

АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»

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

Диссертация на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук
ГОРНЕВ Евгений Сергеевич

Научный консультант:
кандидат технических наук
БАЛАН Никита Николаевич

Москва – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ КОРРЕКЦИИ ЭФФЕКТОВ ОПТИЧЕСКОЙ БЛИЗОСТИ В ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ	21
1.1. Подходы к повышению разрешающей способности проекционной фотолитографии	21
1.1.1. Использование рабочего излучения с меньшей длиной волны ...	22
1.1.2. Увеличение числовой апертуры проекционных объективов	24
1.1.3. Технические приемы, направленные на минимизацию значения коэффициента k_1	27
1.1.3.1. Внеосевое освещение фотошаблона	30
1.1.3.2. Применение фазосдвигающих фотошаблонов	36
1.1.3.3. Топологическая коррекция фотошаблона с целью компенсации паразитных дифракционных эффектов (эффектов «оптической близости»)	42
1.2. Основные подходы к моделированию процессов переноса изображения с фотошаблона в фоторезист в проекционной фотолитографии	52
1.2.1. Методы расчета оптического изображения	54
1.2.2. Применение «компактных» моделей при расчете контура ФРМ для полноразмерной топологии изделия.....	61
1.3. Требования к параметрам литографических операций	68
1.4. Современные коммерческие САПР, используемые для исследования и коррекции эффектов оптической близости при разработке литографических процессов и проектировании фотошаблонов	70
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	75

Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОРС-РЕШЕНИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ФШ	76
2.1 Исходные данные	76
2.2. Подбор оптимальных настроек проекционной системы.....	78
2.3. Предварительное определение параметров непропечатываемых вспомогательных структур (SRAF).....	84
2.4. Разработка спецификации на ФШ	87
2.4.1. Основные требования, содержащиеся в спецификации на фотошаблон для проекционной фотолиитографии современных проектных норм.....	87
2.4.2. Формирование допусков на параметры литографических операций. Вклад фотошаблонной составляющей	91
2.4.2.1. Точность совмещения.....	91
2.4.2.2. Требования к глубине фокуса и допускам на литографический КЛР	94
2.4.2.3. Требования к фазовому слою ФШ	99
2.4.3. Типовая оценочная спецификация на ФШ критических литографических слоев для технологии проектных норм 65 нм .	102
Выводы по Главе 2	103
Глава 3. РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУР РАССТАНОВКИ SRAF И КАЛИБРОВКА КОМПАКТНЫХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТУРА ФОТОРЕЗИСТИВНОЙ МАСКИ.....	104
3.1. Разработка калибровочного фотошаблона и изготовление тестовых структур	104
3.2. Проверка и коррекция рекомендаций к параметрам SRAF по результатам пропечатки тестового модуля «SRAF_TEST»	110
3.3. Настройка оптической и фоторезистивной моделей.....	116
3.3.1. Настройка оптической модели.....	116

3.3.2. Сбор экспериментальных данных, калибровка и валидация «компактной» модели (VT5) формирования контура фоторезистивной маски	124
3.4. Разработка базовой процедуры расстановки непропечатываемых вспомогательных элементов (SRAF).....	129
3.4.1. Определение первоначальных принципов размещения элементов SRAF	130
3.4.2. Дополнительные топологически обусловленные ограничения	130
3.4.3. Основные параметры базовой процедуры расстановки структур SRAF для двумерной топологии затворного слоя.....	134
Выводы по Главе 3	137
Глава 4. ОПТИМИЗАЦИЯ OPC-РЕЦЕПТА ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ СЛОЕВ СБИС ПРОЕКТНЫХ НОРМ 65 нм	140
4.1. Основные настраиваемые параметры OPC-рецепта.....	140
4.2. Алгоритм настройки параметров OPC-рецепта на основе оптимизационных методов	142
4.2.1. Формализация задачи оптимального выбора параметров OPC- рецепта	142
4.2.2. Выбор метода оптимизации.....	147
4.2.3. Схема алгоритма оптимального выбора параметров OPC-рецепта	152
4.3. Определение оптимальных параметров OPC-рецепта в соответствии с разработанным алгоритмом.....	155
4.4. Разработка программного средства автоматизированной настройки OPC- рецепта	164
4.4.1. Требования к программному средству	164
4.4.2. Структурная схема программного средства автоматизированной настройки OPC-рецепта	165

4.4.3. Графический пользовательский интерфейс программного средства автоматизированной настройки OPC-рецепта.....	167
Выводы по Главе 4	171
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	172
ЛИТЕРАТУРА.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Параметры резиста, использованные для «полного» моделирования формирования ФРМ при определении требований фотошаблонной спецификации затворного слоя проектных норм 65 нм (п.2.4)	187
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Конфигурационный файл настроек оптической модели затворного слоя проектных норм 65 нм для САПР Mentor Graphics Calibre (п.3.3.1)	189
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Конфигурационный файл настроек компактной фоторезистивной модели затворного слоя проектных норм 65 нм для САПР Mentor Graphics Calibre (п.3.3.2)	191
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Скрипт базовой процедуры расстановки SRAF затворного слоя проектных норм 65 нм для САПР Mentor Graphics Calibre (инструмент OPCsbar) на языке SVRF	193
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Пример конфигурационного файла OPC-рецепта с оптимизированными настроечными параметрами для затворного слоя технологии проектных норм 65 нм в формате САПР Mentor Graphics Calibre.....	196
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Акты о внедрении и использовании результатов работы и авторские свидетельства	199

ВВЕДЕНИЕ

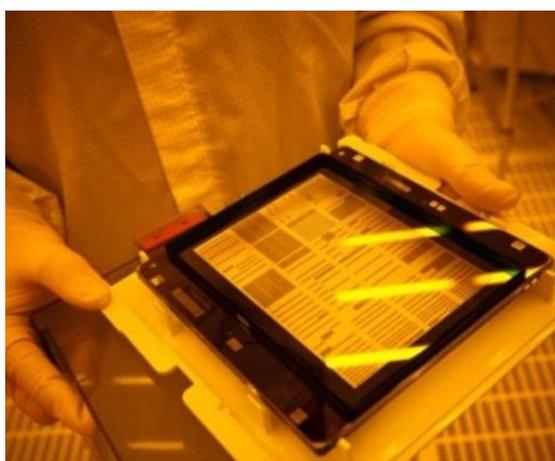
Актуальность проблемы

Начиная с последних десятилетий XX века микроэлектроника развивается крайне высокими темпами, фактически перейдя к настоящему времени в область наноразмеров. Стремительный рост основных показателей электронной техники происходит в значительной мере за счет совершенствования инструментария проекционной фотолитографии, важным элементом которого является фотошаблон (ФС), содержащий топологический рисунок одного или нескольких литографических слоев производимой интегральной схемы (ИС). Литографическая установка производит проекционный перенос этого рисунка с фотошаблона в слой фоторезиста на полупроводниковой пластине, формируя фоторезистивную маску (ФРМ), в свою очередь являющуюся основой для формирования активных, диэлектрических или коммутационных слоев будущей схемы.

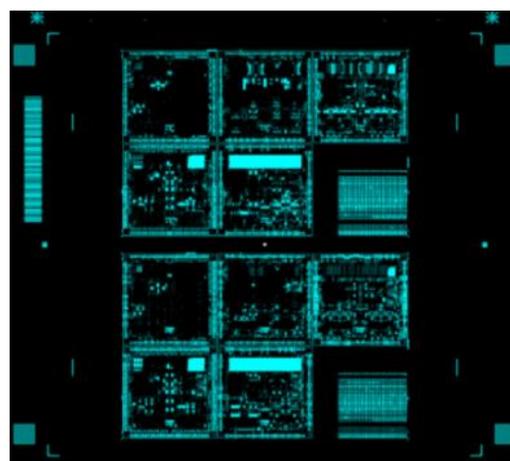
Освоение новых проектных норм микроэлектронного производства требует уменьшения размера полупериода структур, переносимых на полупроводниковую пластину. Это достигается применением излучателей с меньшей длиной волны, совершенствованием технических характеристик проекционных объективов, а также рядом 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 для получения на пластине 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 менее длины волны рабочего излучения, хотя и с рядом ограничений на их конфигурацию.



а)



б)



в)

Рис. В.1. Сканер PAS 5500/1150C (ASML) (а), реализующий процесс проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолетовом излучении ($\lambda = 193$ нм). Внешний вид (б) и топология (в) типового фотошаблона, используемого в производстве СБИС

Фотошаблоны, применяемые в современных установках проекционной фотолитографии (Рис. В.1), 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.

