

На правах рукописи

Иванов Владимир Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ОПТИЧЕСКОЙ БЛИЗОСТИ И
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИХ КОРРЕКЦИИ ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ
ЛИТОГРАФИЧЕСКИХ СЛОЕВ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
СБИС ПРОЕКТНЫХ НОРМ 65 нм**

Специальность 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и
наноэлектроники, квантовых устройств

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»)

Научный руководитель: **Горнев Евгений Сергеевич**
член-корреспондент РАН, доктор технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», заместитель руководителя приоритетного технологического направления по электронным технологиям

Научный консультант: **Балан Никита Николаевич**
кандидат технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», ведущий инженер-конструктор

Официальные оппоненты: **Петросянц Константин Орестович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение «Высшая школа экономики», Московский институт электроники и математики имени А.Н. Тихонова, департамент электронной инженерии, профессор-исследователь

Овчинников Вячеслав Алексеевич
кандидат технических наук, Акционерное общество «Зеленоградский инновационно-технологический центр», главный специалист

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)»

Защита состоится «__» _____ 2023 года в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.106.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук по адресу: 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6, ИПТМ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПТМ РАН и на сайте http://www.iptm.ru/tes_council/diss.ru.html

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета 24.1.106.01,
кандидат физико-математических наук

Д.М. Коротницкая-Седловец

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Освоение новых проектных норм микроэлектронного производства требует уменьшения размера полупериода структур, переносимых на полупроводниковую пластину в процессе проекционной фотолитографии. Это достигается применением излучателей с меньшей длиной волны, совершенствованием технических характеристик проекционных объективов, а также рядом технологических приемов, направленных на повышение разрешения существующих литографических установок. Первые два способа весьма затратны и представляют собой по сути создание новых поколений оборудования и материалов. Третий способ состоит в сочетании внеосевого освещения фотошаблона (в общем случае фазового) с дополнительной коррекцией его топологии (ОРС – Optical Proximity Correction) для получения на пластине фоторезистивной маски (ФРМ) необходимой геометрии. Это позволяет минимизировать влияние паразитных дифракционных оптических эффектов или т.н. «эффектов оптической близости» и, таким образом, в полной мере реализовать потенциал существующего оборудования, сделав возможной литографию структур с размерами полупериода элементов значительно менее длины волны рабочего излучения, хотя и с рядом ограничений на их конфигурацию.

Фотошаблоны (ФС), применяемые в современных установках проекционной фотолитографии, являются прецизионными оптическими элементами и, как правило, содержат крайне сложный рисунок, состоящий из десятков миллионов элементарных топологических структур, с весьма строгими требованиями к размеру и точности размещения элементов.

Переход на более продвинутые проектные нормы неизбежно сопровождается дальнейшим усложнением процесса проектирования фотошаблонов, как минимум, по причине применения новых поколений ОРС-решений, имеющих значительно более сложные входные и выходные данные и, соответственно, являющихся более требовательными к вычислительным ресурсам (Под ОРС-решением подразумевается совокупность моделей, алгоритмов и программных средств для их применения, позволяющих реализовывать коррекцию оптической близости). Это влечет за собой появление дополнительных процедур верификации топологии, новых операций выходного контроля

управляющей информации (УИ) и, как результат, существенное удорожание процесса проектирования ФШ. Особое влияние на эффективность выбранного OPC-решения оказывают оптические модели, характеризующие особенности литографического оборудования, модели формирования фоторезистивной маски и OPC-рецепт, определяющий фрагментацию топологии, алгоритм смещения фрагментов и порядок размещения контрольных точек для оценки эффективности топологической коррекции.

Ошибки, допущенные при проектировании ФШ, негативно сказываются на работоспособности изготавливаемого изделия (вплоть до полной ее потери) и влекут за собой неблагоприятные экономические последствия по причине высокой стоимости производственного цикла в целом и этапа изготовления комплекта фотошаблонов в частности. Поэтому вопрос повышения эффективности процесса проектирования ФШ в условиях перехода на новые уровни технологии имеет первоочередную важность. Его решение лежит в том числе в области оптимизации методов коррекции оптической близости.

Крупнейшие мировые производители специализированного программного обеспечения, такие как Mentor Graphics, Cadence или Synopsys производят программные продукты, ориентированные на осуществление различных стадий процесса проектирования ФШ, в частности на реализацию методов коррекции эффектов оптической близости. Тем не менее, законченные реализации OPC-решений, применяемые на маскшопах и предприятиях, занимающихся производством микроэлектроники, являются закрытой коммерческой информацией. Ситуация дополнительно осложняется отсутствием в России собственных компетенций, алгоритмов и методик разработки OPC-решений. Сильная коммерциализация этой сферы в мировом сообществе производителей специализированных САПР и поставщиков технологии приводит к дефициту информации о результатах исследований в области разработки эффективных алгоритмов и методик коррекции оптической близости в общедоступной литературе. Эти факторы крайне негативно сказываются на развитии отечественного микроэлектронного производства. Повышаются расходы на проектирование фотошаблонов, затрудняется освоение новых техпроцессов, формируется зависимость не только от производителей материалов и оборудования, но и от поставщиков услуг в области разработки технологических решений.

Поэтому задача исследования эффектов оптической близости, а также разработки и оптимизации методов их коррекции является в настоящее время актуальной и своевременной.

Цель диссертации

Цель диссертационного исследования состоит в разработке научно-технических основ и методов нахождения оптимальных решений задачи коррекции эффектов оптической близости для критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 65 нм (на примере затворного слоя).

Основные задачи исследований

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ современного состояния методов повышения разрешающей способности проекционной фотолитографии, а также основных САПР, используемых в данной области;
2. На основе моделирования процесса проекционной фотолитографии для затворного слоя проектных норм 65 нм:
 - произвести оптимизацию настроек проекционной системы литографической установки;
 - определить предварительные параметры используемых непропечатываемых вспомогательных структур (SRAF – Sub-Resolution Assist Features);
 - исследовать вклад фотошаблонной составляющей в общую литографическую погрешность и на основе проведенного исследования разработать типовую оценочную спецификацию на фотошаблон затворного слоя проектных норм 65 нм.
3. Разработать ФШ, предназначенный для экспериментального уточнения основных параметров используемых SRAF, а также для калибровки компактных моделей формирования контура фоторезистивной маски затворного слоя проектных норм 65 нм.
4. Провести экспериментальные исследования качества пропечатки структур калибровочных и тестовых матриц.
5. На основе результатов проведенных экспериментальных исследований произвести уточнение параметров используемых SRAF и разработать базовую процедуру их размещения.

6. На основе результатов проведенных экспериментальных исследований произвести калибровку компактной модели формирования контура ФРМ для заданных технологических условий.

7. Разработать метод оптимальной настройки параметров ОРС-рецепта, предназначенного для процедуры коррекции оптической близости затворного слоя технологии проектных норм 65 нм.

Методы исследований

При калибровке моделей формирования фоторезистивной маски использовались методики растровой электронной микроскопии. Для обработки результатов экспериментов, а также при решении задачи оптимальной настройки параметров ОРС-рецепта применялся аппарат прикладной статистики и оптимизации. Теоретические исследования проводились на базе методов математического моделирования с использованием вычислительных экспериментов и экспертных оценок.

Научная новизна

В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Впервые для усовершенствования процесса калибровки компактной модели контура ФРМ 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. Впервые на основе исследования вклада фотошаблонной составляющей в общую литографическую погрешность разработан универсальный метод составления спецификации на фотошаблон.

4. Впервые разработана и реализована методология создания OPC-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;

6. Впервые разработано программное средство «OPC Optimizer», позволяющее выполнять настройку OPC-рецепта с помощью предложенного алгоритма, а также решать другие оптимизационные задачи в рамках разработки OPC-решения.

Практическая значимость работы

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 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;

3. В целях экономии вычислительных ресурсов для расчета параметров проекционной системы сканера ASML PAS 5500/1150C, требуемых при литографии затворных слоев проектных норм 65 нм, а также параметров структур SRAF было предложено использование модели литографического процесса, основанной на анализе воздушного изображения основных типов групповых линий, используемых в затворных слоях указанных проектных норм, и калибрующейся 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.

Достоверность результатов

Достоверность представленных в работе теоретических и экспериментальных результатов, выводов и рекомендаций 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. Эксперименты проводились на современном оборудовании. Достоверность разработанных методик подтверждена

положительными результатами испытаний, а также экспертизой проведенных НИОКР соответствующими министерствами и ведомствами.

Использование результатов работы

Теоретические и практические результаты работы внедрены в производственный процесс АО «НИИМЭ» и АО «Микрон», были использованы при проведении ряда НИОКР, а также используются в учебном процессе НОУ ДПО «ЦОРК НИИМЭ», что подтверждается соответствующими актами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Модель литографического процесса для расчета параметров проекционной системы сканера и параметров непропечатываемых вспомогательных топологических элементов, основанная на анализе воздушного изображения основных типов групповых линий, используемых в затворных слоях требуемых проектных норм, и калибруемая на экспериментально установленном минимально отрабатываемом полупериоде рисунка в резисте («якорной структуре»).

2. 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.

3. Результаты анализа вклада допусков на параметры фотошаблона (ФШ) в литографическую погрешность, позволившие составить оценочную спецификацию на ФШ затворного слоя технологии проектных норм 65 нм.

4. Усовершенствованная методика калибровки компактных моделей контура ФРМ в части применения кластерного анализа при формировании выборок калибровочных структур, позволяющая определить оптимальный размер выборки (300-350 из 3300 калибровочных структур) при условии кластеризации калибровочных данных методом k-средних.

5. Основные требования к базовой процедуре расстановки структур SRAF для затворного слоя технологии проектных норм 65 нм.

