочными платами, в которой в качестве коммутатора, обеспечивающего подключение разнообразных датчиков к выводам тестируемой платы, используется плата ПЛИС.

Ключевые слова: удаленный стенд; ПЛИС; онлайн-образование; отладочные платы; удаленный доступ.

Концепция удаленных лабораторий стала возможной с появлением Интернета и развитием технологий. Такой подход к реализации лабораторий позволяет студентам, преподавателям и исследователям проводить эксперименты без необходимости физического присутствия в традиционных лабораторных условиях, за счет чего в настоящее время удаленные лаборатории играют важную роль в образовании, научных исследованиях и промышленности [1].

Заметный рост числа научных публикаций, посвященных удаленным лабораториям на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [2], указывает на растущий интерес в данной области. Возможности технологий ПЛИС позволяют создавать более сложные и эффективные системы удаленных лабораторий, что открывает новые перспективы для их развития.

В данной работе производится обзор существующих решений для удаленной работы. Например, рассматриваются такие решение, как прототип устройства на базе ПЛИС, разработанный в Познанском технологическом университете в Польше [3], или разработка Ирландского национального университета в Голуэй [4], которая представляет собой веб-интерфейс для работы с платами ПЛИС. Основным недостатком таких систем является узкая направленность, так как представленные в рассматриваемых стендах инструменты позволяют решать лишь несколько конкретных задач. В результате формируется вывод о существующей потребности в удаленных комплексах с новым подходом, реконфигурируемым, который и будет применяться в разрабатываемом стенде, которому посвящена статья. Научная новизна работы заключается в использовании такого подхода в программно-аппаратном комплексе для работы с отладочными платами.

Основной целью работы является разработка архитектуры реконфигурируемого комплекса для дистанционной синхронной работы с отладочными платами. Архитектура системы состоит из программной и аппаратной части. Программная часть включает в себя пользовательский интерфейс (Frontend) и серверную часть (Backend). Аппаратная часть состоит из исследуемой платы, компьютера, видеокамеры и датчиков, подключаемых к исследуемой плате через ПЛИС. Практическая значимость данной работы заключается в обеспечении возможности

дистанционного взаимодействия студентов с отладочными платами, что позволяет выполнять широкий спектр лабораторных работ за счет использования различной периферии, подключаемой к произвольно выбранным выводам исследуемой платы по усмотрению пользователя. Предлагаемая архитектура с использованием ПЛИС обеспечивает высокую степень гибкости комплекса, что делает его универсальным инструментом для проведения различных лабораторных работ, а не ограничивает область применения решением задач узкого профиля.

Пользовательский интерфейс будет предоставлять возможность настраивать конфигурацию оборудования, выбирать и запускать эксперименты, получать результаты в режиме реального времени с помощью получения данных с видеокамеры и взаимодействовать с удаленной платой. Предполагается, что серверная часть будет включать в себя программу, реализованную на языке высокого уровня, например Python, которая соединяет физически подключенную периферию через определенные внешние контакты ввода-вывода общего назначения ПЛИС (GPIO) с внешним контактами исследуемой платы за счет генерации прошивки (.sof файл), которая после компиляции будет загружаться на плату ПЛИС, а также будет загружаться код студента на отладочную плату для получения результата практической работы. Использование интерфейса GPIO служит одним из ключевых факторов, обеспечивающих гибкость разрабатываемого комплекса, поскольку данный интерфейс позволяет интегрировать с комплексом различные типы исследуемых отладочных плат, включая микроконтроллеры, ПЛИС и др. Универсальность и широкое распространение GPIO-интерфейса, присутствующего в большинстве современных отладочных платах, существенно расширяет возможность применения стенда.

Дальнейшее развитие проекта планируется направить на реализацию комплекса и проведение тестирования в целях оценки ограничений, надежности, безопасности системы и возможности оптимизации производительности.

Литература

1. Ortelt T. R. et al. Concepts of the International Manufacturing Remote Lab (MINT-ReLab) — Combination of a MOOC and a Remote Lab for a Manufacturing Technology Online Course // Engineering Education 4.0. Springer, Cham, 2016. P. 547–558.
2. Lens FPGA Remote Lab [Electronic resource]. URL: https://www.lens.org/lens/search/patent/list?q=(fpga%20remote%20lab)&p=0&n=10&s=_score&d=%2B&f=false&e=false&l=en&authorField=author&dateFilterField=publishedDate&orderBy=%2B_score&presentation=false&preview=true&stemmed=true&useAuthorId=false (дата обращения: 01.04.2025).
3. Melosik M. et al. Remote Prototyping of FPGA-Based Devices in the IoT Concept during the COVID-19 Pandemic // Electronics (Switzerland). MDPI, 2022. Vol. 11. № 9.
4. Morgan F. et al. Remote FPGA Lab with interactive control and visualisation interface // Proceedings — 21st International Conference on Field Programmable Logic and Applications, FPL 2011. 2011. P. 496–499.

УДК 621.3.088

Методика оценки распознаваемости расстояния Хэмминга при анализе утечки информации по боковым каналам цепей электропитания интегральных микросхем

Михайлов В. Ю.[1,2], Тишин А. С.[1,2], Алексеев В. Д.[1,3]
[1] *АО «НИИМЭ»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
valekseev@niime.ru
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
[3] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Представлена методика оценки распознаваемости расстояния Хэмминга на основе интегральной методики. Приведены сравнительные результаты с традиционными методами, использующимися при анализе утечки информации по боковым каналам цепей электропитания интегральных микросхем.
Ключевые слова: микроконтроллер; утечка информации по сторонним каналам; анализ энергопотребления.

В настоящее время микроконтроллеры применяются во многих секторах экономики, в том числе для хранения и обработки конфиденциальных данных [1]. Это создает определенные угрозы, так как логические элементы на базе комплементарных схем металл — оксид — полупроводниковых (КМОП) подвержены риску утечки информации по боковым каналам [2].

В упрощенном варианте потребление микросхемы можно разделить на два состояния: статическое и динамическое. Наибольший вклад вносит динамическое энергопотребление, возникающее при зарядке и разрядке выходной емкости логического элемента. Динамическое энергопотребление можно определить по формуле [3]

$$P_{дин} = V_{пит}^2 \cdot f_{упр} \cdot (C_{нлэ} + C_{пар}) + P_{скзт},$$

где $V_{пит}$ — напряжение питания, $f_{упр}$ — частота управляющего сигнала, $C_{нлэ}$ — емкость нагрузки, $C_{пар}$ — паразитная емкость, $P_{скзт}$ — сквозной ток.

Таким образом, при увеличении количества одновременно переключаемых элементов возрастет энергопотребление. Так как в современных микроконтроллерах одновременно переключаются сразу несколько битов, то, используя последовательно вектора, отличающиеся друг от друга на 1 бит, можно установить потребление при переключении 1 бита. Зная это значение, можно оценить, сколько битов изменилось после выполнения той или иной операции, тем самым определив расстояние Хэмминга.

Одним из способов определения расстояния Хэмминга может быть использование интегральной метрики, определяющей амплитудный профиль трассы энергопотребления. Данная метрика обеспечивает повышенную чувствительность

к форме сигнала и устойчивость к аддитивному шуму, что критично при работе с сильно зашумленными трассами или малыми амплитудами утечки.

В рамках предложенной методики сигнал энергопотребления анализируется по следующим этапам:

1) вычисление среднего значения тока на интервале, соответствующем операции записи;
2) получение отклонения сигнала от среднего уровня (амплитудной составляющей утечки);
3) применение весовой функции, фокусирующей внимание на окрестности пика всплеска — наиболее информативной части сигнала;
4) интегрирование результата, что позволяет получить обобщенную числовую характеристику формы сигнала.

Методика была протестирована на синтетических и экспериментальных трассах, полученных при записи 32-разрядных битовых векторов с различным числом единичных битов. Для каждого значения расстояния Хэмминга формировались выборки трасс, которые потом усреднялись для подавления шума. Для усредненных трасс определялось значение интегральной метрики. При поступлении новой трассы ее интегральная метрика сравнивалась с эталонными значениями и классификация производилась по минимуму абсолютной разницы между ними.

Данная методика обеспечивает:

- надежное различение соседних значений расстояний Хэмминга при числе усредненных трасс порядка 500–1000;
- устойчивость к смещению сигнала, вызванному дрейфом источника питания;
- лучшее качество классификации по сравнению с косинусным сходством при ограниченном числе трасс;
- возможность определения значения расстояния Хэмминга даже при наложении шумов высокой интенсивности, при которых классические методы теряют эффективность.

Предложенный подход может быть реализован для внутреннего тестирования проектируемых микросхем в качестве универсального инструмента предварительного анализа утечек по электропитанию.

Литература

1. Нуйкин А. В., Кравцов А. С., Мытник К. Я. Перспективы развития универсальной защищенной программно-аппаратной платформы со сверхнизким потреблением для устройств Интернета вещей // Наноиндустрия, 2019. — № S (89). — С. 328–329.
2. Standaert F. X. Introduction to side-channel attacks // Secure integrated circuits and systems, 2010. P. 27–42.
3. Mangard S., Oswald E., Popp T. Power Analysis Attaks: Revealing the Secrers of Smart Card. [USA]: Springer US, 2017. 338 p.

УДК 537.86

Мягкий хэндовер в спутниковых терминалах на базе приемо-передающей АФАР с магнитоэлектрическим излучателем

Бурцев В. Д., Антошкин Г. В., Филонов Д. С.
Центр фотоники и двумерных материалов,
Московский физико-технический институт
141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 7
burtsev.vd@phystech.su

В данной работе описываются принципы работы абонентского терминала спутниковой связи, приемо-передающий модуль которого выполнен в виде монолитной активной фазированной антенной решетки, рассматриваются задачи бесшовного доступа в канале Земля — спутник — Земля, приведен вариант решения задачи совмещения приемной и передающей подрешеток и их управляющих элементов в рамках одной топологии.

Ключевые слова: радиофизика; активная фазированная антенная решетка; телекоммуникационные технологии; спутниковая связь; хэндовер.

В рамках проектируемой архитектуры «бесшовного цифрового неба» отдельное место отводится наземным абонентским терминалам спутниковой связи, работающим со спутниками на низких и средних орбитах. Особенное внимание в последнее время получают решения для приемо-передающих модулей, в состав которых входят активные фазированные антенные решетки (АФАР), широко используемые благодаря скорости сканирования лучом, ограниченной только скоростью переключения электрических управляющих компонентов (фазовращателей, чипов-бимформеров). Основными фаворитами на внешнем рынке являются абонентские терминалы Starlink [1], XPhased [2] и Kymeta [3], устанавливаемые как на стационарные, так и на передвижные платформы.

Другим неочевидным преимуществом абонентских терминалов на базе АФАР является принципиальная возможность адаптивного сканирования сразу несколькими лучами, одновременно отслеживающими уходящий и налетающий спутники одной или разных группировок. Формируя несколько лучей и отслеживая положения спутников-ретрансляторов, возможно удобным способом на физическом уровне решить задачу мягкого хэндовера, при котором терминал заранее устанавливает контакт со следующим спутником, обеспечивая бесшовный переход абонента без задержки на переключение.

Помимо прочего, для наиболее эффективного использования апертуры антенны предпочтительно совмещать приемный и передающий массивы АФАР, тем или иным способом обеспечивая их электромагнитную совместимость. Например, в одних из последних вариантах антенных систем Starlink используется система фильтрации, двухдиапазонные щелевые антенны, а также временное разнесение каналов приема и передачи. При этом при проектировании пассивного антенного элемента требуется обеспечить его либо широкой полосой, либо возможностью работы в обоих диапазонах: на прием (Rx) и на передачу (Tx). Классический диапазон Ku является достаточно широким: это 10,95–12,75 ГГц (Rx) и 13,75–14,5 ГГц (Tx), поэтому для обеспечения универсального решения, которое может использоваться для широкого класса задач, мы предлагаем адаптацию турникетной антенны,

используемой в базовых станциях сетей типа 5G [4] для стека печатной платы (PCB). Такой антенный элемент может реализовывать произвольную поляризацию и обладает достаточным для обеспечения обоих каналов диапазоном рабочих частот.

Литература

1. Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности, 2022. — № 4. — С. 190–255.
2. Zhao D. et al. Millimeter-wave integrated phased arrays // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2021. Vol. 68. № 10. P. 3977–3990.
3. Stevenson R. et al. Low Power Metasurface Beamforming Antennas with Dynamic Polarization Control for Multi-Orbit Satcoms // 2024 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY). IEEE, 2024. P. 1–5.
4. Zheng D. Z., Chu Q. X. A miniaturized wideband dual-polarized antenna for base-station applications // 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). IEEE, 2017. P. 1–2.

УДК 621.3.049

Самоорганизация как способ коррекции навигационного комплекса летательного аппарата в автономном режиме

Суркова А. Д.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
a.d.surkova@mail.ru

Исследована задача алгоритмической компенсации погрешностей инерциальных навигационных систем в автономном режиме. Для построения прогнозирующей модели погрешностей навигационной системы рассмотрен компактный алгоритм самоорганизации на основе трендов.
Ключевые слова: ИНС; прогноз; БЦВМ; самоорганизация; тренд.

Для управления различными динамическими объектами, в частности ЛА, используется информация от навигационных систем и комплексов. Обычно в качестве базовой навигационной системы используют инерциальные навигационные системы (ИНС). ИНС имеют погрешности, которые накапливаются с течением времени функционирования. Такие ошибки особенно сильно влияют на работу высокоманевренных ЛА. Традиционные методы коррекции, включая фильтр Калмана и его модификации, подразумевают использование информации от внешних источников (спутниковые навигационные системы, радиолокация и т. п.) и требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение в бортовых цифровых вычислительных машинах (БЦВМ). Данная проблема может быть решена использованием компактных алгоритмов, сочетающих точность и эффективность.

В автономном режиме для коррекции ИНС целесообразно использовать алгоритмы прогноза [1]. В процессе подготовки перед полетом или в режиме коррекции ИНС от внешних датчиков определяется математическая модель погрешностей системы. После чего в автономном полете проводится прогноз погрешностей ИНС и их последующая компенсация в выходной информации системы.

В качестве алгоритма построения модели предлагается использовать модификации алгоритма самоорганизации [2]. Так как алгоритм самоорганизации в классическом варианте также требует большого объема машинной памяти, реализовать его в современных БЦВМ затруднительно. Поэтому необходимо его упрощение, которое может быть реализовано сокращением количества моделей-претендентов или использованием линейных трендов. Радикальным способом сокращения математических моделей-претендентов является включение в ансамбль специальных критериев, т. е. критериев, резко сужающих круг подходящих моделей.

В алгоритмах самоорганизации исходные данные разделяются на обучающую и проверочную выборки. На обучающей строятся модели и рассчитываются значения внутренних критериев, а проверочная служит для образования внешнего дополнения и подтверждения точности построенной модели. При самоорганизации применяется некоторый генератор моделей-претендентов. Генератор задает структуры решений различной сложности. С помощью ансамбля критериев проводится отбор математических моделей [3]. Таким образом, происходит постепенное

усложнение моделей с оценкой их посредством критериев, минимум которых определяет модель оптимальной сложности.

Также для формирования моделей высокодинамичных процессов можно использовать резервирование трендов. Этот механизм срабатывает при резком изменении измерительной выборки. На каждом ряду селекции резервируется тренд, имеющий наименьшее значение ансамбля критериев селекции. После осуществления комбинации моделей-претендентов выделяются модели для следующего ряда селекции и модель для резервирования с помощью критерия простоты модели [4]. Таким образом, в селекции моделей на каждом ряду селекции участвуют зарезервированные тренды со всех предыдущих рядов.

Метод особенно актуален для систем реального времени, таких как навигационные комплексы ЛА, где важна быстрая адаптация и минимальные задержки.

Литература

1. Шэнь Кай. Разработка методов оценивания и прогноза навигационных систем летательных аппаратов // Автоматизация и современные технологии, 2015. — № 7. — С. 13–18.
2. Ивахненко А. Г., Мюллер Й. А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. — Киев: Техника, 1985.
3. Пролетарский А. В., Неусыпин К. А., Вайс Ю. Л., Шолохов Д. О. Формирование ансамбля критериев селекции алгоритма самоорганизации. Автоматизация и современные технологии, 2012. — № 12. — С. 14–16.
4. Неусыпин К. А. Способы определения качественных характеристик моделей динамических систем // Автоматизация. Современные технологии, 2020. — Т. 74. — № 2. — С. 71–77.

УДК 004.716

Автоматизированная система управления тестированием бортовой аппаратуры на основе распределенной вычислительной сети

Голев А. Д.[1,2], **Былинкин И. К.**[2]
[1] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
netadm@miee.ru.
[2] *АО «НИИ «Субмикрон»*
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
Submicron@se.zgrad.ru

Предложен подход к совместному проектированию бортовой аппаратуры и средств отладки на основе децентрализованной сетевой архитектуры с использованием стандартов SpaceWire/GigaSpaceWire. Показан способ подключения к одной сети устройств, имеющих различные интерфейсные модули, при помощи макетного образца на базе ПЛИС.
Ключевые слова: SpaceWire; ПЛИС; сеть наземной аппаратуры; тестирование устройств.

В связи с ростом сложности бортовой аппаратуры и необходимостью в ее функциональном контроле на этапе испытаний существует потребность в ускорении и автоматизации процесса тестирования.

Традиционно для контроля и диагностики используются как типовые интерфейсные модули — CAN, RS-485, МКО, так и нестандартные — сложные параллельные шины, собственные разработки предприятий и т.д. Эти интерфейсные модули чаще всего объединены крейтовыми конструкциями по стандартам VXI, AXI или PXI.

Одним из главных недостатков вышеуказанных стандартов применительно к использованию их в средствах отладки является трудность полноценного масштабирования.

Для решения поставленных проблем предлагается комплексный и системный подход к совместному проектированию бортовой аппаратуры и средств отладки и отработки. Состоит он в том, что система управления тестированием устройств основывается на децентрализованной сетевой архитектуре с использованием стандартов SpaceWire/GigaSpaceWire.

На этапе разработки аппаратуры предусматриваются интерфейсные модули SpaceWire/GigaSpaceWire, с помощью которых изделия подключаются к одной сети. При этом имеется возможность подключать ранее разработанные изделия с традиционными интерфейсами в одну сеть с помощью вычислительных мостов, благодаря чему не потребуется их переработка для взаимодействия с новыми устройствами.

Исследование концепции проводится на макетном образце на базе ПЛИС. Ожидается, что в результате будет достигнута цель унификации и масштабирования системы контроля сложных вычислительных систем.

Литература

1. ГОСТ Р 70020-2022. Космическая техника. Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов. SpaceWire-RUS. — Введ. 2022.06.01. — М.: Российский институт стандартизации, 2022.

УДК 629.7.054

Современные методы проектирования компактной и легкой бортовой радиоэлектронной аппаратуры

Коротков М. Д., д. т. н., Тимошенков С. П.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
netadm@miee.ru.

Статья посвящена рассмотрению ключевых подходов в проектировании компактной и легкой бортовой РЭА: оптимизация конструктива, новые материалы корпусов, аддитивные технологии и повышение плотности компоновки и трассировки печатных плат. Приведены расчетные примеры снижения массы и графики зависимости массы от методов проектирования.
Ключевые слова: бортовая РЭА; компактность; оптимизация конструкции; оптимизация топологии; аддитивные технологии; облегченные материалы; плотность монтажа; космические аппараты; уменьшение массы.

Развитие космической техники предъявляет жесткие требования к массогабаритным характеристикам бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), что стимулирует поиск новых методов проектирования. В статье рассматриваются ключевые подходы, позволяющие снизить массу и размеры устройств без ущерба их надежности и функциональности.

Одним из наиболее эффективных способов уменьшения массогабаритных показателей РЭА является оптимизация компоновки печатных плат (ПП). Размеры ПП и используемых в блоке соединителей напрямую влияют на его габариты. Поэтому очень важно стремиться к уменьшению площади ПП. Применение многослойных плат с высокой плотностью трассировки и встраиваемых компонентов позволяет сократить занимаемую площадь и снизить общий вес устройства [1, 2].

Снижение массы может быть достигнуто за счет рационального изменения формы и размеров деталей при сохранении их механических характеристик. Данный метод включает:

- введение технологических вырезов и пазов в ненагруженных зонах;
- замену сплошных металлических элементов облегченными конструкциями;
- применение конечно-элементного моделирования для анализа напряженно-деформированного состояния.

Результаты моделирования подтверждают, что данный подход наиболее эффективен для корпусов модулей, несущих конструкций и отдельных деталей.

Значительное уменьшение массы достигается за счет применения облегченных алюминиевых сплавов с высокой удельной прочностью, как, например, сплав 1420 с плотностью 2,47 г/см^3 [3]. Аддитивные технологии (3D-печать) открывают новые возможности для создания сложных геометрических форм корпусов и несущих конструкций с минимальным использованием материала. Это не только уменьшает вес, но и сокращает производственные отходы [4].

Расчетные данные показывают, что комбинация перечисленных методов позволяет снизить массу РЭА на 10–20 % в зависимости от его устройства, модульности и функционала. В качестве результатов работы в статье приводятся графики,

демонстрирующие зависимость массы от выбранного метода проектирования, что подтверждает эффективность предложенных подходов.

Таким образом, современные методы проектирования бортовой РЭА, включая оптимизацию топологии ПП, использование новых материалов и аддитивных технологий, а также рациональные конструктивные решения, обеспечивают значительное снижение массы и габаритов аппаратуры, что особенно важно для космических применений.

Литература

1. Архангельский А. Н. Решение прикладных задач, связанных с методами обработки топологических компонентов посредством исследования их взаимных размещений // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2020. — Т. 7. — № 2. — С. 50–62.
2. Шаповалова К. И. Печатные платы. Совершенствование печатных плат // Актуальные проблемы авиации и космонавтики, 2018. — Т. 3. — № 4 (14). — С. 24–25.
3. Пупырев Е. С., Казанцева А. В., Кукарских А. В. Пути усовершенствования несущих конструкций радиоэлектронной аппаратуры // Ракетно-космическая техника, 2017. — Т. 1. — № 3 (11). — с. 6.
4. Шестакова Е. А., Янбаев Р. М., Малкова В. В. Анализ технологий получения корпусных деталей промышленных роботов посредством аддитивных технологий с последующей механической обработкой // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики (АНТЭ-2024): материалы IX Всероссийской научно-технической конференции, Казань, 03–04 октября 2024 года. — Казань: ИП Сагиев А. Р., 2024. — С. 423–425.

УДК 004.3

Обзор требований архитектуры полетного контроллера для анализа возможности применения микроконтроллера МІК32 «АМУР»

Дубленский Д. С., Канунников Е. И., Махмудов Т. Н., Попов Д. А., к. т. н., Семион А. А., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Московский институт электроники и математики)
123458, г. Москва, ул. Таллинская, 34
dsdublenskiy@edu.hse.ru

В работе предложен краткий обзор существующих решений в конструировании полетных контроллеров. Кроме того, выдвинута гипотеза о возможности применения микроконтроллера МІК32 «АМУР» на базе архитектуры RISC-V в качестве управляющего устройства вместо стандартного микроконтроллера из семейства STM32.
Ключевые слова: RISC-V; МІК32; БПЛА; полетный контроллер.

Можно предположить, что архитектура RISC-V, заинтересовавшая разработчиков встраиваемых систем [1], будет актуальна и для разработки полетных контроллеров [2], управляющих работой датчиков и моторов БПЛА [2, 3].

Конструкции полетных контроллеров популярной серии Pixhawk [4] чаще всего основаны на микроконтроллерах семейства STM32, реже используются ATmega и PIC.

Примером является контроллер на STM32F103RCT6 с ядром ARM Cortex-M3. Архитектура включает блок питания, вычислительный модуль, датчики и интерфейсы. Обобщенная авторами архитектура для полетных контроллеров приведена на рис. 1 [5].

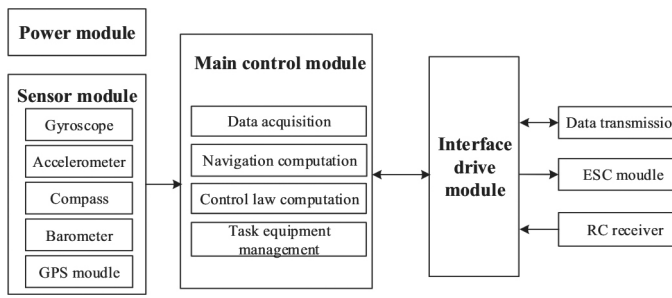


Рис. 1. Обобщенная архитектура полетных контроллеров [5]

Предложена гипотеза о применимости микроконтроллера МІК32 «АМУР» с ядром SCR1 на архитектуре RISC-V [6] в качестве управляющего устройства. Для оценки проведен сравнительный анализ по характеристикам: частота, объем памяти, наличие интерфейсов, наличие floating point unit (FPU) и производительность ядра. В качестве метрики использовано нормализованное евклидово

расстояние. Среднее значение расстояний для МІК32 «АМУР» составляет 1,6773, а общее среднее значение — 1,8799, что позволяет отнести его к числу микроконтроллеров, подходящих для использования в системах управления БПЛА.

Исследование [7] включает в себя описание реализации программного обеспечения (ПО) для полетных контроллеров. Если обобщить концепцию по принципу, который используется в свободно распространяемом ПО Betaflight [8], то достаточными пунктами алгоритма управления полетом окажутся сбор гироскопических данных, обработка с помощью ПИД-регуляторов и формирование сигналов с помощью микширования. Следовательно, можно разработать упрощенную систему для сравнения скорости работы микроконтроллеров МІК32 «АМУР» и STM32F411. Результаты представлены на рис. 2 и 3. Для экспериментов применялся идентичный код, так как полученное ПО на основе Betaflight является аппаратно независимым.

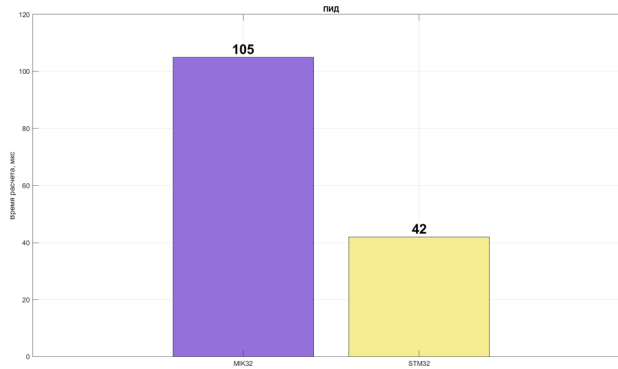


Рис. 2. Время, затраченное на работу ПИД-регуляторов

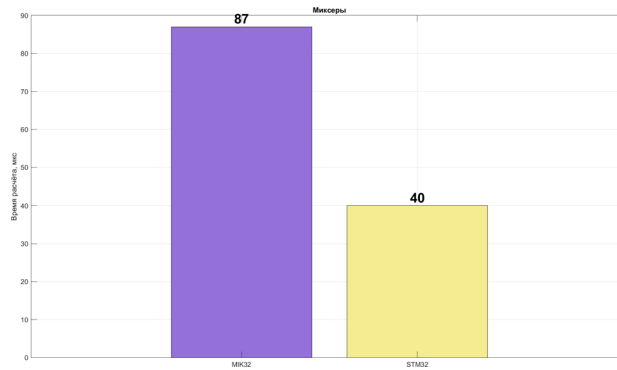


Рис. 3. Время, затраченное на работу микшеров

МІК32 «АМУР» основан на RISC-V-наборе команд и расширениях RV32IMC: рассматриваемое устройство поддерживает базовый набор команд архитектуры, операции целочисленного умножения и деления, а также сокращенный набор инструкций. Однако для стандартных методов, применяемых в ПИД-регуляции и микшировании, критически важен FPU.

Дальнейшие исследования в этой области предполагают включение в эксперименты других управляющих устройств, а также изучение методов для ускорения обработки данных на микроконтроллерах МІК32 «АМУР».

Литература

1. Saidova J. RISC-V architecture and its role in the near future // Journal of Advanced Scientific Research, 2024. Vol. 5. № 9.
2. Sala Y., Capello E., Carminati D. Firmware Design and Implementation for a Quadrotor UAV. Politecnico di Torino.
3. Грошев А. Г. Анализ методов управления мультикоптерами // Вестник воронежского института высоких технологий, 2018.
4. Ebeid E. et al. A survey of Open-Source UAV flight controllers and flight simulators // Microprocess Microsyst. Elsevier, 2018. Vol. 61. P. 11–20.
5. Yin X. et al. Hardware Design of Flight Control System and Flight Experiments of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicle // Proceedings of the 32nd Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 4925–4929.
6. Микрон. Информация о микроконтроллере МИК32 Амур: техническая документация [Электронный ресурс]. — URL: https://mikron.ru/upload/docs/mcu/Information_AMUR_MIK32.pdf (дата обращения: 01.04.2025).
7. Wenfu X. U. et al. Flight control of a large-scale flapping-wing flying robotic bird: System development and flight experiment // Chinese Journal of Aeronautics, 2022. Vol. 35. № 2. P. 235–249.
8. betaflight/betaflight: Open Source Flight Controller Firmware [Electronic resource]. URL: https://github.com/betaflight/betaflight (дата обращения: 09.06.2025).

УДК 621.3.049.779

Возможность создания комплекса для проведения испытаний интегральных микросхем с использованием программно-определяемого радио

Голан А. В., Коротков К. С., Строганова Е. В., Сердюков В. В., Пузановский К. В., Никитин Д. Д.
Кубанский государственный университет
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149
blazepro17@gmail.com

Исследована возможность создания системы испытаний интегральных микросхем с использованием программно-определяемого радио. Исследована возможность реализации супергетеродинного преобразования частоты с использованием отечественных ПЛИС. Проведен анализ возможности создания системы испытаний интегральных микросхем нового поколения с использованием исключительно отечественной ЭКБ.
Ключевые слова: ПОР; ПЛИС; супергетеродинное преобразование частоты; гетеродин; отладка; интегральные микросхемы; СВЧ.

На сегодняшний день перспективным направлением в отечественной микроэлектронной промышленности является внедрение систем испытания интегральных схем. Подобные системы позволяют добиться следующих существенных преимуществ:

- возможность проверки интегральных схем на этапе создания отдельных ее элементов;
- уменьшение числа бракованных интегральных схем;
- снижение стоимости производства.

Одним из сдерживающих факторов повсеместного использования испытательных систем является сложность подобных устройств и их высокая стоимость. В работе предложен новый способ реализации подобного устройства, основанный на синхронизации большого числа одноканальных приемо-передатчиков, используемых в программно-определяемом радио. Данный способ незначительно увеличивает время проведения испытаний, но значительно уменьшает стоимость и простоту конечного устройства. Для реализации проекта был проведен ряд исследований, таких как:

- сравнительный анализ существующих на данный момент доступных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) для формирования цифровых СВЧ-смесителей и полосовых перестраиваемых фильтров, пригодных для применения в системах программно-определяемого радио (ПОР) отечественного производства;
- сравнительный анализ существующих генераторов опорного сигнала и смесителей, используемых при гетеродинном преобразовании частоты, также было исследовано их интегральное строение и технологический процесс их производства;
- анализ возможности создания испытательной системы интегральных схем на базе отечественного ПОР с возможностью генерации сигналов

произвольной формы и регистрации сигналов, поступающих с интегральной схемы в реальном времени.

Данные работы выполнялись специалистами физико-технического факультета ФГБОУ ВО «КубГУ». В результате была определена возможность создания испытательной системы на основе многопортовых ПОР. При этом подобная система может быть изготовлена полностью из отечественных компонентов.

В состав ПОР входит ПЛИС для реализации супергетеродинного преобразования частоты СВЧ-сигнала, несколько аналого-цифровых преобразователей (АЦП) для приема сигналов интегральных схем и несколько цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) для генерации сигналов произвольной формы.

Рассмотрена возможность создания программно-определяемого радио отечественного производства на одной интегральной микросхеме по 200 нм комплементарной технологии металл — оксид — полупроводник (CMOS), а также разработан один из ключевых элементов устройства генерации сигналов с амплитудно-квадратурной модуляцией и подана заявка в Роспатент на регистрацию топологии интегральной микросхемы.

Литература

1. Слинкин Д. И. Анализ современных методов тестирования и верификации проектов сверхбольших интегральных схем // Программные продукты и системы, 2017. — № 3.
2. Строгонов А., Шацких Д., Горлов М. Технологические тренировки интегральных схем // Компоненты и Технологии, 2009. — № 93.
3. Андросов А., Джуринский К. Герметичные СВЧ-вводы для микроэлектроники. Электрические параметры и методика их измерения // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2013 — № 5. — С. 84–91.
4. Терентьев А. А., Никулин С. М., Долинин В. Я., Куликов Д. С. Техника измерения S-параметров нелинейных СВЧ цепей в режиме большого сигнала.
5. Губа В. Г., Дроботун Н. Б., Ладур А. А. Электронный калибратор векторного анализатора цепей / Патент RU 126845 U1.

