

Ученому секретарю
Диссертационного совета
24.1.106.01
Коротичкой-Седловец Д.М.

142432, Московская область,
г. Черноголовка,
ул. Академика Осипьяна, д. 6
ФГБУН «Институт проблем
технологии микроэлектроники
и особочистых материалов
РАН» (ИПТМ РАН)

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Иванова Владимира Викторовича «Исследование эффектов оптической близости и разработка методов их коррекции для критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 65 нм», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Актуальность избранной темы

Разработка и совершенствование приборов твердотельной электроники, изделий микро- и нанoeлектроники с минимальными топологическими размерами от 180 нм и ниже немыслимы без проведения исследований физических принципов переноса изображения на полупроводниковую пластину в процессе проекционной фотолитографии. Эти исследования так важны по причине влияния и необходимости соответствующего учёта паразитных дифракционных эффектов или т.н. «эффектов оптической близости», неизбежно проявляющихся в процессе проекционного переноса на пластину элементов топологии, сравнимых по размерам с длиной волны экспонирующего излучения. Влияние на эффективность ОРС-решения оказывают все его основные составляющие – оптические модели, характеризующие особенности литографического оборудования, модели

формирования фоторезистивной маски, а также OPC-рецепт, определяющий фрагментацию топологии, алгоритм смещения фрагментов и порядок размещения контрольных точек для оценки результата топологической коррекции. Успешное решение задач разработки и калибровки оптической и фоторезистивной моделей, а также нахождения оптимальных параметров OPC-рецепта для критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 65 нм требует проведения комплекса исследований, направленных на выбор оптимальной формы осветителя, корректных топологических элементов тестовых и калибровочных матриц, а также на разработку специализированных алгоритмов оптимизации параметров OPC-рецепта.

Переход на более продвинутые проектные нормы сопровождается необходимостью применения более совершенных методов коррекции влияния эффектов оптической близости (или OPC – Optical Proximity Correction) на результат литографии и, как следствие, – неизбежным усложнением процесса проектирования фотошаблонов. Поэтому вопрос повышения эффективности процесса проектирования фотошаблонов также является одним из важнейших. Особо востребованными являются исследования вклада фотошаблонной составляющей в общую литографическую погрешность в силу необходимости разработки корректной фотошаблонной спецификации, содержащей требования к качеству рисунка, уровню дефектности и свойствам фазового слоя фотошаблонов, используемых в производстве электронных компонентов.

Кроме того, по причине отсутствия в России собственных компетенций в области разработки и применения OPC-решений, а также сильной коммерциализации этой сферы в мировом сообществе производителей специализированных САПР и поставщиков технологии, формируется зависимость отечественных предприятий не только от производителей материалов и оборудования, но и от поставщиков услуг в области разработки технологических решений.

Перечисленные факты свидетельствуют о безусловных актуальности и своевременности задачи исследования эффектов оптической близости, а также разработки и оптимизации методов их коррекции.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В качестве метода исследования в работе использовался аппарат фурье-оптики; кроме того, для решения задачи оптимальной настройки параметров

ОРС-рецепта применялись методы прикладной статистики и оптимизации. Выполненные исследования и практические расчеты базируются на использовании методов вычислительной математики, современных методов программирования и компьютерного моделирования. Экспериментальные результаты, представленные в диссертационном исследовании, были получены с использованием проекционной фотолитографии и сканирующей электронной микроскопии. Общей методологической основой всех исследований является системный подход, что свидетельствует о высокой степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность и новизна

Достоверность теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в диссертационной работе, обеспечивается строгим математическим обоснованием предлагаемых подходов, результатами компьютерного моделирования, использованием современных экспериментальных методик и согласованностью теоретических и экспериментальных данных, известных в литературе и полученных автором.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Для усовершенствования процесса калибровки компактной модели контура ФРМ впервые применён кластерный анализ формирования выборок калибровочных структур и исследована эффективность откалиброванной таким образом модели.