6. Результаты экспериментов по калибровке компактных моделей контура ФРМ и определению процессных окон SRAF;

7. Алгоритм оптимизации параметров рецепта коррекции оптической близости на основе метода дифференциальной эволюции.

8. Программный продукт, позволяющий выполнить настройку OPC-рецепта с помощью предложенного алгоритма, а также решать другие оптимизационные задачи в рамках разработки OPC-решения.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

- Международный форум «Микроэлектроника-2018», 4-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули», Алушта, 2018г.
- 61-я Всероссийская научная конференция МФТИ, «Электроника, фотоника и молекулярная физика», Москва, 2018г.
- Научный семинар «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», Москва, 2019г.
- XVI Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, Санкт-Петербург, 2019г.
- Международный форум «Микроэлектроника-2019», Школа молодых ученых, Гурзуф, 2019г.
- Международный форум «Микроэлектроника-2019», 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули», Алушта, 2019г.
- I Международная конференция «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов», Москва, 2019г.
- 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ, «Электроника, фотоника и молекулярная физика», Москва, 2019г.
- IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, НИЯУ МИФИ, 2020г.
- Международный форум «Микроэлектроника-2020», 6-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули», Ялта, 2020г.
- XIII Международная конференция «Кремний-2020» и XII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе, Гурзуф 2020г.
- X Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, НИЯУ МИФИ, 2021г.

Публикации работы

По теме диссертации опубликовано 28 научных работ, в том числе 14 работ – в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников, включающего 112 наименований, и приложений. Общий объем работы 205 страниц, из которых основная часть составляет 186 страниц, включая 44 иллюстрации и 21 таблицу, приложения 19 страниц, куда входят значения физико-химических параметров резиста, использованные при «полном» моделировании формирования ФРМ, примеры конфигурационных файлов и скрипт базовой процедуры расстановки SRAF для САПР Mentor Graphics Calibre, а также акты об использовании результатов работы и авторское свидетельство на программный продукт «OPC Optimizer».

Основное содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и вытекающие из нее задачи исследования. Определены методы исследований, изложены научная новизна и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена анализу современного состояния работ по развитию и применению методов повышения разрешающей способности процессов проекционной литографии в технологии производства полупроводниковых изделий [1; 9; 11; 14]. Описываются основные подходы к решению этой задачи, а именно: использование рабочего излучения с меньшей длиной волны, повышение числовой апертуры проекционного объектива при помощи иммерсии, а также методики RET (Resolution Enhancement Techniques – методики повышения разрешающей способности), представляющие собой технические приемы, направленные на минимизацию коэффициента k_1 в широко известном соотношении для минимального пропечатываемого полупериода рисунка:

$$F = \frac{k_1 \lambda}{NA}. \quad (1)$$

Методики RET включают в себя комплексное применение внеосевого освещения фотошаблона [7; 10; 19], фазосдвигающих элементов на ФШ [5], а также топологической коррекции [1], что позволяет скомпенсировать паразитные дифракционные оптические явления или «эффекты оптической близости», оказывающие негативное влияние на качество проработки элементов топологии на полупроводниковой пластине в процессе проекционной фотолитографии, и таким образом значительно повысить ее разрешающую способность. Кроме того, методики RET (при условии их корректного применения) позволяют получить выигрыш также и в глубине фокуса, в отличие от подходов, связанных с уменьшением длины волны рабочего излучения или же увеличением числовой апертуры проекционных объективов.

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.

В **Главе 2** производилось определение оптимальных настроек проекционной системы литографической установки [7; 10; 19], предварительное определение параметров SRAF, а также выработка требований фотошаблонной спецификации для затворного слоя технологии проектных норм 65 нм. Искомые параметры найдены посредством моделирования процесса проекционной фотолитографии исходя из соображений удовлетворения определяемых характеристик литографического изображения требованиям к технологии проектных норм 65 нм.

Для расчета параметров проекционной системы сканера ASML PAS 5500/1150C, требуемых при литографии затворных слоев проектных норм 65 нм, а также параметров структур SRAF было предложено использование упрощенной модели литографического процесса, основанной на анализе воздушного изображения основных типов групповых линий, используемых в затворных слоях указанных проектных норм, и калибрующейся на экспериментально установленный минимальный обрабатываемый полупериод рисунка в резисте (т.н. "якорную" структуру). В данном случае такой структурой служил

периодический групповой элемент типа «линия» темного тона с шириной 320 нм и периодом 760 нм на ФШ (с учетом масштабирования), при этом целевой размер структуры в ФРМ – 80 нм. Исходя из этих условий определялся порог воздушного изображения, соответствующий номинальной дозе литографии. При расчете процессных окон производилась вариация значений порога воздушного изображения и дефокусировки и для каждой из тестовых топологических структур проверялось соответствие рассчитанного в рамках данной модели КЛР в резисте заданным допускам ($\Delta\text{КЛР} = \pm 10\%$, глубина фокуса ≥ 250 нм при $\text{EL} = 10\%$).

Для сравнения процессных окон для «якорной» структуры использовался интегральный параметр $A = \int_{-F_{\max}}^{F_{\max}} NILS(f)df$, имеющий размерность длины и соответствующий площади области удовлетворительной пропечатки [3; 16]. При максимально возможной числовой апертуре проекционного объектива $\text{NA} = 0,75$ для «якорной» топологической структуры были признаны оптимальными значения $\sigma_{\text{in}} = 0,60$ и $\sigma_{\text{out}} = 0,85$.

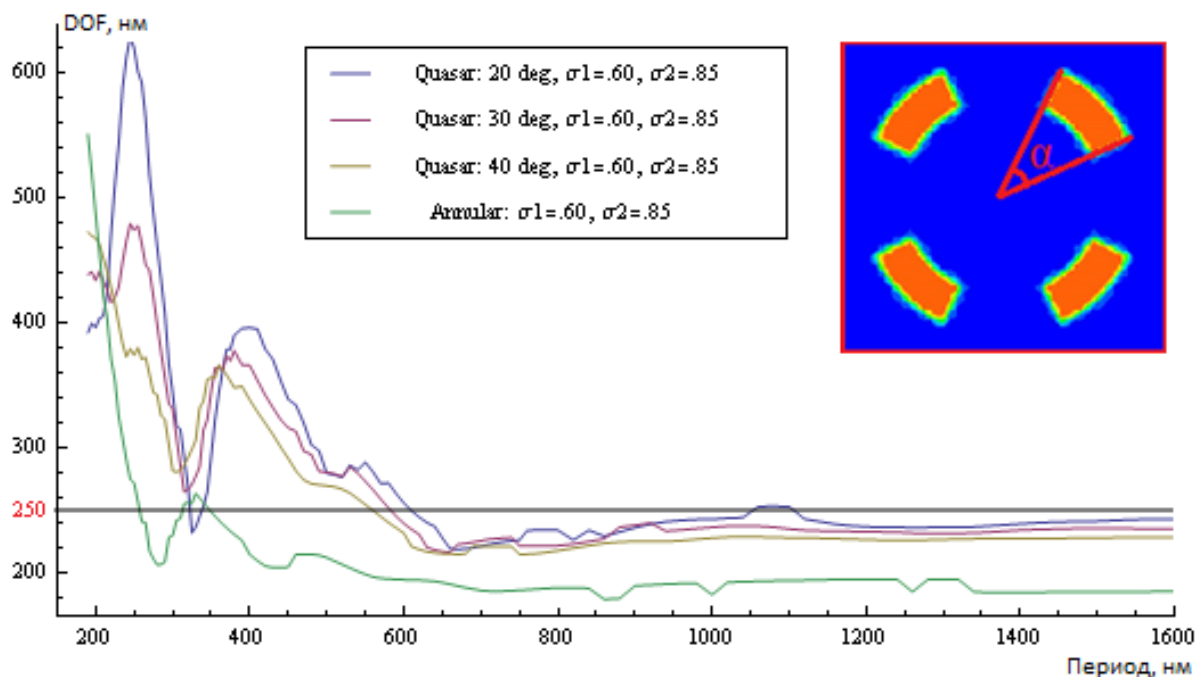


Рис. 1. Результаты вычислительных экспериментов по расчету зависимости глубины фокуса от периода линий для разных форм осветителя (период указан в масштабе пластины)

Далее для всех периодов групповых линий и четырех возможных видов осветителя была рассчитана глубина фокуса (ширина

эллиптического процессного окна по оси дефокусировки). Оптимальным из рассматриваемых был признан источник типа «Quasar» с параметрами $\sigma_{in} = 0,60$, $\sigma_{out} = 0,85$, $\alpha = 30^\circ$ (Рис.1). В целях достижения приемлемых значений глубины фокуса для изолированных линий, а также для структур, имеющих тенденцию к проработке с недостаточной глубиной фокуса, было рекомендовано использование вспомогательных структур SRAF.

В рассматриваемой задаче для подбора оптимальных параметров структур SRAF использовалась та же описанная выше пороговая модель контура фоторезистивной маски с постоянным порогом по интенсивности, определяемым по «якорной» структуре с минимальным периодом. В рамках используемой модели для исключения возможности пропечатки вспомогательных структур было принято удовлетворительное отношение относительной интенсивности SRAF к порогу $\sim 1,3 \div 1,4$.

Расчет показал, что для данной задачи размещение SRAF приемлемо в применении к линиям с периодом от 340 нм и более. С использованием предложенной модели 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 – ширина элемента SRAF);
- $w = 36$ нм, $s = 180$ нм – для периодов линий от 560 нм и более (s – расстояние от элемента SRAF до элемента основной структуры).

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 минимальной возможностью пропечатки элементов SRAF (Рис.2).