УДК 658.56

Структура информационно-аналитической системы обеспечения надежности электроники

Буцкий Д. О., Зубрильцев Е. Е., Цветков В. Э.
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20
dobutskiy_1@edu.hse.ru

В работе приведена структура оригинальной информационно-аналитической системы (ИАС) обеспечения надежности электроники с учетом системы менеджмента качества (СМК). Рассмотрены функции и компоненты системы. Проанализировано влияние системы на принятие решений руководством предприятия-изготовителя.
Ключевые слова: информационно-аналитическая система; надежность; безотказность; технологический процесс; аудит.

Повсеместное использование электронных средств во всех областях, включая военную и аэрокосмическую, обуславливает непрерывный рост требований к точности оценки показателей надежности входящих в их состав электронных модулей. Однако, проанализировав реальную статистику отказов электронной аппаратуры согласно данным Центра исследования надежности RIAC и сопоставив ее с теоретическими расчетами надежности, между ними можно заметить существенное противоречие.

Одним из недостатков существующих подходов к оценке надежности является тот факт, что ни в одном из них в полном объеме не учитывается эффективность принятия управленческих решений на предприятии-изготовителе и организация технологического процесса в целом. Также стоит отметить, что в российских справочниках при расчете показателей безотказности применяется интегральный коэффициент качества производства, который может принимать только два значения: 0,2 — для космической отрасли, 1 — для военной. Подобный подход не дает в достаточной степени точно спрогнозировать надежность изготовленного электрорадиоизделия (ЭРИ).

В целях повышения точности оценки показателей надежности электроники была разработана оригинальная информационно-аналитическая система, в которой предложено использование коэффициента качества технологического процесса (КТП) предприятия-изготовителя вместо описанного ранее коэффициента качества производства. Преимущество использования КТП заключается в том, что в нем заложены требования международных стандартов ISO. Расчет КТП производится после прохождения опросника лицами, ответственными за этапы производства электронных модулей (ЭМ).

Рассмотрим структурные элементы ИАС:

1) опросник — база данных из более чем 400 вопросов, относящихся к различным этапам технологического процесса предприятия, включая трассировку печатного узла (ПУ), выбор компонентов, монтаж элементов на ПУ и др.;
2) веб-сервис, включающий личный кабинет пользователя, при регистрации которого присутствует возможность задания уровня доступа (независимый

эксперт, руководитель, сотрудник). Форма веб-сервиса позволяет проходить опрос с любого устройства, без привязки к определенным операционным системам и ПО;

3) сервер, сохраняющий в отдельную базу данные о зарегистрированных пользователях и о статусе прохождения опроса, ответах на вопросы. В функции сервера также входит формирование отчетов с рекомендациями в форматах .DOCX, .XLSX и .PDF, обработка результатов и расчет КТП.

После прохождения аудита компания может узнать свое значение КТП, а также получить вероятности отказов производимых ЭРИ по категориям.

Отчеты в доступной форме представляют результаты проведения аудита. При помощи их анализа руководство предприятия сможет оценить, во время какого из этапов производства ЭМ ухудшаются показатели надежности продукции, после чего принять взвешенное решение о том, какие мероприятия необходимо выполнить, чтобы решить данную проблему.

Литература

1. Артюхова М., Жаднов В., Полесский С. Оценка показателей надежности электронных средств с учетом многофакторного коэффициента качества производства // Компоненты и технологии, 2014. — № 4. — С. 204–207.
2. Исследование влияния коэффициента качества производства аппаратуры на оценку показателей надежности радиолокационного оборудования // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского, 2019. — С. 90–94.
3. Королев П. С., Жаднов В. В. Оценка «коэффициента качества производства» для модели интенсивности отказов радиотехнических приборов непилотируемых автоматических космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2020. — Т. 63. — № 3. — С. 264–277.
4. Denson W. Handbook of 217PLUS Reliability Prediction Models. RIAC, 2006.
5. Юрков Н. К., Затылкин А. В., Полесский С. Н. и др. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем // Надежность и качество сложных систем, 2013. — № 4. — С. 75–79.

УДК 681.5:617.75

Микропроцессорный блок виброжилета для людей со сниженной остротой зрения

Зотов Ф. А., Москаленко О. В.
МИРЭА — Российский технологический университет
119454, г. Москва, просп. Вернадского, 78

Разработан микропроцессорный блок виброжилета для людей со сниженной остротой зрения. Приведены результаты выбора компонентов, разработки схем (структурной, принципиальной), элементов конструкции и встроенного ПО. Проведен обзор аналогов и обоснована экономическая целесообразность.
Ключевые слова: микропроцессорный блок; виброжилет; для слабовидящих; тифлотехника; датчики расстояния; носимое устройство; ATmega1280; пространственная ориентация.

Зрение является одним из самых важных чувств для человека, поскольку оно позволяет воспринимать окружающий мир, общаться с другими людьми, развивать навыки и творческие способности, вести самостоятельный образ жизни. Однако многие люди страдают от различных нарушений зрения, которые снижают качество жизни и ограничивают их возможности. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в мире насчитывается около 39 миллионов слепых людей и 246 миллионов человек со средней и сильной потерей зрения [1].

В настоящее время существует множество тифлотехнических устройств, ориентированных на адаптацию людей со сниженной остротой зрения. Однако, несмотря на широкие возможности, эти устройства имеют свои ограничения. Создание импортозамещенного устройства не только обеспечит независимость от иностранных производителей, но и позволит учесть специфические потребности российских пользователей.

Основой устройства служит 8-битный микроконтроллер ATmega1280-16AU [2], который собирает и обрабатывает данные с различных сенсоров. Для обнаружения препятствий в широком диапазоне расстояний (до 4–5 метров) и с учетом различных свойств поверхностей используется комбинация из четырех ультразвуковых датчиков расстояния (серии XL-MaxSonar MB1200 [3]) и лазерного датчика (VL53L8CX [4]), формирующего карту глубины 8×8 зон. Такое сочетание позволяет повысить надежность определения как крупных, так и тонких или прозрачных объектов.

Микроконтроллер на основе анализа данных со всех датчиков формирует управляющие сигналы для четырех вибромоторов, подключенных через транзисторную сборку и расположенных на жилете. Интенсивность и локализация вибрации предоставляют пользователю интуитивно понятную тактильную информацию о направлении и расстоянии до ближайших препятствий. Для дополнительного информирования предусмотрен речевой модуль на базе микросхемы aPR33A3 [5], позволяющий воспроизводить заранее записанные голосовые сообщения и подсказки через динамик или подключенные по Bluetooth наушники.

Система питания устройства рассчитана на работу от батареи 9 В типа «крона». Для получения необходимых напряжений (3,3, 1,8, 4 В) используются импульсный (LC2334) [6] и линейные (TPS763) [7] стабилизаторы напряжения. Для согласования

логических уровней между компонентами, работающими от 1,8 и 3,3 В, применен 8-канальный двунаправленный преобразователь NXS0108. Хранение энергонезависимых данных (например, настроек или маршрутов) возможно с использованием EEPROM-памяти 24AA256 с интерфейсом I2C.

Литература

1. Статистика слепых и инвалидов по зрению [Электронный ресурс] / Всемирная организация здравоохранения. — URL: https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment.
2. Техническая документация на микроконтроллер ATmega1280 [Электронный ресурс]. — 436 с. — URL: https://static.chipdip.ru/lib/544/DOC030544791.pdf.
3. Техническая документация на ультразвуковой датчик расстояния MB1200 XL-MaxSonar [Электронный ресурс]. — 18 с. — URL: https://maxbotix.com/pages/xl-maxsonar-ez-datasheet.pdf.
4. Техническая документация на лазерный датчик расстояния VL53L8CX [Электронный ресурс]. — 42 с. — URL: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1584473/STMicroelectronics/VL53L8CX.html.
5. Техническая документация на речевой модуль aPR33A3 [Электронный ресурс]. — 52 с. — URL: https://www.micros.com.pl/mediaserver/info-uiapr33a3c1.1sop.pdf.
6. Техническая документация на стабилизатор напряжения LC2334 [Электронный ресурс]. — 42 с. — URL: http://www.siitek.com.cn/Upfiles/down/LC2334%20Datasheet%20V1.2.pdf.
7. Техническая документация на регулятор напряжения TPS76333DBVR [Электронный ресурс]. — 21 с. — URL: https://html.alldatasheet.com/html-pdf/29282/TI/TPS76333DBVR/26/1/.pdf.

УДК 519.718.2+004.332.3

Результаты и планы лаборатории мемристорной наноэлектроники ННГУ

Михайлов А. Н.
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского 603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

В работе представлены результаты и планы лаборатории мемристорной наноэлектроники ННГУ.
Ключевые слова: мемристор; энергонезависимая резистивная память; нейроморфные устройства.

Представлены результаты лаборатории мемристорной наноэлектроники ННГУ, полученные в ходе выполнения НИР по разработке мемристивных оксидных наноматериалов для энергонезависимой резистивной памяти и нейроморфных устройств, а также планируемые работы по новой тематике лаборатории, связанной с созданием нейроморфных систем обработки информации и управления на основе мемристорной наноэлектроники.

УДК 621.039.624; 621.382; 004.3; 004.383.8.032.26

Работы лаборатории мемристорных материалов ТюмГУ

Бобылев А. Н.
Тюменский государственный университет
625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6
a.n.bobylev@utmn.ru

В лаборатории проводятся исследования влияния режимов изготовления на свойства тонких пленок и мемристоров на их основе. Разрабатываются модели тепломассопереноса в активном слое мемристора. Проводится схемотехническое моделирование комбинированных мемристорно-диодных кроссбар-массивов.

Ключевые слова: мемристор; тонкие пленки; резистивное переключение; мемристорно-диодный кроссбар.

На основе анализа морфологии и шероховатости поверхности, а также вольт-амперных характеристик мемристоров, полученных из этих пленок, определен оптимальный режим магнетронного распыления для нанесения пленок оксида циркония.

Изготовлены пленки диоксида гафния с примесью оксида алюминия разной концентрации на разных подложках для калибровки кривой мощность распыления — состав — 18 образцов, с помощью энергодисперсионной спектрометрии измерены их составы. Сняты спектры пропускания, дифрактограммы. Построены преобразования для определения ширины запрещенной зоны и параметров ячейки.

Построена нестационарная модель теплопереноса и массопереноса зарядов в оксидном слое бесфиламентного неформованного мемристора при самосогласованном электрическом поле. В отличие от известных моделей представленная модель дополнена нестационарными уравнениями непрерывности концентрации свободных и захваченных электронов, граничными условиями для уравнения непрерывности концентрации захваченных электронов, а также уравнением Пуассона для самосогласованного электрического поля вместо уравнения Лапласа.

Расчет двумерного профиля вакансий показывает, что приближение одномерной модели хорошо работает в случае большой по сравнению с толщиной пленки площади электродов, так как радиальное изменение концентрации вакансии заметно только на внешней границе электрода.

Показано, что при нестационарном расчете процессы генерации и рекомбинации значительно сильнее влияют на профиль концентрации вакансий по толщине пленки по сравнению со стационарным расчетом.

Профили концентрации кислородных вакансий по толщине пленки в постоянном электрическом поле и при точном решении уравнения Пуассона с учетом всех заряженных частиц сильно отличаются вблизи электродов. Это сильно влияет на инжекцию и ионизацию электронов и, как следствие, на плотность электронного тока.

Показано, что с увеличением температуры на внешних границах электродов возрастает собственный нагрев пленки. Усиление нагрева связано с ростом

плотности электронного тока при увеличении температуры. Несимметричность нагрева связана с различием материалов и толщиной электродов.

Расчет температуры с учетом локальных изменений тепла при генерации и рекомбинации кислородных вакансий и ионов показывает, что, несмотря на малую плотность тепловых источников от этих процессов, они заметно влияют на итоговую температуру за счет воздействия на процесс массопереноса вакансий, ионов и захваченных электронов в самосогласованном электрическом поле.

Тепло от генерации и рекомбинации кислородных вакансии и ионов приводит к более быстрому резистивному переключению мемристора при самосогласованном электрическом поле в отличие от приближения постоянного поля. Кроме этого, с ростом температуры окружающей среды возрастает влияние дополнительных источников и стоков тепла от генерации и рекомбинации на проводимость мемристора.

Были выявлены причины паразитных эффектов в мемристорно-диодном кроссбар-массиве, проведено схемотехническое моделирование массива с учетом паразитных эффектов, размерности, различных вариантов кодирования, предложены и промоделированы способы купирования паразитных эффектов. С учетом выраженности паразитных эффектов моделирование работы кроссбар-массива является необходимым этапом в проектировании архитектур на основе мемристоров.

УДК 539.216.2:537.226:621.793:004.85

Машинное обучение в технологии тонких сегнетоэлектрических пленок

Сапего Е. Н., Закасовский И. Н., Зайцев О. Е.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, лит. Ф
eugenysapego@yandex.ru

Показана возможность ускоренного поиска оптимальных технологических параметров осаждения тонких сегнетоэлектрических пленок на различные подложки с использованием методов машинного обучения. Демонстрируется способность моделей машинного обучения точно предсказывать структурные свойства тонких пленок, позволяя реализовать программный поиск наилучших технологических параметров с последующей экспериментальной проверкой.

Ключевые слова: машинное обучение; искусственный интеллект; сегнетоэлектрики; тонкие пленки; магнетронное распыление; анализ данных.

Тонкие сегнетоэлектрические (СЭ) пленки активно применяются в изготовлении компонентов СВЧ-электроники [1–2]. Качество СЭ-слоя в СВЧ-диапазоне, а именно управляемость емкости и диэлектрические потери, определяется технологическими параметрами его получения. Поиск оптимальных параметров синтеза является актуальной задачей.

Машинное обучение (МО) — инновационный подход в материаловедении, способный оптимизировать процессы синтеза материалов, точно предсказывать свойства материалов [3].

Целью данного исследования является создание и сравнительный анализ моделей МО для предсказания структурных свойств тонких СЭ-пленок на основе технологических параметров их получения.

Тонкие сегнетоэлектрические пленки состава $BaSn_xTi_{(1-x)}O_3$ (BSnT) были получены методом магнетронного ВЧ-распыления при различных технологических параметрах. Структурные исследования произведены методом рентгеновской дифракции с помощью дифрактометра «ДРОН-6» на эмиссионной спектральной линии CuKα1 ($\lambda = 1{,}5406$ Å). В качестве целевой переменной используется интенсивность в зависимости от угла 2Θ. Объем собранных данных составил 148 образцов, которые были разделены на тестовую (20 %) и обучающую выборки (80 %).

В рамках сравнения были рассмотрены модели регрессии: LassoIC, Bagging Regressor, ExtraTrees, Random Forest, Gradient Boosting Regressor, XBoost, LightGBM, CatBoost. Оценка точности предсказаний целевой величины производилась по значениям среднеквадратичной ошибки, средней абсолютной ошибки, коэффициенту детерминации.

Сравнение моделей производилось по предсказанию спектра дифракции тонкой пленки, твердого раствора $BaSn_{0,2}Ti_{0,8}O_3$ на подложках из поликора и сапфира.

Сравнительный анализ точности предсказания спектра для структуры показал, что среди рассмотренных моделей использование алгоритмов ExtraTrees,

Bagging Regressor, Random Forest обеспечивает точный результат по значениям функций ошибок.

Литература

1. Алтынников А. Г. и др. Характеризация свойств пленок титаната бария-стронция и управляемых элементов на их основе в диапазоне частот 1–60 GHz // Письма в Журнал технической физики, 2019. — Т. 45. — № 11. — С. 12–15.
2. Мироненко И. Г. и др. Щелевая линия на основе нанокомпозитных сегнетоэлектрических пленок // Радиотехника, 2012. — № 7. — С. 117–122.
3. Song K. et al. A steel property optimization model based on the XGBoost algorithm and improved PSO // Computational Materials Science, 2020. Vol. 174. P. 109472.

УДК 538.911

Наводораживание графена в переменном электрическом поле для создания латеральных гетероструктур графен/графан

Катин К. П., д. ф.-м. н., Подливаев А. В., к. ф.-м. н.
Лаборатория 2D-наноматериалов в электронике, спинтронике и фотонике, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
KPKatin@yandex.ru

Методом молекулярной динамики исследована кинетика адсорбции водорода на графен в переменном электрическом поле. На основе микроскопических параметров, извлеченных из молекулярной динамики, построена макроскопическая диффузионная модель. Обоснована возможность создания гетероструктур графен/графан.
Ключевые слова: графен; молекулярная динамика; гетероструктура; зонная структура.

Ширина запрещенной зоны в чистом графене равна нулю, что не очень удобно для его использования в электронике. Адсорбируя водород, графен превращается в полупроводник, причем ширину его запрещенной зоны можно настраивать, меняя концентрацию адсорбировавшегося водорода. Процесс адсорбции обратим: при нагревании водород улетучивается и высокая проводимость графена восстанавливается. Кроме того, водород может собираться в устойчивые островки на поверхности графена. Управляя формой и размером таких островков, можно придавать графену самые разные электронные характеристики, полезные для тех или иных применений. В настоящей работе исследовалось наводораживание графена в переменном электрическом поле [1]. Хотя колебания атомов водорода на графене сильно ангармоничны, они все-таки могут входить в резонанс с полем. При подходящей частоте поля сильно увеличивается подвижность водорода на графене, а также вероятность его десорбции. Из-за ангармонизма оптимальная частота поля зависит от его амплитуды. Наши расчеты проводились при амплитуде поля 0, 1, 5 и 10 В/нм, а экстраполяция позволила предсказать результат для произвольного поля. Использование сравнительно сильных полей связано с ограниченным временем, доступным молекулярной динамике. Из-за этого эффект от поля при моделировании должен быть очень сильным, чтобы интересующий нас процесс (десорбция или миграция) занимал время порядка наносекунды (для обычной молекулярной динамики) или миллисекунды (для гипердинамики). Воздействие поля на водород объясняется наличием у него положительного заряда, величина которого зависит от расстояния до графена. Поэтому поставленная задача не может быть решена при помощи классических межатомных потенциалов, которые не учитывают атомные заряды или учитывают их слишком грубо. Мы использовали неортогональную модель сильной связи и гипердинамику [2]. Это позволило, с одной стороны, добиться высокой точности, а с другой — достичь значительного времени моделирования. Мы экстраполировали аррениусовскую зависимость для скорости процесса миграции и десорбции, считая, что энергия активации и частотный фактор каждого из процессов зависят от внешнего поля. На основании полученных данных мы построили диффузионную модель, описывающую поглощение водорода,

его миграцию по поверхности водорода и десорбцию. Модель также учитывает воздействие переменного электрического поля, которое может быть неоднородным. Расчеты показали, что при реалистичных условиях концентрация адсорбированного водорода в облученных и необлученных областях может отличаться в десять и более раз. Это объясняется тем, что водород быстро мигрирует из облученных областей или улетучивается под действием поля. Равновесная концентрация водорода определяется конкуренцией миграции, адсорбции и десорбции, относительная значимость которых меняется в зависимости от величины внешнего поля. Полученные результаты открывают возможность управлять адсорбировавшимся водородом с помощью излучения. В частности, водород будет «подстраиваться» под интерференционную картину, которую можно создать при помощи лазеров на поверхности графена. Таким образом, можно получить планарную гетероструктуру графен/графан с заданной геометрией. Более сложная интерференционная картина может помочь создать резонансно-туннельный диод и другие устройства.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWU-2024-0014.

Литература

1. Podlivaev A. I., Katin K. P. Competition of hydrogen desorption and migration on graphene surface in alternating electric field: Multiscale molecular dynamics and diffusion study // Applied Surface Science, 2025. Vol. 686. P. 162125.
2. Katin K. P., Grishakov K. S., Podlivaev A. I., Maslov M. M. Molecular Hyperdynamics Coupled with the Nonorthogonal Tight-Binding Approach: Implementation and Validation // Journal of Chemical Theory and Computation, 2020. Vol. 16. № 4. P. 2065–2070.

УДК 621.382.323

Разработка конструкции транзисторных гетероструктур на основе нитрида галлия на кремниевых подложках для создания высоковольтных транзисторов

Царик К. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
tsarik_kostya@mail.ru

Продемонстрированы результаты моделирования гетероструктур типа *p*-GaN/AlGaN/GaN и сформированных на них транзисторных топологий силового предназначения. Представлены особенности эпитаксиального выращивания экспериментальных образцов методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевых подложках.
Ключевые слова: нитрид галлия; наногетероструктура; двумерный электронный газ; силовой GaN-транзистор; моделирование транзистора.

В интегральных схемах (ИС) транзисторы на основе нитрида галлия обладают рядом преимуществ по сравнению с устройствами, основанными на кремниевой технологии. Низкие потери при переключениях, а также способность работать на высоких частотах делают GaN HEMT более перспективными в сфере электроники, где важны такие параметры, как эффективность преобразования энергии, большие плотности по мощности, время переключения и простая топология [1, 2].

Внимание разработчиков силовых HEMT на основе GaN сосредоточено на создании нормально закрытых приборов, которые способны функционировать совместно со стандартными КМОП-драйверами. На сегодняшний день решением данного вопроса является использование в интегральной схеме нормально закрытого и нормально открытого GaN-транзисторов. Это приводит к возникновению проблем в реализации КМОП-схемы. Перед исследователями стоит задача формирования гетероструктуры с возможностью создания на ней как нормально открытого, нормально закрытого транзистора, так и *p*-канального GaN-транзистора.

В данной работе продемонстрирована разработка конструкции транзисторных гетероструктур на основе *p*-GaN/AlGaN/GaN для создания интегральных схем на высоковольтных транзисторах с учетом физического и топологического моделирования GaN HEMT. Было проведено моделирование гетероструктур с транзисторной топологией силового предназначения. В результате проведенного исследования при помощи математического моделирования было обнаружено, что при увеличении концентрации Mg в GaN cap-слое с 10^{16} до 10^{18} см$^{-3}$ пороговое напряжение значительно увеличивается с 1,5 до 5 В, ток стока уменьшается с 0,15 до 0,08 А/мм при 3 В на затворе и 15 В на стоке, а напряжение пробоя меняется незначительно (1,3 %).

Представлены особенности эпитаксиального выращивания экспериментальных образцов методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевых подложках. Выращивание производилось в установке аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии в составе нанотехнологического комплекса «Нанофаб 100». В составе переходных слоев были использованы комбинации конструкций

на основе сверхрешеток и на основе ступенчатых градиентных слоев. В качестве основных методов исследования послеростового процесса использовались сканирующая зондовая микроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния света. Для измерения электрофизических характеристик гетероструктур формировались тестовые топологии контактов. Для этого применялись лазерная и электронная литографии.

Таким образом, были определены основные подходы к уменьшению дефектности и сконструированы приборные гетероструктуры на основе нитрида галлия толщиной порядка 2 мкм с легированными и нелегированными слоями в составе гетероструктуры на поверхности кремниевых подложек.

Литература

1. Cui M. et al. Monolithic GaN half-bridge stages with integrated gate drivers for high temperature DC-DC buck converters // IEEE Access, 2019. Vol. 7. P. 184375–184384.
2. Li A. et al. A 4-transistor monolithic solution to highly linear on-chip temperature sensing in GaN power integrated circuits // IEEE Electron Device Letters, 2022. Vol. 44. № 2. P. 333–336.

УДК 621.384.6

Создание стенда для испытаний ионных источников в ИЯФ СО РАН

Бруль А. В., Вахрушев Р. В., Девятайкина Т. А., Константинов С. Г., Кузьмин Е. И., Куркучеков В. В., Орешонок В. В., Павлюченко В. А., Рыбицкая Т. В., Рябченко К. К., Скляров В. Ф., Сорокин А. В., Старостенко А. А., Чуркин И. Н.

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
V.F.Sklyarov@inp.nsk.su

Разработан и создан специализированный стенд для испытаний ионных источников. Подготовлен вакуумный объем с комплексом диагностик, включающий в себя измерения ускоряющего напряжения, тока зазора ионного источника и тока вытягивающего электрода, что позволяет контролировать режим работы ионного источника по параметрам энергии ионов и полному току пучка. Измерения поперечного профиля тока пучка осуществляются с помощью вторично-эмиссионных датчиков тока. В совокупности расположение двух независимых систем измерения профиля пучка в разных точках по длине траектории позволяет оценить угловую расходимость пучка ионов. Также для измерения эмиттанса пучка была разработана диагностика на основе методики pepper-pot.

Ключевые слова: ионные источники; экспериментальные установки; диагностика пучков заряженных частиц.

В производстве современных полупроводниковых элементов одним из важнейших технологических процессов является имплантация выделенного сорта ионов в кремниевую подложку. Выполнение данной операции осуществляется при помощи специализированных электрофизических установок — ионных имплантеров.

Как правило, имплантеры состоят из нескольких функционально-независимых систем: источника ионов, системы масс-сепарации, ионной оптики, системы ускорения (и/или замедления), развертки ионного пучка в плоскости облучаемого образца, а также диагностических и мониторинговых систем.

Характеристики ионных пучков, создаваемых ионным источником в имплантере, кардинальным образом определяют предельно достижимые параметры всей установки в целом. Масс-сепарация ионного пучка выделяет требуемый сорт частиц, который используется для легирования. В настоящий момент времени наилучшее массовое спектральное разрешение достигается в системах с магнитным разделением изотопов. Для таких систем сепарации требуются ионные пучки определенной (ленточной или круглой) формы и с малым угловым разбросом на входе. Глубина проникновения ионных пучков в толщу облучаемого образца в основном определяется энергией ионов в пучке, которая определяется двумя вкладами. Изначально ионы ускоряются при экстракции из ионного источника, далее — в ускоряющем модуле. В целях транспортировки ионных пучков в вакуумном тракте и уменьшения потерь полного тока используются дополнительные оптические элементы — магнитные или электростатические линзы. При этом величина рабочего

тока пучка ионов, прошедших через всю ионно-оптическую и ускоряющую систему имплантера, зависит от величины эмиттанса пучка ионов.

Ряд технологий предъявляет жесткие требования к параметрам ионных пучков, падающих на облучаемые образцы, в особенности к величине угловой расходимости ионного пучка. Данная характеристика имеет определяющее значение для технологий нанометрового разрешения. Угловой разброс пучка на выходе определяется ионной оптикой установки, а также температурой ионов в пучке, выходящем из ионного источника.

В целях разработки специализированных ионных источников для нужд микроэлектронной промышленности на базе ИЯФ СО РАН в 2024 году при поддержке Минобрнауки и Российской академии наук в рамках национального проекта «Наука и университеты» было образовано новое подразделение.

Наибольшую актуальность в настоящий момент времени представляют ионные источники типа Бернаса — Чавета, предполагающие горение пеннинговского разряда во внешнем магнитном поле. Данные источники позволяют получать большие значения ионных токов, зависящие от формы выходного отверстия и величины вытягиваемого электрического поля. Как правило, температура ионных пучков составляет величину до 10 эВ и, как следствие, угловая расходимость получаемых ионных пучков определяется ионной оптикой системы вытягивания.

Поскольку для технических приложений необходимы ионные пучки с наперед заданными параметрами, то на первом этапе работ был разработан и создан специализированный стенд для испытания ионных источников. Испытательный стенд, включающий в себя газовакуумную систему, систему высоковольтного питания испытываемых ионных источников, а также комплекс диагностик. При помощи используемых диагностик можно получить информацию о величине полного тока ионного пучка, его энергии, геометрическом профиле, а также эмиттансе.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

УДК 539. 23

Опыт реализации проекта молодежной лаборатории фотонных интегральных схем ТУСУР

Перин А. С.
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
anton.s.perin@tusur.ru

В докладе представлен опыт реализации проекта молодежной лаборатории фотонных интегральных схем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), создание которой было поддержано Министерством науки и высшего образования РФ. Приведены результаты выполняемых исследований.

Ключевые слова: фотонная интегральная схема; ФИС; ТУСУР; ЛФИС.

Основными элементами всех фотонных интегральных схем являются базовые структуры на основе оптических волноводов, в которых распространяется оптическое излучение. Эти волноводы обеспечивают управление светом и позволяют создавать сложные оптические функции.

При воздействии внешних факторов на фотонные интегральные схемы происходит изменение параметров света, проходящего через волноводы. Эти изменения могут быть измерены и использованы для получения информации о состоянии окружающей среды или объекта исследования.

За прошедшие три года в лаборатории фотонных интегральных схем Томского университета систем управления и радиоэлектроники достигнуты значительные результаты [1–10] в области развития технологий формирования пленок из нитрида кремния, ниобата лития и дальнейшего формирования в этих пленках фотонных интегральных схем на основе оптических волноводов: разработаны конструкции и изготовлен ряд базовых элементов на кристалле (фотонной интегральной схеме на основе пленок Si_3N_4/SiO_2) — Y-делитель, X-делитель, микрокольцевой резонатор. Разработана методика изготовления линзованных оптических волокон с диаметром поля моды излучения не более 2,5 мкм в области перетяжки по уровню 1/2 мощности и оптическими потерями не более 3 дБ при стыковке двух линзованных волокон.

Перечисленные базовые элементы входят в состав фотонной интегральной схемы для узкополосного лазерного источника, разрабатываемого в ООО «Т8». Разработана технология формирования маски и отрабатывается технологии травления тонкопленочного ниобата лития на изоляторе, что представляет интерес для ООО «Т8» в контексте поиска технологического партнера по изготовлению элементов фотонных интегральных схем на основе тонкопленочного ниобата лития на изоляторе для создания широкополосного электрооптического модулятора. Разработан электрооптический сенсор напряженности электрического поля с повышенным динамическим диапазоном: представлена новая схема организации чувствительного элемента электрооптического сенсора напряженности электрического поля, позволяющая увеличить динамический диапазон измеряемой напряженности электрического поля.

Помимо этого, активно развивается технология формирования оптических волноводных структур в тонких пленках ниобата лития, что является важным этапом для создания и применения оптоэлектронных устройств. Эти устройства включают оптические сенсоры, оптические модуляторы и другие компоненты для применения в области телекоммуникаций и сенсорики. Данные достижения открывают новые горизонты для внедрения фотонных технологий в практические приложения и способствуют развитию высокотехнологичных решений.

Фотоника и фотонные интегральные схемы представляют собой важнейшие направления в современных технологиях. Их развитие открывает новые горизонты для улучшения качества жизни и повышения эффективности различных процессов в разных отраслях. Инвестиции в исследования и разработки в этой области будут способствовать дальнейшему прогрессу и инновациям.

Лаборатория фотонных интегральных схем Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) вносит значительный вклад в процессы импортозамещения компонентов оптоэлектроники, что является важным шагом к обеспечению технологического суверенитета РФ. Разработка компонентов для узкополосных лазерных источников и широкополосных электрооптических модуляторов на основе тонкопленочного ниобата лития позволят создать отечественные аналоги высокотехнологичных устройств, ранее зависевших от импорта. Это не только снижает риски, связанные с внешними поставками, но и способствует укреплению позиций России на мировом рынке оптоэлектронных технологий.

Важным аспектом работы лаборатории является подготовка высококвалифицированных кадров в области фотоники и оптоэлектроники. В процессе исследований и разработок студенты и молодые специалисты получают уникальные знания и практические навыки, что позволяет им успешно конкурировать на рынке труда и вносить свой вклад в развитие отечественной науки и промышленности.

Таким образом, результаты работы лаборатории не только способствуют созданию новых технологий и компонентов, но и играют ключевую роль в формировании кадрового потенциала, необходимого для реализации стратегических задач страны в области высоких технологий и обеспечения технологической независимости.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2022-0004 «Исследование и разработка способов изготовления интегральных оптических волноводов и элементов на их основе»).

Литература

1. Kuznetsov I. V., Perin A. S. Increasing measurements range of electro-optic sensors for electric field by using a Mach-Zehnder interferometer modulators array // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2022. Vol. 86. № 13. P. 119–123.
2. Kuznetsov I. V., Perin A. S. Interference pattern analysis approach for sensory applications // St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics, 2023. Vol. 16. № 1.2. P. 133–138.
3. Romanenko D. K., Shchukin A. V., Bodrenin V. E. and Perin A. S. Estimation of the Coupling Efficiency of Optically Induced Waveguides in a Lithium Niobate Crystal // St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics, 2023. Vol. 16. № 1.2. P. 121–125.

4. Пат. 2794061 РФ. Патент на изобретение. Преобразователь на основе тонкой пленки электрооптического кристалла / Кузнецов И. В., Алтухов В. А., Перин А. С. — заявл. № 2022126610 от 13.10.2022; опубл. 11.04.2023.
5. 160. Пат. 2795387 РФ. Патент на изобретение. Способ формирования оптического волновода в кристалле ниобата лития / Бодренин В. Е., Романенко Д. К., Щукин А., Перин А. С. — заявл. № 2023101361 от 24.01.2023; опубл. 03.04.2023.
6. Kuznetsov I. V., Perin A. S. Mathematical modeling of the parameters of an electro-optic modulator in the Mach–Zehnder interferometer configuration based on thin lithium niobate films // Journal of Optical Technology, 2023. Vol. 90. № 2. P. 93–97.
7. Kuznetsov I. V., Perin A. S. Modeling of ZGDC Polarization Splitter on SiN // Optics and Spectroscopy, 2024. Vol. 132. № 3. P. 270–272.
8. Barbin E., Nesterenko T., Koleda A., Shesterikov E., Kulinich I., Kokolov A., Perin A. The Design, Modeling and Experimental Investigation of a Micro-G Microoptoelectromechanical Accelerometer with an Optical Tunneling Measuring Transducer // Sensors, 2024. Vol. 24. № 3. P. 765.
9. Perin A., Gauthier-Manuel L., Bassignot F., Chauvet M. Efficient photorefractive effect triggered by pyroelectricity in magnesium doped $LiNbO_3$ films // Optics Letters, 2024. Vol. 49. № 8. P. 1989–1992.
10. Kuznetsov V., Perin A. S., Zhuravlev A. A. Modeling of an electric field sensor in configuration of a photonic integrated circuit with pockels cell and polarization splitter // Optics and Spectroscopy, 2024. Vol. 132. № 11. P. 1160–1164.