Для производства интегральных схем с проектными нормами 180-250 нм необходим комплект из 20-40 фотошаблонов различных классов или «групп качества», выражающих технические требования, предъявляемые к ФШ в части точности воспроизведения рисунка, материала подложки и маскирующих слоев, дефектности и т.д. В случае более продвинутых проектных норм количество используемых шаблонов обычно увеличивается, в частности, за счет увеличения количества «критических» литографических слоев (с наиболее строгими требованиями к параметрам литографического процесса) и, соответственно, добавления в комплект более сложных ФШ с высокими группами качества. Чем выше группа качества шаблона, тем более жесткие требования предъявляются к процессу его производства и, соответственно, – тем выше его цена. Таким образом, с каждым новым уровнем технологии цена комплекта увеличивается в среднем в 1,5-2 раза, достигая величин порядка 1 млн. долл. для проектных норм 28 нм. Разработка корректной спецификации на ФШ представляется необходимым условием достижения приемлемого качества литографических операций и во многом позволяет избежать дополнительных расходов.

Переход на более продвинутые проектные нормы неизбежно сопровождается дальнейшим усложнением процесса проектирования фотошаблонов, как минимум, по причине применения новых поколений OPC-решений¹, имеющих значительно более сложные входные и выходные данные и, соответственно, являющихся более требовательными к

¹ OPC – Optical Proximity Correction или коррекция оптической близости. Под OPC-решением подразумевается совокупность моделей, алгоритмов и программных средств для их применения, позволяющих реализовать коррекцию оптической близости

вычислительным ресурсам. 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 и применения 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 в рамках текущих технологий, 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 исследования

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 OPC-рецепта, предназначенного для процедуры коррекции оптической близости затворного слоя технологии проектных норм 65 нм.

Методы исследования

При решении поставленных задач были использованы методы структурного программирования. При калибровке моделей формирования фоторезистивной маски использовались методики растровой электронной микроскопии. Для обработки результатов экспериментов, а также при решении задачи оптимальной настройки параметров OPC-рецепта

применялся аппарат прикладной статистики и оптимизации. Теоретические исследования проводились на базе методов математического моделирования с использованием вычислительных экспериментов и экспертных оценок.

Научная новизна работы

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 шаблонной спецификации;

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;

6. Впервые разработано программное средство «ОРС Optimizer», позволяющее выполнять настройку ОРС-рецепта с помощью предложенного алгоритма, а также решать другие оптимизационные задачи в рамках разработки ОРС-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 калибрующей 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 (Приложение б).

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 (Приложение б).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Модель литографического процесса для расчета параметров проекционной системы сканера и параметров непропечатываемых вспомогательных топологических элементов (SRAF), основанная на анализе воздушного изображения основных типов групповых линий, используемых в затворных слоях требуемых проектных норм, и калибруемая на

экспериментально установленном минимально обрабатываемом 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», 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 опубликованы 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 работы

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».

Сокращения, использованные в диссертации

ФШ – фотошаблон;

ФРМ – фоторезистивная маска;

УИ – управляющая информация;

SRAF – Sub-Resolution Assist Feature (непрорабатываемый в резисте элемент топологии, обеспечивающий увеличение ширины окна процесса, в частности, для одиночных и краевых структур);

RBSRAF – Rule Based Sub-Resolution Assist Feature (структуры SRAF, форма и правила размещения которых определяются на основе ранее разработанных правил);

MBSRAF – Model Based Sub-Resolution Assist Feature (структуры SRAF, форма и правила размещения которых определяются на основе моделирования);

EPE – Edge Placement Error (ошибка смещения положения края расчетной ФРМ относительно номинала);

ГУФ – «глубокий ультрафиолет» (как правило, в фотолитографии используется излучение с длинами волн 248 нм и 193 нм);

ЭУФ – «экстремальный ультрафиолет» (излучение диапазона длин волн 5÷50 нм; в полупроводниковой технологии используются плазменные источники с длиной волны $\lambda = 13,5$ нм);

POR – Process of Record (процессы, используемые в традиционной, отработанной на данный момент технологии изготовления полупроводниковых изделий);

SMO – Source-Mask Optimisation (совместная с топологической коррекцией оптимизация формы источника излучения);

OPC – Optical Proximity Correction (коррекция оптической близости – топологическая коррекция, компенсирующая дифракционные искажения, претерпеваемые рисунком при переносе с ФШ в слой резиста на полупроводниковой пластине в процессе проекционной фотолитографии);

MBOPC – Model Based Optical Proximity Correction (коррекция оптической близости на основе моделирования);

RBOPC – Rule Based Optical Proximity Correction (коррекция оптической близости на основе ранее разработанных правил);

ILT – Inverse Lithography Technique (компенсирующая дифракционные искажения коррекция топологии фотошаблона, производящаяся на основе решения обратной задачи формирования изображения);

ДОЭ – дифракционный оптический элемент;

EL – Exposure Latitude (разброс дозы);

DOF – Depth of Focus (глубина фокусировки);

ILS – Intensity Log-Slope (логарифмическая крутизна интенсивности);

NILS – Normalized Image Log-Slope (нормированная логарифмическая крутизна интенсивности);

BIM – Binary Intensive Mask (бинарный фотошаблон);

AAPSM – Alternating aperture phase shift mask (фотошаблон с чередованием фазы);

EAPSM – Embedded attenuated phase shift mask (ослабляющий фазовый фотошаблон);

MEEF – Mask Error Enhancement Factor (фактор усиления ошибки на ФШ);

КЛР – Критический линейный размер;

МТТ – Mean-to-Target – разность усредненного значения какой-либо величины, измеренной в нескольких точках, и номинала, взятая по модулю;

DP/MP – Double/Multiple Patterning (двойное/многократное впечатывание);

SOCS – Sum of Coherent Sources (метод суммы когерентных источников);

MRC – Mask Rule Check (проверка топологии ФШ на удовлетворение правилам размещения элементов рисунка на фотошаблоне)

Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ КОРРЕКЦИИ ЭФФЕКТОВ ОПТИЧЕСКОЙ БЛИЗОСТИ В ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

1.1. Подходы к повышению разрешающей способности проекционной фотолиитографии

Разрешающая способность проекционной фотолиитографии (в данном случае имеется в виду минимальный размер полупериода печатаемых структур) и доступная глубина фокуса оцениваются широко известными из теории формирования изображения соотношениями [1]:

$$F = \frac{k_1 \lambda}{NA} \quad (1.1)$$

и

$$DOF = k_3 \frac{\lambda}{n \sin^2 \left[\frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \sin \theta \right) \right]} \approx \frac{2k_2 \lambda}{NA^2}, \quad (1.2)$$

где λ – длина волны экспонирующего излучения, $NA = n \sin \theta$ – числовая апертура объектива (θ – апертурный угол, n – показатель преломления среды – см. Рис.1.1). Приближенная часть соотношения (1.2) получена из предположения, что $n = 1$ и $NA < 0,8$ («сухой» объектив, параксиальное приближение). В классической релеевской формуле для разрешающей способности оптических систем коэффициент k_1 равен 0,61 [2]. В некоторых случаях для оценки пределов дифракционного разрешения оптических систем принимается $k_1 = k_2 = 0,5$.

На практике разрешающая способность и глубина фокуса определяются не только проекционной системой, но и характеристиками фотолиитографического процесса, а также особенностями переносимого на полупроводниковую пластину рисунка [3]. Поэтому значения коэффициентов k_1 , k_2 и k_3 в данном случае отличны от классических и зависят от ряда технологических факторов.

Как видно из соотношения (1.1), уменьшение F может быть достигнуто комбинацией трех разных способов [4] – использованием излучателей с меньшей длиной волны, увеличением числовой апертуры проекционных объективов, а также путем приведения к возможному минимуму значения коэффициента k_1 , которое при применении ряда методов может быть доведено до 0,3 (и даже менее), хотя и с некоторыми ограничениями, накладываемыми на геометрию передаваемого рисунка.

При использовании первых двух способов выигрыш в разрешающей способности всегда (по крайней мере, это верно для «сухих» объективов) влечет проигрыш в глубине фокуса. Третий способ (минимизация k_1), как правило, приводит к одновременному выигрышу по обоим параметрам [5], но при этом предъявляет более строгие требования к используемым фотошаблонам и их контролю, поскольку с понижением k_1 растет т.н. «фактор усиления ошибки на ФШ» или MEEF (Mask Error Enhancement Factor) [6]. Величина MEEF выражает чувствительность процесса к ошибке рисунка на фотошаблоне и определяется как $\Delta CD_{\text{пластина}} / (\Delta CD_{\text{шаблон}} / M)$, где CD – обрабатываемый критический линейный размер элемента (или КЛР), M – коэффициент масштабирования литографической установки. Далее указанные три способа улучшения разрешающей способности проекционной фотолитографии будут описаны более подробно.