Далее в главе производился анализ вклада допусков на параметры ФШ в литографическую погрешность с последующим определением фотошаблонной составляющей в предположении, что остальные компоненты являются известными [13; 15; 20].

Для определения допустимой литографической **погрешности совмещения** (OL) фотошаблонная компонента погрешности ($OL_{Photomask}$) в силу ее детерминированного характера линейно прибавляется к $OL_{Tool-to-Itself}$ (т.н. «допуску на совмещение установки относительно самой себя»), если совмещение и экспонирование производятся на одной и той же установке.

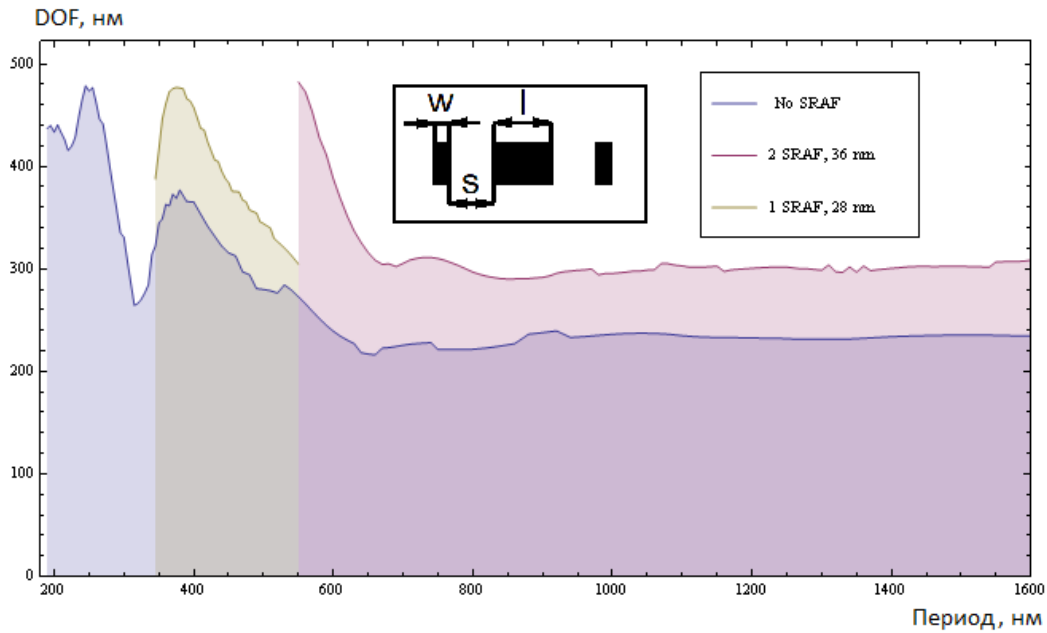


Рис. 2. Расчетная зависимость глубины фокуса от периода групповых линий в масштабе пластины после применения SRAF при использовании оптимального осветителя

Компонента погрешности совмещения, обусловленная конечной точностью размещения топологических элементов на фотошаблонах, может быть определена по формуле:

$$OL_{Photomask} = \sqrt{2(1-r)} \frac{R}{M}, \quad (2)$$

где R – точность расположения топологических элементов (3σ) в масштабе фотошаблона (фигурирующая в фотошаблонной спецификации как «**Registration**»), $M = 4$ – коэффициент масштабирования,

$$r = \frac{\sum_i (R1_i - \bar{R1})(R2_i - \bar{R2})}{\sqrt{\sum_i (R1_i - \bar{R1})^2} \sqrt{\sum_i (R2_i - \bar{R2})^2}} \quad (3)$$

линейный коэффициент корреляции ошибки расположения топологических элементов фотошаблонов совмещаемых литографических слоев, $R1_i$ и $R2_i$ – соответственно ошибки расположения топологических элементов рассматриваемых фотошаблонов в i -й контролируемой точке.

Практика показывает, что для фотошаблонов, изготовленных в одной партии на маскшопе с хорошо налаженным технологическим процессом, коэффициент r может достигать значения $0,6 \div 0,75$, и, стало быть, литографическая погрешность совмещения выражается следующим образом (при $r = 0,65$):

$$OL \approx OL_{Tool-to-Itself} + 0,83 \frac{R}{4}. \quad (4)$$

Для технологии уровня 65 нм ($OL \leq 18$ нм) требуемое значение R составит 14 нм в предположении того, что $OL_{Tool-to-Itself} = 15$ нм и $r = 0,65$ и 8,6 нм при $OL_{Tool-to-Itself} = 15$ нм и $r = 0$.

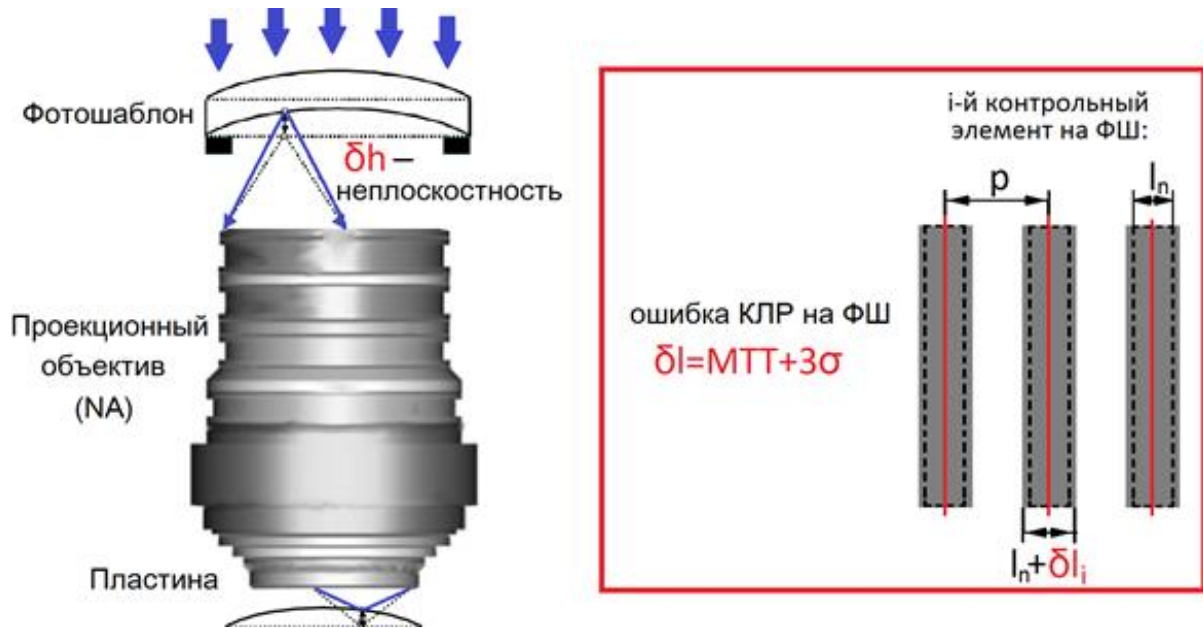


Рис. 3. Основные виды отклонений на ФШ, вызывающих потерю качества литографического процесса

Далее при помощи «полного» моделирования процесса проекционной литографии был оценен вклад **ошибки КЛР** на ФШ δl и **неплоскостности фотобланка** δh в бюджет литографических операций по глубине фокуса (Рис.3). В предположении распределения ошибки по гауссовому закону:

$$\delta l = MTT_{\delta l} + 3\sigma_{\delta l}, \quad (5)$$

где

$$MTT_{\delta l} = |\bar{l} - l_n| = \left| \frac{\sum l_i}{N} - l_n \right|, \quad (6)$$

$$3\sigma_{\delta l} = 3\sqrt{\frac{\sum (l_i - \bar{l})^2}{N}}. \quad (7)$$

Здесь N – общее количество контрольных структур [17], i – номер контрольной структуры, l_i – измеренный размер на i -й контрольной структуре фотобланка, l_n – номинальный размер контрольной структуры.

На Рис.4 показан основной принцип влияния ошибки критического линейного размера (КЛР) на ФШ (точнее, ее части $3\sigma_{\delta l}$, связанной с разбросом значений КЛР контрольных структур относительно среднего) и неплоскостности фотобланка δh на размер литографического процессного

окна. Лимит одновременного изменения размеров контрольных элементов ФШ $MTT_{\delta l}$ (общей компоненты) тесно связан с границами диапазона доз используемого резиста.