УДК 621.382

Нитевидные нанокристаллы на основе висмутсодержащих твердых растворов InAsBi на кремнии: процессы формирования и функциональные свойства

Федоров В. В.[1,2], Кавеев А. К.[2], Минив Д. В.[2], Федина С. В.[1,2], Голтаев А. С.[2], Можаров А. М.[1,2], Павлов А. В.[1,2], Мухин И. С.[1,2]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б

[2] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А

Исследованы механизмы эпитаксиальной стабилизации висмутсодержащих полупроводниковых твердых растворов InAsBi на подложках Si. Предложена КМОП-совместимая методика формирования ансамблей самокаталитических нитевидных нанокристаллов InAsBi с высоким структурным совершенством и содержанием Bi ~2 ат.%.

Ключевые слова: A^3B^5; гетероструктуры; нитевидные нанокристаллы; молекулярно-пучковая эпитаксия; эпитаксиальная стабилизация; висмутсодержащие полупроводники.

Узкозонные полупроводниковые соединения являются ключевым материалом для создания фотоприемных и светоизлучающих устройств среднего инфракрасного диапазона (3–8 мкм), широко востребованных в мультиспектральных системах обнаружения и дистанционного зондирования. В данной работе рассматривается новый класс материалов — эпитаксиальные массивы нитевидных нанокристаллов (ННК) висмутсодержащих твердых растворов InAsBi [1]. В сравнении с соединениями HgCdTe, полупроводниковые гетероструктуры A^3B^5 отличаются простотой легирования до *p*-типа проводимости непосредственно в процессе роста. Введение малой доли «тяжелых» атомов висмута в соединения A^3B^5 способствует значительному уменьшению ширины запрещенной зоны ($\Delta E_g \sim -70$ мэВ/ат. %), а также увеличивает энергию спин-орбитального отщепления валентной зоны (ΔE_{SO}), что позволяет выйти из условий резонансной оже-рекомбинации ($\Delta E_{SO} > E_g$), ограничивающей эффективность светоизлучающих устройств на основе узкозонных полупроводников [2]. Переход к трехмерным гетероструктурам на основе ННК позволяет формировать гетеропереходы в аксиальной или радиальной геометриях, а также выращивать эпитаксиально ориентированные массивы ННК с высоким структурным совершенством даже на решеточно-рассогласованных подложках, таких как кремний. Каждый ННК в массиве может функционировать как отдельное устройство, а эффекты локализации и резонансного усиления оптического поля позволяют управлять спектральными характеристиками и формировать диаграмму направленности оптоэлектронных приборов [3].

В настоящей работе массивы ННК InAsBi формировались методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках Si (111) (рис. 1). Кристаллическая структура и композиционный состав ННК изучались методами просвечивающей электронной микроскопии, энергодисперсионного микроанализа и рентгенодифракционного картирования обратного пространства. Установлено, что самоорганизованно

формирующиеся наноразмерные капли расплава висмута и индия могут служить катализатором для роста ННК по механизму «пар — жидкость — кристалл». Определено окно ростовых условий, позволяющее выращивать массивы самокаталитических ННК InAsBi с содержанием Bi ~2 ат.% и E_g < 300 мэВ (T = 10 K) как на затравках InAs, так и на поверхности Si (111), терминированной водородом. В последнем случае данная методика совместима с КМОП-технологией, так как максимальная температура в процессе формирования ННК не превышает 350 °C. Полученные массивы ННК имеют бездвойниковую структуру типа сфалерита и повторяют кристаллографическую ориентацию подложки Si. Реализованный самокаталитический механизм роста ННК предпочтителен как с точки зрения качества материала, так и ростовой технологии, поскольку при наличии стороннего катализатора, например золота, могут формироваться нежелательные примесные центры. В отличие от золотой, каталитическая капля In-Bi может быть удалена путем отжига или повторно восстановлена, что позволяет переключаться между радиальным и аксиальным механизмами роста. Встраивание атомов Bi было также подтверждено смещением низкотемпературного фотолюминесцентного отклика структур в длинноволновую область (4–5 мкм).

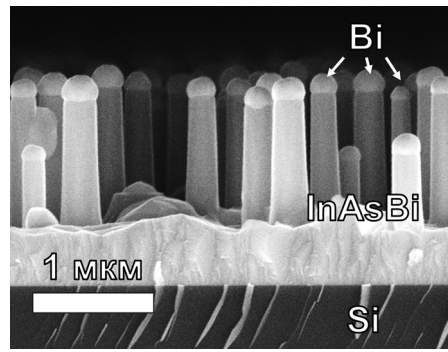


Рис. 1. Поперечное сечение скола гетероструктуры InAsBi на Si (111); изображение получено методом растровой электронной микроскопии

Представленные научные результаты получены в рамках конкурса Минобрнауки России по созданию молодежных лаборатории в «Научно-исследовательской лаборатории эпитаксиальных наноструктур соединений A^3B^5 на кремнии» (FSEG-2024-0017, рук. Федоров В. В.)

Литература

1. Wang L., Zhang L., Yue L., Liang D., Chen X., Li Y., Lu P., Shao J., Wang S. Novel Dilute Bismide, Epitaxy, Physical Properties and Device Application // Crystals, 2017. Vol. 7. № 3. P. 63
2. Hader J., Badescu S. C., Bannow L. C., Moloney J. V., Johnson S. R., Koch S. W. Auger losses in dilute InAsBi // Applied Physics Letters, 2018. Vol. 112. № 19. P. 192106.
3. Dvoretckaia L., Mozharov A., Pavlov A., Polozkov R., Mukhin I. Numerical study of detectivity for near-IR photodetectors based on InAsP Nws // Scripta Materialia, 2023. Vol. 226. P. 115246.

УДК 537.226.4; 621.382; 54.05; 539.2

Разработка технологий получения полимерных сегнетоэлектрических материалов на основе поливинилиденфторида

Макеев М. О., к. т. н., Осипков А. С., к. т. н., Бурьянская Е. Л., Моисеев К. М., Михалев П. А., Кондрашов С. В., д. т. н.
МГТУ им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1
m.makeev@bmstu.ru

Разработаны технологии получения полимерных сегнетоэлектрических материалов на основе поливинилиденфторида из отечественного сырья, включая разработку методики синтеза сополимера ВДФ-ТрФЭ и нового метода поляризации полимерных сегнетоэлектрических пленок с использованием плазмы тлеющего разряда.

Ключевые слова: поливинилиденфторид; сегнетоэлектрики; пьезокоэффициент; поляризация; датчик.

В настоящее время сегнетоэлектрические полимерные материалы находят широкое применение в различных областях науки и техники: в качестве пьезодатчиков, наногенераторов/сенсоров, элементов адаптивных оптических (ЭАП) систем, в устройствах гибкой электроники, биомедицинских изделиях и др. [1–3].

Широкое промышленное применение в РФ полимерных сегнетоэлектриков в ЭАП и других системах ограничивается сегодня рядом факторов, основным из которых является отсутствие необходимого для этого полимерного материала. На сегодняшний день, несмотря на присутствие в РФ одного из ведущих производителей фторполимеров (группа компаний «ГалоПолимер»), в нашей стране отсутствует технология получения полимерных сегнетоэлектрических пленок из отечественного сырья. В этой связи получение качественных пленок с высоким пьезоэлектрическим откликом требует тщательного изучения их структуры в целях разработки эффективных методик их получения. Кроме того, в РФ не производится мономер трифторэтилена, необходимый для синтеза сополимера ВДФ-ТрФЭ, который на сегодняшний день является одним из наиболее эффективных полимерных пьезоэлектриков.

В ходе выполнения работ была создана методика синтеза сополимера ВДФ-ТрФЭ путем гидродехлорирования фторкаучука СКФ-32 с подбором подходящего катализатора (5%-й Pd/C). Предложен механизм реакции гидродехлорирования СКФ 32 и разработаны методики получения фторированных сополимеров на основе тетрафторэтилена. Также было проведено комплексное исследование влияния технологических режимов получения сегнетоэлектрических полимерных пленок на их молекулярную и надмолекулярную структуру и связанные с ней электрофизические свойства полимера.

Помимо этого, был доработан метод поляризации полимерных сегнетоэлектриков с применением плазмы тлеющего разряда в двухэлектродной системе, а также проведены работы, направленные на повышение производительности и однородности поляризации пленок по площади [4]. По сравнению с контактной

поляризацией или поляризацией в коронном разряде, поляризация в плазме тлеющего разряда позволяет повысить эффективность процесса за счет низкой вероятности пробоя образца в процессе поляризации, снижения времени обработки, однородности поляризации по площади образца, высокой производительности процесса. Кроме того, проведение процесса при пониженном давлении (в вакууме) дает возможность его объединения в едином вакуумном цикле с последующей операцией формирования электродов вакуумными методами нанесения тонкопленочных покрытий.

Путем механической одноосной вытяжки и последующей поляризации были получены образцы пленок из отечественного сополимера ВДФ-ТФЭ, обладающие пьезокоэффициентом d_{33} более 20 пКл/Н. Также были изготовлены и исследованы образцы трехслойных пьезоэлектрических преобразователей. Величины d_{33} для пьезопреобразователей с параллельным соединением пленочных элементов составляют более 150 пКл/Н.

Помимо этого, были разработаны конструкции датчика вибрации и гидрофона на основе пленок ПВДФ, проведена их технологическая проработка, изготовлены и испытаны макетные образы таких устройств; проработан вопрос применения пленок ПВДФ в акустической микроскопии.

Литература

1. Mohammadpourfazeli S. et al. Future prospects and recent developments of polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric polymer; fabrication methods, structure, and electro-mechanical properties // RSC advances, 2023. Vol. 13. I. 1. P. 370–387.
2. Sukumaran S. et al. Recent advances in flexible PVDF based piezoelectric polymer devices for energy harvesting applications // Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2021. Vol. 32. I. 7. P. 746–780.
3. Vodyashkin A.A. et al. Piezoelectric PVDF and its copolymers in biomedicine: innovations and applications // Biomaterials Science, 2024. Vol. 12. I. 20. P. 5164–5185.
4. Basov B.A. et al. The Glow Discharge Plasma Polarization Effect on PVDF Film Properties // 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium (UFFC-JS), 2024. P. 1–6.

УДК 621.3.049

Применение методик MPW и MPC в реализации аналоговых микросхем на основе базовых матричных кристаллов.

Попов А. Э.[1], Прокопенко Н. Н.[1], Кузнецов Д. В.[1], Дворников О. В.[2]
[1] Донской государственный технический университет
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
mailap@mail.ru
[2] ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»
220113, Беларусь, г. Минск, ул. Якуба Коласа, 73
oleg_dvornikov@tut.by

Дано обоснование целесообразности использования методологии «Multi-Project Wafer» (MPW) при разработке аналоговых микросхем на основе БМК. Показано, что более эффективное использование площади кристалла обеспечивает методология Multi-Project Chip с несколькими проектами на одном кристалле. Приведены предварительные данные по разработке отечественного аналогового БМК.
Ключевые слова: аналоговая микросхема, базовый матричный кристалл, операционный усилитель, аналоговые и дискретно-аналоговые фильтры.

В настоящее время существует значительная потребность в расширенной номенклатуре аналоговых интегральных микросхем (ИМС) различной степени интеграции — операционные, инструментальные усилители, регуляторы и стабилизаторы напряжения, системы управления электродвигателями, аналоговые вычислители, элементы и устройства систем автоматического управления и т. п.

Серьезной проблемой является сравнительно небольшие объемы заказов специализированных ИМС (от сотен до тысяч шт.), что делает процесс их разработки и мелкосерийного выпуска экономически неоправданным. В результате этого, на рынке доминируют очень крупные зарубежные вендоры, выпускающие ИМС большими тиражами.

Решить проблему выпуска специализированных отечественных аналоговых ИМС, в том числе сравнительно небольших тиражей, можно путем использования идеологии базовых матричных кристаллов (БМК). Срок изготовления партии полузаказных ИМС на основе БМК может составлять 4–6 недель (после завершения проектирования схемы) против 1–2 лет при традиционном подходе.

В настоящее время в РФ готовится к выпуску следующий набор БМК [1, 2]:

1) универсальный аналоговый БМК, содержащий значительное количество (200–5000) транзисторов различных типов, резисторов и конденсаторов;
2) аналоговый БМК для реализации стабилизаторов напряжения и тока, усилителей, силовых коммутаторов, полных схем регулирования и управления нагрузками, содержащий не менее 3 мощных элементов.

Реализация предполагается на основе 2 мкм планарного тех.процесса. Разработаны структурно-топологические концепции обоих вариантов БМК, а так же активные и пассивные элементы, топология универсальных и мощных макроячеек. При этом используются пластины диаметром 100 мм. Количество физических кристаллов с одной пластины — до 1000 шт. Это позволяет использовать идеологию MPW, когда на одной пластине изготавливается одновременно несколько различных интегральных

схем. Таким образом, расходы на изготовление могут быть разделены между несколькими заказчиками, что снижает себестоимость каждого изделия.

Важно, что пластины БМК (без металлизации соединений) могут быть изготовлены заранее и храниться до возникновения необходимости. После получения заказа остается сформировать только слои металлизации межсоединений.

Структурно-топологическое решение БМК предполагает регулярную структуру из нескольких одинаковых макроячеек. На рис. 1 приведена топология БМК [1] с четырьмя универсальными макроячейками, каждая из которых содержит 60 активных многофункциональных элементов (твинсторов) и набор конденсаторов и резисторов. Это позволяет создать устройства, аналогичные по сложности, например, операционному усилителю AD927.

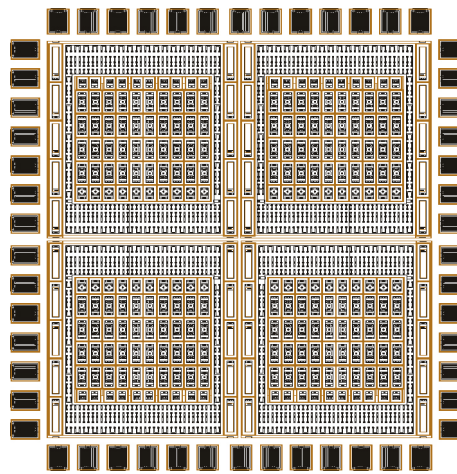


Рис. 1. Топологическая схема маломощной версии аналогового БМК

Таким образом, на одном кристалле можно выполнить 4 различных изделия, то есть реализовать подход «Multi-Project Chip». Это значительно снизит себестоимость каждого изделия, т. к. расходы на изготовление партии могут быть разделены между всеми заказчиками.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10023, https://rscf.ru/project/23-79-10023.

Литература

1. Попов А. Э., Прокопенко Н. Н., Пахомов И. В., Кузнецов Д. В., Дворников О. В. Комплект аналоговых базовых матричных кристаллов как платформа быстрой разработки импортозамещающих аналоговых микросхем // Российский форум «Микроэлектроника 2024». 10-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. — М.: Техносфера, 2024. — С. 318–319.
2. Дворников О., Чеховский В., Попов А. Проектирование биполярных аналоговых базовых матричных кристаллов // Электронные компоненты, 2025. — № 1. — С. 29–34.

УДК 621.3.049.77

Базовый кристалл для изготовления комплекта аналоговых микросхем с входными полевыми транзисторами

Дворников О. В.[1], Чеховский В. А.[2], Попов А. Э.[3], Кузнецов Д. В.[3]
[1] ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»
220113, Беларусь, г. Минск, ул. Якуба Коласа, 73
oleg_dvornikov@tut.by
[2] «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета
220006, Беларусь, г. Минск, ул. Бобруйская, 11
[3] Донской государственный технический университет
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
mailap@mail.ru

Разработан базовый кристалл, предназначенный для производства функциональных аналогов маломощных микросхем с малым входным током и однополярным напряжением питания: AD8244, AD8625, AD8220, WSH223.

Ключевые слова: операционный усилитель, инструментальный усилитель, полевой транзистор, управляемый *p-n*-переходом, базовый кристалл, комплементарные биполярные транзисторы.

В различных областях науки и техники требуется регистрация постоянных токов крайне малой величины, т.е. менее 10^{-12} А, или обработка сигналов высокоомных источников, внутреннее сопротивление которых превышает сотни мегаом. Примером таких приборов могут быть электрометры, измерители параметров полупроводниковых приборов, устройства для высокоточных измерений импедансов, усилители фотодиодов, согласующие устройства датчиков, медицинская техника и др.

Часто для изготовления такой аппаратуры применяются микросхемы фирмы Analog Devices с входными *n*-JFET AD8244, AD8625, AD8220 или операционный усилитель WSH223 фирмы Tesla с входным током менее 500 фА. Появившиеся в последнее время затруднения, а в некоторых случаях и невозможность получения отечественными разработчиками зарубежных комплектующих изделий делают актуальным изготовление отечественных функциональных аналогов указанных микросхем.

В работе приведены результаты моделирования нескольких вариантов операционных усилителей с входными *n*-JFET [1], показана возможность уменьшения напряжения смещения нуля и входного тока за счет подстройки сопротивлений резисторов.

На основе полученных результатов разработана топология экспериментального образца базового кристалла с применением пережигаемых перемычек для изменения сопротивления полупроводниковых резисторов [2]. С помощью фотошаблонов выполняется корректировка некоторых параметров интегральных элементов базового кристалла для оптимизации статических и динамических характеристик операционных усилителей [3] и осуществляется реализация функций указанных зарубежных микросхем.

Сформулированы направления дальнейшей модернизации для уменьшения занимаемой базовым кристаллом площади полупроводниковой пластины — уменьшение количества вспомогательных контактных площадок, подстраиваемых резисторов и масштабируемых транзисторов на основании анализа результатов измерений напряжения смещения нуля и входного тока экспериментальных образцов разработанных функциональных аналогов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10069, https://rscf.ru/project/23-79-10069.

Литература

1. Биполярные // Интеграл. — URL: https://integral.by/produktsiya/tekhnologii/bipolyarnye (дата обращения 07.07.2025).
2. Vyne R. L., Davis W. F., Susak D. M. A monolithic p-channel JFET quad op amp with in-package trim and enhanced gain-bandwidth product // IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1987. Vol. 22. Iss. 6. P. 1130–1138. https://doi:10.1109/JSSC.1987.1052864.
3. Абрамов И. И., Дворников О. В. Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем. — Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, Минск, 2006. — 286 с.

УДК 621.391, 621.396.96

Исследование и разработка радиосистемы с методом разделения каналов на базе вихревых волн

Айрапетян А. А., Азаров М. В., Мелёшин Ю. М.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе показан процесс разработки радиосистемы с методом разделения каналов на базе вихревых волн. Продемонстрированы этапы составления структурной схемы, выбора оптимальных типов формирования вихревых волн. Описан получившийся облик радиосистемы на базе вихревых волн.
Ключевые слова: вихревые волны; радиосистема; излучатель; СФП.

В настоящее время актуальной является задача исследования и разработки современных радиосистем связи, а также улучшения таких характеристик, как эффективность использования спектра и пропускной способности линии передачи. Одним из способов решения этих задач может стать переход от традиционных сферических волн к вихревым волнам со спиралевидным фазовым фронтом, известным также как волны с ненулевым орбитальным угловым моментом [1]. На базе вихревых волн существует подход, который позволит улучшить вышеописанные характеристики, а именно использование метода MDMA для разделения каналов [2]. MDMA (от англ. Mode Division Multiple Access) — множественный доступ с модовым разделением, позволяет повысить спектральную эффективность и емкость канала связи, не используя преимущества временных, частотных и кодовых методов разделения. В данной работе показан процесс разработки радиосистемы на базе MDMA-метода, включающий в себя такие этапы, как составление структурной схемы, теоретический расчет, электромагнитное моделирование формирователя вихревых волн.

В статье уделено внимание выбору формирователя вихревых волн. Для использования были рассмотрены печатные антенны с заданными фазовыми программами для каждого излучателя [3–4], а также спиральные фазовые пластины (СФП), изготовленные при помощи технологии 3D-печати [5–6]. Рассмотрены существующие радиосистемы на базе вихревых волн, использующие метод MDMA [7].

В работе продемонстрировано, что использование метода MDMA может улучшить эффективность использования спектра и повысить емкость канала связи, а предложенные подходы позволят сконструировать радиосистему связи на базе вихревых волн.

Литература

1. Азаров М. В., Айрапетян А. А., Калошин В. А. и др. Вихревые электромагнитные волны: излучение, прием, перспективы использования // Радиотехника и электроника, 2025. — Т. 70. — № 3. — С. 187–208.
2. Wang L., Jiang F., Yuan Z., Yang J., Gui G. and Sari H. Mode division multiple access: a new scheme based on orbital angular momentum in millimetre wave communications for fifth generation // IET Communications, 2018. Vol. 12. № 12. P. 1416–1421.

3. Мелёшин Ю. М. Исследование и разработка антенны X-диапазона частот для формирования волн с ненулевым орбитальным угловым моментом // Труды МАИ, 2024. — № 135.
4. Chen R., Zhou J., Long W.-X. and Zhang W. Hybrid Circular Array and Luneberg Lens for Long-Distance OAM Wireless Communications // IEEE Trans. Commun., 2023. Vol. 71. № 1. P. 485–497.
5. Azarov M. V., Airapetian A. A., Meleshin Y. M. and Syedin E. M. Experimental Evaluation of 3D Printed Spiral Phase Plates for Orbital Angular Momentum Waves Generation // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation: IEEE, 2024. P. 790–793. DOI: 10.1109/edm61683.2024.10615054.
6. Ji W., Wu W., Chen Y., Xu O., Huang Q. and Dong X. Design of Flat and Spiral Phase Plates for Vortex Beam Generation for 3D Printing Purpose // 2024 22nd International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN), Harbin, China: IEEE, Jul. 2024. P. 1–3. DOI: 10.1109/icocn63276.2024.10648495.
7. Yagi Y., Sasaki H., Yamada T. and Lee D. 200 Gb/s Wireless Transmission Using Dual-Polarized OAM-MIMO Multiplexing With Uniform Circular Array on 28 GHz Band // Antennas Wirel. Propag. Lett., 2021. Vol. 20. № 5. P. 833–837.

УДК 621.3.049

Облик САПР Engee РТС для моделирования радиотехнических систем

к. т. н. Балакин Д. А.[1,3], Стельмах А. П.[2], Тильки И. Г.[1]
[1] ООО ЦИТМ «Экспонента»
115280, г. Москва, ул. Ленинская Слобода, 19, пом. 62/1
[2] ООО «Ритм»
121205, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, 42, стр. 1
[3] Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1

Представлен облик САПР Engee РТС, сочитающий в себя различные уровни моделирования радиотехнических систем: аналоговый, цифровой, математический и физический. Приведены алгоритмы, на основе которых базируется каждый из уровней моделирования. Показаны дальнейшие этапы развития САПР Engee РТС.

Ключевые слова: САПР Engee РТС; радиотехнические системы; системное моделирование.

Для успешной разработки и практического применения любой радиотехнической системы (РТС) необходимо качественное моделирование всех узлов системы, включая канал распространения сигнала, где реальные процессы существенно претерпевают искажения. В связи с этим к САПР по моделированию РТС предъявляют высокие требования по совмещению как аналогового и цифрового уровня, так и физического и математического уровня, где учитывается специфика антенно-фидерного тракта, а также распространение сигнала через среду. Кроме того, важным фактором является то, что все уровни моделирования должны быть интегрированы в единую среду для формирования общей модели, которая выступает языком общения между инженерами и главным конструктором. Такая модель используется на всем цикле разработки и практического внедрения РТС и впоследствии становится цифровым двойником РТС [3].

Помимо вышесказанного, САПР по моделированию РТС должны учитывать особенности аппаратной реализации РТС и уметь взаимодействовать с измерительной техникой и специальными вычислительными узлами (ПЛИС, ЦП, микроконтроллеры, видеокарты и др.), тем самым приближая точность модели к натурным сценариям.

Также нельзя оставить без внимания бурное развитие искусственного интеллекта, в частности технологию нейронных сетей. Поэтому современные САПР должны обеспечивать интеграцию алгоритмов, основанных на нейронных сетях, в общую модель РТС.

В докладе представлен облик САПР Engee РТС, который позволяет соединить в себе все уровни моделирования: аналоговый, цифровой, физический и математический. Описываются алгоритмы, на которых базируется каждый из уровней моделирования. Показано, какими способами можно обеспечить взаимодействие с реальной аппаратурой в САПР РТС. Представлена концепция интеграции нейронных сетей в цикл моделирования и разработки РТС.

Литература

1. Баскаков С. И. Электродинамика и распространения радиоволн: учеб. пособие для вузов по спец. «Радиотехника». — М.: Высшая школа, 1992. — 416 с.
2. Цымбал М. Р., Семичастнов А. Е., Балакин Д. А., Удалов Н. Н. Разработка цифрового двойника наземной радионавигационной системы по принципам модельно-ориентированного проектирования с помощью среды моделирования Engee // Труды МАИ, 2024. — № 136.
3. Балакин Д. А., Керский Е. В. Разработка цифрового двойника радиолокационной станции дальнего обнаружения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей», 2020. — № 1. — С. 10–18.
4. Евстратько В. В., Коноваленко А. И., Мишуров А. В., Юхманов А. Д. Цифровой радиоприемник на основе нейронной сети // Журнал радиоэлектроники, 2024. — № 1.

УДК 621.3.049.76

Особенности применения переходных отверстий в молд-компаунде при проектировании электронной компонентной базы микроэлектроники

Семенов С. П., Батин С. А., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Данная статья посвящена исследованию перспектив применения переходных отверстий в молд-компаунде (материале для герметизации кристаллов), применяемом в корпусировании интегральных схем и других изделий микро- и наноэлектроники. Основной целью исследования является изучение возможности электрического и механического соединения различных модулей в единую систему. Такая технология позволяет повысить плотность компоновки элементов и значительно сократить размеры конечного изделия.
Ключевые слова: молд-компаунд; система в корпусе; целостность сигналов; трехмерная интеграция.

В рамках работы представлены формулы расчета электрических параметров переходных отверстий, выполненных в молд-компаунде микросхемы. Проведен сравнительный анализ расчетных результатов, выполненных по математическим формулам, с результатом симуляции, проведенной методом конечных элементов в трехмерной среде моделирования. Проведен анализ распространения электрических и магнитных полей в молд-компаунде, образованных от вертикальных межуровневых соединений, обеспечивающих электрическую связь на разных уровнях системы в корпусе. Рассматриваются возможности моделирования распространения электромагнитных волн для анализа целостности сигналов и электромагнитной совместимости при проектировании мультикристальных сборок и систем в корпусе с применением приходных отверстий, выполненных в заливочном термореактивном молд-компаунде, предназначенном для герметизации микросхемы. Исходя из проведенного анализа полученных результатов моделирования, были определены оптимальные топологические структуры переходных отверстий в молд-компаунде, которые являются наилучшим соотношением между габаритным размером, технологической возможностью производства и вносимыми потерями в целостность сигнала. Сечение двухуровневой системы в корпусе с применением переходных отверстий в молд-компаунде (Plated Mold Via — PMV) приведено на рис. 1.

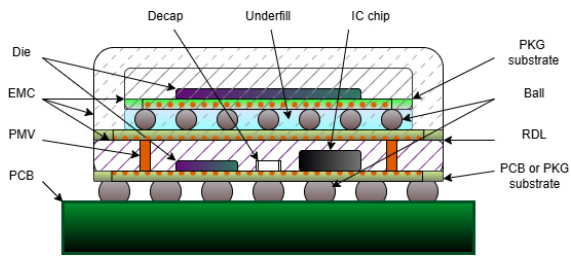


Рис. 1. Двухуровневая система в корпусе с применением PMV

УДК 621.3.049.76

Влияние конструкции и материала пресс-формы на процесс корпусирования микросхем методом трансферного прессования посредством эпоксидного монолитизирующего компаунда

Рабцевич В. А., Беляков И. А., к. т. н. Вертянов Д. В., к. т. н. Разживалов П. Н., д. т. н. Тимошенков С. П.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
vdv.vertyanov@gmail.com, igor-terra@yandex.ru

Исследовано влияние конструкции пресс-формы на скорость течения и распределение герметизирующего материала в процессе трансферного прессования. Изучена возможность проведения процесса трансферного прессования посредством экспериментального стенда на основе упрощенной модели пресс-формы. Рассмотрено влияние материала формы и предварительной обработки очищающим и смазывающим материалом на адгезию к форме герметизирующего материала в процессе корпусирования.
Ключевые слова: корпусирование; трансферное литье под давлением; пластиковый корпус; пресс-форма; эпоксидный монолитизирующий компаунд.

Корпусирование полупроводниковых микросхем в пластиковые корпуса чаще всего осуществляется путем заливки эпоксидным монолитизирующим компаундом (ЕМС) мультизаготовки, объединяющей в себе множество подложек со смонтированными на них кристаллами. Подложки в рамках такой мультизаготовки, называемой «стриплайн» или «стрип» [1, 2], размещаются на расстоянии друг от друга, соответствующем ширине линии реза. При этом сам стрип характеризуется значительными габаритами и, соответственно, значительной площадью области заливки.

Чтобы заполнить область заливки компаундом, используются процессы высокотемпературного прессования. При этом в случае корпусирования BGA наибольшее распространение получили процессы трансферного прессования, в которых компаунд загружается в литниковые каналы в виде таблеток пресс-материала.

Значительная площадь области заливки требует тщательного контроля параметров трансферного прессования, в том числе контроля скорости подачи материала плунжерами, температуры нагрева пресс-формы, времени выдержки материала после завершения хода плунжеров. Также при корпусировании на уровне стрипов, изготавливаемых из стеклопластика на базе бисмалеимидтриазина, необходимо использовать специализированные компаунды, характеризующиеся высокой адгезией к подобным подложкам.

Для облегчения процесса отделения пластика от формы, а также для избежания прилипания к форме частиц пластика перед литьем монолитизирующего эпоксидного компаунда форму обрабатывают сначала очищающим, а затем смазывающим материалом.

В рамках данной работы посредством конечно-элементного моделирования, а также путем экспериментальных исследований на лабораторных стендах,

имитирующих работу литьевой машины, исследовано влияние различных параметров прессования на получаемый в процессе корпусирования результат.

Также изучено влияние предварительной обработки пресс-формы смазывающим и очищающим материалом на адгезию монолитизирующего компаунда к металлу формы. Исследованы различные варианты материалов формы, а также возможность отделения от этих материалов с различным качеством обработки поверхности эпоксидного монолитизирующего компаунда.

По результатам работы определены ключевые элементы конструкции пресс-формы, влияющие на качество опрессовки. Рассмотрены основные типы дефектов, возникающих в процессе трансферного прессования, установлены наиболее вероятные причины этих дефектов. Кроме того, установлено влияние на адгезию монолитизирующего компаунда предварительной обработки формы очищающим и смазывающим материалом (изучена поверхность формы после обработки соответствующими материалами, а также рассмотрены варианты взаимодействия этих материалов с пресс-формой и монолитизирующим компаундом).

Изучено влияние на процесс трансферного прессования состава монолитизирующего компаунда. В частности, рассмотрены дефекты, наблюдаемые при использовании для корпусирования стрипов, более распространенных и менее дорогостоящих, чем специализированные материалы для композитных подложек BGA компаундов, предназначенных для герметизации выводных рамок.

Литература

1. Hui-Jin Um, Young-Min Ju, Dae-Woong Lee, Jinho Ahn, Hak-Sung Kim. Reduced warpage in semiconductor packages: Optimizing post-cure temperature profile considering cure shrinkage and viscoelasticity of epoxy molding compound // Materials & Design, 2024. Vol. 245. № 113265. 13 p.
2. Jeong-Hyeon Baek, Dong-Woon Park, Gyung-Hwan Oh, Dong-Ok Kawk, Simon S. Park, Hak-Sung Kim. Effect of cure shrinkage of epoxy molding compound on warpage behavior of semiconductor package // Materials Science in Semiconductor Processing, 2022. Vol. 148. № 106758. 13 p.