1.1.1. Использование рабочего излучения с меньшей длиной волны

В настоящее время в подавляющем большинстве процессов проекционной фотолитографии используется рабочее излучение трех длин волн:

– 365 нм – i-линия спектра ртути, используемая на нечувствительных слоях литографии, либо в технологических процессах с $F \geq 250$ нм, в качестве источника излучения могут использоваться мощные дуговые ртутные лампы или аргоновые лазеры;

– 248 нм – так называемый «глубокий ультрафиолет» (ГУФ), применяются KrF эксимерные лазеры;

– 193 нм – ГУФ, применяются ArF эксимерные лазеры.

Переход к излучателям с меньшими длинами волн (доступны источники излучения на длинах волн 157 нм, 126 нм, 116 нм и 13,5 нм [7]) является самым дорогостоящим методом уменьшения F. Такие методы сопряжены с усложнением конструкции объективов, исследованием новых материалов, разработкой новых технологических процессов, созданием нового прецизионного оборудования. В оптической литографии на УФ-излучении с тремя «основными» длинами волн в качестве материала линз используется кварцевое стекло. Но, например, уже при длине волны 157 нм (излучение эксимерных F₂ лазеров) оно не обладает приемлемым пропусканием. Поэтому при разработке литографического оборудования, работающего на длине волны 157 нм (основные работы пришлись на начало 2000-х гг.), основной упор был сделан на применение флюорида кальция в качестве материала линз, что привело к значительным проблемам, связанным с изготовлением достаточного количества высокочистого CaF₂ и преодолением эффекта двойного лучепреломления, свойственного этому материалу. В итоге выигрыш в F в сравнении с иммерсионной литографией на длине волны 193 нм (см. далее) был признан незначительным [8], и работы были прекращены.

Примерно в это же время начались разработки оборудования и технологии проекционной фотолитографии в т.н. «экстремальном ультрафиолете» (EUV или ЭУФ). Для этого излучения ($\lambda = 13,5$ нм) прозрачных материалов не существует, поэтому все элементы оптических систем ЭУФ-литографических установок (в т.ч. фотошаблоны) могут быть только отражающими и должны располагаться в вакууме. Полупроводниковые пластины, на которые переносится изображение, должны находиться там же. Чрезвычайно трудоемкой задачей явилось создание стабильного источника излучения достаточной мощности, а также

соответствующих резистов [9, 10, 11]. Изготовление оптических элементов и фотошаблонов для таких систем весьма затратно. Достаточно отметить хотя бы тот факт, что отражающее покрытие для ЭУФ излучения с длиной волны $\lambda=13,5$ нм представляет собой брэгговское зеркало из 40-60 пар тонких слоев металлического молибдена (Mo) толщиной 3 нм и аморфного кремния (Si) толщиной 4 нм, нанесенных на стеклокерамическую (ситалловую) подложку заданной кривизны с исключительно высоким качеством полировки. «Шероховатость» поверхности такой подложки не должна превышать 0,2 нм (3σ). При этих условиях отражающая способность зеркала составляет величину 65-66% для длины волны 13,5 нм [12] с приемлемым уровнем спекл-шума [13, 14].

Тем не менее, к настоящему времени проблемы, стоящие на пути создания литографического оборудования, работающего в диапазоне экстремального ультрафиолета, решены; ЭУФ-установки выпускаются серийно [15] и используются в промышленности, несмотря на высокую стоимость как самой техники, так и ее обслуживания.

Таким образом, основным препятствием для развития проекционной фотолитографии в сторону перехода на меньшие длины волн являются не столько физические пределы, сколько финансовые расходы, связанные с этим переходом.

1.1.2. Увеличение числовой апертуры проекционных объективов

Увеличение числовой апертуры проекционного объектива фотолитографической установки при помощи жидкостной иммерсии явилось гораздо менее затратным методом, однако трудно переоценить его значение для повышения степени интеграции элементов ИС.

Суть метода заключается во введении жидкости (воды или другой жидкости с высоким показателем преломления) между проекционным объективом и полупроводниковой пластиной (Рис. 1.1а) для получения

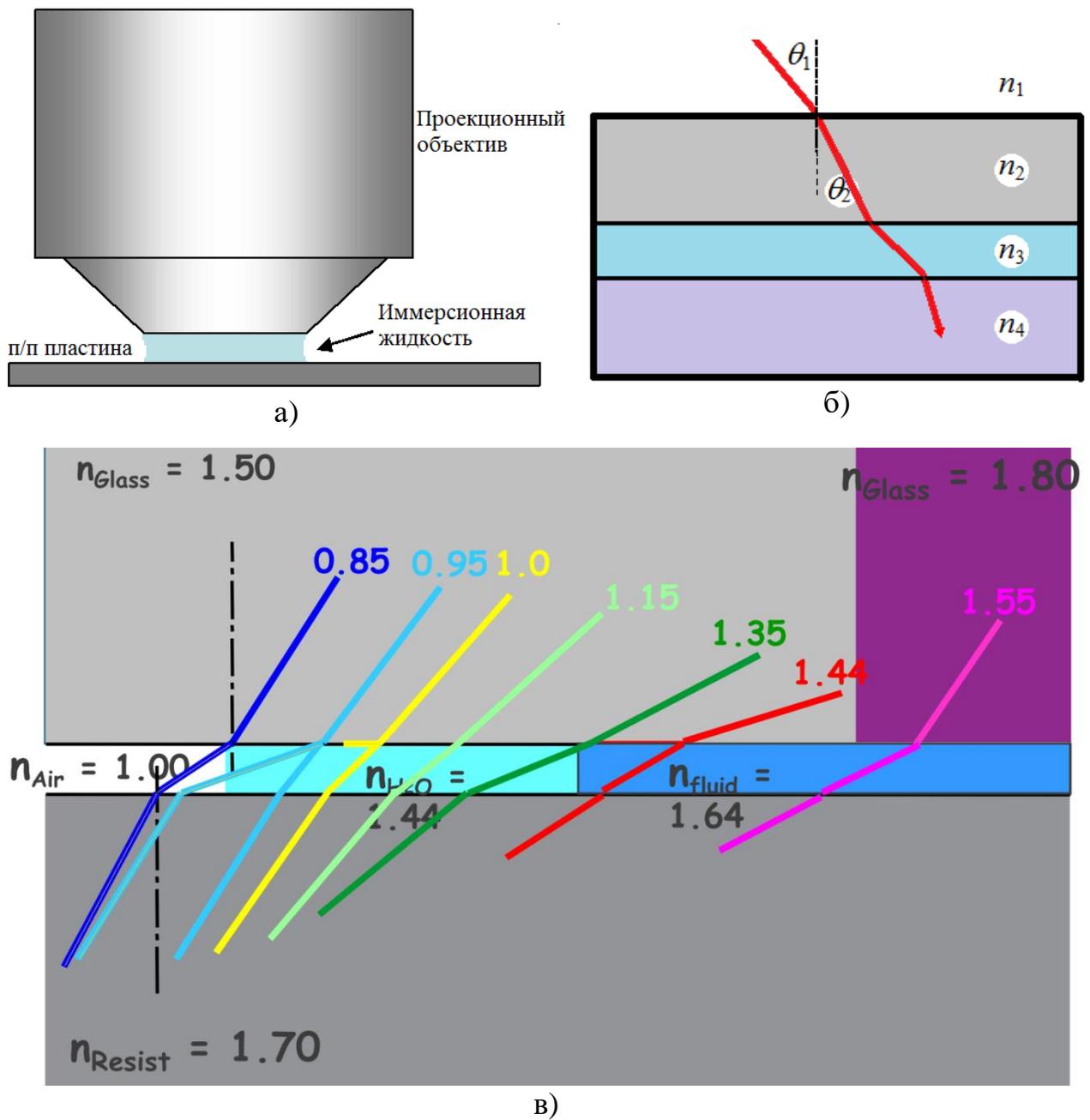


Рис. 1.1. К объяснению функционирования высокоапертурных проекционных иммерсионных объективов:

- а) схема реализации метода жидкостной иммерсии;
- б) распространение световой волны в слоистой среде;
- в) достижение высоких значений NA методом жидкостной иммерсии

проекционной системы с увеличенной числовой апертурой, что значительно улучшает разрешающую способность [16] и, кроме того, позволяет выиграть в глубине фокуса в сравнении с «сухими» объективами [3].