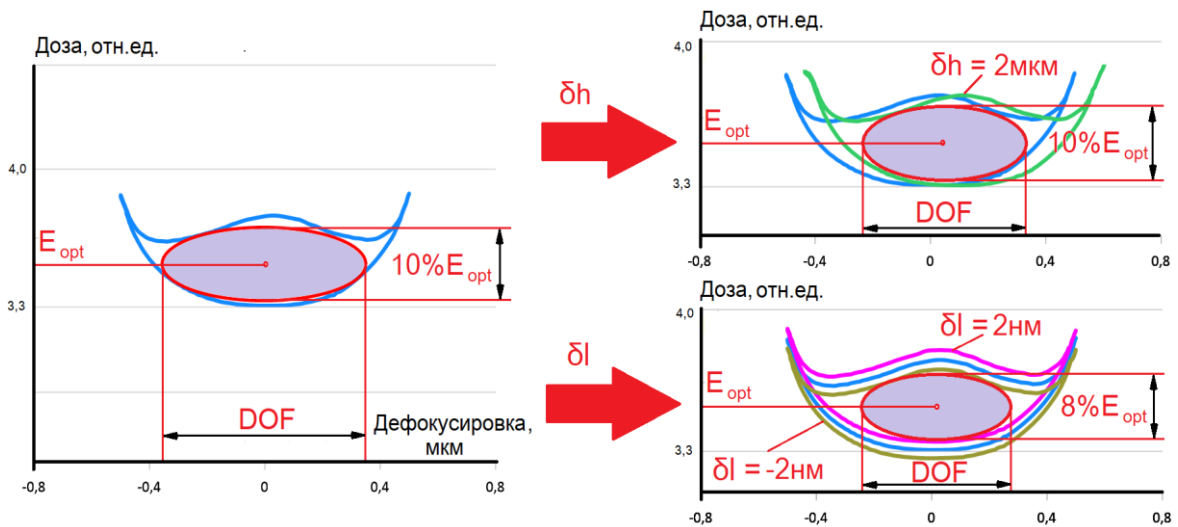


Рис. 4. Расхождение областей удовлетворительной пропечатки, обусловленное неплоскостью подложки ФШ и конечной остаточной компонентой ($3\sigma_{\delta l}$) ошибки КЛР на ФШ для периодических контрольных структур с периодом $p = 520$ нм и шириной темной линии (номинал) $l = 260$ нм, приводящее к уменьшению размеров литографического процессного окна. Требуемый литографический КЛР – $65 \text{ нм} \pm 5\%$, $M = 4$

Для составления оценочной фотошаблонной спецификации в части требований к неплоскостности подложки ФШ и допускам на критический линейный размер на ФШ была проведена серия многофакторных вычислительных экспериментов, реализующих моделирование формирования фоторезистивной маски одиночных и групповых линейчатых структур для некоторого диапазона величин дозы и дефокусировки, с анализом ширины суммарного окна процесса (КЛР = $65 \text{ нм} \pm 5\%$; $\text{DOF} \geq 200 \text{ нм}$ при $\text{EL} = 7\% E_{\text{opt}}$) при варьируемых факторах $MTT_{\delta l}$, $3\sigma_{\delta l}$ и δh .

Допустимые совместные значения компонент ошибки КЛР и неплоскостности фотобланка составили $MTT_{\delta l} \leq 5 \text{ нм}$, $3\sigma_{\delta l} \leq 2,7 \text{ нм}$, $\delta h \leq 250 \text{ нм}$, что демонстрирует сходство с данными, представленными в ITRS-2007. Столь низкое значение $3\sigma_{\delta l}$ обусловлено тем, что в составе тестовых рисунков использовались одиночные линии.

Глава 3 посвящена разработке процедуры размещения SRAF [3; 6] и калибровке оптических и фоторезистивных компактных моделей [8; 12], реализованных в САПР Mentor Graphics Calibre.

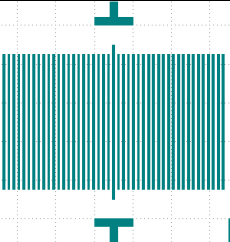
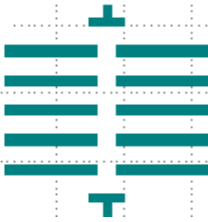
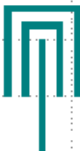
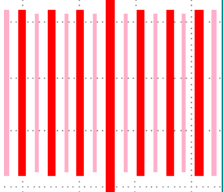
В целях настройки и калибровки оптической и фоторезистивной моделей, необходимых для расчета топологической коррекции затворного слоя, а также для уточнения правил расстановки структур SRAF, был

разработан калибровочный ФШ «LITHO90-65», включающий в свой состав ряд топологических модулей, в частности, модули «DENSE_LINES», «PULLBACKS», валидационный модуль «SLOTS» и модуль «SRAF_TEST», предназначенный для проверки правил расстановки SRAF на одиночных и периодических элементах топологии. Состав и назначение тестовых топологических модулей приведены в Таблице 1.

С использованием ФШ «LITHO90-65» были произведены пропечатки на сканере ASML PAS 5500/1150C с настройками, определенными в Главе 2. Оптические параметры фоторезистивного стека приведены в Таблице 2.

Экспозиции производились на предварительно подобранной «центральной» дозе, оптимальной для проработки «якорного» топологического элемента (19 мДж/см^2), а также с вариацией дозы в диапазоне $\pm 10\%$ с шагом 5% относительно «центрального» значения и дефокусировки в диапазоне $\pm 150 \text{ нм}$ с шагом 50 нм относительно предварительно настроенного «нуля». Измерения линейных размеров тестовых структур производились на CD-SEM «Hitachi CS4800».

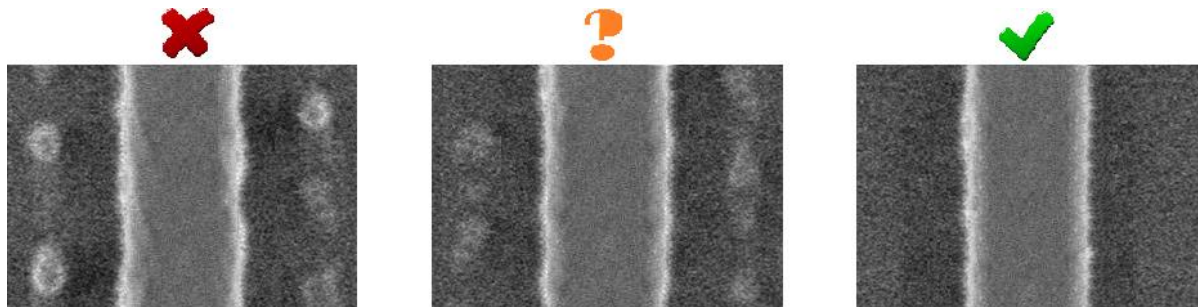
Таблица 1. Состав и назначение тестовых модулей ФШ «LITHO90-65»

Модуль	Состав	Вид ТС	Назначение
DENSE_LINES	Периодические («pitch») и изолированные («iso») линейчатые структуры с различными значениями ширины и периода линий		Калибровка и валидация оптической и фоторезистивной моделей
PULLBACKS	Структуры типа «встречные линии с зазором» («lineend», «dense_lineend») с различными значениями ширины зазора, ширины и периода линий		Калибровка и валидация оптической и фоторезистивной моделей
SLOTS	Двумерные структуры типа «шина в зазоре» с различными значениями ширины линии и зазора		Валидация фоторезистивной модели
SRAF_TEST	Изолированные и периодические линейчатые структуры, содержащие элементы SRAF		Проверка правил расстановки SRAF на одиночных и периодических элементах топологии

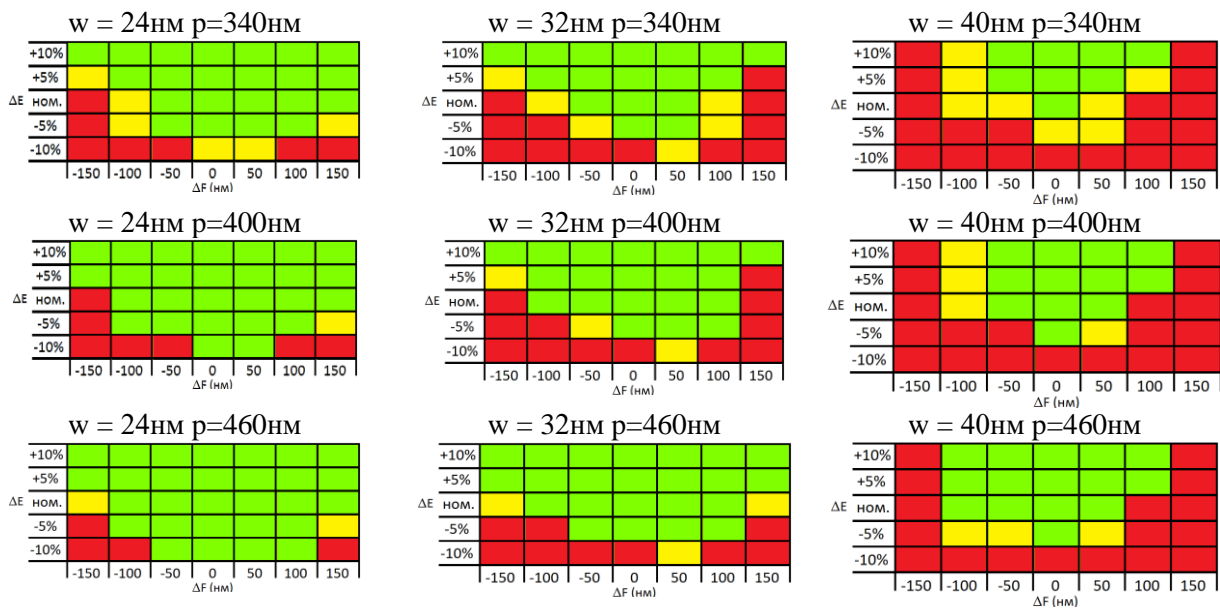
В процессе проверки и корректировки рекомендаций к параметрам SRAF исследовались структуры модуля «SRAF_TEST», полученные при описанных выше пропечатках ФШ «LITHO90-65».