УДК 621.3.049.76

Методы лазерной микрообработки эпоксидного монолитизирующего компаунда для создания отверстий в компаунде при изготовлении трехмерных микросборок с высокой плотностью коммутации

Беляков И. А., Кочергин М. Д., к. т. н. Вертянов Д. В., д. т. н. Тимошенков С. П.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
vdv.vertyanov@gmail.com, igor-terra@yandex.ru

Исследованы возможности формирования отверстий в эпоксидном монолитизирующем компаунде без повреждения нижележащей подложки посредством лазерной микрообработки инфракрасным наносекундным лазером. Изучено влияние материала подложки и элементов под формируемым отверстием в компаунде на степень повреждения подложки. Даны рекомендации по минимизации повреждения подложки в области конструкции подложки, определены оптимальные режимы микрообработки — частота, длина волны и мощность лазера. Исследовано влияние материала компаунда на характер и режимы обработки.

Ключевые слова: трехмерная интеграция; корпусирование; эпоксидный монолитизирующий компаунд; отверстия в компаунде.

Существуют различные подходы для соединения уровней трехмерных микросборок друг с другом. Соединяющая уровни коммутация может создаваться по торцу микросборки или непосредственно над необходимым элементом коммутации в объеме монолитизирующего микросборку компаунда. В одних случаях вертикальные соединения в объеме микросборки сначала формируются на подложке в виде столбиков металлизации еще до монолитизации. После герметизации столбики вскрываются от компаунда и таким образом формируют проводящий вертикальный элемент коммутации (технология InFo) [1]. В других отверстия формируются путем лазерной обработки или травления компаунда. В рамках данной работы за основу взят второй способ создания переходов в объеме микросборки [2].

Отверстия в компаунде представляют собой один из наиболее распространенных подходов к реализации вертикальных соединений в микросборках вида «корпус на корпусе». В рамках данной работы рассматривается возможность использования данного типа вертикальных соединений как дополнительного способа соединения подложек в трехмерных микросборках с торцевой коммутацией.

Формирование отверстий в компаунде методом лазерной микрообработки требует тщательного контроля глубины обработки и подбора материалов монолитизирующего компаунда, а также подложек уровней. Низкотемпературные материалы подложек могут быть разрушены в процессе удаления компаунда, когда лазер проходит сквозь компаунд и начинает обрабатывать подложку. Кроме того, из-за высокого аспектного соотношения глубины к диаметру формируемых отверстий достаточно сложно контролировать момент, в который обработка перейдет от компаунда к подложке.

Одним из способов минимизации повреждения подложки при переходе лазера от обработки компаунда к обработке подложки служит контроль параметров обработки и определение режима, при котором обработка компаунда идет более интенсивно, чем обработка подложки. В рамках данной работы рассмотрено влияние таких параметров режима лазерной обработки на селективность удаления компаунда по отношению к металлу подложки, как частота импульсов, мощность импульса, длина импульса и скорость обработки. Рассмотрены комплексные режимы обработки, сочетающие при создании отверстий обработку с несколькими параметрами частоты и скорости лазера. Установлено, что комплексные режимы позволяют более точно контролировать глубину удаления компаунда и определять момент перехода к обработке подложки.

Также установлено, что значительное влияние на характер обработки оказывает тип используемого монолитизирующего компаунда и, в частности, такие параметры компаунда, как тип наполнителя и количества наполнителя в компаунде. Изучен характер лазерной обработки для компаундов с низким наполнением — до 40–60 % (underfill), компаундов среднего наполнения (до 60–75 %) и высоконаполненных компаундов (до 80–90 %).

Рассмотрена возможность формирования специализированных элементов из более толстой меди и других металлов на подложке, которые позволяют минимизировать повреждение подложки лазером. Изучена возможность формирования теплоотводящих элементов, позволяющих распределить мощность лазерного излучения по подложке после завершения обработки компаунда. Также показано, что более термостойкие материалы, и в особенности материалы с керамическим наполнением, способны более эффективно сопротивляться разрушению при удалении вышележащего компаунда. Выявлены проблемы обработки, такие как отсутствие возможности адекватно оценить глубину, на которую удалось удалить компаунд.

Литература

1. Yi H. Through Package Via: A bottom-up approach: doctoral dissertation of an electrical engineer: 23.06.20. Delft University of Technology. Netherlands, 2020. 130 p.
2. Materials for advanced packaging: second edition / ed. by D. Lu, C. P. Wong. Springer, 2017. 974 p.

УДК 004.89:621.3

Практическое внедрение ИИ для автоматизации проектирования СВЧ-трактов от документации до расчета

к. т. н. Будяков А. С.
ООО «Новые технологии»
107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 38, стр. 2, пом. 11/2
bas@n-teh.tech

Предлагается концепция и демонстрируется использование ИИ-ассистентов для автоматизации проектирования СВЧ-устройств через конвейер «экстракция — преобразование — расчет — тестирование» (ЭПРТ), который превращает справочную информацию в готовые к тестированию проекты.
Ключевые слова: ИИ-ассистент; САПР; СВЧ-тракт; YandexGPT; отечественная ЭКБ; СВЧ КИТ; РаТрак.

ИИ активно внедряется в высокотехнологичные области, но инженеры СВЧ-аппаратуры сталкиваются со сложными задачами поиска и анализа численных данных, выбора компонентов и т. д. Эти рутинные операции можно автоматизировать с помощью ИИ-агента, работающего по инструкциям на естественном языке.

Для практической реализации ИИ-помощника предлагается концепция четырехэтапного конвейера ЭПРТ.

Экстракция. Осуществляется извлечение технических параметров из PDF-файлов с техническими описаниями на отечественную электронную компонентную базу (ЭКБ). В качестве примера используется документация на отечественные широкополосные усилители СВЧ серии К1324 [1]. Планируется создание автоматизированного конвейера на базе облачных сервисов и нейросетевых моделей для распознавания и систематизации данных по запросу пользователя.

Преобразование. Полученные данные преобразуются в машиночитаемый формат JSON-библиотеки параметров. В качестве примера был разработан телеграм-бот [2] на основе YandexGPT с базой знаний в виде markdown-файлов документации [1], по запросу пользователя бот генерирует ответы на технические вопросы.

Расчет. Сейчас в ручном режиме применяется веб-калькулятор «РаТрак» [3], который позволяет с помощью загруженной JSON-библиотеки рассчитать ключевые параметры радиочастотного тракта. Развитием этого этапа является интеграция через API с ИИ-ассистентом, который будет самостоятельно подбирать компоненты в радиотракт, выполнять расчеты и выводить результаты на проверку.

Тестирование. Финальный и ключевой этап проектирования — экспериментальная проверка результатов. ИИ-ассистент поможет плавно перейти от теоретических расчетов в «РаТрак» к практике. Планируется интегрировать инструментарий с платформой «СВЧ КИТ» [4]. Телеграм-бот будет экспортировать результаты из «РаТрак» в онлайн-конструктор «СВЧ КИТ» [5] и предоставлять пользователю ссылку на проект. Это позволит не просто получить цифры, а мгновенно визуализировать рассчитанный тракт в виде схемы сборки СВЧ-блоков для быстрого прототипирования.

Литература

1. Микросхемы — Широкополосные СВЧ-усилители [Электронный ресурс]. — URL: https://electron-engine.ru/produkciya/otechestvennaya-ekb/broadband_amplifiers (дата обращения: 12.07.2025).
2. ИИ-агент по ШПУ серии К1324 [Электронный ресурс]. — URL: https://t.me/K1324UV1_bot (дата обращения: 12.07.2025).
3. РаТрак: калькулятор РЧ-трактов v0.5.1 [Электронный ресурс]. — URL: https://n-teh.tech (дата обращения: 12.07.2025).
4. СВЧ-КИТ [Электронный ресурс]. — URL: http://www.svch-kit.ru (дата обращения: 12.07.2025).
5. Онлайн-конструктор «СВЧ-КИТ» [Электронный ресурс]. — URL: https://platform.svch-kit.ru (дата обращения: 12.07.2025).

УДК 539.8.621.669

Исследование деформированного состояния корпуса РЭА, изготовленного методом селективного лазерного плавления SLM с использованием порошка РС-553 на основе алюминиевого сплава Al-Mg-Sc

Волков С. В., к. т. н., Вертянов Д. В., д. т. н., Тимошенков С. П.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
serzh.volkov.98@inbox.ru

Проведено исследование деформированного состояния корпуса РЭА, изготовленного методом SLM с использованием порошка РС-553 на основе алюминиевого сплава Al-Mg-Sc. Была получена расчетная модель, которая может быть использована для прогнозирования деформации, а также модификации корпуса РЭА.

Ключевые слова: аддитивные технологии; селективное лазерное плавление; метод конечных элементов; динамический термомеханический расчет.

На сегодняшний день аддитивные технологии (АТ) — одно из ключевых направлений технологического развития многих отраслей промышленности (машиностроение, электроника и т. д.). Преимуществом использования АТ является возможность создания деталей со сложной геометрией при минимально возможных массогабаритных характеристиках за счет особенностей используемых материалов и варьирования технологических параметров (состав материала, скорость технологического процесса и т. д.) [1].

В рамках данной работы задействована технология селективного лазерного плавления SLM (Selective Laser Melting), которая является одной из ключевых АТ, применяемых в производстве высокопрочных металлических конструкций радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

В основе АТ SLM лежит послойное лазерное плавление металлического порошка, предварительно нанесенного на платформу. Процесс включает в себя ряд этапов, включая напыление порошка и лазерное сканирование. Его проводят в инертной камере с контролируемой атмосферой по выбору, чтобы избежать окисления во время обработки, т. е. плавления и затвердевания [2].

Существуют проблемы при использовании АТ SLM, от которых напрямую зависит качество изготавливаемых изделий. Таковыми являются остаточные напряжения и деформации, возникающие в процессе селективного лазерного плавления вследствие неравномерного теплового нагрева и охлаждения [3].

Целью данной работы является численно-экспериментальное исследование деформированного состояния корпуса РЭА, изготовленного методом селективного лазерного плавления SLM с использованием высокопрочного порошка РС-553 на основе алюминиевого сплава Al-Mg-Sc.

Расчет АТ SLM связан с проведением динамического термомеханического анализа в системе на основе метода конечных элементов (МКЭ). Поведение формируемого изделия как объекта механики деформируемого тела в дискретном представлении хорошо описывается стационарной моделью [4].

По результатам качественного и количественного сравнения отклонения формы корпуса РЭА было установлено, что подход системы МКЭ к расчету деформированного состояния корпуса, изготовленного по технологии SLM, обеспечивает достаточную точность в диапазоне ±0,1...±1 мм.

Таким образом, на основе количественного соответствия данных конечно-элементного анализа полученная расчетная модель может быть использована для прогнозирования искажения формы корпуса РЭА, а также для модификации исходных геометрических моделей в целях компенсации коробления корпуса после технологического процесса.

Литература

1. Волков С. В., Тимошенков С. П. Сравнительный анализ аддитивных технологий, используемых для формирования электромеханических конструкций функциональных устройств // Инженерный вестник Дона, 2023. — № 11 (107). — С. 201–211.
2. Волков С. В., Вертянов Д. В., Тимошенков С. П. Разработка и исследование корпуса модульного блока на основе высокопрочного порошка РС-553 с использованием аддитивной технологии селективного лазерного плавления // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение, 2024. — № 2 (147). — С. 22–36.
3. Разносчиков А. С., Абдесселем С., Жданов А. В., Морозов В. В. Моделирование параметров поддерживающих структур и их влияние на деформации крупногабаритных нависающих элементов при СЛП из материала AlSi10Mg // Прогрессивные литейные технологии: труды XI Международной научно-практической конференции, Москва, 09–11 ноября 2022 года / под ред. В. Д. Белова, А. В. Колтыгина. — М.: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 2022. — С. 430–435.
4. Мазалов А. Б., Шматов Д. П., Пустовалов А. С. и др. Исследование деформированного состояния деталей, изготовленных методом селективного лазерного спекания из жаропрочного никелевого сплава // Успехи прикладной физики, 2019. — Т. 7. — № 6. — С. 578–585.

УДК 681.586.72

Разработка инклинометра повышенной точности на основе инерциальных МЭМС

Галкин А. А.[1,2], Соломкина Н. А.[1,2], Михеев А. В.[2], Тимошенков А. С.[2], Еркин П. В.[1], Захаров В. П.[2], Рубис Л. Д.[1,2]

[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] ООО «Лаборатория Микроприборов»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
agalkin@mp-lab.ru

В статье описана разработка инклинометра на базе МЭМС-акселерометров, обеспечивающего измерение углов наклона с точностью до ±0,01° в диапазоне ±40°. Проведены эксперименты по выбору подходящих акселерометров, спроектирована конструкция инерциального блока и механизма компенсации погрешностей датчиков. Разработана методика калибровки изделия с помощью точного поворотного стенда.

Ключевые слова: инклинометр; МЭМС; акселерометр; инерциальные датчики; мальтийский механизм.

Измерения углов наклона с высокой точностью необходимы во многих отраслях, связанных с ориентацией подвижных и стационарных объектов. Высокоточная инклинометрия требуется в георазведке, строительстве, наведении крупногабаритных спутниковых антенн. Обычно для этой цели применяются прецизионные инклинометры, способные измерять угол наклона с точностью 0,01–0,001°. Однако такие изделия достаточно дороги и обеспечивают измерение угла наклона в небольшом диапазоне (±2–5°) [1].

Требовалось разработать инклинометр на основе инерциальных МЭМС-датчиков, позволяющий измерять угол наклона в диапазоне ±40° с точностью не менее ±0,01°.

Были проведены исследования характеристик различных МЭМС-акселерометров и разработана методика компенсации ошибки смещения нулевого сигнала акселерометров. Рассматривались варианты как применения единичных высокоточных одно- ,и двухосевых МЭМС-акселерометров, так и использования массивов бюджетных трехосевых датчиков [2–5].

Для повышения точности измерения кроме стандартной калибровки [6] до начала измерений необходимо было оценить и описать ошибку смещения нулевого сигнала акселерометров. Известный метод решения этой задачи заключается в повороте датчиков на 180° в плоскости осей XY датчика, когда фиксируются усредненные значения показаний акселерометров в положениях 0° и 180°, после чего находится среднее значение между ними для оценки смещения нулевого сигнала [7].

В предварительных экспериментах такой поворот выполнялся с помощью точного поворотного стенда, на котором устанавливались все исследуемые датчики.

По итогам экспериментов были получены значения ошибок измерения углов для датчиков, показанные в табл. 1.

Таблица 1. Акселерометры, исследуемые при разработке инклинометра

Модель датчика	Количество осей в датчике	Количество датчиков в массиве	Нестабильность смещения нулевого сигнала по вариации Аллана, мкg	Максимальная ошибка измерения угла при наклоне 40 ± 0,05°
Bosch BMI323	3	1	37	0,021°
		2	24	0,013°
		4	19	0,012°
Analog Devices ADXL357	3	1	11	0,009°
		2	8	0,006°
Silicon Sensing CAS213	2	1	4	0,003°
Ericco ER-MA-5 (2 шт.)	1	1	5	0,008°

Из таблицы видно, что использование датчиков CAS213, ER-MA-5 или пары ADXL357 обеспечивает заданное значение ошибки. По итогам испытаний было принято решение использовать пару ADXL357 как наиболее экономически выгодный вариант.

В качестве поворотного механизма, обеспечивающего самокалибровку датчика, было решено использовать мальтийский механизм с внутренним зацеплением [8], приводимый в движение мотор-редуктором. Использование данного механизма позволило обеспечить точность установки положений 0° и 180° при самокалибровке изделия в пределах ±0,05°. Такая погрешность установки калибровочных положений вносит ошибку в измерении угла наклона не более 0,003°, что вместе с погрешностью датчиков обеспечивает суммарную ошибку не более 0,009°, что удовлетворяет заданным требованиям точности.

В настоящее время опытная партия изделий проходит цикл калибровки и испытаний.

Литература

1. Описание Инклинометра ИН-Д3 // НТПП Горизонт [Электронный ресурс]. — URL: https://www.ntpgorizont.ru/product/in-d3 (дата обращения: 12.07.2025).
2. Specifications ER-MA-5 // Ericco Inertial Technology [Электронный ресурс]. — URL: https://www.ericcointernational.com/accelerometer/mems-accelerometer/navigation-and-positioning-receiver.html (дата обращения: 12.07.2025).
3. Specifications ADXL357 // Analog Devisec [Электронный ресурс]. — URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl1356-357.pdf (дата обращения: 12.07.2025).
4. Specifications BMI323 // Bosch [Электронный ресурс]. — URL: https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmi323-ds000.pdf (дата обращения: 12.07.2025).
5. Specifications CAS213 // Silicon Sensing [Электронный ресурс]. — URL: https://siliconsensing.com/wp-content/uploads/cas200-00-0100-131-rev-7-brochure.pdf (дата обращения: 12.07.2025).

6. Чернодаров А. В., Патрикеев А. П., Тимошенков С. П., Иванов С. А. Динамическая калибровка и испытание МЭМС модуля с использованием опорной инерциальноспутниковой навигационной системы // XXIX Санкт-петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам [Электронный ресурс], 2022. URL: https://mp-lab.ru/wp-content/uploads/2022/08/10-dinamiceskaya-kalibrovka-i-ispytanie-mems-modulya-s-ispolzovaniRU.pdf (дата обращения: 12.07.2025).
7. Описание ИН-Д9 Абсолютный инклинометр // НТПП Горизонт [Электронный ресурс]. — URL: https://www.ntpgorizont.ru/product/in-d9-absolyutnyy-inklinometr (дата обращения: 12.07.2025).
8. Мальтийский механизм // Большая Российская энциклопедия [Электронный ресурс]. — URL: https://bigenc.ru/c/mal-tiiskii-mekhanizm-782934 (дата обращения: 12.07.2025).

УДК 530.145

Реконструкция поляризационных квантовых состояний с учетом конечной ширины спектра и немарковости квантовыхопераций

Голышев И. К.[1,2], Богданова Н. А.[1,2], Богданов Ю. И.[1,2], Лукичев В. Ф.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] НИЦ «Курчатовский институт» — ФТИАН им. К. А. Валиева
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

В рамках настоящего исследования разработана модель реконструкции поляризационных кубитов, учитывающая эффекты немарковости при измерении квантовых состояний. Показано, что подход на основе нечетких измерений позволяет существенно повысить точность восстановления квантовых состояний в условиях влияния квантовых шумов.
Ключевые слова: кубиты; квантовая томография; нечеткие измерения; декогерентизация; немарковость.

Довольно общее описание квантовых операций с учетом влияния шумов может быть получено на основе изучения расширенной унитарной динамики открытой квантовой системы, взаимодействующей со своим окружением [1]. При этом обычно предполагается, что выполняется условие марковости квантовой операции, которое означает, что время, в течение которого окружающая среда «помнит» о своих корреляциях с системой, пренебрежимо мало.

В реальных задачах, однако, условие марковости нередко нарушается. Ярким примером, когда окружающая среда долго «помнит» о своих корреляциях с системой, является эффект поляризационного эха [2]. В этом случае в процессе эволюции чистое поляризационное входное состояние переходит в полностью смешанное, а затем возвращается в исходное. В явлении поляризационного эха спектральная степень свободы выступает в качестве окружения по отношению к поляризационной степени свободы.

В настоящей работе представлена модель, демонстрирующая эффекты немарковости, возникающие вследствие хроматической аберрации в системе из полу- и четвертьволновой фазовых пластин. Была рассмотрена реконструкция поляризационных кубитов, учитывающая конечную ширину спектра излучения, падающего на измерительный гаджет. Для корректного анализа статистики считывания квантовых состояний с учетом конечной ширины спектра была применена математическая модель нечетких измерений [3].

Работа выполнена в НИУ МИЭТ в рамках программы государственной поддержки университетов «Приоритет-2030».

Литература

1. Бройер Х.-П., Петруччионе Ф. Теория открытых квантовых систем / перевод с англ. под ред. Ю. И. Богданова. — М.—Ижевск: РХД, 2010. — 816 с.

2. Богданов Ю. И., Бантыш Б. И., Калинкин А. А., Кулик С. П., Морева Е. В., Шершулин В. А. Поляризационное эхо: проявление и исследование методами квантовой томографии состояний и процессов // ЖЭТФ, 2014. — Т. 145. — Вып. 6. — С. 963 — 975.
3. Bantysh B. I., Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Kuznetsov Yu. A. Precise tomography of optical polarization qubits under conditions of chromatic aberration of quantum transformations // Laser Phys. Lett., 2020. 17, 035205. 9 p.

УДК 621.385.69

Прототипирование программно-конфигурируемых радиосистем до 6 ГГц на основе отечественной ЭКБ СВЧ

Будяков А. С.[1], Григорьев О. В.[1,2], Савченко Е. М.[1], Тимошенко А. Г.[2]
[1] ООО «Центр инновационных разработок ВАО»
107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 2, стр. 2, офис 40
bas@icvao.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Рассматривается макет программно-конфигурируемого радиочастотного интерфейса (РЧИ) на базе отечественного конструктора «СВЧ КИТ». Описаны архитектура, использованные компоненты отечественной разработки, результаты измерений и демонстрация сквозной передачи сигнала с модуляцией QPSK в SDR-стеке (GNU Radio, HackRF One).
Ключевые слова: программно-конфигурируемая радиосистема; СВЧ КИТ; РЧИ; отечественная элементная база; SDR.

Развитие радиочастотных технологий требует оперативного прототипирования без значительных затрат. Это критически важно для обеспечения технологической независимости и развития отечественной компонентной базы в радиоэлектронной отрасли [1]. Одним из эффективных решений становится применение модульных платформ с возможностью многократного использования компонентов. В данной работе рассматривается отечественный радиочастотный конструктор «СВЧ КИТ» [2] в контексте создания программно-конфигурируемого радиочастотного интерфейса (РЧИ) с использованием отечественной элементной базы.

В рамках проекта выполнены проектирование, сборка и тестирование макета РЧИ, реализующего прием и передачу квадратурных сигналов в L-диапазоне. Система построена на основе отечественных компонентов (квадратурные модуляторы и демодуляторы серии К1324 [3], кварцевые генераторы серии ГК258-П и др.), что позволило обеспечить ее соответствие требованиям технологической независимости. Структурная схема макета приведена на рис. 1. Особенностями конструкции являются модульность, совместимость с виртуальной средой макетирования, а также наличие обучающих материалов и документации.

Выполнены проектирование, сборка и тестирование макета РЧИ для L-диапазона. Система реализована на компонентах:

- квадратурные модулятор К1324МП9У [4] и демодулятор К1324ДП9У [5];
- кварцевый генератор ГК258-П-13БМ [6];
- синтезатор частот iFSY-34-M36 [7];
- регулируемые усилители К1324УП1У [8];
- микроконтроллер управления MDR32F9Q2I [9].

Для полученного РЧИ были проведены измерения параметров сигнала, включая фазовые и амплитудные искажения, подавление несущей и характеристики спектра [10].

Рис. 1. Структурная схема макета

Для выполнения работы по стыковке РЧИ с HackRF One были проделаны следующие шаги:

- написана прошивка для HackRF One, отключающая работу встроенного приемо-передатчика MAX2839 для избавления от создаваемого им шума;
- разработана плата для согласования постоянных уровней сигнала на выходе с РЧИ (меняется в зависимости от мощности сигнала) и на входе АЦП (необходим постоянный уровень 1,5 В);
- подготовлены схемы GNU Radio для передатчика (генерация отсчетов для генератора произвольных сигналов) и для приемника (производит перенос на нулевую частоту, синхронизацию и демодуляцию сигнала).

Макет успешно интегрирован с SDR-платформой HackRF One и программной средой GNU Radio, что подтверждает его работоспособность в составе программно-конфигурируемой радиосистемы. Схема подключения приведена на рис. 2.

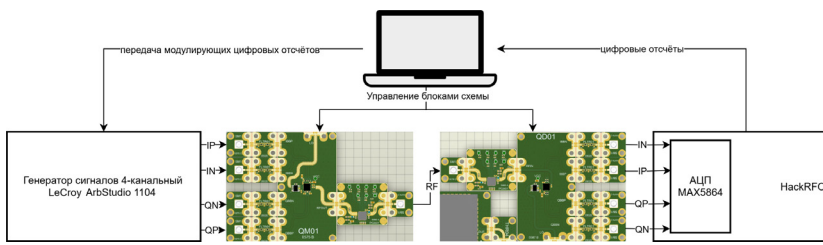


Рис. 2. Схема подключения к HackRF One

В результате подключения РЧИ с HackRF One продемонстрировано сквозное прохождение сигнала (GNU Radio Tx → генератор произвольных сигналов → макет → кабельная перемычка → макет → GNU Radio Rx) с модуляцией QPSK.

Сигнальное созвездие имеет правильную форму после символьной синхронизации по методу максимального правдоподобия и частотной синхронизации в петле Костаса в GNU Radio на скорости передачи данных 125 кбит/с при частоте дискретизации 1 МГц. Схема собранного стенда приведена на рис. 3.

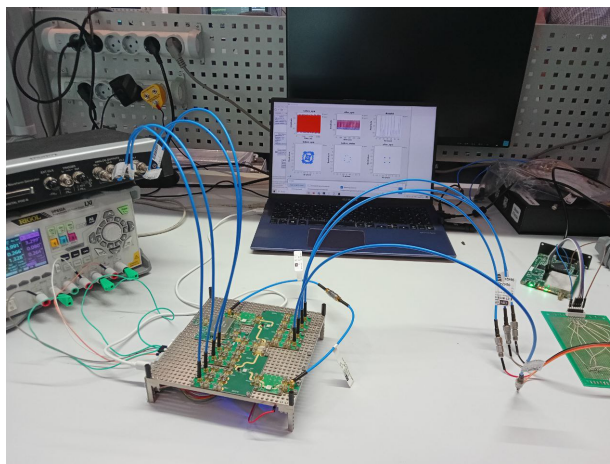


Рис. 3. Фотография стенда

Таким образом, на базе конструктора «СВЧ КИТ» и отечественной компонентной базы разработан и испытан макет РЧИ для L-диапазона. Продемонстрировано сквозное прохождение сигнала QPSK через макет с последующей демодуляцией и синхронизацией (Costas Loop, Maximum Likelihood Symbol Sync) в GNU Radio, подтвержденное визуально правильным созвездием (рис. 3). Полученные результаты подтверждают возможность использования «СВЧ КИТ» как платформы для прототипирования систем связи. В дальнейшей работе планируется количественная оценка параметров канала: измерение EVM/MER, построение кривых BER/BLER = f(SNR) для различных модуляций, определение максимальной скорости передачи данных и анализ влияния неидеальностей компонентов на динамический диапазон системы.

Литература

1. Савченко Е. М., Будяков А. С., Гаранович Д. И., Огурцова К. М. Состояние и перспективы развития интегральных схем программно-конфигурируемых радиочастотных приемопередатчиков // Электроника и микроэлектроника СВЧ, 2019. — Т. 1. — С. 15–20.
2. СВЧ КИТ [сайт]. — URL: https://svch-kit.ru.
3. Савченко Е. М., Будяков А. С., Мартынов А. А., Вагин А. В., Гладких М. В., Гаранович Д. И. Кремниевые монолитные интегральные схемы СВЧ квадратурных модуляторов L и S диапазонов частот // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы научно-технической конференции, 2015. — С. 177–179.

4. Широкополосный квадратурный модулятор для диапазона частот 0,3–6,0 ГГц К1324МП9У/Н4 // Электрон-Маш [сайт]. — URL: https://electron-engine.ru/wp-content/uploads/2024/01/К1324МП9У_Н4_Справочный-лист_ИПК.pdf.
5. Квадратурный демодулятор для диапазона частот 0,3–6,0 ГГц К1324ДП9У/Н4 // Электрон-Маш [сайт]. — URL: https://electron-engine.ru/wp-content/uploads/2024/01/К1324ДП9У_Н4_Справочный-лист_ИПК.pdf.
6. Кварцевый генератор ГК258-П // Пьезотрон [сайт]. — URL: https://piezotron.ru/gk258.
7. Целочисленный синтезатор частоты со встроенным ГУН от 800 до 1200 МГц iFSY-304-M36 // Электрон-Маш [сайт]. — URL: https://electron-engine.ru/wp-content/uploads/2023/12/iFSY-304-M36_Rev-A-RUS-v4.pdf.
8. Усилитель с регулируемым коэффициентом усиления и цифровым управлением до 6,0 ГГц К1324УП1У // Электрон-Маш [сайт]. — URL: https://electron-engine.ru/wp-content/uploads/2024/07/К1324УП1У_Справочный-лист_Rev_B-2.pdf.
9. Серия 32-разрядных микроконтроллеров построенных на ядре ARM Cortex-M3, содержащих 128 КБ памяти программ Flash-типа и 32 КБ ОЗУ К1986ВЕ92QI // Миландр [сайт]. — URL: https://mdr32.ru.
10. Комплект «СВЧ КИТ: Системы Связи» на сайте базы знаний «СВЧ КИТ» [сайт]. — URL: https://wiki.svch-kit.ru/xwiki/bin/view/Komplekty/Sistemy-sviazi.

УДК 621.3

Системный подход к разработке ЭКБ и приборов космических аппаратов

Ахметов Р. Н.[1], Баранов Д. А.[1], Гришин В. Ю.[2]
[1] АО «Ракетно-космический центр «Прогресс»
443009, г. Самара, ул. Земеца, 18
mail@samspace.ru
[2] АО «НИИ «Субмикрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
grishin@se.zgrad.ru

В статье рассматриваются организационно-технические мероприятия, позволяющие сформировать системный подход к созданию сложных образцов бортовой аппаратуры космических аппаратов в ретроспективе развития отрасли.
Ключевые слова: бортовая аппаратура космического назначения; разработка.

В промышленности устойчиво утвердилась парадигма выстраивания производственных отношений в пределах вертикальной организационной структуры (отрасль, концерн, корпорация и т. д.).

Это позволяет сохранить финансирования внутри структуры, но может привести к принятию неэффективных решений: сохранив копейку, можно потерять рубль, т. к. компетенции формируются статистически при работе над рядом однородных проектов. Т.е. компетенции «живут» в горизонтальной плоскости и, по существу, определяют системный подход в приборостроении.

В АО «НИИ «Субмикрон», например, таковыми компетенциями являются встраиваемые бортовые вычислительные машины: сбое-, отказоустойчивые, с различной кратностью и механизмом резервирования, крипто-, имитостойкие и для различных условий эксплуатации (подводные лодки, шахты, самоходные средства, самолеты, вертолеты, крылатые ракеты, ракеты-носители, космические корабли и аппараты на разных орбитах) с оригинальным ПО и технологией его разработки и отладки.

Родоначальником системного подхода к организации бортовой аппаратуры КА можно считать АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара, которому в начале 90-х было выдано ТЗ на разработку системы управления КА «Сапфир-С». ТЗ определяло сетевую отказоустойчивую структуру бортовой вычислительной системы (БВС) с распределенными встраиваемыми вычислительными машинами во все приборы КА. Для создания такой БВС были разработаны новые виды ЭКБ, в т. ч. БМК, процессоры, память, а системные связи строились на основе новых стандартов МКО (аналог MIL STD 1553 B). К таким работам были привлечены ведущие предприятия МЭП, такие как НИИМЭ и «Микрон», «Ангстрем» и др. Созданный в те годы задел ЭКБ и сейчас применяется в приборах, изготавливаемых для современных образцов ВВСТ.

В настоящее время продолжается сотрудничество АО «НИИ «Субмикрон» и АО «РКЦ «Прогресс» в части создания бортового радиолокационного комплекса на основе АФАР X-диапазона [1]. Уже традиционно в основе проекта лежит системный подход. Разрабатывается как новая ЭКБ, в т. ч. ППМ на основе технологии интерпозеров с новыми СВЧ-компонентами, так и блоки АФАР, объединенные

в единую сетевую структуру на основе интерфейсов SpaceWire / GigaSpaceWire [2] и оригинальных сетевых протоколов, выполнение которых поддержано новой ЭКБ на основе БМК.

Литература

1. Костров В. В., Ракитин А. В. Радиолокационный космический сегмент дистанционного зондирования Земли в 2023 году: состояние и перспективы развития // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2023. — № 4. — С. 11–31.
2. ГОСТ Р 70020-2022 Космическая техника Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов. Spacewire-RUS: Дата введения 2022-06-01. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва, Российский институт стандартизации, 2022.

УДК 004.315.7

Конфигурируемая архитектура систолического массива для ускорителя нейронных сетей

Гуржов Н. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе рассматривается реализация реконфигурируемого систолического массива с поддержкой аппаратного квантования, объединяющего режимы Output-Stationary и Weight-Stationary. Целью разработки является преодоление ограничений фиксированных массивов для обеспечения гибкости и эффективности в различных задачах тензорных вычислений. В основе реализации лежит универсальный вычислительный элемент (MAC), поддерживающий мультиплексирование потоков данных, переменную разрядность.
Ключевые слова: систолический массив; output-stationary; weight-stationary; реконфигурируемая структура; квантование; нейронные сети.

Систолические массивы — это ключевое решение для гетерогенных вычислительных систем, обеспечивающее высокую производительность в задачах численной математики, комбинаторной оптимизации, обработки изображений, сигналов, речи и текста.

Применение систолических массивов позволяет ускорить тензорные операции, исключив необходимость в перемещении промежуточных результатов через подсистему памяти. Открытые реализации решают узкий спектр задач и не имеют реконфигурации.