Согласно закону Снеллиуса [2], при распространении световой волны через слоистую среду (Рис. 1.1б) величина $n_i \sin \theta_i$ остается постоянной. Соответственно, максимальная возможная числовая апертура $NA = n_{\text{объектива}} \sin \theta_{\text{объектива}} = n_{\text{среды}} \sin \theta_{\text{среды}} = n_{\text{резиста}} \sin \theta_{\text{резиста}}$ определяется минимальным из показателей преломления материалов системы «объектив-среда-резист» (Рис. 1.1в). Таким образом, для достижения значения $NA > 1$ целесообразна водная иммерсия, для $NA > 1,44$ требуется использование жидкостей с показателем преломления, бóльшим, чем у воды, а для дальнейшего увеличения NA до значений более 1,5 требуется помимо этого изготавливать, как минимум, выходную линзу объектива из тяжелого стекла с показателем преломления, бóльшим, чем у кварца. Кроме того, применение иммерсии позволяет увеличить также глубину фокуса в 1,5-2 раза в сравнении с «сухими» объективами по причине значительного уменьшения угла схождения формирующих изображение гармоник [3] (см. соотношение (1.2)).

В начале 2000 годов предполагалось, что водная иммерсия продвинет применение излучения с длиной волны 193 нм до уровня критических размеров 45 нм и далее. Ожидания оправдались, и иммерсионная технология пошла в серию сразу после преодоления основных трудностей, таких как образование мелких пузырьков или выщелачивание резиста [17]. По сути, применение иммерсии в комплексе с методиками минимизации k_1 на длине волны $\lambda = 193$ нм оставляет литографии в экстремальном ультрафиолете сравнительно небольшую нишу «сверхмалых» размеров полупериода прорабатываемых элементов (< 20 нм).

Совершенствование ЭУФ литографических установок в сторону увеличения числовой апертуры также производится, но, поскольку какая-

либо иммерсия здесь невозможна, делается это путем улучшения характеристик зеркальной проекционной системы. Так, например, числовая апертура проекционных систем современных установок равна 0,33. Имеется потенциал увеличения NA до значения 0,55 [18]. Экспериментальные ЭУФ проекционные системы, существовавшие в конце 2000-х годов, имели значение $NA = 0,25$.

1.1.3. Технические приемы, направленные на минимизацию значения коэффициента k_1

Третий путь, включающий в себя разнообразные технические и технологические приемы, направленные на **уменьшение k_1** , как правило, именуется в литературе термином **«RET»** (Resolution Enhancement Techniques). Методики RET включают в себя:

- **использование внеосевого освещения фотошаблона** [19];
- **введение фазовых элементов на фотошаблоне** [20, 21, 22, 23];
- **коррекцию топологии фотошаблона** с целью компенсации паразитных дифракционных оптических эффектов или т.н. «эффектов оптической близости».

Корректное применение RET невозможно без осуществления большого количества расчетных процедур и модельных экспериментов, входящих в круг задач **вычислительной литографии** [24, 25, 26].

Как уже отмечалось, процедуры минимизации k_1 , как правило, приводят к одновременному выигрышу по разрешающей способности и глубине фокуса. Основным критерием эффективности применения RET является увеличение ширины так называемого **«литографического окна процесса»** – прямоугольной или эллиптической области в координатах «доза-дефокусировка», удовлетворяющей условиям удовлетворительной пропечатки при допустимом разбросе дозы.

Без учета допустимого разброса дозы **область удовлетворительной пропечатки** определяется как область в координатах дефокусировка-доза, в

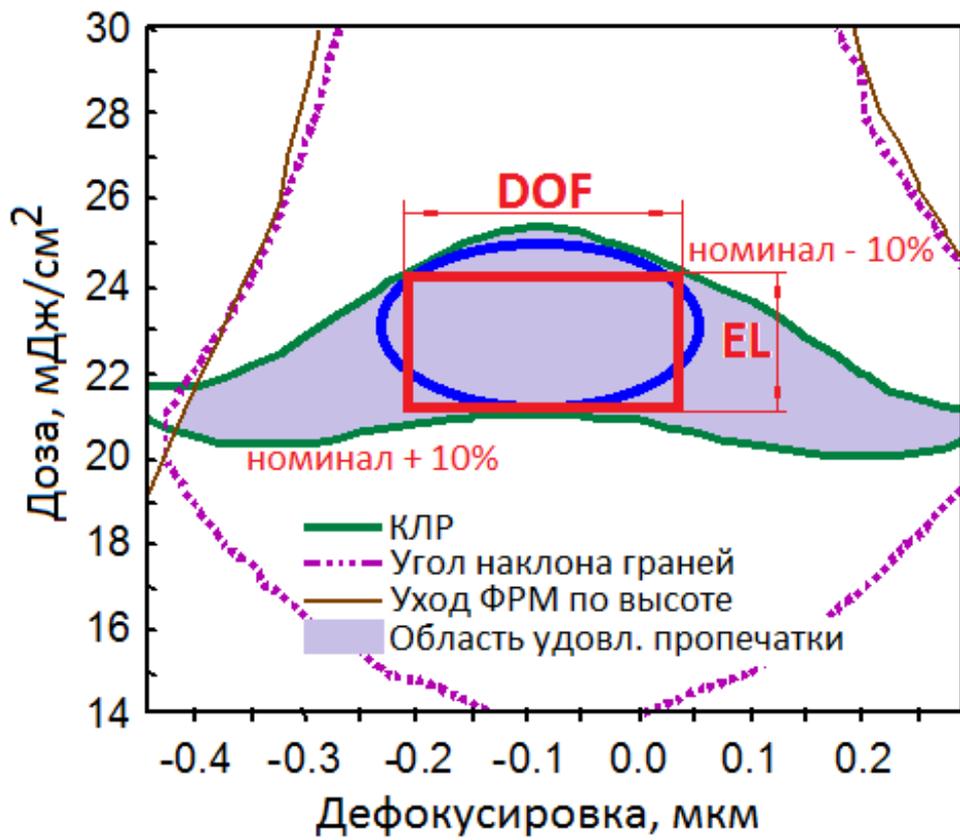
пределах которой формируемая в процессе проекционной фотолитографии фоторезистивная маска удовлетворяет ряду заданных требований. Существует три вида таких требований:

- литографический критический линейный размер прорабатываемой фигуры должен соответствовать заданным допускам (как правило, $\pm 10\%$ от номинала КЛР);
- угол наклона боковых граней фоторезистивной маски должен укладываться в допуски, определяемые процессом плазмохимического травления через маску (в большинстве случаев угол наклона боковых граней фоторезистивной маски должен быть не менее 85°);
- допускается уход фоторезистивной маски по высоте в процессе постэкспозиционной обработки резиста не более 10% .

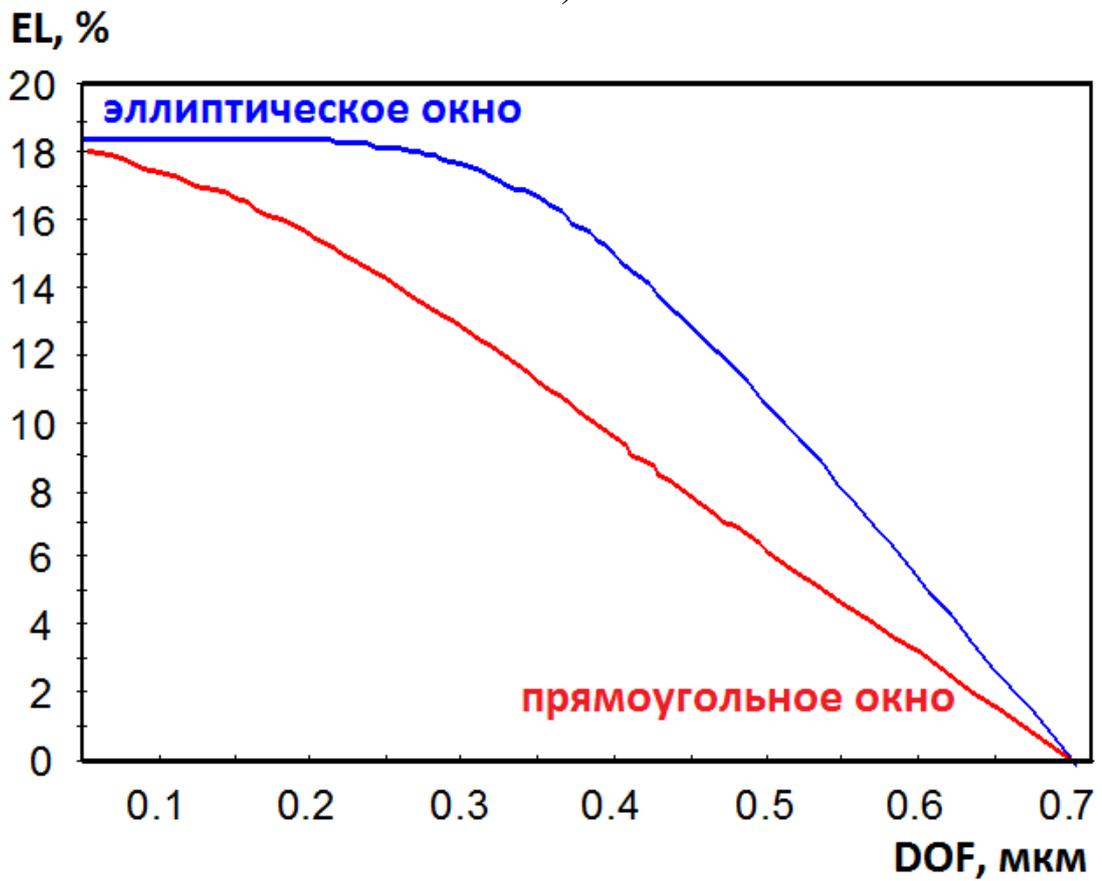
Общая область удовлетворительной пропечатки представляет собой результат перекрытия таких областей для всех типов топологических структур, одновременно переносимых с фотошаблона в резист. Конфигурация формируемой фоторезистивной маски для различных значений дозы и дефокусировки измеряется экспериментально или рассчитывается в процессе моделирования [27].