Таблица 2. Оптические параметры фоторезистивного стека ($\lambda=193$ нм)

	Коэф. преломления, n	Коэф. поглощения, k	Толщина, t (нм)
Фоторезист	1,698	0,023	185 нм
BARC	1,82	0,34	75 нм
Подложка	1,6	3,97	-



а)



- удовлетворительный результат (пропечатки нет);
- приемлемый результат (незначительные следы в резисте);
- неудовлетворительный результат (полная или частичная пропечатка SRAF);

б)

Рис. 5. Результаты эксперимента по проверке первоначальных рекомендаций к параметрам SRAF (основная структура – периодические линии с шириной 80 нм и периодом 340÷460 нм, 1 SRAF в центре зазора – т.н. «полу-SRAF»): а) основная структура – периодические линии с шириной 80 нм и периодом 340 нм, 1 SRAF $w = 40$ нм в центре зазора: неудовлетворительный результат ($\Delta E = -5\%$ ном., $\Delta F = -100$ нм), приемлемый результат ($\Delta E = 0\%$ ном., $\Delta F = -50$ нм), удовлетворительный результат ($\Delta E = +5\%$ ном., $\Delta F = 0$ нм); б) экспериментально определенные процессные окна SRAF

На Рис.5 приведены результаты проведенных экспериментов в виде процессных окон SRAF в координатах «дефокусировка-доза» для некоторых структур модуля «SRAF_TEST». Ситуация, при которой структура SRAF оставляет следы при пропечатке в резисте или пропечатывается полностью, считается неудовлетворительным результатом. При незначительных следах SRAF в резисте результат может считаться приемлемым по причине их предположительно небольшого влияния на дальнейший процесс травления поликремния.

Все структуры в исследуемом модуле представляют собой линии (изолированные или периодические) шириной 80 нм. При анализе экспериментальных результатов рассматривались отдельно линии с периодом 340÷520 нм и одним элементом SRAF в центре зазора, линии с периодом 580 нм и одним элементом SRAF на каждую сторону основной структуры, а также изолированные линии.

Анализ экспериментальных результатов пропечатки тестового модуля «SRAF_TEST» позволил скорректировать и дополнить сформулированные ранее требования к параметрам непропечатываемых вспомогательных топологических структур SRAF следующим образом (все размеры приведены в масштабе пластины):

- $w = 24$ нм, расположение в центрах промежутков между основными линиями – для периода линий от 340 нм до 420 нм;
- $w = 32$ нм, расположение в центрах промежутков между основными линиями – для периода линий от 420 нм до 580 нм; $w = 24$ нм, $s = 120$ нм – для периодов линий от 580 нм до 620 нм;
- $w = 32$ нм, $s = 140$ нм – для расстояний между основными структурами от 540 до 620 нм;
- $w = 36$ нм, $s = 180$ нм – для расстояний между основными структурами от 620 нм и более, а также для краевых структур;
- расстояние между элементом SRAF и основной структурой, а также между соседними элементами SRAF не должно быть менее 90 нм (в частности, после проведения процедуры OPC)
- максимальная ширина элемента основной топологии, для которого ставится SRAF, – 200 нм.

Структуры тестового модуля «SRAF_TEST», показывающие удовлетворительные результаты в рассматриваемых диапазонах дозы и дефокусировки, было рекомендовано учесть при калибровке полуэмпирической фоторезистивной модели VT5.

Для поиска оптимальных значений параметров «beamfocus», «def_start» и др. была проведена калибровка оптической модели на «прямых» и инвертированных тестовых структурах типа «pitch», «lineend», «dense_lineend». Всего использовалось 500 структур, из них калибровка проводилась на 400 структурах, а 100 структур предназначались для валидации. Для моделирования контура ФРМ использовалась модель с постоянным порогом, соответствующим номинальному значению дозы для наилучшей проработки «якорного» элемента топологии ($\Omega = 0,3408$). Поиск оптимальных параметров производился методом полного перебора. Минимизировалась взвешенная среднеквадратичная ошибка моделирования:

$$errRrms_{CD} = \sqrt{\frac{\sum_i PCW_i \frac{\sum_j W_{i,j} (CD_{Sim} - CD_{Meas})^2}{\sum_j W_{i,j}}}{\sum_i PCW_i}}, \quad (8)$$

где суммирование производится как по тестовым структурам (j), так и по условиям процесса (i), PCW_i – весовой коэффициент i -х условий технологического процесса, $W_{i,j}$ – весовой коэффициент j -й тестовой структуры для i -х условий процесса. В настоящей работе весовые коэффициенты тестовых структур подбирались методом экспертных оценок.

Максимальное значение $errRrms_{CD}$ в результате калибровки оптической модели с использованием постоянного порога составило 10,058 нм. Значение $errRrms$ на верификационном множестве составило 13,493 нм, что было признано приемлемым. Оптимизированные параметры оптической модели приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Параметры оптической модели после оптимизации

$\Delta\sigma_{внеш}$	0,019
$\Delta\sigma_{внутр}$	0,012
$\Delta\alpha$	0,011
Вид модели	векторная
Оптический диаметр	1,310 мкм
Число ядер SOCS	11
Разрешение сетки ядер SOCS	0,007
Значение параметра «beamfocus»	0,091 мкм
Значение параметра «def_start»	0,11 мкм
Количество уровней дефокусировки	1

Компактная фоторезистивная модель VT5, используемая в данной работе, представляется в виде полинома:

$$\begin{aligned}
 T(I_{\max}, I_{\min}, Slope, Factor) = & \\
 = a_0 + a_1 I_{\max} + a_2 I_{\min} + a_3 Slope + a_4 Factor + a_{11} I_{\max}^2 + a_{22} I_{\min}^2 + & \\
 + a_{33} Slope^2 + a_{44} Factor^2 + a_{12} I_{\max} I_{\min} + a_{13} I_{\max} Slope + & \\
 + a_{14} I_{\max} Factor + a_{23} I_{\min} Slope + a_{24} I_{\min} Factor + a_{34} Slope Factor &
 \end{aligned} \quad (9)$$

где T – пороговое значение интенсивности освещения для фоторезиста (определяется экспериментально при отсеме тестовых структур калибровочной матрицы); I_{\max} – максимальное значение интенсивности; I_{\min} – минимальное значение интенсивности; $Slope$ – значение первой производной интенсивности в точке размещения ребра фрагмента в топологическом рисунке; $Factor$ – значение второй производной интенсивности в точке размещения ребра фрагмента в топологическом рисунке, a_0, \dots, a_{34} (всего 15 шт.) – калибруемые коэффициенты фоторезистивной модели. Ядра свертки не используются.

Необходимость снижения количества измерений при калибровке фоторезистивной модели ставит задачу определения оптимального набора подлежащих измерению структур. Оптимальная выборка должна максимально охватывать пространство параметров оптического изображения наименьшим количеством тестовых структур, достаточным для адекватной калибровки компактной модели формирования контура ФРМ. В качестве верификационного множества выбиралось 50 двумерных тестовых структур из модуля «SLOTS», для которых из SEM-снимков были экстрагированы контуры с использованием модуля SEMCal САПР Mentor Graphics Calibre, после чего для каждой структуры в 5-ти точках полученного контура измерялось значение EPE^{Meas} . Помимо этого, таким же образом для промоделированного контура ФРМ той же структуры измерялось значение EPE^{Sim} . В этом случае взвешенная среднеквадратичная ошибка моделирования $errRrms_{EPE}$ определяется по формуле (8) (с тем отличием, что вместо CD_{Sim} и CD_{Meas} используются значения EPE). Характеристикой точности откалиброванной модели в данном случае служило значение $errRrms_{EPE}$ с весовыми коэффициентами, определяемыми методом экспертных оценок, на верификационном множестве тестовых структур.

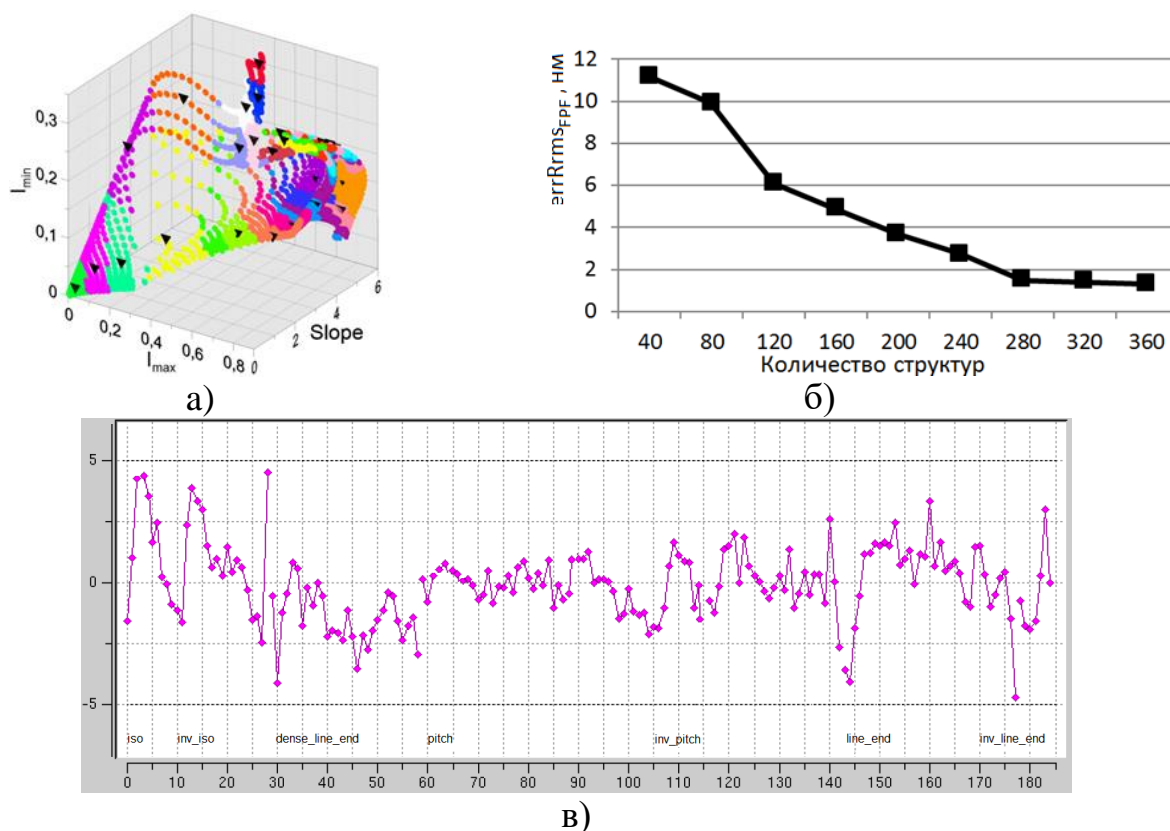


Рис. 6. Калибровка и верификация модели VT5: а) кластеризация точек в пространстве параметров изображения (точка соответствует одной тестовой структуре); б) зависимость $errRms_{EPE}$ модели VT5 на верификационном множестве от числа структур калибровочных выборок, сформированных посредством кластеризации множества параметров изображения методом k-средних; в) различие между измеренными и промоделированными линейными размерами тестовых структур калибровочного множества ($CD_{Sim} - CD_{Meas}$, выборка – 190 структур)