Для решения указанной проблемы была разработана реконфигурируемая структура систолического массива, в основе которой лежат принципы: Output-stationary (OS) и Weight-stationary (WS). Результаты анализа показали, что выбор между Output Stationary и Weight Stationary должен основываться на конкретных требованиях задачи: если приоритетом является скорость вычислений, то предпочтение следует отдать Output Stationary, так-как он в среднем требует в 27 раз меньше тактов на выполнение, а если важна энергоэффективность и минимизация обращений к памяти, то Weight Stationary будет более подходящим выбором, так-как в задачах вычисления свёрток он требует в 1,5 раза меньше обращений в память.

Литература

1. Kung H. T. Why systolic architectures? // IEEE, 1982. DOI: 10.1109/MC.1982.1653825. (дата обращения 18.03.2025).
2. Google Cloud TPU. 2025. URL: https://cloud.google.com/tpu/docs/system-architecture-tpu-vm (дата обращения 18.03.2025).
3. Systolic Systems 12.1. Basic Concepts of Systolic Systems. Corpus ID: 14518158. URL: http://compalg.inf.elte.hu/~tony/Informatikai-Konyvtar/03-Algorithms%20of%20Informatics%201,%202,%203/Systolic30May.pdf (дата обращения: 18.03.2025).
4. Understanding Matrix Multiplication on a Weight-Stationary Systolic Architecture. 2018. URL: https://telesens.co/2018/07/30/systolic-architectures (дата обращения: 18.03.2025).

5. Benoit J., Kligys S., Bo Chen, Menglong Zhu, Matthew T., Howard A. G., Hartwig A., Dmitry K. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:39867659 (дата обращения: 18.03.2025).
6. Markus N., Marios F., Rana A. A., Yelysei B., Mart van B., Tijmen B. A White Paper on Neural Network Quantization // ArXiv, 2021. URL: https://arxiv.org/abs/2106.08295 (дата обращения: 18.03.2025).
7. Wenhao S., Deng L., Zhiwei Z., Wendi S., Yi K., Song C. Sense: Model Hardware Codesign for Accelerating Sparse CNN on Systolic Array // ArXiv, 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2202.00389 (дата обращения: 18.03.2025).
8. Kyle M., Pengmiao Z., Viktor P. ME-ViT: A Single-Load Memory-Efficient FPGA Accelerator for Vision Transformers // ArXiv, 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2402.09709 (дата обращения: 18.03.2025).
9. Surya S., Vinod G., Pratyush K. FuSeConv: Fully Separable Convolutions for Fast Inference on Systolic Arrays // ArXiv, 2021. URL: https://arxiv.org/abs/2105.13434 (дата обращения: 18.03.2025).
10. Initializing Weights for the Convolutional and Fully Connected Layers. 2018. URL: https://www.telesens.co/2018/04/09/initializing-weights-for-the-convolutional-and-fully-connected-layers (дата обращения: 18.03.2025).

УДК 621.6.677.49

Антенны с цифровым формированием луча — результат концентрации алгоритмов обработки сигналов и микроэлектронных технологий

Джиган В. И.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
djigan@yandex.ru

Рассматриваются фазированные антенные решетки и их свойства. Приводятся архитектуры цифровых антенных решеток. Рассматриваются адаптивные антенные решетки и алгоритмы их работы.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка; цифровая антенная решетка; адаптивная антенная решетка.

Сегодня в радиотехнических системах в качестве направленных антенн широко используются антенные решетки (АР) [1]. Такие антенны позволяют формировать луч (основной лепесток диаграммы направленности, ДН) путем изменения комплексных весовых коэффициентов (ВК), с помощью которых производится взвешивание сигналов, принимаемых антеннами АР перед их сложением. Изменение ВК позволяет не только ориентировать луч АР в интересуемом направлении, но и изменять форму всей ДН. Последнее свойство позволило создавать т. н. адаптивные антенные решетки (ААР) [2]. Основное назначение ААР — это борьба с помехами. В процессе работы ААР так изменяет свои ВК, что в неизвестных направлениях на источники помех в ее ДН образуются провалы. В результате уровень сигналов помех на выходе ААР уменьшается, т. е. сигналы помех подавляются.

Вычисление ВК ААР базируется на обработке как ее выходного сигнала, так и сигналов в ее каналах. Для этого сигналы в каналах необходимо преобразовать на нулевую промежуточную частоту. Это преобразование осуществляется с помощью современных микроэлектронных элементов, реализующих алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС). Сигналы на нулевой промежуточной частоте взвешиваются в цифровом виде путем умножения цифровых отсчетов этих сигналов на комплексные числа. Взвешенные сигналы затем складываются также в цифровом виде. Решетки, построенные на таком принципе, называются АР с цифровым формированием луча или цифровыми АР [3].

Обработка сигналов в цифровой АР с помощью адаптивных алгоритмов [4] придает таким АР новое свойство, а именно способность адаптироваться под текущую сигнальную обстановку. Адаптация означает способность функционировать в условия наличия источников сигналов естественных и искусственных помех. В качестве адаптивных алгоритмов сегодня используются как вычислительно простые алгоритмы, базирующиеся на стратегиях градиентного поиска, так и вычислительно сложные алгоритмы, базирующиеся на решении систем линейных уравнений.

В работе рассмотрены архитектуры классических ААР, ААР с частичной адаптацией (в случае большого числа антенн), ААР для аппаратуры потребителя

систем глобальной спутниковой навигации, а также ААР систем связи, работающих в условиях многолучевого распространения волн.

Таким образом, для построения современных АР с цифровым формированием луча необходимо использовать алгоритмы ЦОС, включая алгоритмы адаптивной обработки сигналов, а также использовать современную цифровую элементную базу, производимую микроэлектронной промышленностью, которая позволяет создавать компактные по габаритам быстродействующие устройства ЦОС, работающие на высокой частоте дискретизации, т. е. позволяющие обрабатывать сигналы в широкой полосе частот.

Дальнейшее усовершенствование цифровой элементной базы (размеры кристаллов, быстродействие, энергопотребление, способность работать в широком диапазоне температур и др.) позволит с ее помощью решать более сложные задачи ЦОС, в том числе и задачи многоканальной обработки сигналов, одним из примеров которой является обработка сигналов в ААР.

Литература

1. Maillou R. J. Phased array antenna handbook, 3rd ed. Artech House, Inc., 2017. 506 p.
2. Hudson J. E. Adaptive array principles. The Institution of Engineering and Technology, 2007. 253 p.
3. Григорьев Л. Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. — М.: Радиотехника, 2010. — 144 с.
4. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. — М.: Техносфера, 2013. — 528 с.

УДК 530.145

Томография оптических квантовых состояний с учетом неидеальностей детекторов, различающих число фотонов

Дмитриев И. А.[1,2], Голышев И. К.[1,2], Богданова Н. А.[1,2], Богданов Ю. И.[1,2], Лукичев В. Ф.[2]

[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] НИЦ «Курчатовский институт» — ФТИАН им. К. А. Валиева
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

Разработан метод оценки квантовых состояний с использованием неидеальных инструментов детектирования. На примере сжатых когерентных состояний было проведено исследование влияния «мертвого времени» и эффективности детекторов, способных различать число фотонов (PNR — Photon Number Resolution), на точность восстановления квантовых состояний.

Ключевые слова: оптические квантовые состояния; квантовая томография; PNR-детекторы; POVM; эффективность протокола.

В настоящем исследовании выполнено обобщение результатов работы [1] на случай, когда для числа регистрируемых детекторами фотонов используется не простейшая модель, основанная на биномиальном распределении, а более общая модель, основанная на POVM-элементах детекторов. При этом учет «мертвого времени» приводит к тому, что детектор не способен зарегистрировать число фотонов больше некоторого максимального, каким бы большим ни было число фотонов на входе. Такого рода ограничение на максимально возможное число отсчетов не может быть описано простейшим биномиальным распределением.

Ранее экспериментально был изучен детектор, способный регистрировать за время экспозиции лазерного импульса не более трех фотонов [2]. В рассматриваемом детекторе определены всего четыре POVM-элемента, отвечающих регистрации соответственно 0, 1, 2 и 3 отсчетов.

Интегральное качество протоколов квантовых измерений мы характеризуем их эффективностью, которая есть отношение минимально возможных средних потерь точности к реально наблюдаемым. В то время как эффективность детектора характеризует долю регистрируемых фотонов, эффективность протокола квантовых измерений характеризует статистическую эффективность квантовой томографии в целом. Эта величина рассчитывается по отношению к минимально возможным потерям, являющимся аналогом границы Рао — Крамера. Заметим, что эффективность детекторов является только одним из ингредиентов эффективности квантовой томографии в целом.

Предложена модель POVM-элементов детекторов на основе распределения Пойа с ограничением по числу кликов, которая обобщает модель с биномиальным распределением [3]. На примере моделирования томографии сжатых когерентных состояний показано, что количественно протокол, основанный на POVM-элементах, обладает более низкой эффективностью по сравнению с идеальным детектором. При этом оказывается, что детекторы, способные регистрировать небольшое число отсчетов, позволяют с высокой точностью реконструировать состояния, несущие в себе значительно большее число фотонов.

На примере томографии квантовых состояний сжатого вакуума демонстрируется, что переход от полной к редуцированной статистике и от идеальных к неидеальным детекторам приводит к росту потерь точности, что обуславливается более низким значением эффективности протоколов, однако более низкая эффективность протоколов на POVM-элементах может быть скомпенсирована увеличением объема выборки.

Работа выполнена в НИУ МИЭТ в рамках программы государственной поддержки университетов «Приоритет-2030».

Литература

1. Bogdanov Yu. I., Kulik S. P. The efficiency of quantum tomography based on photon detection // Laser Physics Letters, 2013. Vol. 10. № 12. 125202.
2. Bogdanov Yu. I., Katamadze K. G., Borshchevskaya N. A., Avosopyants G. V., Bogdanova N. A., Kulik S. P. and Lukichev V. F. Tomography of Detectors Taking Dead Time into Account // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № 4. P. 221–227.
3. Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Катамадзе К. Г., Авосопянц Г. В., Лукичев В. Ф. Гиперпуассоновская статистика фотонов // Письма в ЖЭТФ, 2020. — Т. 111. — № 10. — С. 646–652.

УДК 621.3.049

Анализ топологии n-p-n-транзисторов выходных каскадов

Грушин А. И., Дюканов П. А., Ксенофонтов Д. Л.
АО «ДЦ «Кристал»
105187, г. Москва, ул. Щербаковская, 53
pdyukanov@dckristal.com

Разработаны и изготовлены семь вариантов интегральных n-p-n-транзисторов. Проведено измерение электрических параметров тестовых образцов транзисторов. Определены рекомендации по выбору топологии биполярных транзисторов для выходных каскадов аналоговых микросхем.
Ключевые слова: биполярный транзистор; планарная технология; выходная характеристика; сопротивление коллектора; топология.

При проектировании аналоговых микросхем с Rail-to-Rail-выходом или повышенной нагрузочной способностью особое внимание уделяется транзисторам выходного каскада. Основной проблемой при проектировании данных транзисторов является уменьшение сопротивления тела коллектора с минимально возможным увеличением емкостей переходов.

Уменьшение сопротивления тела коллектора осуществляется технологическими и/или топологическими методами.

Технологические методы в рамках проведенной работы не рассматривались. Конструкция всех изготовленных образцов транзисторов идентична и включает в себя операции формирования высоколегированных скрытого слоя и глубокого коллектора, а также подлегирование областей контактов эмиттерной примесью.

Топологический метод изготовления интегральных n-p-n-транзисторов заключался в подборе взаиморасположения контактов к коллектору и эмиттеру. При этом предъявлялся ряд условий:

1) транзисторная структура — полосковая, содержит два транзистора в едином изолированном кармане;
2) количество контактов к эмиттеру — 6 шт. на транзистор, длина одного контакта — 15 мкм;
3) допустимое увеличение площади транзистора не превышает 30 % от исходной топологии;
4) все варианты транзисторов размещаются на одном кристалле.

Тестовые образцы изготавливались по комплементарной биполярной технологии с изоляцией обратносмещенным *p-n*-переходом с семью топологиями (исходная, исходная с расширенным скрытым слоем, три варианта с различным легированием коллектора, два варианта кольцевого коллектора).

В качестве контрольных параметров были выбраны:

- вольт-амперная характеристика для определения сопротивления коллектора и оценки эффекта квазинасыщения;
- зависимость коэффициента усиления от тока коллектора для определения максимального коэффициента усиления и эффекта Кирка.

Итогами проведенной работы являются:

- расширение библиотеки топологических элементов;
- дополнение экспериментальной базы данных результатами измерений;

- определение рекомендаций по выбору оптимальной топологии для выходных каскадов с учетом наложенных условий.

Литература

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника, 12-е изд. Том I: Пер. с нем. — М.: ДМК Пресс, 2008. — С. 561–565.
2. Hastings A. The Art of analog layout. Prentice-Hall, 2001. P. 311.
3. Дворников О. В., Шульгевич Ю. // Современная электроника, 2009. — № 5. — С. 48–53.
4. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. 2-е изд. — М.: Издательский дом Додэка-XXI, 2010. — С. 59–60.

УДК 004.42

Разработка комплекса модулей САПР для отладки, анализа и оптимизации цифровых СБИС на вентильном уровне

Заплетина М. А., к. т. н., Чочаев Р. Ж.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
zapletina_mariya@mail.ru

Представлены результаты исследований и разработки программных средств для отладки, анализа и оптимизации цифровых сверхбольших интегральных схем на вентильном уровне. Разработанное программное обеспечение включает функциональные модули для выполнения логического ресинтеза проектируемых схем на вентильном уровне, интервального статического временного анализа, анализа помехоустойчивости, ускоренного анализа пикового тока, объединенные общей графической оболочкой для визуализации результатов работы всех модулей и отладки СБИС.

Ключевые слова: система автоматизации проектирования; цифровой маршрут; оптимизация; вентильный уровень; СБИС; логический синтез.

В настоящее время в сфере автоматизации проектирования цифровых сверхбольших интегральных схем (СБИС) активно развиваются инструментальные средства, задача которых состоит в помощи инженеру в проведении отладки и анализа проектируемых схем. Они призваны комплексно отобразить отладочную информацию большого объема, характерного для современных микроэлектронных изделий, а также способствовать достижению более качественных результатов проектирования. Целью проведенных исследований и разработок является получение набора программных модулей САПР цифровых СБИС для функциональной отладки, анализа и модифицирования списков соединений проектируемых схем на вентильном уровне. Преимуществом разработанных программных средств является совместимость с известными коммерческими и открытыми средствами логического синтеза и оптимизации СБИС.

К математическим методам в основе модуля логического ресинтеза и оптимизации схем на вентильном уровне относятся методы булевой алгебры, в том числе методы преобразования логических функций, аппарат теории множеств, теории графов, в частности методы построения и преобразования SP-BDD-моделей [1]. В основу программного модуля интервального временного анализа положены методы булевой алгебры и интервального анализа, аппарат теории множеств и теории вероятностей, теория графов и методы временного анализа КМОП-схем. Программный модуль анализа помехоустойчивости базируется на методах булевой алгебры, аппарате теории множеств, теории графов, теории вероятностей, теории дискретной математики, теории оптимизации и методах временного анализа КМОП-схем.

Модуль ускоренного анализа пикового тока построен на основе метода анализа пикового тока вентилей, базирующегося на модели характеризации тока в контрольных точках [3]; методов решения систем линейных уравнений; трилинейной интерполяции табличных значений характеризации токов в контрольных точках на основе двоичного деления по параметру смещения входных фронтов;

методе суммирования кривых тока с разбиением на интервалы по времени; методе резолюций для оценки пикового тока; модифицированном методе ветвей и границ для поиска максимального взвешенного независимого набора вершин для оценки пикового тока в схемах размером порядка 1 млн вентилей.

Функциональность программного модуля графического отображения и интерактивной визуализации реализована за счет методов графического представления, преобразования и анализа ориентированных гиперграфов схемных описаний [2], методов синтаксического разбора входных схемных описаний и результатов различных видов анализа.

Литература

1. Глебов А. Л. SP-BDD модель цифровых КМОП схем и ее приложения в оптимизации и моделировании // Информационные технологии, 1997. — Вып. 10.
2. Гаврилов С. В., Рыжова Д. И., Стемпковский А. Л. Методы повышения точности оценки пикового тока на логическом уровне на основе анализа логических корреляций // Известия ЮФУ. Технические науки, 2014. — № 7 (156). — С. 66–75.
3. Bulakh D., Zhestkov S. Logic gates placement algorithm for visualization of integrated circuits netlists // 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), 2019. P. 1–4.

УДК 681.586.72

Разработка интегрированной системы навигации для беспилотного транспортного средства

Захаров В. П.[1,3], Моторин А. В.[1], Рубис Л. Д.[2,3]
[1] Национальный исследовательский университет ИТМО
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, лит. А
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[3] ООО «Лаборатория Микроприборов»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

В статье представлены разработка и практическая реализация интегрированной навигационной системы для беспилотных транспортных средств, устойчивой к потере сигнала ГНСС. Система объединяет инерциальный модуль, одометр, лидар и ГНСС-приемник с использованием расширенного фильтра Калмана и программной платформы ROS2. Проведены полевые испытания, подтвердившие высокую точность и надежность позиционирования в сложных условиях.

Ключевые слова: беспилотные транспортные средства; навигационная система; фильтр Калмана; ГНСС.

Введение

Современные беспилотные транспортные средства (БПТС) стремительно развиваются и находят широкое применение в самых различных отраслях — от логистики и сельского хозяйства до оборонной промышленности и аварийно-спасательных операций. Надежная навигация является краеугольным камнем функционирования подобных платформ, поскольку от нее напрямую зависят безопасность, автономность и эффективность движения. На сегодняшний день ключевым источником информации о положении в пространстве остаются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), однако их сигнал подвержен множеству помех и ограничений: затенение зданиями, тоннели, плотные леса, погодные условия, а также преднамеренное радиоэлектронное воздействие. В подобных ситуациях одних лишь спутниковых данных недостаточно [1]. В связи с этим возникает необходимость в интеграции альтернативных сенсоров, обеспечивающих автономное определение положения даже при полной потере сигнала ГНСС. Актуальность темы данной работы обусловлена необходимостью создания устойчивой и точной навигационной системы, способной функционировать в условиях полной или частичной недоступности спутниковой информации. Несмотря на многочисленные исследования в области SLAM, инерциальной и лидарной навигации, большинство решений либо ограничиваются программным моделированием, либо не охватывают полный цикл интеграции — от выбора сенсоров до полевых испытаний. Настоящая работа направлена на практическую реализацию интегрированной навигационной системы и проверку ее работоспособности в реальных условиях.

Основная часть

В ходе выполнения работы был проведен анализ архитектуры типичного БПТС, с подробным рассмотрением сенсорной, вычислительной и исполнительной

подсистем. На основе этого анализа предложена структура интегрированной системы навигации, включающая инерциальный измерительный модуль (ИИМ), колесную одометрию (на основе данных АБС по CAN), лидар и ГНСС-приемник [2]. Сенсоры синхронизируются по импульсу PPS и объединены в общую навигационную систему с применением расширенного фильтра Калмана, адаптированного к кинематике колесной платформы. Разработан алгоритм калибровки сенсоров, позволяющий согласовать локальные координатные системы с глобальной навигационной системой без физического демонтажа оборудования. В вычислительной части использовалась платформа ROS2, обеспечивающая модульную структуру, высокую масштабируемость и возможность работы в реальном времени.

Особое внимание уделено аппаратной коммутации и синхронизации сенсоров с использованием интерфейсов UART, Ethernet и CAN. Программная реализация включает сбор и фильтрацию данных, приведение их к единой временной шкале и формирование навигационного решения. Комплекс был установлен на колесную платформу и протестирован в условиях городской и загородной среды, включая сценарии с отключенным ГНСС и в присутствии помех (имитация РЭБ). Были проведены серии испытаний с различными конфигурациями сенсоров: ИИМ отдельно, ИИМ + одометр, ИИМ + одометр + лидар. Полученные траектории сравнивались с эталонными маршрутами. Результаты показали, что система сохраняет устойчивость и точность позиционирования в течение длительного времени даже при отсутствии спутникового сигнала, а при его восстановлении корректно возвращается к глобальной привязке без резких скачков [2]. Среднеквадратичная ошибка в условиях автономной работы (без ГНСС) не превышала 1,5 м при интервале в 3–5 минут, что является допустимым уровнем для задач навигации на малых скоростях. Были подтверждены корректность алгоритма фильтрации и эффективность калибровки, а также пригодность комплекса для реального применения в автономных платформах.

Заключение

Разработан и внедрен программно-аппаратный комплекс навигации для БПТС, обеспечивающий устойчивую работу при недоступности ГНСС. Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенной архитектуры в серийных автономных транспортных средствах, робототехнических платформах, аграрной технике и в условиях, критичных к навигационной автономности. Программная реализация комплекса, основанная на ROS2, позволяет легко адаптировать систему под другие сенсоры и расширять функциональность. Интеграция данных от ИИМ, одометра, лидара и ГНСС с помощью расширенного фильтра Калмана продемонстрировала высокую точность и устойчивость навигации. Ключевым преимуществом разработанного комплекса стала способность к навигации в условиях глушения спутникового сигнала без необходимости в специализированном оборудовании [3]. Научная новизна работы заключается в реализации комплексного подхода, объединяющего аппаратную синхронизацию, алгоритмическое фильтрование, калибровку координатных систем и многосенсорную интеграцию с проверкой в реальных условиях. Результаты могут быть использованы как основа для дальнейших разработок в области автономной мобильной навигации, а сам подход адаптирован под требования отечественной электронной компонентной базы. Проведенные испытания подтвердили эффективность архитектуры и ее

пригодность для применения в условиях, где автономность и надежность системы навигации имеют критическое значение.

Литература

1. Цветков В. К. Исследования и разработка средств структурно-параметрического синтеза трактов обработки сигналов в системах дистанционного зондирования Земли: диссертация ... кандидата Технических наук: 05.13.01 [Текст]; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»]. — Москва, 2019. — 145 с.
2. Калеев Д. В., Соловьев А. Н., Савченко Ю. В. Оценка параметров инерциальной системы, обеспечивающей прямое вычисление фазовой неоднозначности после кратковременной потери сигналов приемниками спутниковой системы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — Тула: ТулГУ, 2014. — Вып. 12, часть 2. — С. 122–130.
3. Тимошенков С. П., Кульчицкий А. П. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов // Известия высших учебных заведений. Электроника. — М.: МИЭТ, 2012. — № 6 (98). — С. 51–56. EDN PJHDEV.

УДК 621.3.049

Алгоритм компенсации колебаний и ошибок позиционирования объектного стола

Климушкин Д. А., Астафьев Д. В., Митрофанов С. П., Петров О. В., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
klimushkin.daniil@yandex.ru

Разработан алгоритм компенсации колебаний и ошибок позиционирования стола за счет электромагнитных отклоняющих систем при помощи непрерывного контроля координат стола лазерной интерферометрической системой.
Ключевые слова: установка электронно-лучевой литографии; лазерная интерферометрическая система; объектный стол; электромагнитная отклоняющая система.

Развитие электронного машиностроения привело к значительному росту спроса на продукцию микроэлектронной промышленности. Отечественное производство интегральных схем становится стратегическим направлением суверенитета России. Однако создание конкурентоспособных продуктов требует решения целого ряда проблем, связанных с недостатком высокопроизводительного оборудования, специализированных материалов и квалифицированных кадров.

Одним из перспективных направлений электронного машиностроения является применение установок электронно-лучевой литографии (УЭЛЛ). Электронно-лучевые установки представляют собой сложную инженерную конструкцию, объединяющую механические компоненты и электронные системы управления. Центральной задачей при совмещении и синхронизации этих двух независимых составляющих является обеспечение точности позиционирования и формата электронного луча во время и после перемещения объектного стола [1].

Стол посредством приводов способен передвигаться в плоскости координат X и Y. Из-за особенностей конструкции стола при движении могут возникать ошибки позиционирования по оси X, ошибки позиционирования по оси Y и эффект рысканья, который обуславливается вращением стола вокруг оси Z. Также одним из эффектов, который влияет на точность изготовления топологии микросхемы, является вибрация всех механических элементов конструкции.

Для решения этих проблем был разработан алгоритм управления магнитной отклоняющей системой из состава электронно-оптической системы (ЭОС), позволяющий уменьшить ошибки позиционирования за счет непрерывного контроля координат стола лазерной интерферометрической системой (ЛИС) [2]. Алгоритм в режиме реального времени обеспечивает движение луча в противофазе механическим колебаниям стола, не влияя на точность прорисовки топологии. В рабочем пределе динамического смещения электронного луча по X и Y ±5 мкм от заданной позиции система слежения лучом позиционирует его с точностью 1 нм.

Литература

1. Xu Ma, Gonzalo R. Arce Computational Litography. — New Jersey: WILEY, 2010. 256 p.
2. Точность в системах позиционирования // Сервотехника. — URL: https://www.servotechnica.ru/glossary/type/index.pl?id=33 (дата обращения: 11.07.2025).

УДК 681.7

Анализ материалов фотоники для разработки оптических устройств измерения микроперемещений

Кобзев В. М.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Проанализированы материалы, используемые для изготовления фотонных элементов, среди которых кремний, ниобат лития и др., и их свойства, среди которых показатель преломления, поглощения и др. Также разбираются виды планарных волноводов и их технологии изготовления вместе с их плюсами и минусами.
Ключевые слова: материалы в фотонике; планарные волноводы; фотоника.

При разработке различных интегральных изделий фотоники необходимо проводить анализ существующих материалов и выбирать оптимальные из них по различным параметрам, определяющим их область применения. Среди таких параметров можно перечислить следующие:

- показатель преломления;
- показатель поглощения;
- полоса пропускания;
- диапазон волн, в которых материалы применяются.

Так же, как и в любой области, в фотонике можно выделить ряд материалов, которые находят довольно частое применение в изготовлении оптических устройств, при этом, конечно, существует и множество других материалов. Материалы, которые рассматриваются в работе:

- кремний;
- диоксид кремния;
- нитрид кремния;
- ниобат лития;
- фосфид индия;
- арсенид галлия;
- германий.

В результате проделанной работы была составлена сводная таблица со свойствами материалов и выбрана технология погруженного полоскового волновода из-за простоты и пониженных потерь для разработки оптического устройства измерения микроперемещений.

Литература

1. Каплунов И. А., Рогалин В. Е. Оптические свойства и области применения германия в фотонике // Фотоника, 2019. — Т. 13. — № 1. — С. 88–106. DOI: 10.22184/FRos.2019.13.1.88.106.
2. Refractive index database. — URL: https://refractiveindex.info (дата обращения: 11.07.2025).
3. Семенова О. И., Косинова М. Л. Диэлектрические материалы для устройств кремниевой фотоники // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «III Байкальский материаловедческий форум», Улан-Удэ, 09–15 июля 2018 года / Отв. редактор Е. Г. Хайкина. Часть 2. — Улан-Удэ: Бурятский научный центр Сибирского отделения РАН, 2018. — С. 120–121.

УДК 530.145

Томография кудитов с учетом неидеальности измерений

Кокшаров К. Б.[1,2], Богданова Н. А.[1,2], Богданов Ю. И.[1,2], Лукичёв В. Ф.[2]
[1] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] *НИЦ «Курчатовский институт» — ФТИАН им. К. А. Валиева*
117218, г. Москва, Нахимовский просп., 36, корп. 1

Представлен метод реконструкции многоуровневых квантовых состояний (кудитов) с учетом ошибок считывания. Разработанный нами алгоритм основан на использовании матрицы несоответствий (confusion matrix), трактуемой как стохастическая матрица переходов в цепи Маркова. Особое внимание уделено модели равномерного распределения ошибок и критическому уровню вероятности ошибки, при котором система полностью теряет способность к реконструкции состояний. Представленные результаты дополняют ранее разработанный подход к высокоточному контролю кудитов с применением нечетких квантовых измерений в условиях декогерентизации.

Ключевые слова: кубиты; кудиты; нечеткие квантовые измерения; квантовая томография; ошибки считывания; матрица несоответствий.

Многоуровневые квантовые состояния (кудиты) представляют собой перспективную платформу для масштабируемых квантовых вычислений [1, 2]. Ранее в наших работах [3, 4] был предложен метод высокоточного контроля таких систем с помощью нечетких квантовых измерений. Разработанный метод был применен для прецизионной реконструкции квантовых состояний в условиях существенного влияния декогерентизации и квантовых шумов. В настоящем исследовании акцент был сделан на разработку модели реконструкции квантовых состояний кудитов с использованием матрицы несоответствий (confusion matrix), позволяющей учитывать ошибки считывания. Матрица несоответствий является матрицей вероятностей переходов в цепи Маркова (сумма вероятностей в каждом столбце равна единице). Подробно была исследована модель равномерного распределения ошибок по всем уровням. В этом случае для кудита размерности s, если суммарная по всем уровням вероятность ошибки есть p_0, то на каждый «неверный» уровень приходится ошибка, равная $p_0/(s-1)$. В рассматриваемой модели имеется критический уровень вероятности ошибки, который равен $(s-1)/s$. При достижении этого уровня потери точности обращаются в бесконечность, а детектирующая система теряет возможность различать «верный» и «неверный» уровни, поскольку вероятность любого исхода одна и та же — $1/s$.

В табл. 1 представлены средние потери точности для протоколов квантовых измерений на основе взаимно-несмещенных базисов для различных размерностей. Функция средних потерь точности рассчитывается по формуле

$$L = \langle 1 - F \rangle n,$$

где F — точность (Fidelity) реконструкции квантового состояния, n — объем выборки.

Значения для функции потерь точности в табл. 1 рассчитывались при помощи матрицы полной информации H [5, 6].

Таблица 1. Средние значения функции потерь точности для реконструкции кудитов с учетом ошибок считывания. Реконструкция случайных квантовых состояний, равномерно распределенных по мере Хаара. В каждом случае рассматривалось по 10 тысяч экземпляров

s	$L(p_0 = 0)$	$L(p_0 = 0{,}1)$	$L(p_0 = 0{,}3)$	$L(p_0 = 0{,}4)$
2	$1{,}08333 \pm 0{,}00037$	$2{,}0121 \pm 0{,}00084$	$9{,}0717 \pm 0{,}0013$	$37{,}1971 \pm 0{,}0013$
3	$2{,}20440 \pm 0{,}00091$	$3{,}5124 \pm 0{,}0024$	$9{,}0631 \pm 0{,}0040$	$17{,}2931 \pm 0{,}0055$
4	$3{,}27362 \pm 0{,}00082$	$5{,}0280 \pm 0{,}0023$	$11{,}2329 \pm 0{,}0041$	$19{,}6532 \pm 0{,}0055$
8	$7{,}39304 \pm 0{,}00062$	$10{,}8207 \pm 0{,}0024$	$21{,}1553 \pm 0{,}0043$	$31{,}1333 \pm 0{,}0055$

Из таблицы мы видим, что потери точности растут с увеличением ошибки считывания и размерности кудита.

Работа выполнена в НИУ МИЭТ в рамках программы государственной поддержки университетов «Приоритет-2030».

Литература

1. Wang Yuchen, Hu Zixuan, Sanders Barry, Kais Sabre. Qudits and High-Dimensional Quantum Computing. Frontiers in Physics, 2020. 8. 10.3389/fphy.2020.589504.
2. Kiktenko E. O., Nikolaeva A. S., Xu Peng et al. Scalable quantum computing with qudits on a graph // Physical Review A, 2020. Vol. 101. № 2. P. 022304.
3. Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Kuznetsov Yu. A., Koksharov K. B. and Lukichev V. F. Precise Tomography of Qudits // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. № 3. P. 135–143.
4. Koksharov K. B., Bogdanov Yu. I., Bogdanova N. A., Kuznetsov Yu. A., Lukichev V. F. High-precision quantum measurements of qudits taking into account the influence of amplitude and phase relaxation // Russian Microelectronics, 2023. Vol. 52. Suppl. 1. P. S363–S368.
5. Bogdanov Yu. I., Chekhova M. V., Kulik S. P. et al. Qutrit state engineering with biphotons // Physical Review Letters, 2004. Vol. 93. № 23. P. 230503. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.230503.
6. Bogdanov Yu. I., Chekhova M. V., Krivitsky L. A. et al. Statistical reconstruction of qutrits // Physical Review A, 2004. Vol. 70. № 4. P. 042303. DOI: 10.1103/PhysRevA.70.042303.

УДК 004.415.2

Анализ вариантов реализации автоматизации отечественного маршрута проектирования цифровых СБИС на основе workflow-подхода

Переверзев А. Л.[1,2], д. т. н., Коршунов А. В.[1,2], к. т. н., Седов А. Ю.[1], Фаворов М. Ю.[1]

[1] АО «Международный научно-технологический центр МИЭТ»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 10, стр. 1
a.korshunov@istc-miet.ru
[2] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Представлен анализ формализации процесса проектирования цифровых СБИС как рабочего процесса (workflow). Рассматриваются подходы к автоматизации и интеграции инструментов САПР на основе BPMN, DAG и скриптовых представлений, анализируется их практичность и ограничения. Особое внимание уделено масштабируемости и переносимости таких систем в процессах внедрения новых САПР и маршрутов на их основе.

