

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.106.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГИИ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ОСОБОЧИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

(ИПТМ РАН) ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 27.06.2023 г. № 2-23

О присуждении Иванову Владимиру Викторовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование эффектов оптической близости и разработка методов их коррекции для критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 65 нм» по специальности 2.2.2 – электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств принята к защите 26.04.2023 г., протокол № 23-2-И, диссертационным советом 24.1.106.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6, утвержден приказом Минобрнауки №105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Иванов Владимир Викторович, 29.07.1982 года рождения, в 2004 году окончил Московский государственный институт электронной техники (технический университет), в 2007 году окончил аспирантуру МИЭТ по специальности 05.13.12 – системы автоматизированного проектирования. Работает в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ») начальником лаборатории и заместителем начальника отдела в Отделе проектирования фотошаблонов.

Диссертация выполнена в отделе проектирования фотошаблонов АО «НИИМЭ».

Научный руководитель – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук Горнев Евгений Сергеевич, работает заместителем руководителя приоритетного технологического направления АО «НИИМЭ».

Научный консультант – канд. техн. наук Балан Никита Николаевич, работает ведущим инженером-конструктором в АО «НИИМЭ».

Официальные оппоненты:

Петросянц Константин Орестович, д-р тех. наук, проф., ординарный профессор Московского института электроники и математики им. А.Н.Тихонова Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",

Овчинников Вячеслав Алексеевич, канд. тех. наук, главный специалист Акционерного общества «Зеленоградский инновационно-технологический центр», – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном проф., д-ром техн. наук Шахновым В.А., зав. кафедрой "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры" МГТУ им. Н.Э. Баумана, указала, что «Диссертационная работа Иванова Владимира Викторовича соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а также паспорту специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и наноэлектро-ники, квантовых устройств, в частности, п. 1 и п. 2. Автор диссертационной работы – Иванов Владимир Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – электронная компонентная база микро- и наноэлектро-ники, квантовых устройств».

Недостоверные сведения об опубликованных работах в диссертации отсутствуют. Соискатель имеет 20 опубликованных работ по теме диссертации, из

них 14 (каждая работа объемом 5-10 страниц) опубликованы в рецензируемых ВАК научных изданиях. Наиболее значимые публикации по теме диссертации содержат ключевые результаты, основная часть которых получена лично соискателем:

1. Иванов В.В. Разработка OPC-модели для технологии уровня 65 нм / В.В. Иванов, А.В. Колобов [и др.] // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2016. – № 4(164). – Р. 4-9.

2. Медведев К.А. Алгоритм и методика повышения эффективности OPC-рецепта / К.А. Медведев, А.В. Кузовков, В.В. Иванов // Наноиндустрия. – 2019. – № S(89). – Р. 368-372.

3. Харченко Е.Л. Оптимизация размещения SRAF для увеличения разрешающей способности фотолитографии / Е.Л. Харченко, А.В. Кузовков, В.В. Иванов // Наноиндустрия. – 2019. – № S(89). – Р. 216-218.

4. Иванов В.В. Место фазосдвигающих фотошаблонов в современной полупроводниковой технологии / Н.Н. Балан, В.В. Иванов [и др.] // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2019. – № 2(174). – Р. 54-63.

5. Иванов В.В. Генерация Rule-based SRAF для двумерных топологических структур с учетом правил MRC: проблемы и решения / В.В. Иванов, Е.С. Шамин, Е.В. Ипатова [и др.] // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2019. – № 2(174). – Р. 36-41.

6. Основные подходы к моделированию формирования фоторезистивной маски в вычислительной литографии / Н.Н. Балан, В.В. Иванов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2019. – № 22(4). – Р. 279-289.

7. Использование нейросетевых алгоритмов в задачах вычислительной литографии / В.В. Иванов, Н.Н. Балан [и др.] // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-2. – Р. 543-548.