Таблица 4. Значения коэффициентов модели VT5. Калибровка по 320 ТС (выборка при помощи кластеризации методом k-средних)

Коэффициент	Значение
a_0	0,508245
a_1	-0,0978258
a_2	0,124958
a_3	0,046329
a_4	0,00152032
a_{11}	-0,118414
a_{22}	0,0985023
a_{33}	0,000987581
a_{44}	-0,0171112
a_{12}	-0,0712726
a_{13}	0,046749
a_{14}	0,00238269
a_{23}	-0,0254777
a_{24}	-0,0182512
a_{34}	-0,00156329

Таблица 5. Основные требования к базовой процедуре расстановки структур SRAF для двумерной топологии затворного слоя технологии проектных норм 65 нм (размеры в масштабе пластины)

Правило	Значение
основные правила расстановки	
для зазора 260÷340 нм	w = 24 нм, 1 SRAF в центре
для зазора 340÷500 нм	w = 32 нм, 1 SRAF в центре
для зазора 500÷540 нм	w = 24 нм, s = 120 нм
для зазора 540÷620 нм	w = 32 нм, s = 140 нм
для зазора более 620 нм	w = 36 нм, s = 180 нм
дополнительные требования к характерным размерам	
мин. размер ребра фигуры осн. топологии, для которой ставится SRAF	300 нм
макс. ширина фигуры, для которой ставится SRAF	200 нм
мин. зазор между углом SRAF и ребром фигуры осн. топологии	80 нм
мин. зазор между углом SRAF и углом фигуры осн. топологии	120 нм
мин. зазор между углами примыкающих SRAF	90 нм
мин. зазор между углами и ребрами примыкающих SRAF	70 нм
мин. зазор между параллельными SRAF	90 нм
мин. длина SRAF	140 нм
мин. расстояние между концами встречных совмещенных SRAF, необходимое для слияния	120 нм
пересечения и угловые SRAF	запрещены

В ходе исследования формировались различные наборы данных, включающие от 40 до 360 калибровочных структур с шагом 40. При отборе точек необходимо обеспечить максимальный охват области пространства параметров воздушного изображения. Провести такую фильтрацию позволяет кластерный анализ: точки пространства группируются в кластеры, в каждом из которых геометрически выбирается одна точка-центроид (Рис.6а), соответствующая которой тестовая структура и учитывается при калибровке.

Далее с использованием результатов предварительного моделирования, проведенного в Главе 2, результатов экспериментов по пропечатке тестовых структур, двумерного моделирования с применением откалиброванной фоторезистивной модели, а также правил MRC, формулируемых, в частности, на основе требований составленной в Главе 2 фотошаблонной спецификации, была разработана **базовая процедура** расстановки элементов SRAF, которая в дальнейшем может быть скорректирована с учетом индивидуальных особенностей производимых изделий или используемых в их составе библиотечных

элементов. Основные требования к базовой процедуре расстановки SRAF приведены в Таблице 5.

В Главе 4 производилась оптимизация параметров OPC-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 целесообразно по причине большой размерности вектора параметров OPC-рецепта и их взаимосвязи.

Предложено два вида оценочной функции и, соответственно, два подхода к расчету ее значения.

Первый подход (EPE_RMS) построен на анализе распределения величины EPE, которая характеризует ошибку размещения ребер фрагментов в смоделированном контуре, вычисляемую в контрольных точках (Рис.7а). При таком подходе для определения количественного показателя эффективности комбинации параметров OPC-рецепта F использовалось среднее квадратическое отклонение величины EPE, вычисляемое по формуле:

$$F = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k EPE_i^2}, \quad (10)$$

где k – количество фрагментов, сформированных на этапе фрагментации топологии; EPE – значение ошибки размещения ребра фрагмента в контрольной точке.

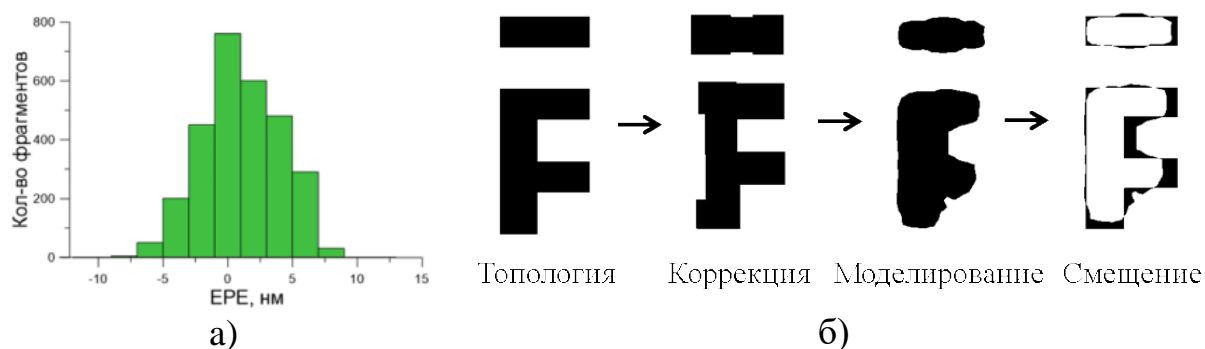


Рис. 7. Подходы к методике оценки эффективности OPC-рецепта: а) анализ распределения величины EPE; б) анализ площади фигуры смещения смоделированного контура

Альтернативный подход (SQUARE) подразумевает рассмотрение в качестве F площади фигуры, описывающей смещение смоделированного контура, относительно исходного топологического рисунка (Рис.7б). Область смещения состоит из конечного числа многоугольников, площадь

которых может быть вычислена с помощью формулы Гаусса (формулы шнурования):

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^{k-1} x_{i,j} y_{i,j+1} + x_{i,k} y_{i,1} - \sum_{j=1}^{k-1} x_{i,j+1} y_{i,j} - x_{i,1} y_{i,k} \right|, (11)$$

где n – общее количество многоугольников; k – количество вершин i -го многоугольника; x, y – координаты вершин i -го многоугольника.

Оба подхода дают усредненную оценку качества используемого рецепта, поэтому в общем случае рекомендуется применять их в комбинации с проверкой соблюдения заданных допусков на размеры.

На этапе подготовки входных данных была произведена настройка оптической и фоторезистивной моделей в соответствии с результатами Главы 3, кроме того, был сформирован комплект тестовых топологий.

По причине большого разнообразия конфигураций применяемых топологических структур и малопредсказуемого характера построения реальной топологии, использовался комплект тестовых топологий случайной конфигурации [18] (Рис.8), основными требованиями к которому являются:

- максимальное разнообразие структур;
- вариативность параметров, определяющих дизайн структур;
- имитация реалистичного дизайна топологии;
- соответствие правилам проектирования.

Тестовый комплект содержит 7 топологий. Диапазоны вариации «периода» и ширины топологической структуры составляют 190÷420 нм и 80÷120 нм соответственно. Габаритные размеры топологий 10x10 мкм.

Наиболее эффективным подходом при решении подобных задач является применение метаэвристических методов, позволяющих найти адекватное решение за приемлемое время. Для оптимизации ОРС-рецепта в данной работе использовался один из таких методов – метод дифференциальной эволюции, относящийся к генетическим алгоритмам.

К основным преимуществам выбранного метода можно отнести:

- отсутствие ограничений, связанных с видом целевой функции и размерностью вектора аргументов;
- отсутствие необходимости кодирования переменных;
- способность динамически моделировать особенности рельефа целевой функции;

- способность быстро проходить вытянутые овраги различной формы и обеспечивать эффективность поиска даже в случае сложного рельефа;
- простота реализации и возможности эффективной параллелизации вычислений.