Ключевые слова: система автоматизации проектирования; бизнес-процесс; BPMN; автоматизация; DAG; рабочий процесс.

Процесс проектирования цифровых СБИС может рассматриваться как типовой пример для систем управления рабочими процессами (workflow-система). Workflow-системы предназначены для автоматизации и оркестрации бизнес-процессов, в рамках которых описывается и управляется исполнение последовательности задач, что обеспечивает более эффективное управление ресурсами. Основные цели workflow-систем — упростить процессы разработки, снизить вероятность типовых ошибок и повысить прозрачность. Такие системы позволяют формализовать описание маршрутов проектирования, интегрировать разнородные инструменты (коммерческие, open-source, вновь разрабатываемые) и обеспечить контроль на всех этапах жизненного цикла использования САПР.

Среди возможных подходов к описанию рабочих процессов можно выделить нотации BPMN, DAG и YAML/JSON/Makefile, каждая из которых имеет свои преимущества и области применения. BPMN (Business Process Model and Notation) [1] представляет собой графическую нотацию, обеспечивающую визуальное моделирование процессов с явным разделением ролей и этапов. DAG (Directed Acyclic Graph) ориентирован на построение процессов с зависимостями между задачами и широко используется в научных и инженерных workflow, в том числе при интеграции с инструментами ИИ [2]. Традиционные описания на основе YAML/JSON/Makefile [3] обеспечивают простое текстовое представление процессов и обычно применяется в CI/CD и в процессах автоматизации разработки.

BPMN особенно актуален при описании сложных процессов проектирования СБИС, требующих взаимодействия различных ролей (проектировщик, менеджер, заказчик), координации задач и отслеживания прогресса. BPMN позволяет описать этапы проектирования в виде графической модели, что делает процесс понятным для всех участников, а также повышает прозрачность, облегчает аудит

и служит основой для последующей стандартизации с участием предприятий — изготовителей ЭКБ и РЭА.

Выбор конкретной системы и нотации зависит от сложности процессов, необходимости визуализации, уровня формализации и требований к масштабируемости. В контексте автоматизации проектирования СБИС наибольшую актуальность представляют BPMN (для управления сложными бизнес-процессами) и DAG (для построения технических маршрутов проектирования и интеграции инструментов). Традиционные подходы на основе текстовых описаний слабо масштабируются, затрудняют повторное использование, плохо документируются и требуют высокой квалификации от пользователей.

Литература

1. ESTECO. BPMN for Engineering Design Automation: A Case Study with VOLTA [Электронный ресурс]. — URL: https://www.cardanit.com/blog/bpmn-engineering-design-esteco (дата обращения: 13.07.2025).
2. Singh S., Kumar A., Rani S. et al. Unleashing the power of AI and data analysis: transforming insights into action // Interdisciplinary Approaches to AI, Internet of Everything, and Machine Learning. IGI Global Scientific Publishing, 2025. P. 1–24.
3. Deutschbein C., Stassinopoulos A. Test, Build, Deploy — A CI/CD Framework for Open-Source Hardware Designs // arXiv preprint arXiv:2503.19180. 2025.

УДК 621.3.049.779

Разработка и исследование МЭМС-акселерометров с ЧЭ дифференциального типа

Анчутин С. А.[1,2], Кочурина Е. С.[1,2], к. т. н., Зарянкин Н. М.[1,2], Виноградов А. И.[1,2], Дернов И. С.[1,2], Тимошенков А. С.[1,2], д. т. н., Усов М. И.[1,2], Баюнов А. Г.[3]

[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] ООО «Лаборатория Микроприборов»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
[3] Муниципальное бюджетное учреждение дополнительного образования городского округа Солнечногорск «Спортивная школа № 2»
141508, г. Солнечногорск, ул. Ухова, стр. 29
step@mail.ru, ekochurina@mp-lab.ru, nzaryankin@mp-lab.ru, avinogradov@mp-lab.ru, idernov@mp-lab.ru, at@mp-lab.ru, musov@mp-lab.ru

Приведено описание МЭМС-датчика с ЧЭ дифференциального типа. В работе представлено описание конструкции разработанного ЧЭ и особенности технологического процесса изготовления. Приведены методы оценки основных параметров изготовленных образцов ЧЭ и результаты проведенных исследований.
Ключевые слова: чувствительный элемент; МЭМС-акселерометр; технологический процесс изготовления; результаты исследований.

В работе рассматривается МЭМС-акселерометр с чувствительным элементом дифференциального типа, его конструкция и особенности технологического процесса его изготовления. Чувствительный элемент был изготовлен с использованием плазмохимического и жидкостного травления кремния.

Проведены исследования изготовленных образцов чувствительных элементов дифференциального типа. Исследования изготовленных МЭМС-акселерометров проводились в целях определения статических параметров (смещение нуля, масштабный коэффициент и нелинейность), а также была оценена зависимость смещения нуля коэффициента от изменения температуры.

Исследования проводились на собранном стенде на базе одноосного поворотного стола в поле силы тяжести Земли, в состав стенда также входила камера тепла — холода для проведения климатических испытаний. Данные собирались при различных точно выставленных значениях положения датчика по отношению к вектору силы тяжести Земли.

В работе приводятся результаты исследований изготовленных экспериментальных образцов МЭМС-акселерометров с чувствительным элементом дифференциального типа.

Литература

1. Виноградов А. И., Зарянкин Н. М., Прокопьев Е. П. и др. Оптимизация параметров процесса глубокого плазмохимического травления кремния для элементов МЭМС // Известия вузов. Электроника, 2010. — № 2 (82). — С. 3–9.
2. Кочурина Е. С., Анчутин С. А., Калугин В. В., Зарянкин Н. М., Тимошенков А. С., Дернов И. С. Разработка чувствительного элемента микромеханического акселерометра // Известия вузов. Электроника, 2022. — 27 (1). — С. 59–67.

УДК 004.42

Разработка программы приборно-технологического моделирования кремниевых интегральных схем

к. т. н. Красюков А. Ю.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
a_kras@org.miet.ru

Приведено описание применения программы приборно-технологического моделирования для кремниевых КМОП- и BCD-технологий, предназначенной для моделирования технологических процессов формирования кремниевых интегральных схем, а также для расчета и отображения электрических характеристик элементов кремниевых интегральных схем.
Ключевые слова: технологическое моделирование; приборное моделирование; визуализация; кремниевая технология; окисление; имплантация; диффузия; стационарный и малосигнальный анализ.

Программа приборно-технологического моделирования для кремниевых КМОП- и BCD-технологий MSIM предназначена для моделирования технологических процессов формирования кремниевых интегральных схем на основе КМОП- и BCD-технологий, а также для расчета и отображения электрических характеристик элементов кремниевых интегральных схем.

Программа MSIM предназначена для использования в качестве инструмента разработки новых и совершенствования существующих технологических маршрутов создания кремниевых КМОП и BCD интегральных схем и разработки новой элементной базы предприятий электронной промышленности.

Программа MSIM содержит модули для:

- моделирования технологических процессов;
- моделирования приборных, электрических характеристик;
- модули для визуализации одномерных и двумерных результатов моделирования.

Программа MSIM имеет возможность моделирования технологических процессов, а также приборного моделирования, в том числе:

- моделирование процесса ионной имплантации примесей B, BF2, P, As, Sb в Si, Si*, SiO_2, $Si3N_4$ с учетом эффекта каналирования примеси в кремний;
- моделирование процесса ионной имплантации основных примесей в многослойные структуры с учетом рельефа поверхности подложки и маски;
- моделирование процесса окисления в различных газовых смесях с учетом давления и ориентации поверхности подложки, а также локального окисления;
- моделирование процесса диффузии основных примесей в многослойные двумерные структуры в нейтральной и окисляющей среде с учетом влияния точечных дефектов и эффекта диффузии, ускоренной окислением;
- эмуляция травления нанесения слоев с использованием эмуляции процесса;
- моделирование КМОП технологического маршрута с проектными нормами 130 нм и выше;

- моделирование элементов BCD технологического маршрута, таких как МОП-транзисторы, биполярные транзисторы, силовые МОП-транзисторы;
- расчет статических (ВАХ МОП- и биполярных транзисторов с проектными нормами 130 нм и выше (DC-анализ));
- расчет малосигнальных ВФХ и МОП биполярных транзисторов с проектными нормами 130 нм и выше (AC-анализ);
- отображение одномерных результатов моделирования, таких как профили распределения примеси, ВАХ и ВФХ;
- отображение двумерных результатов моделирования, таких как распределение примесей, напряженности электрического поля, концентраций носителей и подобных распределений.

Программа MSIM позволяет считывать и сохранять результаты моделирования одномерных и двумерных структур в текстовых фалах STR-формата, а также сохранять одномерные зависимости в текстовых файлах PLX- и PLT-форматов.

УДК 620.187

Разработка эталонного атомно-силового микроскопа

Быков В. А., Матюшин Т. Г.
[1] ООО «КСИЛЛЕКТ»
107207, г. Москва, Щелковское ш., 77, пом. XII
info@xillect.ru
[2] ООО «ТЕХНОСТЕК ХОЛДИНГ»
107207, г. Москва, Щелковское ш., 77

Сканирующая зондовая микроскопия за почти 50 лет после рождения стала мощным методом исследования, применяющимся как в большинстве естественно-научных исследований, так и производствах. Тем не менее вопросы калибровки и повторяемых измерений всегда были и остаются вопросом, требующим решения. Использование лазерных интерферометров по трем координатам даст возможность решить метрологические проблемы.

Ключевые слова: лазерные интерферометры; интерферометрия; сканирующий зондовый микроскоп; СЗМ; СТМ; АСМ; комбинационное рассеяние; Рамановская спектроскопия; кантилевер; нанотехнология; метрология; нанометрология; наноэлектроника; диагностика; сканирующая капиллярная микроскопия.

Текущий уровень развития микроэлектронной промышленности и научно-исследовательских работ в этой области требует наличия современных метрологически обеспеченных методов контроля качества как готовых изделий, так и изделий на промежуточных технологических операциях. Одним из наиболее мощных методов контроля свойств и качества поверхностных структур является атомно-силовая (АСМ) / сканирующая зондовая (СЗМ) микроскопия.

Атомно-силовые микроскопы прошли огромный путь развития от первых самодельных приборов, разработанных в 1980–1990-х годах, до передовых инструментов визуализации, широко используемых в исследовательских лабораториях, поддерживающих многие области нанонауки. Однако насколько точны и повторяемы измерения размеров, выполненные с помощью АСМ? За последние несколько лет было опубликовано несколько статей, посвященных воспроизводимости данных. Например, в статье Бейкера и Пенни в журнале Nature [1] указано: «Более 70% исследователей пытались, но не смогли воспроизвести эксперименты других ученых, а более половины не смогли воспроизвести свои собственные эксперименты». Точные измерения, как отмечают Сене и др. [2], необходимы для качественного контроля технологических процессов микро- и наноэлектроники, получения воспроизводимых результатов, репутации и уверенности в результатах своей работы.

Калибровка и поверка рабочих АСМ проводится по специальным мерам (тестовым структурам), которые уже более 15 лет не производятся в РФ. Несколько лет назад данная задача решалась закупкой мер у иностранных фирм (MikroMasch, AppNano). Принципиально эти меры могут быть откалиброваны в национальных метрологических лабораториях, а калибровочные значения могут быть выражены с известной погрешностью с помощью эталонных АСМ. Эти приборы, изготовленные по индивидуальному заказу, производятся и эксплуатируются в нескольких метрологических центрах по всему миру. Их отличительной особенностью

является наличие лазерных интерферометров для прослеживаемого измерения смещения осей сканирования АСМ относительно зонда АСМ [3].

Ранее было можно проводить сличение российских мер в иностранных метрологических центрах, но сегодня такой вариант решения проблемы невозможен.

Для того чтобы результаты сличения мер и их аттестация в качестве рабочего эталона 2-го разряда были легитимными, необходимо применение атомно-силового микроскопа, который аттестован в качестве рабочего эталона 1-го разряда (согласно Государственной поверочной схеме для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм. Часть 4). После прохождения данной процедуры эта мера может быть использована для поверки АСМ, применяемых в качестве рабочих СИ, что позволяет частично решить задачу по обеспечению легитимности использования АСМ. При этом метрологически обеспечены должны быть измерения как в диапазоне сканера (100×100×10 мкм), так и позиционера (200×200 мм).

Таким образом, в целях организации метрологического обеспечения АСМ для научно-исследовательских работ и микроэлектронной промышленности предлагается разработка эталонного АСМ с лазерными интерферометрами (МИФИ) в качестве отсчетных устройств по осям XYZ с диапазоном измерения сканера 100×100×10 мкм и позиционера 200×200×30 мм и со следующими метрологическими характеристиками.

Макродиапазон:

- повторяемость по XY <0,6 μm,
- повторяемость по Z <0,3 μm,
- погрешность по X и Y <0,2 μm,
- погрешность по Z <0,1 μm.

Микродиапазон:

- погрешность менее 1 нм.

Крайне важно, что для обеспечения достоверности необходимо разработать методики испытаний, методику расчета неопределенности, методики аттестации и методики поверки таким образом, чтобы в ходе их выполнения принципы и алгоритмы обмеров контрольных образцов были максимально близки к принципам и алгоритмам контрольно-измерительных операций, для которых предназначено данное оборудование.

Потенциальными заказчиками данного типа АСМ предполагаются лаборатории микроэлектронных производств (аттестация мер и полученных структур), метрологические центры (поверка рабочих мер), научно-исследовательские организации (подтверждение полученных в ходе ОКР результатов), университеты (подготовка метрологов для микроэлектронной промышленности). Парк АСМ в РФ превышает 5000 единиц, и все они требуют поверки.

ООО «КСИЛЛЕКТ» имеет научно-технические и метрологические компетенции, необходимые для разработки эталонного АСМ.

Литература

1. Baker M. and Penny D. Is there are reproducibility crisis // Nature, 2016. 533, 7604 P. 452–545.
2. Sene M. et al. Metrology is key to reproducing results // Nature, 2017. 547, 7664. P. 397–399. URL: https://www.nature.com/news/metrology-is-key-to-reproducing-results-1.22348.
3. Yacoot A. et al. The lattice parameter of silicon; a secondary realisation of the metre // Meas. Sci. Technol., 2020.

УДК 621.3

Анализ и моделирование причин возникновения LER-эффекта и методы его снижения при создании интегральных схем

Кульпинов М. С., Путря М. Г., Лосева В. В., Балашов А. Г.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе проведен анализ основных причин возникновения LER-эффекта, влияния литографического маршрута и технологии переноса рисунка элементов ИС на качество поверхности формируемых структур. Рассмотрены способы и предложен метод уменьшения неровностей фоторезистивной маски, такие как оптимизация процесса фотолитографии, использование специализированных материалов и технологий их нанесения при формировании слоев антиотражающих покрытий и жесткой маски, применение дополнительных технологий и способов обработки поверхности формируемых слоев.

Ключевые слова: неровности края линии фоторезиста; LER-эффект; интегральные схемы.

В данной работе проанализированы и систематизированы основные причины возникновения LER-эффекта (неровностей края линии фоторезистивной маски) и особенности появления искажений с фоторезистивной маски на формируемые структуры. Рассмотрено влияние параметров литографического процесса и технологий переноса рисунка при изготовлении интегральных схем на качество поверхности создаваемых структур. Выявлены ключевые факторы, воздействующие на проявление LER-эффекта; предварительная оценка их позволяет прогнозировать параметры проектируемых элементов и учитывать возможные отклонения, возникающие в ходе технологического процесса при изготовлении наноэлектронных устройств. Предложена экспериментальная методика снижения неровностей фоторезистивной маски, оказывающих негативное влияние на характеристики интегральных схем и фотонных устройств. В частности, рассмотрены способы оптимизации фотолитографического процесса, применение специализированных материалов и технологий нанесения антиотражающих покрытий и жестких масок, а также дополнительные методы обработки поверхности для улучшения качества формируемых слоев.

Таким образом, в ходе выполнения работы исследованы основные причины возникновения LER-эффекта и его влияние на параметры устройств при создании интегральных схем. Приведен пример, позволяющий уменьшить влияние LER-эффекта при формировании фоторезистивной маски.

Исследование выполнено в рамках соглашения с Минобрнауки № 075-03-2025-266 от 16.01.2025 г. FSMR-2023-0002.

Литература

1. Chen H. et al. Line Edge Roughness Modeling for Continuous Time-space Resist Simulations // 2024 2nd International Symposium of Electronics Design Automation (ISEDA), Xi'an, China, 2024.
2. Zheng Cui. Nanofabrication: Principles, Capabilities and Limits. Springer, 2017. P. 343.

УДК 621.389

Определение наиболее подходящей технологии группового монтажа шариков припоя в целях отработки на стендовом оборудовании

Кухарь М. В., Разживалов П. Н., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
maxim.kukhar2002@yandex.ru, razzhivalovpavel@gmail.com

Рассмотрены основные разновидности технологии группового монтажа шариков припоя и ключевые параметры для составления ТЗ на стенд для отработки технологии. Выбран конкретный вид технологии и предложены черновые решения по реализации выявленных критериев.

Ключевые слова: шарики припоя; WLSST; Wafer/Panel Level Solder Ball Placement; стенд для монтажа шариков припоя.

МИЭТ ведет исследования по групповому монтажу шариков припоя. Для отработки данной технологии нужен стенд. Необходимо выбрать вид технологии, выявить ключевые параметры для составления ТЗ.

Данная технология имеет два основных подхода:

- Wafer/Panel Level Solder Sphere Transfer (WLSST) [1] — перенос шариков припоя на уровне пластины/подложки;
- Wafer/Panel Level Solder Ball Placement [2] — установка припойных шариков на уровне пластины/подложки.

Эти подходы различаются способами установки шариков припоя. В WLSST она происходит с помощью вакуумного захвата с трафаретом в нем. Для подхода Wafer/Panel Level Solder Ball Placement шарики наносятся через трафарет, совмещенный с подложкой.

При изучении источников были определены ключевые параметры для оборудования по данной технологии, а при анализе существующего оборудования — их количественные величины для современной техники. В результате получилась следующая картина [3]:

- максимальный размер заготовки — пластина 300 мм или подложка 260×300 мм;
- диаметры шариков припоя — от 60 до 500 мкм;
- пропускная способность — от 25 пластин в час;
- точность установки шариков — не менее ±25 мкм.

Разрабатываемый стенд будет работать по технологии Wafer/Panel Level Solder Ball Placement, т. к. вакуум в ней применяется только для удержания заготовки, и в нем будут шарико-винтовые передачи или линейные двигатели для позиционирования рабочего стола.

Литература

1. Glaubitz C. et al. Solder Sphere Transfer for Wafer Level Packaging // 2018 IEEE 20th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). Singapore, 2018. P. 948–953.

2. Lim S. P. S., Jaafar N., Chong S. C., Lim S. S. H. and Chai T. C. Development of wafer level solderball placement process for RDL-first FOWLP // 2020 IEEE 22nd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). Singapore, 2020. P. 435–439.
3. Automated solder bumping machine for ball placement and rework [Электронный ресурс]. URL: https://pactech.com/equipment-item/ultra-sb2 (дата обращения 10.07.2025).

УДК 004.94:621.3.049.77

Подход «мастер — клиент» к использованию распределенных вычислений при характеризации библиотек стандартных ячеек

Макаров Г. Н., Сорокин Т. М.
ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6
info@nm-tech.org

В работе проанализировано несколько подходов к использованию распределенных вычислений при характеризации библиотек стандартных ячеек. Отдельно рассмотрен перспективный подход, основанный на архитектуре «мастер — клиент», а также приведены детали его возможной реализации.
Ключевые слова: характеризация библиотек; формат Liberty; стандартная ячейка; САПР.

Особенности процесса характеризации библиотек стандартных ячеек

При переходе к продвинутым технологическим нормам увеличивается суммарное количество стандартных ячеек в цифровых библиотеках, а также возрастает число требуемых рабочих режимов (PVT). Для разработки конечного продукта требуются дополнительные, более сложные Liberty-модели [1], учитывающие эффекты, возникающие на субмикронных технологиях. В результате процесс характеризации таких библиотек требует все больших временных и вычислительных ресурсов.

Использование вычислительных кластеров при характеризации

Использование вычислительных кластеров позволяет снизить время характеризации за счет одновременного запуска большого количества SPICE-симуляций. Подключение к удаленным вычислительным узлам производится либо с использованием сетевых протоколов низкого уровня (ssh [2]), либо посредством интерфейса систем распределенных вычислений (LSF [3], SGE [4]). Множественные подключения к вычислительным кластерам могут суммарно занимать ощутимое время, что приводит к существенному увеличению времени характеризации.

Подходы к запуску SPICE-симуляций на вычислительных кластерах

Можно выделить несколько основных подходов к распределению SPICE-симуляций на вычислительных кластерах:

- использование отдельных подключений к вычислительному кластеру для запуска каждой SPICE-симуляции. В таком подходе накладные расходы на отправку задач могут оказаться соизмеримыми с временем моделирования, обычно занимающим несколько секунд для библиотек стандартных ячеек;
- подключение к вычислительному кластеру для запуска сразу нескольких SPICE-симуляций («пакетов»). К минусам подхода можно отнести практическую невозможность формирования одинаковых по длительности и вычислительной сложности «пакетов». Также данный подход неудобен с точки зрения отслеживания и повторного запуска неуспешных SPICE-симуляций;
- подход, основанный на архитектуре «мастер — клиент», который не обладает перечисленными выше недостатками.

Концепция подхода «мастер — клиент»

В рамках подхода мастер-клиент на вычислительные кластеры отправляются задачи запуска не отдельных SPICE-симуляций, а самостоятельных программ-клиентов. После запуска программы-клиенты устанавливают связь посредством TCP/IP-протокола [5] с породившей их программой-мастером и начинают последовательно выполнять SPICE-симуляции, запрашиваемые программой-мастером.

Детали реализации подхода «мастер — клиент»

Отправка и прием сообщений организованы в отдельном асинхронном потоке, что улучшает оперативность реагирования на запросы. Сообщения содержат задачи для выполнения на стороне программы-клиента, а также результаты моделирования. Для контроля работы программы-клиента введены служебные сообщения. Блок-схема взаимодействия программ приведена на рис. 1.

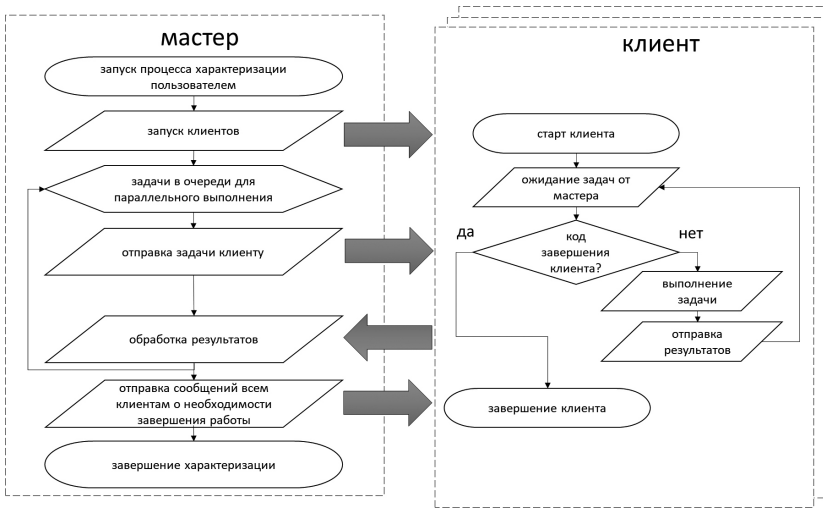


Рис. 1. Блок-схема взаимодействия программ

Заключение

Подход «мастер — клиент» применялся при характеризации библиотек стандартных ячеек с общим числом SPICE-симуляций 500 тыс. и более. Загруженность программ-клиентов превышала 95 %, что подтверждает эффективность подхода.

Литература

1. Макаров Г. Н., Сорокин Т. М., Калашников В. С., Семенов М. Ю., Царапкин С. Ф., Гундарцев М. А. Требования к разработке отечественной системы характеризации библиотек стандартных ячеек и ячеек ввода-вывода // Информационные технологии, 2024. — Т. 30. — № 10. — С. 520–527. DOI: 10.17587/it.30.520-527.
2. Secure Shell protocol (SSH). URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4250.

3. Platform Load Sharing Facility (LSF). URL: https://www.ibm.com/products/hpc-workload-management.
4. Sun Grid Engine (SGE). URL: http://www.oracle.com/technetwork/oem/grid-engine-166852.html.
5. TCP/IP. URL: Модели OSI и TCP/IP (oslogic.ru).

УДК 621.382

Мощный высоковольтный транзистор со статической индукцией на Si, превосходящий по основным параметрам все известные ключевые полупроводниковые приборы

Максименко Ю. Н., д. т. н.
АО «ДЦ Кристал»
105187, г. Москва, ул. Щербаковская, 53, корп. 3

Рассмотрена физика работы мощных высоковольтных ключевых транзисторов со статической индукцией с планарной конструкцией затвора. Показано, что разработанные в 90-е годы и доработанные сегодня транзисторы на Si по основным параметрам превосходят не только МОП ПТ и IGBT, но и приборы, построенные на широкозонных материалах SiC и GaN. К достоинствам данных приборов следует отнести простоту изготовления кристалла и, соответственно, низкую их себестоимость.

Ключевые слова: полевой транзистор со статической индукцией; ключевые параметры; себестоимость.

В настоящее время половина всей мировой энергетики потребляется в виде электрической энергии, и силовая электроника играет ключевую роль в ее цикле производства — хранения — распределения. Мощные полупроводниковые ключи находят широкое применение во многих областях силовой электроники, являются важными элементами радиоэлектронной аппаратуры, определяющими ее надежную работу и массогабаритные параметры.

Основные требования к ключам: они должны рассеивать на себе как можно меньше мощности в открытом и закрытом состояниях, обладать высоким быстродействием и низкой себестоимостью.

В последние 20–30 лет разработчики полупроводниковых ключей создают приборы, которые обладают достоинствами БТ и МДП ПТ. Наилучшим представителем такого сочетания является БТ с полевым управлением (IGBT), который сегодня нашел очень широкое применение во всех областях силовой РЭА. Однако в последнее десятилетие IGBT начали теснить приборы, построенные на широкозонных материалах SiC и GaN.

Но есть мощные высоковольтные ключевые приборы, которые были изобретены еще в далекие девяностые годы прошлого века, они превосходят по основным ключевым параметрам и IGBT, и приборы на SiC и GaN. Это приборы со статической индукцией с планарным затвором, способные работать одновременно и в полевом, и в биполярном режимах.

Чтобы понять уникальность транзистора со статической индукцией (СИТ), рассмотрим физику его работы.

При отсутствии напряжения на затворе транзистор может быть нормально открытым, когда расстояние между p^+-областями велико, и нормально закрытым, когда это расстояние мало. Транзистор с нормально закрытым каналом был назван биполярным транзистором со статической индукцией (БСИТ). При подаче на затвор положительного потенциала в канал впрыскиваются неосновные носители (дырки). В канале образуется электронно-дырочная плазма. Она снижает

сопротивление канала более чем на три порядка. При подаче на затвор отрицательного напряжения дырки, которые находятся рядом с p^+-областями, быстро уходят в затвор. Появляется ОПЗ. Остальные дырки рекомбинируют с электронами, летящими из истока. Так как на пути протекания тока нет ни одного p-n-перехода, то скорость выключения СИТ очень высока, а сопротивление очень мало. В БТ и IGBT из-за наличия базы, в которой процессы рассасывания неосновных носителей очень медленные, сетевые приборы имеют максимальную рабочую частоту 20 и 50 кГц соответственно.

В 80–90-е годы, в ОКБ при НЭВЗ я разработал серию высоковольтных транзисторов со статической индукцией с нормально открытым и нормально закрытым каналами. Лучшие представители этой серии — транзистор КП926 — СИТ и его аналог КТ9154 — БСИТ.

С 2022 года я продолжил работы по исследованию данного класса приборов и пришел к следующим выводам:

- мощные высоковольтные приборы, разработанные в 80–90 годы, и сегодня существенно превосходят по основным ключевым параметрам современные приборы IGBT и полевые транзисторы, выполненные на SiC и GaN;
- несмотря на свои уникальные ключевые параметры, конструкция этих приборов далеко не оптимальная;
- просматривается возможности создания приборов данного класса с принципиально новыми конструктивными исполнениями, которые по основным ключевым параметрам будут превосходить приборы, разработанные ранее, в десятки раз.

Для исследования конструкций, разработанных ранее, были созданы физико-математические модели на базе программы TCAD, которые позволяли проводить анализ как для статического режима работы, так и для динамического. Проведенные исследования транзистора КП926 с использованием данных моделей показали, что с помощью незначительных конструктивных изменений можно увеличить коэффициент усиления по току в 2–3 раза, повысить максимальную рабочую частоту с 1 до 10 МГц и выше, снизить себестоимость в несколько раз. По новой конструкции на предприятии АО «ДЦ Кристал» ведется изготовление опытных образцов.

На сегодняшний день мощные высоковольтные СИТ и ТЭУ с планарной структурой затвора по основным ключевым параметрам превосходят все известные приборы.

Также сегодня разработаны следующие приборы со статической индукцией: составные СИТ, СИТ с быстродействующим диодом на одном кристалле, прибор с N-образной характеристикой, СИТ с защитными стабилитронами на входе и на выходе. Предложены конструкции СИТ и ТЭУ с гетероистоком и гетерокатодом и ТЭУ с полевым управлением.

УДК 533.9.03

Технологическое оборудование: лямбда-резонатор — уникальный источник объемной плазмы

Малинов А. Ю., Виноградов Г. К.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Институт НМСТ, НИЛ ВПТО
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
vinogradovgk@mail.ru

Обсуждаются уникальные промышленные источники плазмы типа «Лямбда-резонатор» с внутренним фазовым балансом и жесткой волновой 3D-структурой. Эффективность передачи энергии в разряд от высокочастотного (ВЧ) генератора до 100%. Представлены особые физические явления самоорганизации разряда и уникальные возможности непосредственного наблюдения и контроля локализованных объемных токов в плазме.

Ключевые слова: индуктивные источники плазмы; Лямбда-резонатор Виноградова; полупроводниковое производство.

Введение

Индуктивные ВЧ источники плазмы высокой плотности получили широкое распространение в оборудовании современных полупроводниковых производств. Этому способствовал идеал «чисто индуктивной» плазмы, создаваемой замкнутым вихревым током. Такие разряды имеют свои преимущества по отношению к емкостным планарным. Однако, размерные эффекты реакторов по мере увеличения диаметра обрабатываемых пластин до 300 мм и более, приводят к увеличению индукторов и к усугублению таких проблем, как потенциальные емкостные токи от них. Такие токи приводят к потере контроля разрядов. Увеличение размера индукторов приводит и к проявлению эффектов «линии передачи», поскольку длина намотки индуктора оказывается сопоставима с четвертью длины волны на частоте возбуждения.

Основным применением индуктивных источников являются процессы, требующие высокой плотности (мощности) плазмы, как например, удаление фоторезиста [1], скоростное травление кремния, азотирование и окисление.

Решение проблемы «больших индукторов»

Разрешить фундаментальную проблему потенциальных токов индукторов и азимутальной однородности в больших реакторах оказалось возможным, используя волновые свойства самой линии передачи, которые и вызывали проблемы. Был предложен новый класс «супериндукционных» источников на линях передачи [2], в которых проблема неоднородности ВЧ токов и напряжений больших индукторов фундаментально решена путем полного фазового баланса электрической структуры резонатора.

«Супериндукция» применительно к разряду означает, во-первых, то, что реактор практически не дает емкостных токов на землю, то есть работает как идеальный индуктор, и во-вторых, имеет ранее недостижимую энергетическую эффективность (>99,99%) передачи ВЧ энергии от коаксиального кабеля в плазму без

применения согласующих электромеханических устройств [3,4] в основном в индуктивную моду разряда.

В докладе показана перспективность применения Лямбда-резонаторов в качестве уникальных научно-исследовательских и учебных установок промышленного масштаба с возможностью контроля и изучения 3D объемных токов как для исследования физики плазмы, так и для целей обучения методам диагностики и контроля плазмы. Эти же установки позволяют осуществлять производственные плазменные технологии. Подобные устройства не были до сих пор доступны ни одному университету или академической лаборатории, поскольку были изначально защищены патентами и использваны исключительно в промышленности.

Заключение

Лямбда-резонатор (Lambda-Resonator — уникальный плазменный реактор для изучения физических процессов в плазме и для развития фундаментальных и инженерных основ инновационных технологий. Имеется возможность производства и использования описанного оборудования и систем как для академических, образовательных, так и для производственных целей.