8. Basic approaches to simulation of resist mask formation in computational lithography / N.N. Balan, V.V. Ivanov [et al.] // Modern electronic materials. – 2020. – Vol. 6. – № 1. – Р. 37-45.

9. Иванов В.В. Современные методики RET как средство повышения качества литографического изображения в технологиях предыдущих поколений / Н.Н. Балан, В.В. Иванов [и др.] // Наноиндустрия. – 2020. – Vol. 13. – № S5-1 (102). – Р. 243-245.

10. Балан Н.Н. Метод разработки спецификации на фотошаблоны для производства СБИС современных проектных норм / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.Л. Панкратов // Наноиндустрия. – 2020. – Vol. 13. – № S5-1 (102). – Р. 213-220.

11. Иванов В.В. Разработка и применение экспресс-метода для увеличения окна литографического процесса / В.В. Иванов, Е.Л. Харченко, Е.С.

Шамин [и др.] // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-2. – Р. 730-732.

12. Колобов А.В. Влияние типов структур для совмещения и измерения контролируемых размеров на достоверность аттестации фотошаблонов / А.В. Колобов, А.Л. Панкратов, В.В. Иванов // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-2. – Р. 659-664.

13. Ипатова Е.В. Разработка методики оценки стабильности OPC-решения / Е.В. Ипатова, В.В. Иванов, Е.С. Шамин // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-2. – Р. 623-626.

14. Иванов В.В. Определение оптимальных параметров литографического стека и осветителя при разработке OPC решений для слоев металлизации в перспективном технологическом процессе 28 нм / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.В. Кузовков // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-2. – Р. 589-594.

На автореферат диссертации поступил отзыв старшего научного сотрудника кафедры лазерной физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», доктора физико-математических наук Родина Владислава Геннадьевича. Отзыв целиком положительный, в нём сказано, что, судя по автореферату, работа полностью удовлетворяет требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. От 18.03.2023), а её автор заслуживает присуждения ему степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 2.2.2 – электронная компонентная база микро- и наноэлектро-ники, квантовых устройств.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что ведущая организация является передовым предприятием в области исследования эффектов оптической близости в проекционной фотолитографии, а официальные оппоненты – высокопрофессиональными специалистами в микро- и наноэлектронике, в частности, в области проектирования и изготовления фотошаблонов для проекционной фотолитографии, что подтверждается авторитетными публикациями.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных исследований:

предложен способ определения параметров оптической системы установки проекционной фотолитографии, оптимальных при переносе на пластину рисунка критических литографических слоев технологии производства современных полупроводниковых изделий, а также определения оптимальной геометрии

непропечатаваемых вспомогательных топологических элементов, необходимых для пропечатки одиночных и краевых элементов топологии СБИС с приемлемым значением глубины фокуса;

исследован вклад допусков на параметры фотошаблона в литографическую погрешность, что в результате позволило разработать метод составления оценочной спецификации на фотошаблоны критических литографических слоев;

предложен метод калибровки полуэмпирических фоторезистивных моделей с использованием кластерного анализа при формировании выборок калибровочных тестовых структур и **исследована** эффективность откалиброванных таким образом моделей;

предложен эвристический алгоритм оптимизации параметров рецепта коррекции оптической близости на основе метода дифференциальной эволюции;

разработана и реализована методология создания ОРС-решения, сохраняющая общую последовательность этапов разработки при переходе к следующим проектным нормам технологии производства СБИС.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана возможность значительного сокращения числа тестовых структур калибровочной выборки при калибровке полуэмпирических моделей формирования контура фоторезистивной маски при условии использования кластерного анализа (метод k-средних) для формирования нерегулярной выборки тестовых структур;

применительно к проблематике диссертации результативно, т.е. с получением обладающих новизной результатов, **использован** комплекс модельных представлений о переносе изображения с фотошаблона в слой фоторезиста в процессе проекционной фотолитографии;