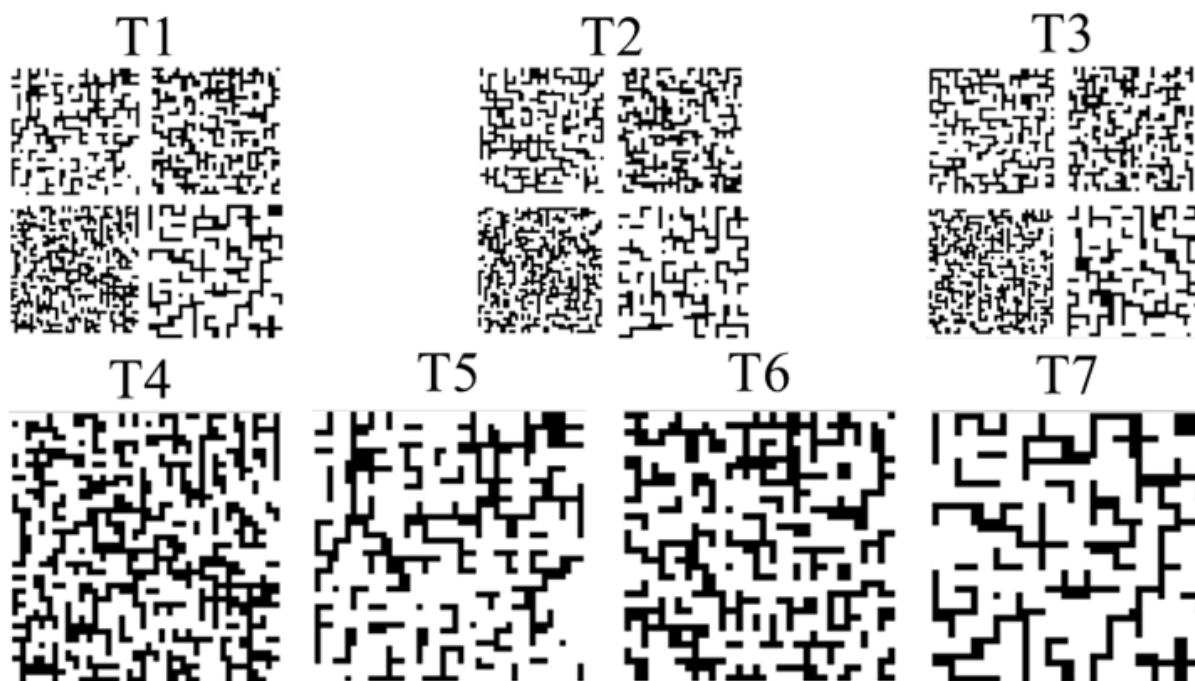


Рис. 8. Комплект тестовых топологий для оптимизации параметров ОРС-рецепта

Анализ характерных особенностей метода дифференциальной эволюции показывает целесообразность применения его в условиях недостаточности информации о виде и свойствах целевой функции, поэтому было принято решение о его использовании в основе алгоритма оптимальной настройки параметров ОРС-рецепта.

Обобщенная схема алгоритма оптимальной настройки ОРС-рецепта с применением метода дифференциальной эволюции представлена на Рис. 9. В качестве особи популяции выступает комбинация значений калибруемых параметров ОРС-рецепта, каждое из которых определяет один из генов особи. Работа алгоритма прерывается когда выполнен один из заданных критериев остановки:

- нахождение оптимального значения с заданной точностью;
- превышение лимита на количество поколений;
- превышение лимита на время моделирования;

- превышение лимита на количество вычислений целевой функции;
- превышение лимита на число попыток улучшения значения целевой функции;
- деградация популяции.

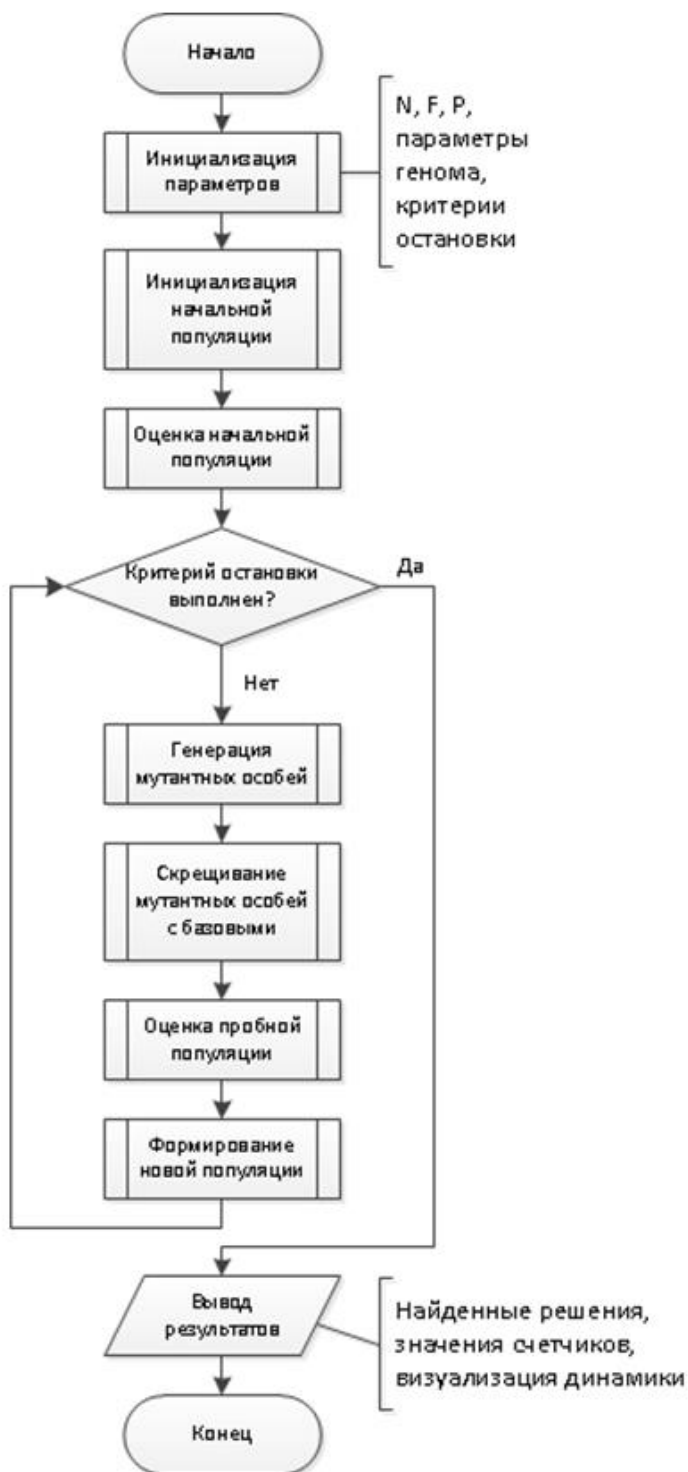


Рис. 9. Обобщенная схема алгоритма оптимальной настройки ОРС-рецепта

Под оценкой популяции подразумевается анализ приспособленности особей, т.е. вычисление показателя эффективности ОРС-рецепта для соответствующей комбинации значений параметров.

Алгоритм использует разработанные методы оценки эффективности ОРС-рецепта, для реализации которых применяются специализированные программные модули платформы Calibre, выполняющие моделирование, подготовку статистических данных и генерацию промежуточных топологических файлов, а также пользовательские скрипты, обрабатывающие результаты и производящие вычисление целевой функции. После настройки параметров алгоритма на тестовой топологии T1 выполнен поиск наилучших параметров рецепта для каждой тестовой топологии с применением двух предложенных видов целевой функции и произведена оценка эффективности каждого из полученных рецептов. Ее результаты показаны в Таблицах 6 и 7.

Таблица 6. Сравнительная оценка настроенных рецептов по методике EPE_RMS

№	T	F(D), нм	F(DE_S), нм	F(DE_U), нм
1	T1	9,260	5,285 (-43%)	5,285 (-43%)
2	T2	9,260	5,285 (-43%)	5,331 (-42%)
3	T3	9,391	5,331 (-43%)	5,331 (-43%)
4	T4	12,164	7,861 (-35%)	7,861 (-35%)
5	T5	8,854	3,959 (-55%)	4,141 (-53%)
6	T6	6,786	3,429 (-49%)	3,429 (-49%)
7	T7	6,182	1,852 (-70%)	1,979 (-68%)

Таблица 7. Сравнительная оценка настроенных рецептов по методике SQUARE

№	T	F(D), мкм ²	F(DE_S), мкм ²	F(DE_U), мкм ²
1	T1	2,322	1,696 (-27%)	1,696 (-27%)
2	T2	2,413	1,789 (-26%)	1,795 (-26%)
3	T3	2,403	1,720 (-28%)	1,722 (-28%)
4	T4	0,903	0,716 (-21%)	0,726 (-20%)
5	T5	0,532	0,319 (-38%)	0,331 (-38%)
6	T6	0,553	0,426 (-23%)	0,433 (-22%)
7	T7	0,335	0,195 (-42%)	0,206 (-39%)

Обозначения в Таблицах 6 и 7: T – тестовая топология; F(D) – эффективность исходного рецепта; F(DE_S) – эффективность специфичного для топологии рецепта, полученного путем поиска оптимальных параметров с помощью разработанного алгоритма; F(DE_U)

– эффективность универсального рецепта, полученного путем поиска оптимальных параметров с помощью разработанного алгоритма. В скобках показан прирост эффективности относительно исходного рецепта. Универсальным считается рецепт с оптимальными параметрами, найденными с использованием топологии T1 при наилучших параметрах алгоритма. Параметры исходного рецепта имеют значения, типичные для OPC-рецепта технологии уровня 90 нм.