Литература

1. Mézerette D. L., Tanimura K., Vinogradov G. K. Analysis of thermally activated kinetics and uniformity of photoresist ashing process on 300 mm wafers // J. Vac. Sci.Technol., 2009. B 27 (5). P. 2084.
2. Vinogradov G. K. Transmission line balanced inductive plasma sources // Plasma Sources Sci. Technol., 2000. Vol. 9. P. 400–412.
3. Vinogradov G. K., Menagarishvili V. M., Yoneyama S. // J. Vac. Sci. Technol., 1998. A 16. P. 1444.
4. Vinogradov G. K., Menagarishvily V. M., Yoneyama S. // J. Vac. Sci. Technol., 1998. A 16. P. 3164.

УДК 621.37

Анализ факторов, влияющих на достоверность радиолокационных измерений в ближней зоне

Марков А. С.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
markov_rt@mail.ru

Рассмотрены ключевые факторы, влияющие на точность радиолокационных измерений в ближней зоне. Проанализированы волновые, системные и конструктивные причины погрешностей. Обобщены современные экспериментальные и численные методы повышения точности радиолокационных измерений в ближней зоне.
Ключевые слова: радиолокация ближнего действия; достоверность измерений; фазовые искажения.

Радиолокационные системы ближнего действия (РЛС БД) применяются в задачах автономной навигации, робототехники, биомедицинских измерениях. Для них характерны жесткие ограничения по габаритам, времени отклика и точности оценки расстояния на малых дальностях. Однако в ближней зоне распространения электромагнитных волн традиционные РЛС, основанные на модели плоской фронтальной волны и дальней зоны, теряют применимость. Это приводит к росту ошибок измерения и снижению достоверности результатов.

Целью работы является выделение и классификация факторов, ограничивающих точность радиолокационных измерений ближнего действия, с последующим учетом выявленных эффектов при построении структуры и модели РЛС БД. Анализ опирается на современные численные и экспериментальные исследования.

В УВЧ-диапазоне при использовании широкополосных импульсов в ближней зоне наблюдаются значительные фазовые искажения. В [1] показано, что при размере объекта порядка 5 см погрешности измерения дальности, обусловленные кривизной фронта волны, могут достигать миллиметровых значений. Авторы вводят метод коррекции на основе фазового градиента, позволяющий повысить точность до субмиллиметрового уровня. В [2] рассмотрен подход, использующий электродинамическое моделирование и оценку максимального правдоподобия, что повышает устойчивость к искажениям ближнего поля.

Для оценки пространственной структуры поля применяются методы реконструкции диаграммы направленности (ДН) из ближнего поля. В [3] реализован метод двухстороннего сканирования и восстановления ДН на основе эквивалентной дипольной модели. Работа [4] предлагает фазонезависимую методику на базе спирального сканирования с существенно меньшим числом измерений, применимую в компактных измерительных стендах.

Эффективным методом восстановления характеристик ближнего поля является цилиндрическое 3D-сканирование рассеяния, рассмотренное в [5]. Он позволяет восстановить структуру ближнего поля отраженного сигнала и провести анализ рассеяния объемных объектов с выраженной анизотропией. Также следует учитывать системные факторы, такие как стабильность синхронизации и частоты.

В [6] предложена методика компенсации временных и частотных ошибок, повышающая устойчивость локализации объектов и точность определения их движения.

Таким образом, комплексный учет фазовых искажений, геометрии ближнего поля, системных ошибок и особенностей объектов измерения является необходимым условием для построения РЛС БД с заданными метрологическими характеристиками. Выявленные закономерности и подходы положены в основу проектируемой РЛС, ориентированной на работу в ближней зоне с адаптивной цифровой обработкой сигналов.

Литература

1. Piotrowsky L., Barowski J., Pohl N. Near-field effects on micrometer accurate ranging with ultra-wideband mmWave radar // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022. Vol. 21. № 5. P. 938–942. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3152558.
2. De Saint Moulin F., Thiran G., Craeye C., Vandendorpe L., Oestges C. Near-field EM-based multistatic radar range estimation // arXiv preprint, 2024. arXiv:2403.09258. DOI: 10.48550/arXiv.2403.09258.
3. Han J. Y., Yun D.-J., Kim Y. D. Far-field antenna pattern reconstruction through front and back planar near-field scanning // IEEE Access, 2024. Vol. 13. P. 2229–2238. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3523946.
4. Bevilacqua F., Capozzoli A., Curcio C., Vardaxoglou J. Y. C. Experimental validation of a phaseless, non-redundant planar spiral scanning for antenna characterisation // IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2023. DOI: 10.1049/mia2.12357.
5. Yang Z., Zhao J., Si W., Lou C., Zhao X., Miao J. A target near-field scattering measurement technique utilizing 3D near-field imaging via cylindrical scanning // Remote Sensing, 2025. Vol. 17. № 9. Art. 1575. DOI: 10.3390/rs17091575.
6. Su Y., Wang L., Wang Z., Liu Y., Wang X. System error analysis and target localization of distributed pulse radars // Electronics Letters, 2024. Vol. 60. DOI: 10.1049/ell2.13295.

УДК 004.94:621.3.049.77

Автоматизированная генерация топологии полупроводниковых приборов на основе результатов приборно-технологического моделирования

Михайлова Е. А.[1,2], Слезкин В. В.[2], к. т. н., Сотников М. А.[2], к. т. н., Калашников В. С.[1,2], к. т. н., Семенов М. Ю.[2], к. т. н.
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
mea5022@mail.ru
[2] ООО «НМ-Тех»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Работа посвящена автоматизированной генерации топологического представления полупроводниковых приборов на основе данных, полученных из программы приборно-технологического моделирования. Предлагаемый подход позволяет снизить вероятность ошибок и ускорить процесс разработки комплекта средств технологического проектирования (КСТП — Process Design Kit, PDK).

Ключевые слова: топология; PDK; генерация топологии; автоматизация проектирования; САПР; приборный базис технологии; приборно-технологическое моделирование.

Полупроводниковые приборы (транзисторы, диоды, резисторы и т. д.) составляют основу современных интегральных схем (ИС), поэтому при разработке КСТП подготовке приборного базиса уделяется особое внимание [1]. Как правило, разработка структуры будущих полупроводниковых приборов и непосредственно технологического маршрута их изготовления осуществляется с помощью специализированных программ приборно-технологического моделирования [2]. Такие программы позволяют создать виртуальную модель прибора и соответствующий маршрут изготовления, а также спрогнозировать электрические характеристики будущего прибора на основе решения уравнений физики полупроводников. После верификации модели полученные данные используются для создания топологии прибора в технологической библиотеке. На этом этапе важно обеспечить соответствие разрабатываемой топологии прибора в КСТП с исходной структурой, полученной из программы приборно-технологического моделирования. При этом специальные инструменты для выполнения такой проверки отсутствуют и разработчики вынуждены сопоставлять данные вручную. Этот трудоемкий процесс может провоцировать возникновение ошибок вследствие человеческого фактора, а также увеличивает время разработки КСТП. Кроме того, процесс разработки нового приборного базиса носит итеративный характер и требует соответствующей калибровки моделей, что еще больше усугубляет проблему, т. к. разработчику КСТП необходимо постоянно отслеживать изменения в геометрии приборов и вносить их в топологию [3]. Еще одной немаловажной задачей в процессе перехода от модели в программе приборно-технологического моделирования к топологии прибора в технологической библиотеке является трансляция слоев между различными САПР. В процессе такой трансляции часто возникает необходимость добавления

или изменения слоев для корректного представления топологии прибора в целевой САПР.

Предлагаемый автоматизированный подход процесса разработки элементов технологической библиотеки включает в себя программную обработку данных приборно-технологического моделирования и преобразование этих данных в графическое представление для детального анализа информации, сравнения с прототипом топологии прибора и последующей доработки в целях получения финальной топологии прибора. Применение алгоритмов операций над слоями в описанном маршруте позволяет генерировать дополнительную или модифицировать существующую геометрию слоев прибора. Внедрение автоматизации в цикл разработки элементов технологической библиотеки позволяет добиться значительного ускорения процесса разработки и свести многоэтапный маршрут создания топологии приборов к использованию средств автоматизации проектирования, исключающих критичные и времязатратные шаги.

Литература

1. Слезкин В. В., Бритвин А. А., Кондратьев С. А. Продвинутая автоматизация тестирования сложнопараметризованных топологических ячеек PDK для автоэлектроники // Наноиндустрия, 2024. — Т. 17. — № S10-1 (128). — С. 272–275. DOI: 10.22184/1993-8578.2024.17.10s.272.275. EDN ZEWYGF.
2. Кузьминова Т. Д., Красюков А. Ю., Балашов А. Г., Бобриков С. А. Программы приборно-технологического моделирования // Перспективы науки, 2023. — № 11 (170). — С. 77–79. EDN KMODVM.
3. Лысенко И. А., Зыков Д. Д. Особенности моделирования технологических процессов в среде TCAD // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции, 2016. — № 1-2. — С. 51–53. EDN YGXUPV.

УДК 621.391.63

Функционально ориентированные фотонные интегральные схемы бортового применения

Тимошенков С. П.[1], Новиков В. М.[2], Гончаров А. А.[2]
[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] ФАУ «ГосНИИАС»
125319, г. Москва, ул. Викторенко, 7

Рассмотрен способ внедрения в комплексы бортового оборудования фотонных системы, обеспечивающих реализацию абсолютно новых функциональных возможностей, а именно детерминированные оптические сети реального времени (ДОС РВ) на базе WDM-технологии. Разработан базовый перечень ФИС для ДОС. Предложена технология изготовления на платформе «кремний на изоляторе» (КНИ).
Ключевые слова: комплекс бортового оборудования; системы реального времеи; WDM-технология.

Функционально ориентированная фотонная интегральная схема (ФОФИС), разработанная по технологии гетерогенной гибридной интеграции, есть микрочип, включающий в себя набор пассивных и активных фотонных компонентов, совместно решающих общую функциональную задачу обработки оптической информации в рамках единого конструктивно законченного узла. Использование фотонной компонентной базы (ФКБ) на борту летательного аппарата влечет целый набор специфических требований, связанных как с условиями эксплуатации, так и габаритными размерами. В состав ФКБ входят два типа ФИС:

- пассивные оптические компоненты на КНИ-платформе;
- активные оптические компоненты на платформе InP.

Наличие двух технологических платформ для активных и пассивных ФИС приводит к необходимости применения технологии гибридной интеграции пассивных и активных фотонных элементов в конструктиве одного чипа. В работе рассмотрена технология гибридной интеграции, при которой пассивная оптическая разводка изготавливается на платформе КНИ (SOI), а активные компоненты интегрируются на КНИ-пластину методом бондинга.

Разработан комплект ФОФИС для бортовой детерминированной оптической сети реального времени (ДОС РВ). Детерминированная оптическая сеть реального времени (ДОС РВ) относится к области передачи информации в виде пакетов без коммутации каналов с организацией обмена между оконечными системами по принципу распределенной памяти. ДОС РВ представляют класс сетей, в функционировании которых главную роль при коммутации, мультиплексировании, ретрансляции играют не электронные, а чисто оптические технологии.

ДОС РВ строится как двухконтурная система передачи информации, имеющая топологию звезды и кольца, содержащая N ВМ, в которых функционируют ФПП и присутствует спектральное сетевое оконечное устройство (СОУ). На рис. 1 представлена структурная схема ДОС РВ.

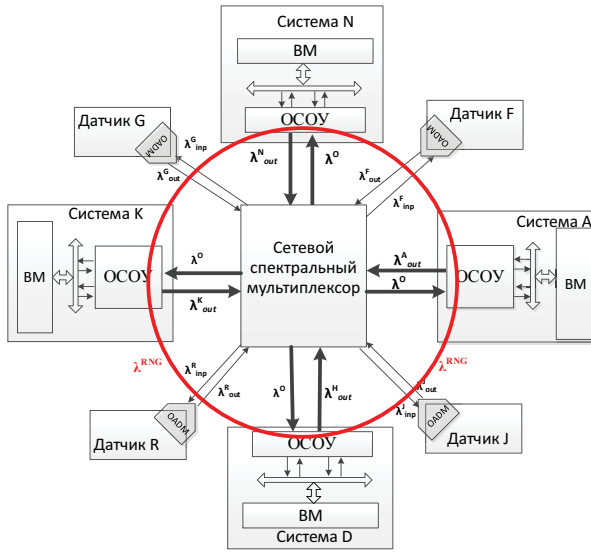


Рис. 1. Структурная схема ДОС РВ

Концепция построения ДОС РВ [1, 2, 3, 4] базируется на использовании в качестве транспортной архитектуры оптической технологии спектрального уплотнения (Wavelength Division Multiplexing — WDM).

Литература

1. Косьянчук В. В., Новиков В. М., Чуянов Г. А., Платошин Г. А., Стецюк С. В., Пенкин С. С. Патент RU 2694137 09.07.2018 «Сиситема передачии нформации в реальном времени на базе полностью оптической спектрально-уплотненной бортовой сети реального времени».
2. Косьянчук В. В., Новиков В. М., Касатиков М. В., Мищенко И. Б. Патент RU 2744517 11.03.2021. «Двухконтурная система передачи информации в реальном времени на базе полностью оптической спектрально-уплотненной бортовой сети».
3. Novikov V. M., Selvesyuk N. I., Olenev V. L., Solovyov A. M., Semenov M. E. Deterministic Real-Time Optical Network // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), May 2022. P. 1–10.
4. Косьянчук В. В., Новиков В. М., Мищенко И. Б., Гончаров А. А. Патент RU 2771792 12.05.2022 «Система передачи информации в реальном времени на базе полностью оптической спектрально-уплотненной бортовой сети».

УДК 004.23

Способы аппаратной реализации функции активации в нейронных сетях

Протасова Е. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе анализируются используемые в современных нейронных сетях функции активации, а также способы их аппаратной реализации в нейронном ускорителе. В результате анализа способов аппаратной реализации функций была разработана методика проектирования СФ-блока функции активации, позволяющая создать блок по заданным критериям. Применение данной методики было рассмотрено на примере проектирования блока функции активации для ускорителя DRACO_NPU.
Ключевые слова: функция активации; нейронный ускоритель; NPU; аппаратная реализация.

Функция активации является неотъемлемым элементом нейронной сети. Она вводит нелинейность в нейронную сеть и позволяет моделировать сложные взаимодействия между входными и выходными данными. Это позволяет нейронной сети обучаться и адаптироваться в соответствии с входными данными.

В современных нейронных сетях наиболее широко распространены нелинейные функции активации в сравнении с линейной и бинарной функциями. Существует множество нелинейных функций активации, к наиболее проверенным относятся функции ReLU, сигмоиды и гиперболического тангенса. Последующие за ними функции были созданы в целях устранения имеющихся недостатков, например Leaky ReLU, SiLU, GELU.

В ходе работы были проанализированы способы аппаратной реализации нелинейных функций и выделены следующие: кусочно-линейная аппроксимация, аппроксимация полиномом второго порядка, вычисление алгоритмом CORDIC, использование таблицы поиска и комбинированные способы. В работе представлена методика проектирования СФ-блока функции активации и рассмотрено ее применение на примере проектирования блока активации для ускорителя нейронных сетей DRACO_NPU. По результатам логического синтеза была произведена оценка разработанного блока по критериям занимаемой площади кристалла, максимальной частоты работы.

Литература

1. Bouguezzi S., Faiedh H. and Souani C. Hardware Implementation of Tanh Exponential Activation Function using FPGA // 2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). Monastir, Tunisia, 2021. P. 1020–1025.
2. Kangjoon Choi, Sungho Kim, Jeongmin Kim, In-Cheol Park. HardwareFriendly Approximation for Swish Activation and Its Implementation. // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024. P. 4516–4520.
3. Chih-Hsiang Chang, Hsu-Yu Kao, Shih-Hsu Huang. Hardware Implementation for Multiple Activation Functions // 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics — Taiwan (ICCE-TW), 2019. P. 1–2.

4. Tsmots I., Skorokhoda O. and Rabyk V. Hardware Implementation of Sigmoid Activation Functions using FPGA // 2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems. Polyana, Ukraine, 2019. P. 34–38.

УДК 621.3.077.7

Интеграция и калибровка инерциальных сенсоров для применения в системах навигации и ориентации

Савчиц А. С., Якунин А. Н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
savchic2000@mail.ru

Предложена методика одновременной калибровки и привязки осей трехосевого магнитометра с использованием катушки Гельмгольца. Рассмотрены особенности выбора параметров катушки Гельмгольца и преимущества ее применения. Приведены результаты исследования привязки осей и калибровки серийного магнитометра.
Ключевые слова: инерциальные сенсоры; магнитометр; калибровка; привязка осей; катушка Гельмгольца; матрица поворота.

Определение положения и ориентации объектов является ключевой задачей для широкого класса технических систем — от автономных платформ до авиационной навигации. В условиях отсутствия доступа к внешним навигационным сигналам, таким как системы GNSS или сети радиомаяков, возникает необходимость в реализации инерциальной навигации, которая базируется на использовании инерциальных сенсоров: акселерометров, гироскопов и магнитометров.

Корректная работа таких сенсоров требует калибровки чувствительности, компенсации смещений и точной пространственной привязки. В настоящей работе рассматривается подход к упрощению процедуры привязки и калибровки магнитометра на основе катушки Гельмгольца.

Методика может быть распространена на акселерометры и гироскопы, что создает основу для комплексной калибровки инерциальных измерительных систем, включая многопозиционные и резервируемые конфигурации.

Приведены результаты экспериментального исследования привязки осей и калибровки серийного магнитометра. Эксперимент подтвердил эффективность метода, его способность упрощения процесса калибровки и привязки осей магнитных сенсоров в составе многопозиционных сенсорных систем. Разработка универсальной методики привязки и калибровки таких конфигураций является перспективным направлением дальнейших исследований.

УДК 621.3.019.3

Прогнозирование показателей безотказности интегральных микросхем на основе параметров надежности используемой элементной базы

Соловьев А. В., к. т. н., Селецкий А. В., к. т. н., Воеводин А. В.
АО «НИИМЭ»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6, стр. 1
andsolovev@niime.ru

В работе рассмотрен подход к прогнозированию показателей безотказности ИС с использованием экспериментально определенных параметров надежности элементной базы. Предложены возможные пути улучшения стандартных подходов, направленных на повышение точности прогнозирования.
Ключевые слова: надежность ЭКБ; старение ЭКБ; КМОП ИС; расчетно-экспериментальный метод оценки надежности.

Во многих отраслях промышленности требуется ЭКБ высокого уровня надежности. Существует множество физических эффектов, влияющих на надежность КМОП ИС, к основным можно отнести: пробой подзатворного диэлектрика (TDDB), инжекцию горячих носителей (HCI), изменение параметров транзисторов при отрицательном смещении и высокой температуре (NBTI), отказы проводящих шин и переходных окон, вызванные электромиграцией (EM) [1, 2].

Большинство стандартов по надежности в основном оценивают эксплуатационную интенсивность отказов по статистическим данным результатов испытаний микросхем или/и их аналогов, что требует постоянного обновления данных и снижает предсказательную способность модели. Модели расчета интенсивности отказов, описанные в [3] и [4], оперируют параметрами, которые можно экстрагировать по результатам исследовательских испытаний специализированных тестовых структур. При этом в основе метода в случае [3] лежит надежность отдельных конструктивных элементов, а в [4] — интенсивность отказов, связанная с доминирующими механизмами деградации (HCI, TDDB и т. д.). Такой подход к моделированию имеет ключевое преимущество — при разделении частоты отказов по каждому механизму отказа (элементу ИС) модель может точнее учитывать влияние ускоряющих факторов на каждый из них, что дает более полное представление о динамике частоты отказов в зависимости от времени, температуры и электрических режимов и приводит к более реалистичной оценке стабильности работы устройства в процессе эксплуатации.

Прогнозирование показателей надежности элементов ИС проводят исходя из параметров закона распределения наработки до отказа и значения коэффициента ускорения, определяемых по результатам испытаний элементной базы, а также по литературным данным. Для описания отказов, связанных с деградацией структуры, как правило, принимают логарифмически-нормальный закон распределения интенсивности отказов во времени. Для механизмов отказа, для которых характерны как ранние, так и долгосрочные отказы, в справочнике [4] дополнительно вводится модель экспоненциального уровня опасности, которая позволяет

учитывать ранние отказы. Также учитываются независимые от времени механизмы, например электростатический разряд, отказы корпуса и т. п.

Для каждого механизма деградации используют свои специализированные тестовые структуры и свой режим стрессового воздействия за пределами рабочих температурных и электрических режимов функционирования. В ходе испытаний фиксируют времена условных отказов по критическому сдвигу рабочих параметров и с помощью математической модели проводят экстраполяцию времени наработки до отказа [5].

Стоит отметить что стандартные методики оценки деградации параметров, как правило, в качестве критерия отказа используют изменение параметра на определенное значение. Однако для последующего использования результатов испытаний при оценке надежности ИС целесообразнее использовать в качестве критерия отказа уход периметров за установленные нормы спецификации или полную потерю работоспособности. Также тестовые структуры могут подвергаться испытаниям в режимах и условиях, более жестких, чем при их работе в составе ИС, в том числе и в форсированном режиме.

Модель частоты отказов, используемая в [3] и [4], была разработана с использованием данных различных производителей и, следовательно, рассчитывает среднюю ожидаемую частоту отказов. Это приводит к пессимистичным прогнозам надежности ИС. Для повышения точности прогнозирования необходимо при тестировании элементов ИС оценивать влияние конструктивных особенностей, электрических параметров структуры на параметры надежности для каждого из исследуемых механизмов деградации и учитывать получение зависимости при построении модели.

Таким образом, введение норм на параметр, оценка влияния конструктивных особенностей исследуемой технологии в стандартную методику оценки надежности позволят получить более реалистичные оценки надежности ИС, существенно упростить процесс проектирования ЭКБ и ускорить ее поставки потребителям за счет сокращения цикла разработки и снижения рисков отказов на испытаниях.

Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника, 2017. — № 1 (165). — С. 51–69.
2. Валеев А. С., Красников Г. Я. Технология изготовления внутрикристальных и межкристальных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития) // Микроэлектроника, 2015 — Т. 44. — № 3. — С. 180–201.
3. MIL-HDBK-217F: Reliability prediction of electronic equipment. (Notice 2) / Department of defense — 28 February 1995. 150 p.
4. РД 11 0755-90 Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность / Микросхемы интегральные: Отраслевой руководящий документ. — Москва, 1990. — 91 с.
5. JEDEC Standard JP001.01. Foundry Process Qualification Guidelines. May, 2004.

УДК 621.372.82

Изготовление волноводов на акриловых жидких фотополимеризующихся композициях

Соловьев В. С.[1], Налимов А. Г.[2], Тимошенков С. П.[1], Тимошенков А. С.[1]
[1] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
[2] *Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева*
443086, г. Самара, Московское ш., 34

Разработана технология создания волноводов и волноводных систем на жидких фотополимеризующихся композициях.
Ключевые слова: жидкие фотополимеризующиеся композиции (ЖФПК); волноводные системы; фотонные технологии.

В настоящее время в связи с быстрым развитием фотоники, систем передачи и обработки информации необходимо развивать новые технологии изготовления волноводов и волноводных систем. На этой основе будут развиваться системы передачи и приема информации, обработки и распознавания изображений, измерительные системы на основе волноводных датчиков и других систем в бытовой и военной технике.

В работе [1] было продемонстрировано, что волноводы можно записывать лазером на полимерах. Там были записаны волноводы с помощью лазера среднего ИК-диапазона на двух разных полимерах, поликарбонате и полиметилметакрилате. Были зарегистрированы вносимые потери 3,1 дБ для поверхностного волновода длиной 30 мм, выполненного из полиметилметакрилата. Такие большие потери обусловлены тем, что волноводы записываются лазерным излучением. При этом полимер сильно разогревается и происходит его частичная деструкция.

Мы предлагаем новую технологию на основе жидких фотополимеризующихся композиций (ЖФПК). С помощью акриловых олигомеров с различной молекулярной массой можно подобрать олигомеры с необходимым показателем преломления волноводных и прилегающих слоев. Из имеющихся олигомеров фирмы «Крейнор» с помощью рефрактометра RL 2 мы выбрали олигомеры с показателями преломления 1,48 и 1,53.

Травление полимерных слоев планируется проводить с помощью анизотропного плазмохимического травления, используя стандартную технологию фотолитографии.

Используя программы Full Wave, были рассчитаны волноводы с вышеприведенными показателями преломления. На рисунке показана структура волновода и рассчитанная мода излучения, проходящая по волноводу.

По сравнению с работой [1], потери в волноводах такой конструкции можно уменьшить минимум на порядок.

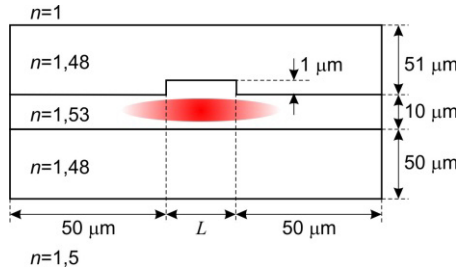


Рис. 1. Расчеты на длину волны света λ = 1,55, L = 6 μm методом распространения пучка (BPM). Высота ступеньки равна 1 мкм

Литература

1. Jean-Philippe Berube et al. Direct Inscription of on-surface waveguides in polymers using a mid-ir fiber laser // Optics Express, 2019. Vol. 27. № 21. 31019 p.

УДК 621.791.3

Моделирование формообразования припойных шариковых выводов на контактных площадках методом лазерного спекания и оценка их надежности

Соловьев И. А., Вертянов Д. В., Титов А. Ю., Коробова Н. Е.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
ilya.a.solovyov@gmail.com

Проведен анализ методов формирования шариковых выводов на контактных площадках. Исследовано изменение формы припойных шариковых выводов при их формировании методом лазерного спекания. Получены экспериментальные данные адгезионной прочности шариковых выводов и проведена оценка надежности.

Ключевые слова: припойные шариковые выводы; монтаж методом перевернутого кристалла; корпусирование микросхем; метод лазерного спекания; адгезионная прочность; надежность.

В процессе производства интегральных микросхем и их корпусов типа BGA важную роль играет формирование шариковых выводов, обеспечивающих электрическое и механическое соединение кристалла с подложкой или подложки корпуса микросхемы с печатной платой. В современной микроэлектронике существует множество технологий для реализации этой операции, включая размещение готовых припойных шариков, распределение паяльной пасты через трафареты с последующим оплавлением, установку золотых бампов и гальваническое наращивание медных столбиков [1, 2]. Однако одним из наиболее перспективных и гибких методов является лазерное спекание припойных шариков, которое позволяет точно контролировать их положение и размер, минимизируя тепловое воздействие на подложку и исключая необходимость использования флюса, и, в отличие от других технологических решений, позволяет формировать выводы как на пластине, так и на отдельных кристаллах и подложках [3].

В рамках проведенного исследования выполнено численное моделирование процесса взаимодействия припойного шарика с контактной площадкой. Исследование включало анализ двух ключевых случаев: взаимодействие припойного шарика с контактной площадкой на кристалле, имеющей финишное покрытие ENIG, а также взаимодействие припойного шарика с контактной площадкой на полимерной подложке с финишными покрытиями ENIG и иммерсионным оловом. В моделировании учитывались такие параметры, как материал, вязкость, поверхностное натяжение припоя, смачиваемость контактной площадки и физические свойства подложки. Это позволило оценить форму шарикового вывода при затвердевании, а также термическое воздействие в области под контактной площадкой.

Для экспериментальной оценки прочности соединения, сформированного методом лазерного спекания, были проведены испытания на сдвиг припойных шариков диаметрами 60, 100 мкм на контактных площадках кристаллов и 600 мкм — на контактных площадках органических подложек с использованием установки, фиксирующей усилия, необходимые для механического сдвига шарика.

Полученные данные позволили провести анализ прочностных характеристик соединений и выявить возможные проблемы в надежности. Результаты численного моделирования и экспериментальных испытаний подтвердили высокую эффективность и технологическую пригодность метода лазерного спекания для формирования шариковых выводов.

Были разработаны рекомендации по оптимальным режимам установки шариков, а также предложены методы решения потенциальных проблем, связанных с надежностью соединений. Результаты исследования могут быть применены при разработке технологии изготовления высокопроизводительных микросхем в многовыводных корпусах типа BGA на основе многослойных органических подложек.

Литература

1. Jang Y. J., Sharma A., Jung J. P. Advanced 3D Through-Si-Via and Solder Bumping Technology: A Review // Materials, 2023. Vol. 16. № 24. P. 7652.
2. Вертянов Д. В., Беляков И. А., Соловьев И. А., Гладкова С. И. Моделирование термомеханических нагрузок в трехмерных микросборках с различными типами вертикальных соединений // Инженерный вестник Дона, 2022. — № 11 (95). — С. 349–361.
3. Fettke M. et al. A Study About Facile Interconnect Formations Involving SB2-JET Solder Ball Stacking and Colonnade Patterning in Hybrid Package Architectures // 2020 International Wafer Level Packaging Conference (IWLPC). IEEE, 2020. P. 1–8.

УДК 681.586.72

Разработка методики герметизации гироскопических блоков на базе аналоговых МЭМС-датчиков в BGA-корпусах

Галкин А. А.[1,2], Соломкина Н. А.[1,2], Каменский А. М.[2], Тимошенков А. С.[2], Еркин П. В.[1], Захаров В. П.[2], Рубис Л. Д.[1,2]

[1] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
nsolomkina@mp-lab.ru
[2] ООО «Лаборатория Микроприборов»
124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Проведены эксперименты по герметизации МЭМС-ДУС в BGA-корпусах в составе трехосевого блока. Рассмотрено влияние различных вариантов герметизации на характеристики ДУС, в частности на изменение нулевого сигнала в диапазоне рабочих температур. Разработана методика герметизации изделия, позволяющая обеспечить температурную стабильность нулевого сигнала в пределах ±0,1 °/с.

Ключевые слова: МЭМС; инерциальные датчики; датчик угловой скорости; герметизация.

Для повышения надежности изделий микроэлектроники важно обеспечить защиту от воздействия окружающей среды. Традиционные методы — покрытие смонтированной платы лаком, заливка контактных областей компаундом, заполнение корпуса изделия герметиками или установка уплотнителей [1–3].

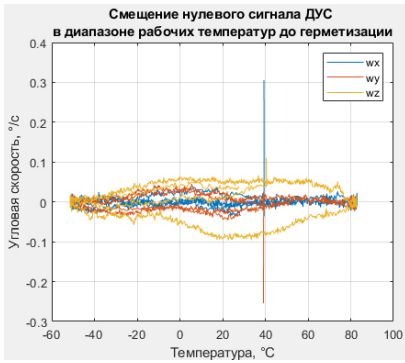
В данном исследовании работа проводилась с трехосевыми блоками МЭМС-датчиков угловой скорости. Особенностью данных блоков было использование аналоговых датчиков в BGA-корпусах. Кроме того, необходимым требованием к блоку было обеспечение стабильности нулевого сигнала в диапазоне рабочих температур в пределах ±0,1 °/с. Это накладывало определенные ограничения на используемые средства герметизации. В частности, средство обеспечения герметичности не должно было оказывать электрического влияния на аналоговые тракты в диапазоне рабочих температур изделия, а также создавать механических напряжений в точках монтажа BGA-корпуса.

Рассматривались три основных варианта герметизации, основанные на герметизации смонтированной платы: покрытие смонтированной платы лаком, герметизация эпоксидным компаундом и заливка сверхтекучим герметиком. Используемые материалы показаны в табл. 1 [4–6].

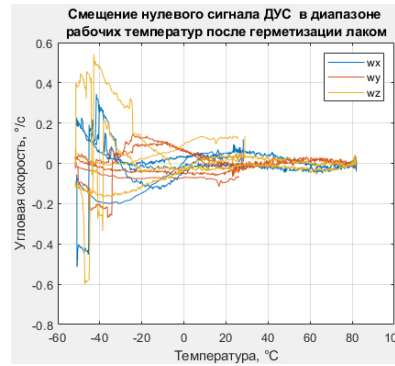
Таблица 1. Используемые материалы

Тип покрытия	Лак	Эпоксидный компаунд	Сверхтекучий герметик
Марка материала	Plastik 71	СТЭП-КТП7	JCID Chip Underfill UF6008
Время технологического отверждения	24 ч при 18–24 °С	8 ч при 15–35 °С	1 мин при 150 °С

Первый эксперимент по герметизации лаковым покрытием показал, что данные покрытие значительно ухудшает температурные характеристики датчиков: в частности, при понижении температуры возникают резкие скачки смещения нулевого сигнала (рис. 1).