Для построения **окна процесса** необходимо в общую область удовлетворительной пропечатки вписать эллипс или (более строго) прямоугольник, размер которого по оси дозы равен допустимому разбросу дозы (Рис. 1.2а). Литографическая **глубина фокуса** («**Depth of Focus**» или **DOF**) эквивалентна ширине **окна процесса** по оси дефокусировки при фиксированном разбросе дозы («**Exposure Latitude**» или **EL**) [3]. На Рис. 1.2б приведены примеры прямоугольного и эллиптического окон процесса в координатах «**DOF-EL**» («глубина фокуса-разброс дозы»).

Во многих случаях (и в данной работе в частности) при рассмотрении окна процесса требования по наклону боковых граней и уходу маски по высоте не учитываются, что, разумеется, снижает точность анализа



а)



б)

Рис. 1.2. Построение прямоугольного и эллиптического окон процесса (для периодических линий) в координатах «дефокусировка-доза» и «DOF-EL»

литографического процесса, однако значительно экономит время и вычислительные ресурсы, позволяя использовать т.н. «компактные» полуэмпирические модели формирования фоторезистивной маски в процессном моделировании [27].

Проекционный литографический процесс переноса элементов изображения в слой резиста характеризуется совокупностью трех параметров: литографическим КЛР прорабатываемого топологического элемента (измеряется на пластине), допуском на литографический КЛР и минимальным значением глубины фокуса (см. п.1.3 настоящей работы), определяемым свойствами рельефа, допустимым прогибом полупроводниковой пластины и т.п. Обычно предполагается, что разброс дозы составляет $\pm 5\%$ от оптимальной дозы при оптимальном значении фокуса (когда геометрические параметры фоторезистивной маски соответствуют номиналу).

1.1.3.1. Внеосевое освещение фотошаблона

Как известно, бинарный фотошаблон, содержащий группу непрозрачных параллельных периодических линий с периодом p , при освещении нормально падающей плоской ТЕ-волной длины λ (осевое точечное освещение) формирует дифракционную картину дискретных порядков, отстоящих друг от друга в плоскости пространственных частот на расстояние, пропорциональное $1/p$. В силу конечных размеров объектива пространственные частоты высших порядков отсекаются, что ухудшает качество воспроизводимого изображения. Для линий достаточно малого периода наблюдается отсечка всех порядков, кроме нулевого и первых (Рис. 1.3а), и в этом случае нормированное распределение интенсивности в плоскости изображения дается следующим выражением [3]:

$$I(x) = \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi} \cos(2\pi x / p) + \frac{4}{\pi^2} \cos^2(2\pi x / p). \quad (1.3)$$

Первый член правой части в (1.3) соответствует равномерной засветке, второй (несущий основную информационную составляющую) отражает результат интерференции первых порядков с нулевым. Третий член обусловлен интерференцией первых порядков между собой и вносит в результирующее изображение гармоническую компоненту двойной частоты, повышая контраст изображения. Для простоты предполагается, что кратность объектива равна единице.

Пространственная частота отсечки ± 1 -порядков дифракции, обусловленная конечными размерами оправы объектива, равна по модулю NA/λ . Таким образом, при использовании бинарного фотошаблона с осевым пространственно-когерентным (точечным) освещением разрешаемый период линий не может быть менее λ/NA , поскольку при уменьшении периода до этого значения изображение исчезает вовсе. Использование в этом случае внеосевого точечного освещения позволяет добиться попадания в объектив вместе с нулевым как минимум одного из ненулевых порядков дифракции, что приводит к восстановлению полезного сигнала. Таким образом, внеосевое освещение позволяет вернуть изображение, пусть и за счет некоторой потери его контраста.

В случае использования протяженного осветителя каждый из порядков дифракции представляет собой в плоскости пространственных частот конечную область (Рис. 1.4б), что позволяет формировать в слое резиста изображение некоторого количества периодических линейчатых структур различного периода, не разрешаемых литографической установкой в случае использования осевого точечного освещения [19, 28].

Самой широко используемой формой протяженного осветителя является форма диска. Такой осветитель обычно именуется «**Conventional**» и характеризуется параметром

$$\sigma = \frac{n \sin \theta_{осв}}{NA} = \frac{\text{диаметр источника}}{\text{диаметр апертуры объектива}}, \quad (1.4)$$

где $\theta_{осв}$ – угол светового конуса дифракционного порядка (Рис. 1.3б).

Основной недостаток такого осветителя заключается в том, что, начиная с некоторых значений периода линий передаваемого рисунка, значительная часть площади источника (показана на Рис. 1.3б красным цветом) перестает участвовать в формировании полезного сигнала, добавляя к изображению лишь паразитную засветку и тем самым понижая контраст передаваемого изображения [29]. Так появились параметрические источники сложной формы, призванные в какой-то мере исправить эту проблему. Такие источники, как правило, описываются несколькими параметрами. Например, кольцевой источник (или «**Annular**») характеризуется параметрами $\sigma_{внеш}$ и $\sigma_{внутр}$ (далее – σ_{out} и σ_{in}). Некоторые более сложные параметрические источники приведены на Рис. 1.3в.

Главный недостаток таких осветителей заключается в том, что они оптимизируются для достаточно ограниченного набора конфигураций передаваемого рисунка. В частности, при использовании такого источника глубина фокуса для линий некоторых периодов показывает минимальное значение, сравнимое с глубиной фокуса для одиночных линий, на проработку которых внеосевое освещение вообще не оказывает заметного влияния [3]. Это вынуждает разработчиков вносить в правила проектирования изделий дополнительные требования по исключению из дизайна групповых линейчатых структур определенного периода (так называемые «**Forbidden Pitches**»).

Что же касается одиночных или краевых линий и прямоугольников, то для их успешной пропечатки в условиях освещения, оптимизированного для групповых периодических структур, в топологию схемы добавляются дополнительные элементы (так называемые «**SRAF**» – **Sub-Resolution Assist Features**), не прорабатываемые в резисте в силу своего небольшого размера, но оказывающие влияние на картину дифракции, приближая ее к случаю дифракционной картины, формируемой периодическим рисунком.

Сложные приборные слои могут быть сформированы посредством нескольких литографий (многократная экспозиция или процессы с жесткой маской – т.н. «многократное впечатывание» [30, 31, 32]). В этом случае требуются весьма ресурсоемкие по вычислительной мощности процедуры декомпозиции приборного слоя на несколько литографических слоев, для каждого из которых отдельно производится оптимизация формы параметрического источника². В последние годы подобный подход сталкивается все с бóльшими затруднениями, поскольку дизайн изделий становится более сложным, а технологические процессы более дорогими.

Задачу подбора оптимальной формы источника существенно облегчает применение пиксельных осветителей произвольной формы, которыми в настоящее время комплектуются установки проекционной оптической литографии, предназначенные для продвинутых уровней технологии. Форма подобного осветителя оптимизируется для некоторого набора периодических участков топологии критического слоя. Оптимизация формы осветителя производится совместно с коррекцией топологии (процесс «SMO» – Source-Mask Optimisation), позволяя добиться значительного увеличения глубины фокуса [33] (Рис. 1.4в).