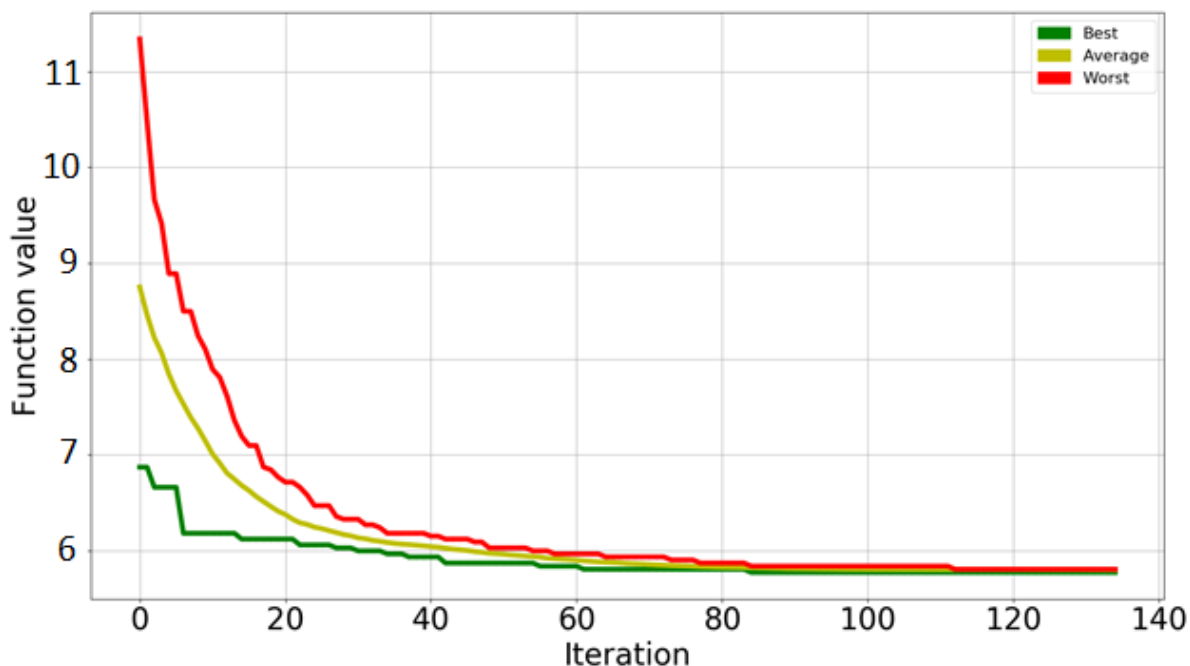


Рис. 10. Динамика изменения значения целевой функции при поиске оптимальных параметров OPC-рецепта для топологии T1 с применением методики EPE_RMS

Анализ результатов показывает, что применение разработанного алгоритма позволяет повысить эффективность исходного рецепта более чем на 35% в случае использования методики оценки решения EPE_RMS и более чем на 20% с использованием методики SQUARE. Кроме того, 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.

На Рис.10 приведены графики динамики изменения лучшего, среднего и худшего по популяции значения целевой функции для эксперимента по поиску оптимального OPC-рецепта для топологии T1. Установлено, что для отдельных параметров значения сходятся к границам соответствующих допустимых диапазонов, для других – стремятся к определенному значению или интервалу.

Разработанные алгоритмы оптимальной настройки OPC-рецепта реализованы в виде программного средства «OPC Optimizer», на которое получено свидетельство РФ о регистрации программы для ЭВМ.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Основные результаты и выводы

Основные результаты и выводы диссертационной работы формулируются следующим образом:

1. На базе выполненных обзорно-аналитических исследований показано, что задача исследования эффектов оптической близости, а также разработки и оптимизации методов их коррекции является в настоящее время актуальной и необходимой для решения научно-технических проблем, стоящих перед отечественной микроэлектроникой.

2. В процессе исследований для расчета параметров проекционной системы сканера ASML PAS 5500/1150C, требуемых при литографии затворных слоев проектных норм 65 нм, а также параметров структур SRAF 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).

3. 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.

4. С применением «полного» моделирования процесса проекционной фотолитографии исследован вклад допусков на параметры фотошаблона в литографическую погрешность, что в результате позволило составить оценочную спецификацию на фотошаблон (ФШ) затворного слоя технологии проектных норм 65 нм.

5. Разработан и изготовлен калибровочный ФШ, включающий в свой состав ряд тестовых модулей, предназначенных для калибровки оптической и компактной фоторезистивной модели с переменным порогом, а также для проверки правил расстановки структур SRAF на одиночных и периодических элементах топологии.

6. С использованием результатов пропечаток тестовых структур ФШ откалибрована оптическая модель. Для моделирования контура фоторезистивной маски использовалась модель с постоянным порогом по интенсивности, соответствующим номинальному значению дозы для наилучшей проработки «якорного» элемента топологии ($\Omega = 0,3408$; критический линейный размер (КЛР) на ФШ: $l = 320$ нм; период на ФШ: $p = 760$ нм; КЛР в резисте: 80 нм). Поиск оптимальных параметров производился методом полного перебора. Максимальное значение среднеквадратичной ошибки в результате калибровки оптической модели с использованием постоянного порога составило 10,058 нм. Значение среднеквадратичной ошибки на верификационном множестве составило 13,493 нм.

7. С использованием результатов пропечаток тестовых структур ФШ откалибрована фоторезистивная модель с переменным порогом, исследованы ее точность и стабильность. Калибровочная выборка формировалась методом кластерного анализа (к-средних) в пространстве параметров оптического изображения используемых калибровочных структур. Исследована достаточность калибровочной выборки для корректной калибровки компактной фоторезистивной модели. При оптимальном числе калибровочных структур (300÷350) значение взвешенной среднеквадратичной ошибки моделирования на верификационном множестве составило 1,5 нм.

8. Разработаны основные требования к базовой процедуре расстановки структур SRAF для затворного слоя технологии проектных норм 65 нм в применении к двумерным топологиям с учетом результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

9. На базе метода дифференциальной эволюции разработан эвристический алгоритм оптимальной настройки параметров OPC-рецепта.

10. Для исследования эффективности разработанного алгоритма проведена серия вычислительных экспериментов по оптимальной настройке OPC-рецепта. Анализ результатов исследования показывает, что применение разработанного алгоритма позволяет значительно повысить эффективность рецепта (от 20% до 35% относительно исходного рецепта в зависимости от выбора целевой функции). Кроме того, 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.

11. Разработано программное средство, позволяющее выполнять настройку OPC-рецепта с помощью предложенного алгоритма, а также решать другие оптимизационные задачи в рамках разработки OPC-решения.

Основным результатом диссертационной работы является разработка научно-технических основ и методов нахождения оптимальных решений задачи коррекции эффектов оптической близости для критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 65 нм и их внедрение в состав информационной системы проектирования фотошаблонов. Предложенные методы сохраняют основную последовательность этапов разработки OPC-решения для технологий более продвинутых проектных норм, что значительно облегчает переход к следующим поколениям технологического процесса производства СБИС.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Иванов В.В. Разработка OPC-модели для технологии уровня 65 нм / В.В. Иванов, А.В. Колобов[et al.] // 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. Медведев К.А. Алгоритм и методика повышения эффективности рецепта коррекции эффектов оптической близости / К.А. Медведев, А.В. Кузовков, В.В. Иванов // Труды научного совета РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для ее создания». – 2019. – Vol. 1(3). – Р. 122-130.
5. Балан Н.Н. Место фазосдвигающих фотошаблонов в современной полупроводниковой технологии / Н.Н. Балан, В.В. Иванов[et al.] // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2019. – № 2(174). – Р. 54-63.
6. Генерация Rule-based SRAF для двумерных топологических структур с учетом правил MRC: проблемы и решения / Е.С. Шамин, Е.В. Ипатова[et al.] // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2019. – № 2(174). – Р. 36-41.

7. Балан Н.Н. Форма осветителя как ключевой фактор при разработке методик дифракционной коррекции изображения в проекционной фотолитографии для технологий уровня 65 нм и менее / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.В. Кузовков // HOLOEXPO 2019. XVI Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям. Тезисы докладов. – 2019. – Р. 208-215.
8. Основные подходы к моделированию формирования фоторезистивной маски в вычислительной литографии / Н.Н. Балан, В.В. Иванов[et al.] // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2019. – № 22(4). – Р. 279-289.
9. Балан Н.Н. Методы повышения разрешающей способности проекционной оптической литографии в полупроводниковой технологии современных проектных норм / Н.Н. Балан, В.В. Иванов[et al.] // Сборник тезисов докладов IX Международной конференции по фотонике и информационной оптике, 29-31 января 2020 года, Москва, НИЯУ МИФИ. – 2020. – Р. 575-576.
10. Балан Н.Н. Расчет форм осветителя для литографических процессов технологии уровня 65 нм / Н.Н. Балан, В.В. Иванов[et al.] // Сборник тезисов докладов IX Международной конференции по фотонике и информационной оптике, 29-31 января 2020 года, Москва, НИЯУ МИФИ. – 2020. – Р. 237-238.
11. Использование нейросетевых алгоритмов в задачах вычислительной литографии / В.В. Иванов, Н.Н. Балан[et al.] // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-2. – Р. 543-548.
12. 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.
13. Методики расчета вклада допусков на критические линейные размеры и точность размещения элементов рисунка фотошаблона в бюджеты литографических операций / Н.Н. Балан, В.В. Иванов[et al.] // XII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе в рамках XIII Международной конференции “Кремний 2020”, Сборник тезисов. Республика Крым, 21-25 сентября 2020 г. – 2020. – Р. 297-299.
14. Балан Н.Н. Современные методики RET как средство повышения качества литографического изображения в технологиях предыдущих поколений / Н.Н. Балан, В.В. Иванов[et al.] // Наноиндустрия. – 2020. – Vol. 13. – № S5-1 (102). – Р. 243-245.
15. 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.

16. Харченко Е.Л. Разработка и применение экспресс-метода для увеличения окна литографического процесса / Е.Л. Харченко, Е.С. Шамин[et al.] // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-2. – Р. 730-732.
17. 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.
18. Ипатова Е.В. Разработка методики оценки стабильности ОРС-решения / Е.В. Ипатова, В.В. Иванов, Е.С. Шамин // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-2. – Р. 623-626.
19. Балан Н.Н. Определение оптимальных параметров литографического стека и осветителя при разработке ОРС 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.
20. Балан Н.Н. Метод расчета допусков на критические линейные размеры и точность размещения элементов рисунка фотошаблонов для проекционной фотолитографии / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.Л. Панкратов // Сборник тезисов докладов X Международной конференции по фотонике и информационной оптике, 27-29 января 2021 года, Москва, НИЯУ МИФИ. – 2021. – Р. 393-394.