2. Впервые предложен эвристический алгоритм оптимизации параметров рецепта коррекции оптической близости на основе метода дифференциальной эволюции, обеспечивающий в сравнении с исходным рецептом уменьшение усредненного значения ошибки смещения положения края расчётной фоторезистивной маски относительно номинала и площади смещения моделируемого контура более, чем на 35% и 20% соответственно. В качестве исходного использовался типовой ОРС-рецепт, применяемый в технологии уровня 90нм. Различия в целевых показателях, полученных с помощью универсального и специфичных для конкретных топологий рецептов, не превышают 2%, что подтверждает целесообразность применения полученного решения для коррекции топологий с произвольной конфигурацией.

3. На основе исследования вклада фотошаблонной составляющей в общую литографическую погрешность разработан универсальный метод составления спецификации на фотошаблон.

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

5. С применением модернизированной методики калибровки компактных моделей проведена калибровка компактных моделей контура ФРМ для затворного слоя на различных наборах калибровочных данных, что позволило определить оптимальный размер выборки (300-350 из 3300 калибровочных структур) при условии кластеризации калибровочных данных методом k-средних. При этом среднеквадратичная ошибка моделирования составила менее 1,4 нм, что составляет 2,3% от номинала критического линейного размера для технологии проектных норм 65 нм.

Практическая значимость полученных автором научных результатов

1. На основе разработанного метода с применением «полного» моделирования литографического процесса проведен анализ вклада допусков на параметры ФШ в литографическую погрешность, что позволило составить оценочную спецификацию на ФШ затворного слоя технологии проектных норм 65 нм.

2. 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 непропечатываемых вспомогательных структур SRAF (Sub-Resolution Assist Feature) 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.

3. Предложена модель литографического процесса, основанная на пороговой обработке распределения интенсивности на пластине, получаемого методом Хопкинса. Модель калибруется на экспериментально установленный минимальный обрабатываемый полупериод рисунка в резисте (т.н. "якорную" структуру).

На основе предложенной модели 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 элементов SRAF. Результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными.

4. 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.

Соответствие автореферата диссертации

Автореферат соответствует основным положениям диссертационной работы.

Полнота опубликованных работ

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: на Международном форуме «Микроэлектроника» в 2018, 2019 и 2020 годах, в том числе на Международной научной конференции «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули» в 2018, 2019 и 2020 годах, а также в рамках Школы молодых ученых в 2019 году; на Всероссийской научной конференции МФТИ, «Электроника, фотоника и молекулярная физика» в 2018 и 2019 годах; на Научном семинаре «Коррекция эффектов оптической близости в

литографии» в рамках заседания совета РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для ее создания» в 2019 году; на XVI Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям в 2019 году; на I Международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов» в 2019 году; на Международной конференции по фотонике и информационной оптике в 2020 и 2021 годах; на XIII Международной конференции «Кремний-2020» и XII Школе молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе в 2020 году.

Основное содержание диссертации отражено в 28 научных работах, в том числе 14 работ – статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК Минобрнауки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Краткий анализ содержания диссертации

Во введении показана актуальность работы, сформулирована цель и вытекающие из нее задачи исследований. Изложены научная новизна работы и ее практическая значимость. Выделены выносимые на защиту положения.

В первой главе проведен анализ современного состояния работ по развитию и применению методов повышения разрешающей способности процессов проекционной литографии в технологии производства полупроводниковых изделий. Описываются основные подходы к решению этой задачи, основное внимание уделяется методикам RET (Resolution Enhancement Techniques), представляющим собой технические приемы, направленные на минимизацию коэффициента k_1 в широко известном соотношении Рэлея для минимального пропечатываемого полупериода рисунка. Подчеркивается, что корректное применение RET является нетривиальной задачей, требующей рассмотрения множества технических и технологических факторов, проведения большого количества модельных и экспериментальных исследований с целью нахождения оптимальных решений задачи коррекции эффектов оптической близости при производстве полупроводниковых изделий.

С учетом проведенных обзорно-аналитических работ намечены пути теоретических и экспериментальных исследований.