На Рис. 1.4а изображен сканер TWINSCAN NXT:1970Ci (ASML), содержащий систему освещения произвольной формы «FlexRay» [34] на основе микрзеркального модулятора (Рис. 1.4б). Модулятор выступает в роли отражательного дифракционного оптического элемента (ДОЭ), формирующего в одном из дифракционных порядков требуемое пространственное распределение интенсивности по апертуре осветителя. Литографические установки фирмы Nikon (Япония) [35], например, иммерсионный ArF сканер NSR-S630D, также комплектуются подобными

² Метод многократной экспозиции (и также многократного впечатывания) в некоторых работах относят к понижающим коэффициент k_1 техникам RET, однако по своей сути он к ним не относится, поскольку представляет собой чисто технологический прием, не увеличивающий разрешающую способность проекционной фотолитографии как таковую

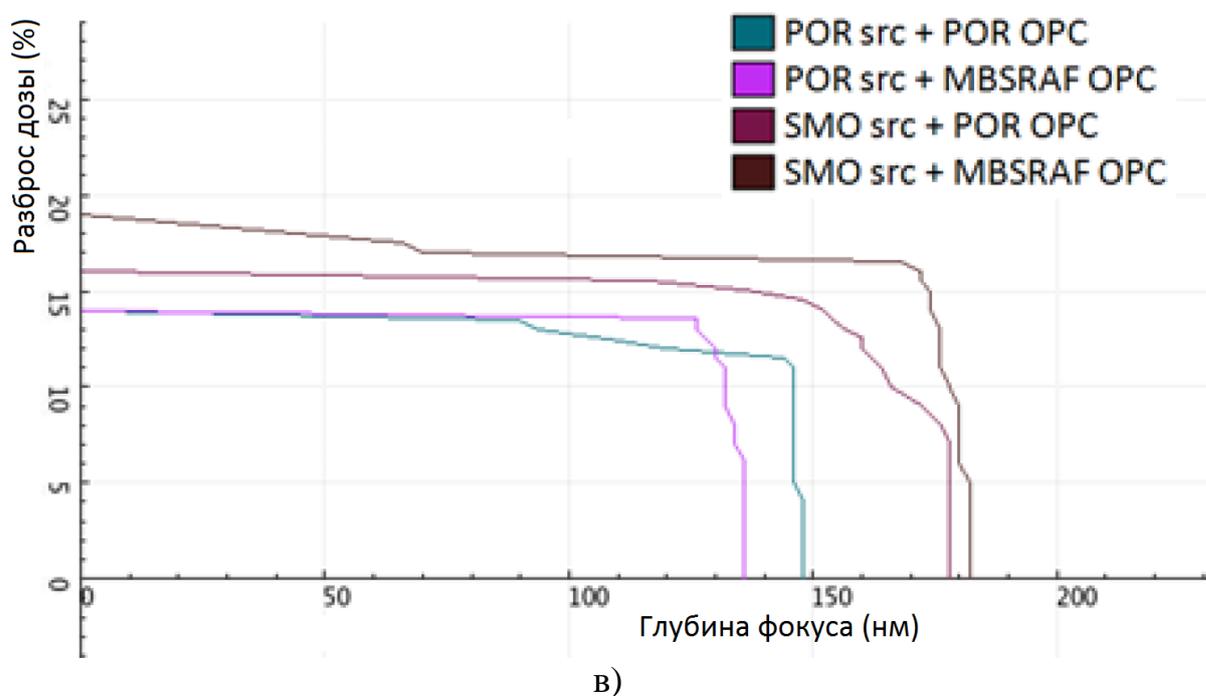
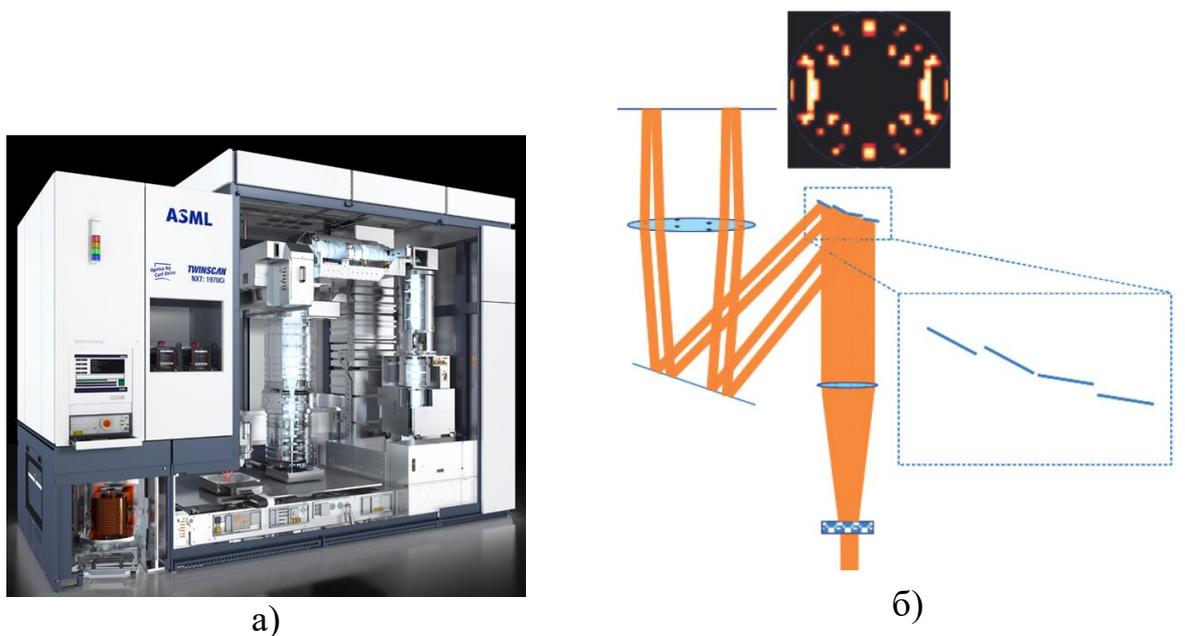


Рис. 1.4. Осветители произвольной формы на дифракционных элементах:

а) сканер Twinscan NXT:1970Si, оснащенный осветителем произвольной формы «FlexRay» [34] на основе микрозеркального модулятора;

б) схематичное изображение устройства и принципа работы системы «FlexRay»;

в) эллиптические окна процесса в координатах «глубина фокуса-разброс дозы» при литографии с использованием традиционного параметрического осветителя и осветителя произвольной формы, оптимизированного совместно с топологией [33], при всех прочих одинаковых условиях

системами освещения фотошаблона, т.н. «ИУ» – Intelligent Illuminator Unit [36, 37].

Кроме того, существует практика применения для этих целей (в том числе, для формирования параметрических источников типа «Dipole», «Quasar», «Quadrupole» и т.п.) пропускающих фазовых ДОЭ, встраиваемых в систему освещения сканеров, не оснащенных микрозеркальными системами формирования произвольной формы осветителя [38]. Пропускающие фазовые ДОЭ изготавливаются из кварца, имеют значительно бóльшую дифракционную эффективность в сравнении с микрозеркальными аналогами, но, очевидно, не имеют возможности оперативной перестройки.

1.1.3.2. Применение фазосдвигающих фотошаблонов

Фотошаблоны с чередованием фазы (AAPSM)

Рассмотрим теперь фотошаблон, похожий на изображенный на Рис. 1.36 бинарный ФШ (BIM – Binary Intensive Mask), но отличающийся от него тем, что в каждый второй промежуток между линиями добавлена прозрачная вставка, вращающая фазу излучения на 180° (Рис. 1.5а). Это может быть реализовано также за счет дополнительного протравы подложки фотошаблона на глубину $\lambda/2(n-1)$. Такой тип ФШ называется «фотошаблон с чередованием фазы» или AAPSM (Alternating aperture phase shift mask).

Допустим, что w – ширина светлого промежутка между линиями. Дифракционная картина от такой решетки может рассматриваться как суперпозиция картин от двух решеток с периодом $2p$, сдвинутых друг относительно друга на расстояние p , у одной из которых коэффициент пропускания прозрачного участка по амплитуде равен 1, а у другой – -1 (по причине сдвига фазы на 180°).

Нетрудно заметить, что в этом случае четные порядки дифракции от двух рассматриваемых решеток гасят друг друга, а результирующее выражение для амплитуды дифракционной картины в плоскости пространственных частот будет выглядеть следующим образом [3]:

$$T_m(f_x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j \delta(f_x - \frac{j}{2p}), \quad (1.5)$$

$$\text{где } a_j = \begin{cases} 0, & j \text{ четное} \\ \frac{2 \sin(j\pi w/2p)}{j\pi}, & j \text{ нечетное.} \end{cases}$$

И, соответственно, в случае малых периодов, когда в формировании изображения не участвуют высшие порядки дифракции, при условии пространственно-когерентного (точечного) освещения ТЕ-волной результирующая интенсивность в выходной плоскости объектива определится выражением:

$$I(x) = 2a_1^2 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right), \quad a_1 = \frac{2 \sin\left(\frac{\pi w}{2p}\right)}{\pi}. \quad (1.6)$$

Минимальный разрешаемый период линий будет в этом случае равен $0,5\lambda/NA$. Таким образом, использование фотошаблонов с чередованием фазы приводит, как и при внеосевом освещении, к двухпучковому формированию изображения, что в свою очередь одновременно улучшает и разрешение, и глубину фокуса. Кроме того, формирующие изображение пучки имеют одинаковую интенсивность, что дает максимальный контраст изображения.