применен аппарат математической оптимизации на основе метода дифференциальной эволюции для настройки ОРС-рецептов;

изучены основные составляющие общей погрешности литографического процесса, выделен вклад фотошаблонной составляющей.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработанные методы анализа вклада допусков на параметры изображения на фотошаблоне в общую литографическую погрешность **позволили** составить оценочную спецификацию на ФШ затворного слоя технологии проектных норм 65 нм;

разработан и изготовлен универсальный калибровочный фотошаблон «LITHO90-65», включающий в свой состав ряд топологических модулей, предназначенных для калибровки оптической и компактной фоторезистивной модели VT5, а также для проверки правил расстановки структур SRAF на одиночных и периодических элементах топологии. Указанный ФШ может быть использован при решении задач калибровки компактных моделей формирования контура ФРМ для технологических процессов проектных норм до 45 нм;

на основе предложенных моделей с учетом условий и особенностей процесса АО "Микрон" **рассчитаны** параметры оптической системы сканера ASML PAS 5500/1150C ($NA = 0,75$; $\sigma_{in} = 0,60$, $\sigma_{out} = 0,85$, $\alpha = 30^\circ$), оптимальные при литографии затворного слоя технологии проектных норм 65 нм, а также предварительно **определены** параметры непропечатываемых вспомогательных топологических структур SRAF (в масштабе пластины):

- $w = 28$ нм, расположение в центрах промежутков между основными линиями – для периодов линий от 340 нм до 560 нм;

- $w = 36$ нм, $s = 180$ нм – для периодов линий от 560 нм и более.

Применение указанных вспомогательных структур при оптимальных настройках оптической системы сканера позволяет (согласно используемой модели) достичь глубины фокуса проекционной фотолитографии более 260 нм для затворного слоя с исключением возможности пропечатки вспомогательных элементов SRAF. Результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными;

разработано программное средство «OPC_Optimizer», позволяющее выполнять оптимальную настройку OPC-рецепта с помощью алгоритмов оптимизации, в том числе, эвристического алгоритма дифференциальной эволюции, а также решать другие оптимизационные задачи в рамках разработки OPC-решения. На программный продукт «OPC_Optimizer» получено

Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Оценка достоверности результатов выявила:

результаты **экспериментальных работ** получены на современном оборудовании. Достоверность разработанных методик подтверждена положительными результатами испытаний, а также экспертизой проведенных НИОКР соответствующими министерствами и ведомствами.

теория исследования обладает необходимой строгостью и точностью формулировок, а достоверность обеспечивается строгой математической обоснованностью и корректностью применяемых подходов и методов, а также использованием признанных апробированных программных платформ для разработки специализированных приложений; подтверждается проверками на адекватность по экспериментальным данным, метрологической поверкой, выступлениями и обсуждениями на конференциях и семинарах, а также непосредственной согласованностью результатов работы с опубликованными результатами исследований других авторов

идея базируется на анализе литературных данных и непротиворечивости известным физическим моделям.;

использовано сопоставление с результатами других авторов;

установлено качественное и количественное соответствие авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

Личный вклад соискателя состоит в его непосредственном и определяющем участии во всех этапах исследования, в анализе, расчетах и обработке результатов, а также подготовке публикаций по выполненной работе.

На заседании 27 июня 2023 г. диссертационный совет принял решение за новые научно обоснованные технологические решения и разработки в области микроэлектроники, имеющие существенное значение для развития страны присудить Иванову Владимиру Викторовичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 13 докторов наук по специальности 2.2.2, участвовавших в

заседании, из них двое – в удалённом интерактивном режиме, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 14, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель диссертационного совета
член –корр. РАН

Рощупкин Дмитрий Валентинович

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук

Коротичкая-Седловец Дарья Михайловна

27.06.2023 г.

Подпись Рощупкина Д.В. заверяю:

Ученый секретарь ИПТМ РАН,

канд. физ.-мат. наук

О.В. Феклисова