Во второй главе приводятся результаты моделирования переноса изображения в процессе фотолитографии с целью определения оптимальных настроек проекционной системы литографической установки, предварительной оценки параметров элементов SRAF, а также выработки требований фотошаблонной спецификации для затворного слоя технологии проектных норм 65 нм. Искомые параметры находятся посредством «полного» или упрощенного моделирования процесса проекционной фотолитографии исходя из соображений удовлетворения характеристик литографического изображения требованиям к технологии проектных норм 65 нм. Для упрощенного моделирования была предложена модель литографического процесса, основанная на анализе воздушного изображения основных типов групповых линий, используемых в затворных слоях указанных проектных норм, и калибрующаяся на экспериментально установленный минимальный обрабатываемый полупериод рисунка в резисте (т.н. «якорную» структуру).

Третья глава посвящена калибровке реализованных в САПР Mentor Graphics Calibre полуэмпирических моделей формирования «воздушного» изображения и контура фоторезистивной маски, используемых в процессе применения методик коррекции эффектов оптической близости при разработке фотошаблонов для производства изделий твердотельной электроники. Для калибровки моделей и исследования проработки структур SRAF был разработан и изготовлен специализированный калибровочный фотошаблон, содержащий ячейки с тестовыми и калибровочными структурами, с которого в условиях, характерных для фотолитографии затворного слоя, были произведены пропечатки с проходом по значениям дозы и дефокусировки. Результаты проведенных пропечаток использовались для калибровки моделей и экспериментального уточнения параметров SRAF. Для формирования калибровочной выборки были применены методы кластерного анализа (k-средних) в пространстве параметров оптического изображения используемых калибровочных структур. Исследована достаточность калибровочной выборки для корректной калибровки фоторезистивной модели.

Помимо этого, в главе с использованием результатов предварительного моделирования, откалиброванных полуэмпирических моделей и результатов проведенных экспериментальных исследований была разработана базовая процедура размещения структур SRAF в двумерных топологиях затворных слоев СБИС проектных норм 65 нм.

В четвертой главе ставится и решается задача оптимизации параметров ОРС-рецепта, отвечающих за процесс коррекции топологии (количество,

размер сегментов топологии при фрагментации, максимальное число итераций, положение контрольных точек и т.д.). Применение методов математической оптимизации в данном случае оправдано по причине большой размерности вектора параметров ОРС-рецепта и их взаимосвязи. Описывается специализированное программное средство, разработанное в процессе решения указанной задачи.

Замечания по диссертационной работе

1. Погрешности угла вращения фазы и коэффициента пропускания фазового маскирующего слоя не учитываются в процессе проведения многофакторных вычислительных экспериментов по определению допусков на параметры фотошаблона.
2. Недостаточно подробно описан набор оптимизируемых параметров ОРС-рецепта.
3. В работе не освещена верификация разработанного ОРС-решения на топологии реального изделия.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств, в частности, пунктам:

- п. 1 – Разработка и исследование физических основ создания новых и совершенствования существующих приборов, интегральных схем, изделий микро- и нанoeлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (МЭМС), нанoeлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин;
- п. 2 – Исследование и разработка физических и математических моделей изделий по п.1, в том числе для систем автоматизированного проектирования.

Заключение

В соответствии с п. 9 Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, диссертацию Иванова Владимира Викторовича «Исследование эффектов оптической близости и разработка методов их коррекции для критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 65 нм», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, можно оценить как научно-квалификационную работу, в которой на основе проведенных исследований, предложенных математических моделей и полученных экспериментальных данных решается задача разработки методов коррекции эффектов оптической близости для критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 65 нм, имеющая существенное значение для развития отечественного производства изделий микро- и наноэлектроники.

Диссертация соответствует требованиям ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Иванов Владимир Викторович заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент,
доктор технических наук по специальности 05.27.01, профессор департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики Национального Исследовательского университета «Высшая школа экономики»

23.05.2023

К.О. Петросянц

Адрес места работы: 123458, г. Москва, ул. Таллинская, д.34.

Контактные данные: Тел. +7(495)772-95-90*15208;

e-mail: kpetrosyants@hse.ru

Личную подпись проф. Петросянца Константина Орестовича удостоверяю:

Подпись заверяю

СПЕЦИАЛИСТ
ПО ПЕРСОНАЛУ
КИСИН М.