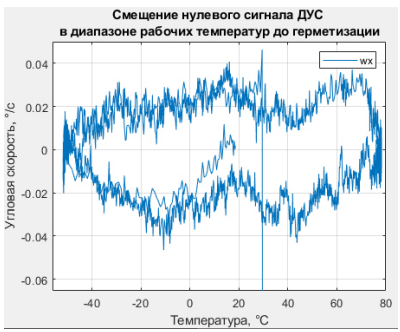
а



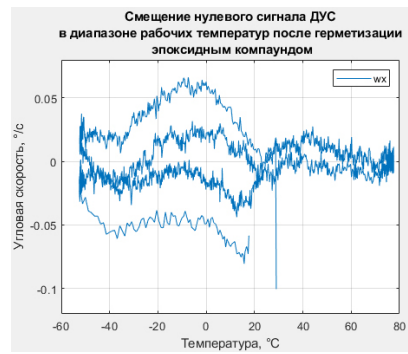
б

Рис. 1. Смещение нулевого сигнала ДУС:
а — сигнал до герметизации, *б* — сигнал после герметизации лаковым покрытием

Во втором эксперименте была применена герметизация эпоксидным компаундом. После герметизации и сушки в течение 8 часов при +35 °С была получена стабильная температурная характеристика ДУС, отличие которой от исходной составило 0,2 °/с. Изменение новой характеристики ДУС в диапазоне рабочих температур составило ±0,08 °/с (рис. 2).



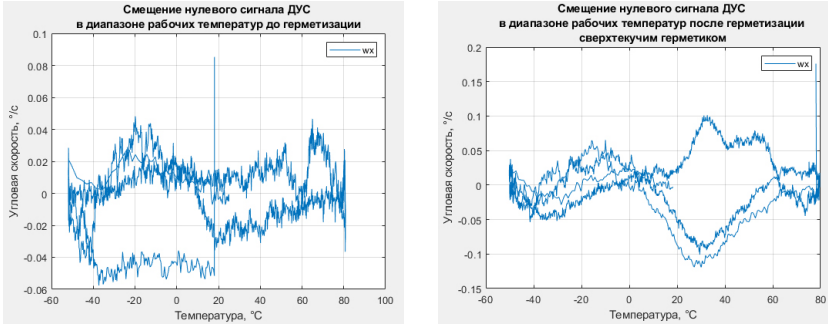
а



б

Рис. 2. Смещение нулевого сигнала ДУС:
а — сигнал до герметизации, *б* — сигнал после герметизации эпоксидным компаундом

Третий эксперимент с герметизацией сверхтекучим герметиком показал, что данный метод также обеспечивает стабильную температурную характеристику ДУС (рис. 3).



а *б*

Рис. 3. Смещение нулевого сигнала ДУС:
а — сигнал до герметизации, *б* — сигнал после герметизации сверхтекучим герметиком

Второй и третий эксперименты показали возможность использования обоих материалов в качестве средства герметизации изделия, однако использование сверхтекучего герметика (underfill) показало себя значительно более удобным методом с точки зрения технологичности. Кроме того, важным свойством underfill стало заполнение пространства между шаровыми контактами BGA-корпуса, что гарантировало отсутствие потенциальных закороток и вытеснение остатков паяльного флюса.

Важно отметить, что, несмотря на заявленное производителем время полного отверждения герметика в 1 мин. при 150 °С, в реальности за это время происходило лишь частичное отверждение, большее же время при данной температуре подвергало ДУС риску деградации характеристик. После проведения дополнительных экспериментов удалось установить, что результат полного отверждения герметика достигается при выдержке датчика в течение 3 часов при температуре +85 °С, что находится в диапазоне рабочих температур изделия.

Таким образом, по итогам проведенных экспериментов была получена методика герметизации блока МЭМС-ДУС, обеспечивающая сохранение температурной стабильности характеристик датчиков. В настоящий момент происходит встраивание методики в технологический процесс производства данных изделий.

Литература

1. Волков А. Еще раз о лакировке и заливке // Технологии в электронной промышленности, 2015 [Электронный ресурс]. — № 7. — С. 58–59. — URL: https://tech-e.ru (дата обращения: 12.07.2025).
2. Как выбрать лучший материал для герметизации печатной платы для вашего проекта // Highleap Electronic PCBA One-stop Solutions [Электронный ресурс]. — URL: https://hilelectronic.com/ru/pcb-encapsulation (дата обращения: 12.07.2025).

1. Комаров С. Герметизация разборных корпусов электронной техники // Control Engineering [Электронный ресурс]. — URL: https://controleng.ru/apparatnye-sredstva/germetizaciya (дата обращения: 12.07.2025).
2. Технические условия ТУ 20.59.59-002-78983067-2022 // Solins.
3. Технические условия ТУ 20.16.40-126-05770317-2021 // НПК СТЭП.
4. Specifications UF6008 Chip Underfill Adhesive for Nand CPU Packaging BGA CPS Circuit Board Protection // JCID [Электронный ресурс]. URL: https://www.jcprogrammer.com/product/uf6008-chip-underfill-adhesive (дата обращения: 12.07.2025).

УДК 681.3.5

Предложения по построению унифицированной АСУ СТО электронного машиностроения

Переверзев А. Л., д. т. н., Петров В. Ф. к. т. н., Симонов С. Б., к. т. н., Терентьев А. И., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
aaattt@mail.ru

В работе рассмотрены проблемы проектирования отечественного специального технологического оборудования (СТО) с учетом импортозамещения. В настоящее время технические и архитектурные решения в области разработки автоматизированных систем управления СТО на отечественной элементной базе не унифицированы. Поиск и применение общих архитектурно-технических решений позволят сократить время разработки СТО, повысить их надежность и снизить стоимость обслуживания.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления; программируемый логический контроллер; «Багет-ПЛК2»; ПЛК «Эльбрус»; распределенные системы управления.

В настоящее время развитие отечественных технологий электронного машиностроения имеет большее значение. Разрабатывается более 100 единиц специального технологического оборудования (СТО), свыше 500 видов материалов для производства электроники.

Проектируемое СТО представляет собой комплексные установки с автоматизированной системой управления. Система управления СТО должна обеспечивать автоматический сбор, обработку, хранение информации и выработку управляющих сигналов в соответствии с заданным рецептом для обеспечения технологического процесса. При этом необходимо обеспечить безопасность функционирования и эффективность производства, которая складывается из скорости (производительности) изготовления и качества выпускаемой продукции.

Для этого в проектируемых СТО необходимо поддерживать высокий уровень автоматизации работы как отдельной стоящей установки, так и всей производственной линии. Также необходимо обеспечить ясный и непротиворечивый операторский интерфейс для выполнения производственных операций и сервисного обслуживания установки и интеграцию в автоматизированный производственный цикл на предприятии.

На фоне санкций и ухода зарубежных производителей становится актуальной задача создания отечественного унифицированного комплекта разработчика АСУ СТО с открытой архитектурой для применения в электронном машиностроении. Идеология такого подхода предполагает создание множества совместимых и взаимозаменяемых модулей, которые допускают применение компонентов различных разработчиков, без привязки к определенным производителям.

Ассоциация предприятий «Электронное машиностроение» [1] также считает целесообразным создание унифицированной системы управления СТО.

В России разработкой и производством ПЛК на базе отечественных процессоров занимаются НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ [2] и ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» [3] и др.

В НИИСИ разработаны две линейки ПЛК и модулей для них — ПЛК1 и ПЛК2 [2]. Отличительной особенностью является использование отечественного микропроцессора 1890ВМ108 с тактовой частотой 400 МГц.

ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» производит программируемый логический контроллер «ПЛК-Эльбрус» [3], построенный на базе отечественного микропроцессора «Эльбрус-2С3» (К1891ВМ068) с тактовой частотой до 2 ГГц.

На базе представленных отечественных решений предлагается разработать унифицированный программно-аппаратный комплекс, выполняющий функции сбора и обработки информации, регистрации, управления, регулирования, сигнализации и технологических блокировок, предназначенный для обеспечения необходимых параметров управления и бесперебойной работы СТО. Использование предлагаемых решений позволит повысить эффективность разработки, производства и эксплуатации оборудования электронного машиностроения, а также разработать единые стандарты подготовки кадров.

Литература

1. Ассоциация ЭМ — главная, 2025. — URL: https://elmashrussia.ru (дата обращения 17.03.2025).
2. НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, 2025. — URL: https://www.niisi.ru (дата обращения 17.03.2025).
3. ИНЭУМ, 2013-2024. — URL: http://www.ineum.ru (дата обращения 17.03.2025).

УДК 621.382

Результаты разработки широкополосного усилителя СВЧ-диапазона с внешним смещением и повышенной энергоэффективностью

Терехин В. В.[1,2]
[1] *ООО «ИПК «Электрон-Маш»*
124482, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Савелки, г. Зеленоград, к. 313А
[2] *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
115409, г. Москва, Каширское ш., 31
terekhinvladislav@yandex.ru

Работа посвящена разработке широкополосного СВЧ-усилителя с внешним смещением на базе микросхемы К1324УВ2. В статье приведены результаты моделирования усилителя и сравнение с параметрами трехвыводного варианта.
Ключевые слова: СВЧ-усилитель; широкополосный усилитель; внешнее смещение; КПД; транзистор Дарлингтона; термостабильность; компрессия.

Имеется целый ряд систем, в которых применение широкополосных усилителей (ШПУ) необходимо. Это системы радиоэлектронного подавления (РЭП), драйверы сверскоростных АЦП [1], сверхширокополосная локация, аппаратура тестирования на электромагнитную совместимость, специальные системы передачи данных, измерительная техника [2].

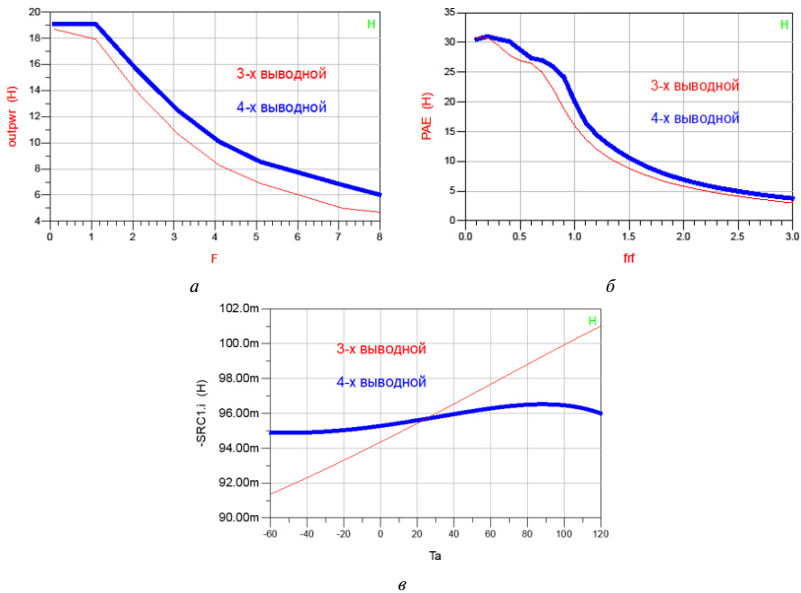
При проектировании широкополосных усилителей СВЧ-диапазона (ШПУ), выполненных на основе составного транзистора Дарлингтона, традиционно используется трехвыводная схема: вход, общий вывод для выхода и питания и земля. В такой схеме стабилизация рабочей точки часто реализуется с помощью балластного резистора, подключенного последовательно с дросселем в цепи питания. Однако этот резистор является источником значительных паразитных потерь: весь ток, потребляемый усилителем, протекает через него, и значительная часть мощности рассеивается в виде тепла. Это приводит к снижению КПД, повышению тепловыделения, а также ограничивает гибкость в выборе режимного тока, поскольку он определяется величиной падения напряжения на балластном резисторе.

В рамках работы была разработана 4-выводная модификация отечественного широкополосного СВЧ-усилителя К1324УВ2, в которой введен отдельный вывод для подачи смещения, независимый от цепи основного питания. Это позволяет полностью исключить балластный резистор из цепи питания. Вместо него используется резистор в цепи смещения, по которой протекает существенно меньший ток. Такое решение обеспечивает снижение паразитных потерь мощности, повышение общего коэффициента полезного действия (КПД) усилителя, возможность точной и гибкой настройки режимного тока независимо от напряжения питания, улучшение термостабильности за счет возможности термокомпенсации в цепи смещения.

Разработанный усилитель реализован по схеме Дарлингтона с отрицательной обратной связью. В результате моделирования установлено, что выходная мощность при компрессии на 1 дБ у 4-выводной версии превышает аналогичный параметр 3-выводного усилителя в среднем на 2 дБм по всему рабочему диапазону

частот (рис. 1*а*), КПД увеличивается на 2–5 % (рис. 1*б*) благодаря исключению рассеивания на встроенном резисторе, наблюдается улучшение термостабильности: усилитель демонстрирует устойчивую работу при отклонениях температуры в широком диапазоне (рис. 1*в*).

Предложенная 4-выводная схема широкополосного СВЧ-усилителя обеспечивает значительные преимущества по сравнению с традиционным 3-выводным исполнением. Повышенная энергоэффективность, улучшенный тепловой режим и гибкость в управлении рабочей точкой делают ее перспективной для использования в составе современных отечественных приемо-передающих модулей радиосвязи, аппаратуры РЭП, измерительных комплексов и других СВЧ-систем.



а *б* *в*

Рис. 1. Результаты моделирования выходной мощности при компрессии 1 дБ на всем диапазоне частот (*а*), КПД от частоты (*б*) и тока потребления от температуры (*в*) 3-выводного и 4-выводного ШПУ ($U_{пит}$ = 5 В, $I_{пит}$ = 95 мА)

Литература

1. Савченко Е. М., Будяков П. С., Сурков Н. С. Драйверы сверскоростных АЦП на основе СВЧ МИС широкополосных усилителей // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы, 2017. — № 3 (246). — С. 26–33.
2. Кищинский А. Широкополосные транзисторные усилители мощности СВЧ диапазона — смена поколений // Электроника: НТБ, 2010. — № 2.
3. Иовдальский В. А., Ганюшкина Н. В., Панас А. И., Дудинов К. В. Новая конструкция усилителей мощности СВЧ-диапазона // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение», 2024. — № 4. — С. 41–55.

УДК 535.8

Разработка фотонной интегральной микросхемы по гибридной технологии для обработки оптических сигналов

Тимошенков А. С., Соловьев В. С., Штерн М. Ю.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработана технология создания фотонной интегральной микросхемы для преобразования сигналов СВЧ в оптический сигнал и последующего получения разностного сигнала в оптической области с окончательным преобразованием в электрический сигнал.

Ключевые слова: гибридная гетерогенная технология; волноводные системы; полупроводниковые лазеры; кремний; фосфид индия; фотонные технологии.

В настоящее время фотоника постепенно занимает некоторые разделы электроники, особенно в области СВЧ. По сравнению с обработкой в СВЧ-области, обработка сигналов в оптической области намного упрощается. Упрощается из-за того, что технологии изготовления оптических элементов могут на порядки уменьшать потери в преобразовании сигналов, а также позволяют в миллионы раз увеличивать добротность резонансных контуров. Для радиотехники добротность 100 является пределом мечтаний, а у фотонных кольцевых резонаторов добротность 1 000 000 является обычным делом.

В работе Мартиросова [1] была представлена оптическая схема обработки СВЧ-сигналов независимо от амплитуды входных сигналов на дискретных элементах. Мартиросовым было показано, что сдвиг фаз между сигналами практически пропорционален отношению оптической мощности между каналами.

Недостатком схемы является то, что схема, изготовленная на дискретных элементах, не может длительно работать в реальном времени из-за температурного фазового ухода параметров сигнала. Для решения этой проблемы необходимо изготовить фотонную интегральную схему (ФИС) в одном кристалле-чипе.

Авторы предлагают решение этой задачи путем совмещения двух разных платформ изготовления фотонных элементов: платформы на фосфиде индия и платформы «кремний на изоляторе». Предложены схемные и технологические решения.

Литература

1. Мартиросов К. Б. Разработка фазового пеленгатора с применением технологии радиофотоники // Электроника, фотоника и киберфизические системы, 2022. — Т. 2. — № 4. — С. 71–78.

УДК 621.317.1:004.7

Методика параметрического контроля синхронизирующих тайм-кодов SpaceWire

Трещеткин А. Ю.
АО «НИИ «Субмикрон»
124460, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., 5, стр. 2
alexander.treschetkin@yandex.ru

Разработаны методы параметрического контроля синхронизирующих тайм-кодов, передающихся по сети SpaceWire, которые легли в основу методики. Приведено краткое описание факторов, влияющих на точность синхронизации по сети SpaceWire и требования к необходимому диагностическому оборудованию.

Ключевые слова: SpaceWire; методика контроля; синхронизация; тайм-коды.

Синхронизация времени в сети является важной задачей при работе с детерминированными протоколами передачи данных [1]. Для синхронизации узлов сети SpaceWire используются синхронизирующие тайм-коды, формируемые «мастером времени» и имеющие высокий приоритет при передаче. Основными факторами, влияющими на точность синхронизации, являются задержка и джиттер тайм-кодов. Указанные факторы зависят от количества коммутаторов на маршрутном пути тайм-кода и от скоростей передачи данных в передающих каналах. В ГОСТ Р 70020-2022 SpaceWire-RUS приведены формулы расчета максимальных задержки и джиттера для тайм-кодов.

Скорость передачи данных в каналах сети SpaceWire во многом определяет время передачи синхронизирующего тайм-кода. Частота, получаемая в результате выполнения операции исключающего ИЛИ на сигналы данных и строба, не должна отличаться от заданной более чем на 10 %. Метод контроля скорости передачи данных в каналах SpaceWire основан на измерении частоты, полученной с использованием математических функций осциллографа или при помощи подключенного к каналу анализатора SpaceWire.

Метод измерения задержки и джиттера синхронизирующих тайм-кодов основан на сборе и анализе статистики измеренний разницы времени между событием формирования тайм-кода в «мастере времени» и событием получения узлом сети тайм-кода. Задержка передачи тайм-кода связана с последовательной передачей битов по интерфейсу SpaceWire и не меняется при условии повторяемости маршрута прохождения сети тайм-кодом. Джиттер тайм-кодов — это хаотическое изменение времени получения синхронизирующего тайм-кода, который возникает вследствие нахождения в очереди передачи перед тайм-кодом случайного количества битов (в пределах одного кода). Поэтому распределение вероятности тайм-кода на выходе «мастера времени» равномерное, после прохождения первого коммутатора оно подчиняется закону Симпсона, а после прохождения последующих коммутаторов становится нормальным. Критерием оценки результатов может служить проверка распределения вероятностей тайм-кодов критерием Рунге и критерием Пирсона.

Описанные выше методы легли в основу параметрического контроля синхронизирующих тайм-кодов SpaceWire. Для выделения события тайм-кода

из последовательного потока передающихся по каналу SpaceWire данных могут быть использованы анализатор интерфейса SpaceWire с внешними настраиваемыми выходами событий или осциллографы с функцией анализатора интерфейса. В случае отсутствия внешнего выхода метки времени у «мастера времени» можно воспользоваться внешним источником частоты, однако измерение задержки в таком случае будет относительным.

Внедрение методики параметрического контроля синхронизирующих тайм-кодов SpaceWire позволит увеличить уровень контроля бортовой аппаратуры, контролировать сбои и некорректную работу механизма синхронизации. Данная методика может быть полезна при разработке расписания работы по детерминированным протоколам. Полученные доверительные интервалы тайм-кодов позволяют снизить время ожидания тайм-кодов в сети на 11–13 % и увеличить производительность сети.

Литература

1. Коробков И. Л., Разживин Д. Б. Подгорнова Е. С., Оленев В. Л., Лавровская И. Я. Механизмы планирования в сетях SpaceWire // Конференция «Научная сессия ГУАП». Санкт-Петербург, 2016. — С. 96–103
2. ГОСТ Р 70020-2022. Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов SpaceWire-RUS. — Введ. 2022-06-01. — М.: Российский институт стандартизации: ФГБУ «РСТ», 2022.

УДК 621.3.049

Опыт применения открытой библиотеки градиентного бустинга CatBoost на этапе трассировки в рамках физического синтеза на основе ПЛИС

Чистяков А. Ю.
ОППМ ЦПМ НИЦ «Курчатовский институт»
124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3
chis.alexandr2018@yandex.ru

На основе библиотеки градиентного бустинга CatBoost разработана модель прогнозирования времени нахождения трассировочного решения для подбора входных параметров этапа трассировки в маршруте проектирования схем на ПЛИС. Модель внедрена в САПР X-CAD, проведены вычислительные эксперименты.

Ключевые слова: программируемая логическая интегральная схема; физический синтез; трассировка; градиентный бустинг; CatBoost.

Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) в условиях высокой стоимости и относительной сложности производства заказных схем получают все более широкое применение. Одним из важнейших преимуществ использования ПЛИС являются короткие сроки проектирования схем на их основе, обеспечиваемые постоянным совершенствованием алгоритмов, применяемых в системах автоматизированного проектирования (САПР) для ПЛИС.

Методы машинного обучения наращивают свою популярность в применении к современным САПР. Известно множество алгоритмов на основе машинного обучения, с помощью которых решаются задачи прогнозирования разводимости проектных цепей на основе данных предыдущих этапов проектирования [1] или предсказания расположения перегруженных участков кристалла СБИС или ПЛИС [2]. Существуют также исследования по применению методов машинного обучения для подбора входных параметров САПР в целях улучшения качества результатов проектирования [3]. Этому направлению принадлежит и данная работа.

Открытая библиотека градиентного бустинга CatBoost [4] была применена для подбора параметров алгоритма трассировки в составе САПР X-CAD [5] в целях минимизации времени нахождения трассировочного решения:

- на основе CatBoost создана регрессионная модель, описывающая зависимость времени нахождения трассировочного решения от таких данных, как настроечные параметры алгоритма трассировки, доля заполнения кристалла ПЛИС и информация о размещении проектируемой схемы;
- для настройки гиперпараметров модели использован фреймворк Optuna [6];
- модель обучена на большом объеме данных, сгенерированных в результате запусков маршрута проектирования в САПР X-CAD для нескольких наборов тестовых схем, размещенных с вариациями параметров алгоритмов кластеризации и размещения;

- разработан программный сценарий, автоматизирующий подбор трассировочных параметров на основе спрогнозированного моделью времени трассировки;
- программный сценарий внедрен в САПР X-CAD, благодаря чему подбор параметров для текущей схемы производится непосредственно в ходе выполнения маршрута проектирования.

По результатам вычислительных экспериментов применение данного решения позволило сократить время трассировки тестовых схем с долей заполнения базового кристалла ПЛИС больше 5 % в среднем в 1,5 раза.

Литература

1. Szentimrey H., Al-Hyari A., Foxcroft J., Martin T., Noel D., Grewal G., Areibi S. Machine Learning for Congestion Management and Routability Prediction within FPGA Placement // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems (TODAES), 2020. Vol. 25. № 5. P. 1–25.
2. Yu C., Zhang Z. Painting on Placement: Forecasting Routing Congestion using Conditional Generative Adversarial Nets // Proceedings of the 56th Annual Design Automation Conference, 2019. P. 1–6.
3. Agnesina A., Rajvanshi P., Yang T., Pradipta G., Jiao A., Keller B., Khailany B., Ren H. AutoDMP: Automated DREAMPlace-based Macro Placement // Proceedings of the 2023 International Symposium on Physical Design (ISPD '23). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2023. P. 149–157.
4. CatBoost — open-source gradient boosting library. URL: https://catboost.ai (дата обращения: 07.07.2025).
5. Гаврилов С. В., Железников Д. А., Заплетина М. А., Тиунов И. В., Хватов В. М., Чочаев Р. Ж., Шокарев Д. Б. Разработка доверенных средств проектирования ИС в базисе гетерогенных ПЛИС // Труды ИСП РАН, 2023. — Т. 35. — № 5. — С. 107–126.
6. Optuna — A hyperparameter optimization framework. URL: https://optuna.org (дата обращения: 07.07.2025).

УДК 004.42

Разработка программного комплекса для автоматизации проектирования цифровых схем в базисе программируемых логических и гетерогенных реконфигурируемых интегральных схем

Чочаев Р. Ж., Железников Д. А., к. т. н., Заплетина М. А., к. т. н.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
chochaev@yandex.ru

Разработана альфа-версия программного комплекса для автоматизации проектирования цифровых схем в базисе ПЛИС, а также программное обеспечение для проектирования на гетерогенных реконфигурируемых ИС. Разработанное ПО обеспечивает поддержку микросхем российского производства, позволяя проходить полный маршрут цифрового проектирования.
Ключевые слова: ПЛИС; модульность; единая проектная среда; цифровой маршрут; гетерогенные реконфигурируемые интегральные схемы.

Альфа-версия программного комплекса ПЛИС (ПК ПЛИС), входящего в состав программного комплекса реализации цифровых маршрутов базового уровня для проектирования цифровых сверхбольших интегральных схем в единой проектной среде, предназначена для автоматизации проектирования в базисе российских ПЛИС. Программный комплекс включает в себя следующие инструменты [1]:

- инструмент технологического отображения XMAP;
- инструмент визуализации электрической схемы проектируемой схемы XLEDI;
- инструмент кластеризации, размещения и трассировки проектируемых СБИС в базисе ПЛИС XCORE;
- инструмент просмотра и модификации результатов этапа размещения XPLACE.

В рамках этапов эскизного и технического проектирования были описаны применяемые математические методы и ограничения, функционирование программного изделия, включая внутреннюю архитектуру, описано взаимодействие программного изделия с другими системами и ПО и метод организации входных и выходных данных. Кроме того, описаны интерфейсы командной строки инструментов ПК ПЛИС и форматов данных, поддерживаемые данными инструментами.

В рамках 2-го этапа разработки ПО для проектирования на ГРИС был создан экспериментальный образец САПР, включающий в себя разработанные алгоритмы и программные средства технологического отображения, планировки и размещения элементов ГРИС, автоматической трассировки межсоединений, программирования и конфигурирования памяти ГРИС. Тестирование экспериментального образца выполнялось на актуальных данных о гетерогенных реконфигурируемых ИС российской разработки.

Литература

1. Гаврилов С. В., Железников Д. А., Заплетина М. А., Тиунов И. В., Хватов В. М., Чочаев Р. Ж., Шокарев Д. Б. Разработка доверенных средств проектирования ИС в базисе гетерогенных ПЛИС // Труды Института системного программирования РАН, 2023. — Т. 35. — № 5. — С. 107–126. https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-35(5)-8.

УДК 004.021

Алгоритм уточнения калибровочных параметров микроэлектромеханической системы инерциальной навигации

Шипатов Е. А., к. т. н., Шипатов А. В.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1
eshipatov@mail.ru

Предложены алгоритмы уточнения систематических погрешностей измерений микроэлектромеханических датчиков системы инерциальной навигации. Программная реализация представленных алгоритмов позволила увеличить точность определения ориентации на 13,85 %.
Ключевые слова: погрешность; измерения; система инерциальной навигации; микроэлектромеханические датчики.

Показания микроэлектромеханических систем зависят от производственных неточностей, температурных колебаний, вибраций и других внешних факторов [1]. В связи с этим возникает необходимость в их калибровке.

Значительное распространение получили алгоритмы, требующие наличия вспомогательных деталей и механизмов для калибровки. Некоторые из них основываются на гипотезе постоянства магнитного поля, отсутствия линейных ускорений, что приводит к необходимости однократного выполнения заданной последовательности действий в ограниченной области [2].

На практике существует потребность в периодическом уточнении калибровочных параметров при работе в изменяющихся окружающих условиях.

Рассмотрены задачи уточнения систематических погрешностей измерений трехосевого микроэлектромеханического магнитометра, уточнения систематических погрешностей измерений трехосевых микроэлектромеханических датчиков системы инерциальной навигации в зависимости от температуры, уточнения смещения нуля трехосевого микроэлектромеханического датчика угловых скоростей на основе методов машинного обучения; разработаны соответствующие алгоритмы, которые реализованы в виде встраиваемого программного обеспечения.

Разработана схема электрическая принципиальная и топология печатной платы аппаратного модуля, реализующего представленные алгоритмы.

Численным моделированием с использованием цифрового двойника системы инерциальной навигации выявлено, что разработанный алгоритм позволяет снизить среднюю ошибку определения ориентации в пространстве с 1,3 градуса до 1,1. Увеличение точности составило 13,85 %.

Литература

1. Ru X., Gu N., Shang H., Zhang H. MEMS Inertial Sensor Calibration Technology: Current Status and Future Trends // Micromachines, 2022. Vol. 13. № 6. P. 879–907.
2. Aparna H., Manish A. A systematic review of user — conducted calibration methods for MEMS-based IMUs // Measurement, 2024. Vol. 225.

УДК 621.382.2/.3

Разработка 8-битного цифроаналогового преобразователя для нейростимулятора на отечественной КМОП-технологии 180 нм

Калёнов А. Д., Янова П. А.
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

Разработан 8-битный ЦАП для применения в имплантируемых нейростимуляторах спинного мозга. ЦАП обеспечивает прецизионное формирование стабильных токов стимуляции. ЦАП R2R интегрирован с операционным усилителем, что гарантирует стабильность выходного сигнала при вариациях импеданса нагрузки.

Ключевые слова: ЦАП; R2R; операционный усилитель; нейростимулятор; КМОП.

В настоящее время хроническая боль, поражающая миллионы россиян, не только причиняет невыносимые страдания, но и ведет к глубокой социальной дезадаптации и инвалидизации. В случаях когда традиционная терапия бессильна, нейростимуляция спинного мозга (SCS) зачастую становится единственным шансом вернуть качество жизни. Ключевым компонентом, определяющим эффективность и безопасность нейростимулятора, является цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). ЦАП предназначен для преобразования цифровых команд врача в точные, стабильные и физиологически значимые терапевтические электрические импульсы, подаваемые на спинной мозг [1]. Без высокоточного энергоэффективного и миниатюрного ЦАП отечественная система нейростимуляции просто невозможна.

Для решения этой задачи разработана схема, представляющая собой сборку ЦАП и усилителя. Выход ЦАП подключен к операционному усилителю (ОУ), работающему в конфигурации повторителя напряжения (буфера с единичным усилением): выходное напряжение ЦАП подается на неинвертирующий вход ОУ, а отрицательный вход соединен с выходом. Это позволяет эффективно управлять током 1–10 мА через электроды (нагрузку Rl, имитирующую импеданс «электрод — ткань» и варьирующуюся от 100 Ом до 1 кОм) и обеспечивать стабильность выходного сигнала независимо от вариаций сопротивления нагрузки. Выход ОУ подает напряжение непосредственно на Rl, формируя ток стимуляции.

Научно-техническая новизна представленной схемы (ЦАП + ОУ) заключается в оптимальном сочетании архитектуры резистивного R-2R ЦАП с выходом по напряжению (Voltage Mode) и повторителя напряжения на Rail-to-Rail операционном усилителе для формирования прецизионного стабильного тока в широком диапазоне сопротивлений нагрузки. В отличие от классических токовых R-2R ЦАП (Current Mode), требующих сложных схем усиления тока для достижения необходимого малого выходного тока (единицы—десятки мА) и страдающих от падений напряжения на ключах, или емкостных ЦАП, критичных к утечкам и паразитным емкостям, выбранная комбинация обеспечивает необходимую линейность преобразования и низкое выходное сопротивление для точного управления напряжением на нагрузке. Применение компенсированного Rail-to-Rail ОУ [2] гарантирует

работу во всем диапазоне питающего напряжения (от земли до напряжения питания), стабильность при емкостной нагрузке и безопасность формируемых импульсов.

Высокая линейность преобразования (низкие INL/DNL) критична для точности и безопасности терапевтического тока. Однако разброс резисторов R и 2R по кристаллу является основным источником ошибок интегральной (INL) и дифференциальной (DNL) нелинейности [3]. Для минимизации этого рассогласования в топологическом проектировании применяется метод центральной компоновки (common centroid), а для симметрии используются фиктивные структуры резисторов (dummy resistors).

Применение этих методов в сочетании с выбранной архитектурой ЦАП и ОУ позволяет создать высокоточный и стабильный источник тока стимуляции, отвечающий строгим требованиям имплантируемых нейростимуляторов.

Литература

1. Greenwald E., Maier C., Wang Q., Beaulieu R., Etienne-Cummings R., Cauwenberghs G., Thakor N. A CMOS Current Steering Neurostimulation Array With Integrated DAC Calibration and Charge Balancing. IEEE Trans Biomed Circuits Syst., 2017 Apr; 11 (2). P. 324–335.
2. Davide Marano, Gaetano Palumbo, and Salvatore Pennisi. A New Compact Low-Power High-Speed Rail-to-Rail Class-B Buffer for LCD Applications // J. Display Technol., 2010. № 6. P. 184–190.
3. Salonina E.A., Belyaev Ya.V., Piatak I.M. Modeling the impact of technological process variations on R-2R DAC static characteristics // Информатика, телекоммуникации и управление, 2020. — № 3.

Производство книг на заказ
Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
125319, Москва, а/я 91
тел.: (495) 234-01-10
e-mail: knigi@technosphera.ru

Реклама в книгах:
• модульная
• статьи
Подробная информация о книгах на сайте
http://www.technosphera.ru

Российский форум «Микроэлектроника 2025»
11-я Научная конференция
«ЭКБ и микроэлектронные модули».
Сборник тезисов

Научно-технологический университет «Сириус»,
21-27 сентября 2025 г.

Компьютерная верстка – ИП Автушенко Р.В.
Дизайн – Н.И. Семячкина
Ответственный за выпуск – О.А. Казанцева

Подписано в печать 19.09.2025
Формат 60×90/16
Гарнитура «Ньютон»
Печ. л. 105.

Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2