В отличие от использования внеосевого освещения, данный метод показывает высокую эффективность для линейчатых структур любого периода и даже для одиночных темных линий. При этом, очень интересный эффект возникает, когда w обращается в нуль, и структура превращается в простую фазовую ступеньку. В этом случае в выходной плоскости формируется темная линия с шириной около $0,25\lambda/NA$.

На этом принципе работают т.н. "бесхромовые фотошаблоны", которые дают возможность формирования в резисте крайне узких линий. Однако, в силу так называемых «фазовых конфликтов» [3, 9] (Рис. 1.5б)

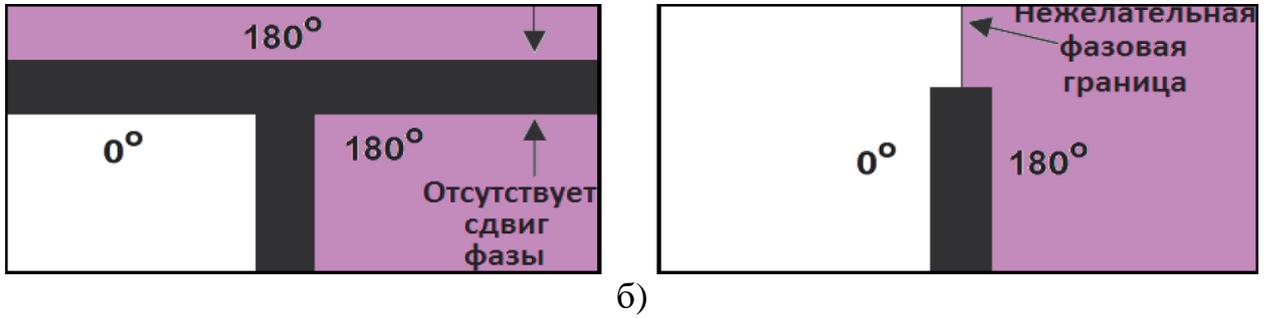
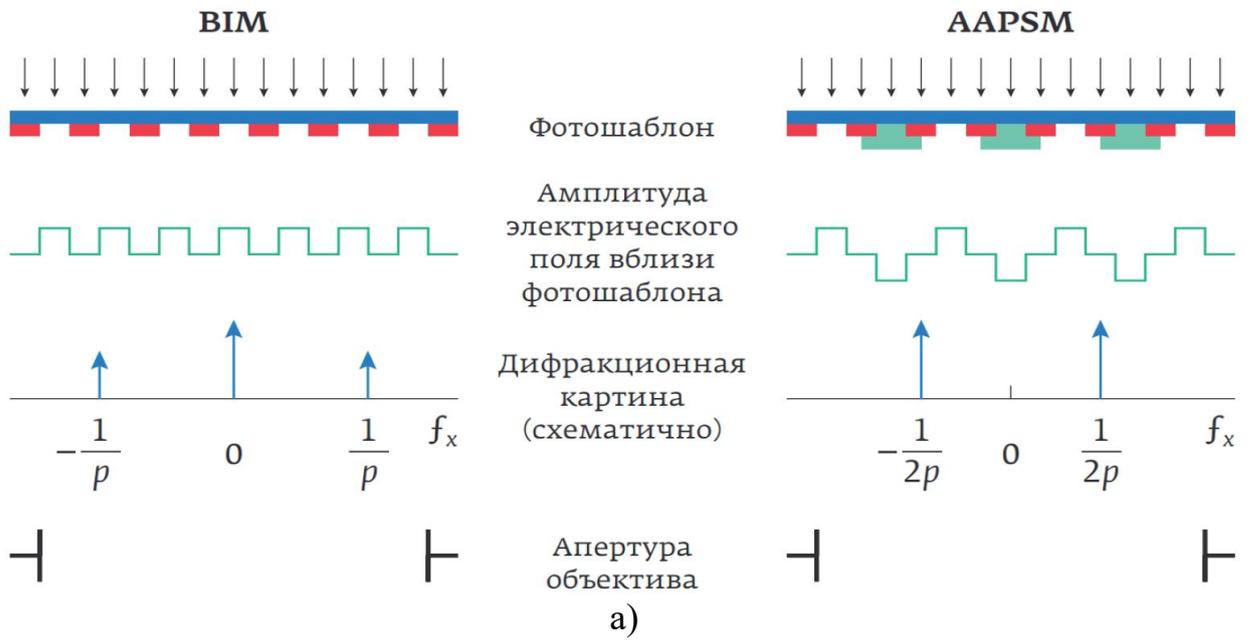


Рис. 1.5. Фотошаблоны с чередующейся фазой (AAPSM):

а) двухлучевое формирование изображения;

б) к объяснению проблемы фазовых конфликтов при использовании фотошаблонов с чередующейся фазой

подобные шаблоны (как и любые ФШ с чередованием фазы) хороши для формирования замкнутых линий без перемычек и могут эффективно использоваться только в связке со специальными вспомогательными бинарными фотошаблонами, задача которых состоит в формировании крупных или удалении лишних элементов рисунка (метод cPSM – Complementary Phase Shifting Mask) [21, 39, 40].

На практике применение AAPSM сталкивается с рядом серьезных трудностей:

- 1) в случае реальной топологии неизбежность фазовых конфликтов приводит к необходимости использования двойной экспозиции, что значительно увеличивает время, затрачиваемое на литографию;
- 2) инспекция и восстановление дефектов, возникающих на фазосдвигающих участках, крайне нетехнологичны, поэтому производство бездефектных фотошаблонов с чередованием фазы сложно и дорого;
- 3) контроль фазы на фазосдвигающих участках затруднен;
- 4) рассеяние света на границах фазосдвигающих областей приводит к деградации изображения.

Таким образом, применение фотошаблонов с чередованием фазы целесообразно на "прорывных" направлениях при разработке новых технологических процессов или для решения узкоспециализированных задач. Кроме того, их использование оправдано при проведении наиболее «критических» литографий, например, при формировании затворных слоев. В большинстве существующих на сегодняшний день коммерческих технологий, использующих фазосдвигающие шаблоны, доля шаблонов такого типа крайне невелика (единицы процентов) [21, 41, 42].

Ослабляющие фазовые фотошаблоны (EAPSM)

Другой подход к созданию т.н. «ослабляющих» фазосдвигающих фотошаблонов или EAPSM (Embedded attenuated phase shift mask) состоит в формировании рисунка по тому же принципу, что и в бинарных ФШ, но

вместо непрозрачного хрома для создания темных элементов используется слой специального фазосдвигающего материала, который сам частично пропускает свет. Это может быть полупрозрачный тонкий слой хрома, работающий в комбинации с фазосдвигающим слоем, сформированным, например, при помощи того же локального травления кварцевой подложки. Используются также фазосдвигающие слои из других материалов, таких как CrO, CrOH, MoSiO, MoSi, MoSiON. Коэффициент пропускания слоёв на основе силицида молибдена (применяемых при производстве коммерческих фотошаблонных заготовок) составляет, как правило, 6% по интенсивности прошедшего света, встречаются также слои с 18%-пропусканием. Фазосдвигающие элементы такого типа считаются «слабыми» [21], однако огромное преимущество, состоящее в простоте расчета и технологичности изготовления, делает их наиболее широко используемыми в современных коммерческих технологиях производства интегральных схем. Это обусловлено, кроме того, отсутствием фазовых конфликтов, а, следовательно, и необходимости в сложных операциях по разбиению слоев на составляющие. Ослабляющие фазосдвигающие фотошаблоны увеличивают глубину фокуса и максимальный разброс по дозе экспозиции посредством перераспределения энергетических характеристик порядков в картине дифракции, создаваемой периодическими структурами изображения.

Использование EAPSM подтвердило свою целесообразность как для 248 нм, так и для 193 нм литографии. Такие шаблоны имеют наилучшее соотношение цена/эффективность, обладают высокой технологичностью, хорошими показателями по однородности критических размеров.

Метрикой качества воздушного изображения в литографии является так называемая **нормированная логарифмическая крутизна интенсивности** или *NILS* (Normalized Intensity Log-Slope), определяемая

выражением
$$NILS = \frac{w}{I} \frac{dI}{dx} = w \frac{d(\ln I)}{dx},$$
 где w – характерная величина

структуры, а производная берется на ее границе.

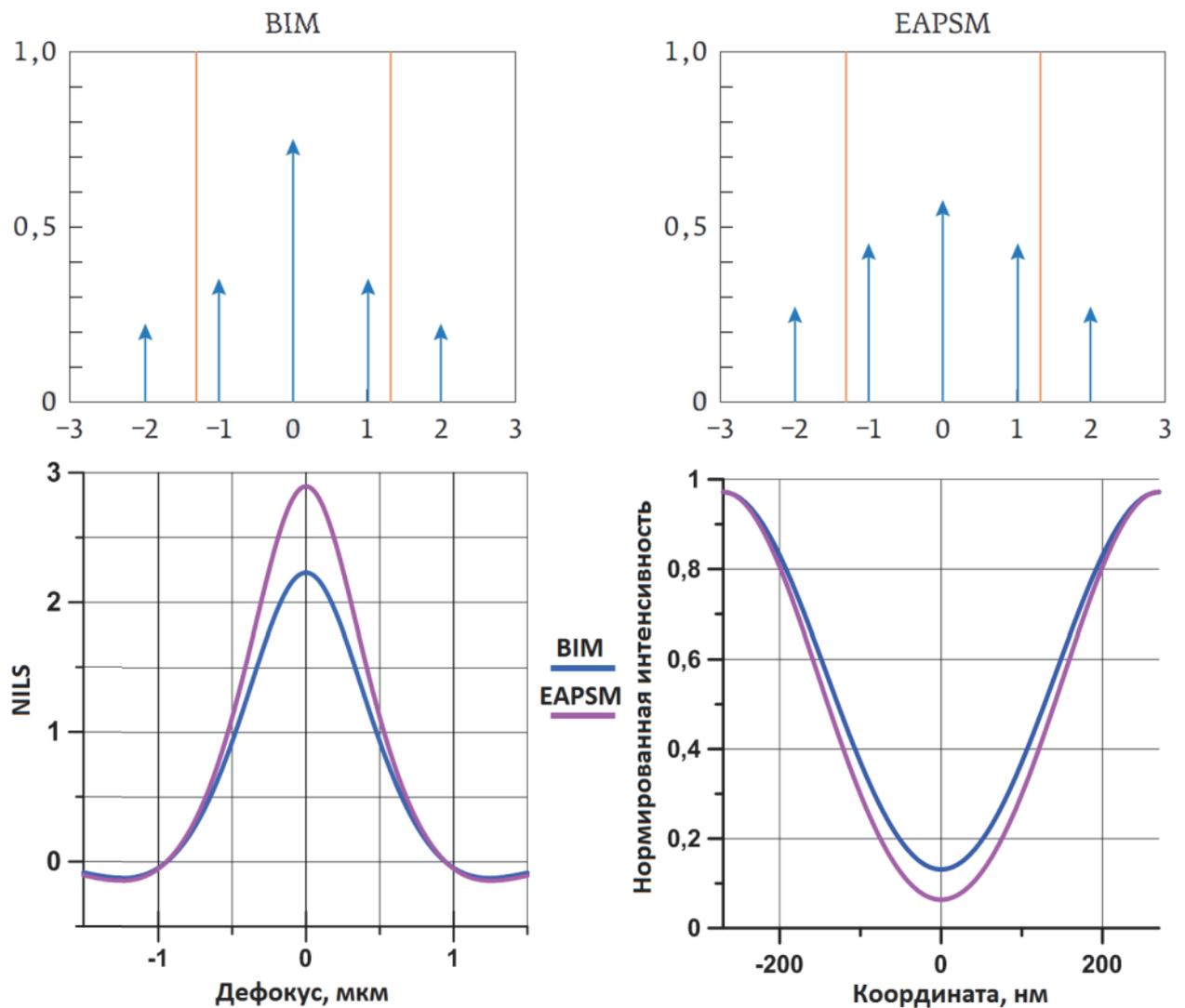


Рис. 1.6. Сравнение интенсивности дифракционных порядков, зависимости NILS от величины дефокуса и профиля нормированной интенсивности воздушного изображения для случая бинарного фотошаблона и ослабляющего фазосдвигающего фотошаблона с вращением фазы 180° и пропусканием 6% (групповая линейчатая структура с шириной линии 180 нм и периодом 540 нм, длина волны 248 нм, $NA = 0,6$, осветитель Conventional, $\sigma=0,75$)

На Рис. 1.6 схематически изображена дифракционная картина, даваемая групповыми темными структурами на ослабляющем фазосдвигающем шаблоне в сравнении с бинарным шаблоном. Видно, что нулевой порядок имеет меньшую интенсивность в сравнении с бинарным шаблоном, а 1-е и 2-е – бóльшую. На этом же рисунке показаны соответствующие распределения интенсивности на пластине. Видно, что NILS возрастает (а, в силу порогового характера засветки резиста, увеличивается и допуск на разброс дозы). Кроме того, возрастание интенсивности высших порядков дифракции приводит к значительному увеличению глубины фокуса [21, 39].

Наряду с очевидными достоинствами, ослабляющие фазовые шаблоны имеют и некоторые недостатки. Возможен, например, эффект возникновения боковых лепестков излучения в области расположения темных элементов, так как амплитуда в них больше нуля. Это накладывает некоторые ограничения на дозу экспонирования. Кроме того, возможны ошибки совмещения слоев из-за прозрачности шаблона (крайне редко).

Перечисленные недостатки не являются критическими и не идут ни в какое сравнение с проблемами, возникающими при работе с фотошаблонами с чередующейся фазой.

1.1.3.3. Топологическая коррекция фотошаблона с целью компенсации паразитных дифракционных эффектов (эффектов «оптической близости»)

Коррекция топологии фотошаблона с целью частичной компенсации паразитных дифракционных эффектов или т.н. «эффектов оптической близости» (общепринятая англоязычная аббревиатура OPC – Optical Proximity Correction) представляет собой мощный способ повышения качества изображения, формируемого в фоторезистивном слое в процессе проекционной фотолитографии.

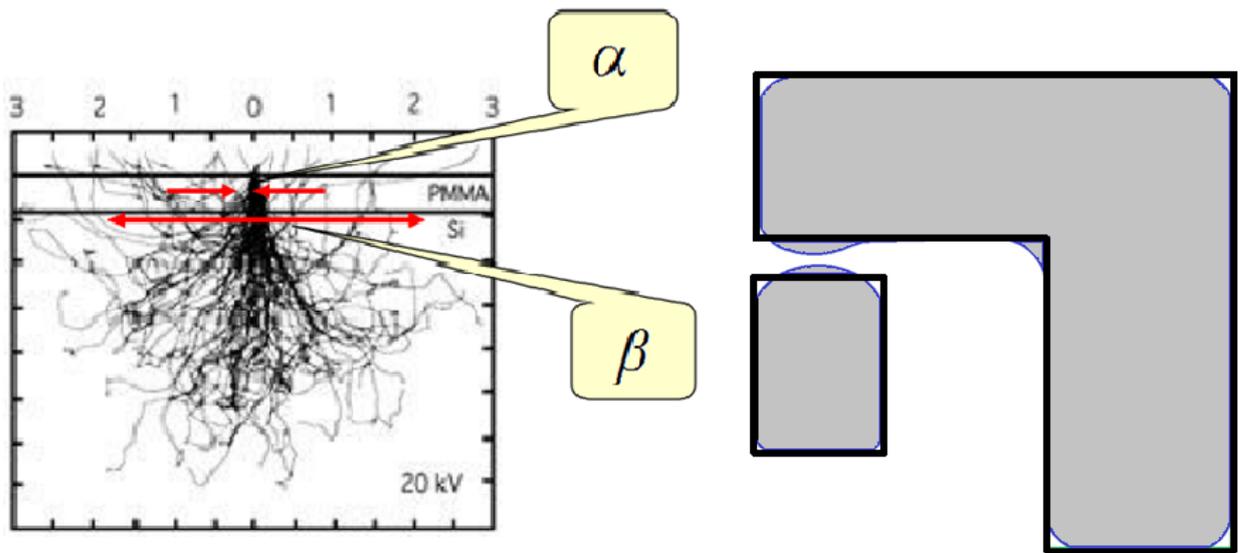
«Эффект близости» – термин, первоначально относившийся к электронно-лучевой литографии [43] и обозначающий нежелательные искажения рисунка в процессе его переноса в слой резиста. При электронной литографии такие искажения возникают обычно в процессе рассеяния электронов в резисте и подложке. Малоугловым рассеянием первичных электронов в резисте обусловлена гауссова зависимость набранной дозы (обусловленной первичными электронами) от расстояния до центра пучка: $\frac{1}{\alpha^2} \exp(-r^2/\alpha^2)$, где α – диаметр первичного электронного пучка.

При рассеянии в подложке первичных электронов возникают вторичные электроны, часть которых поглощается в резисте и вносит дополнительный вклад в поглощенную дозу, который тоже описывается распределением Гаусса: $\frac{\eta}{\beta^2} \exp(-r^2/\beta^2)$, где β – размер области возбуждения вторичных электронов, а η – относительный вклад обратно рассеянных электронов в поглощенную дозу (Рис. 1.7а).

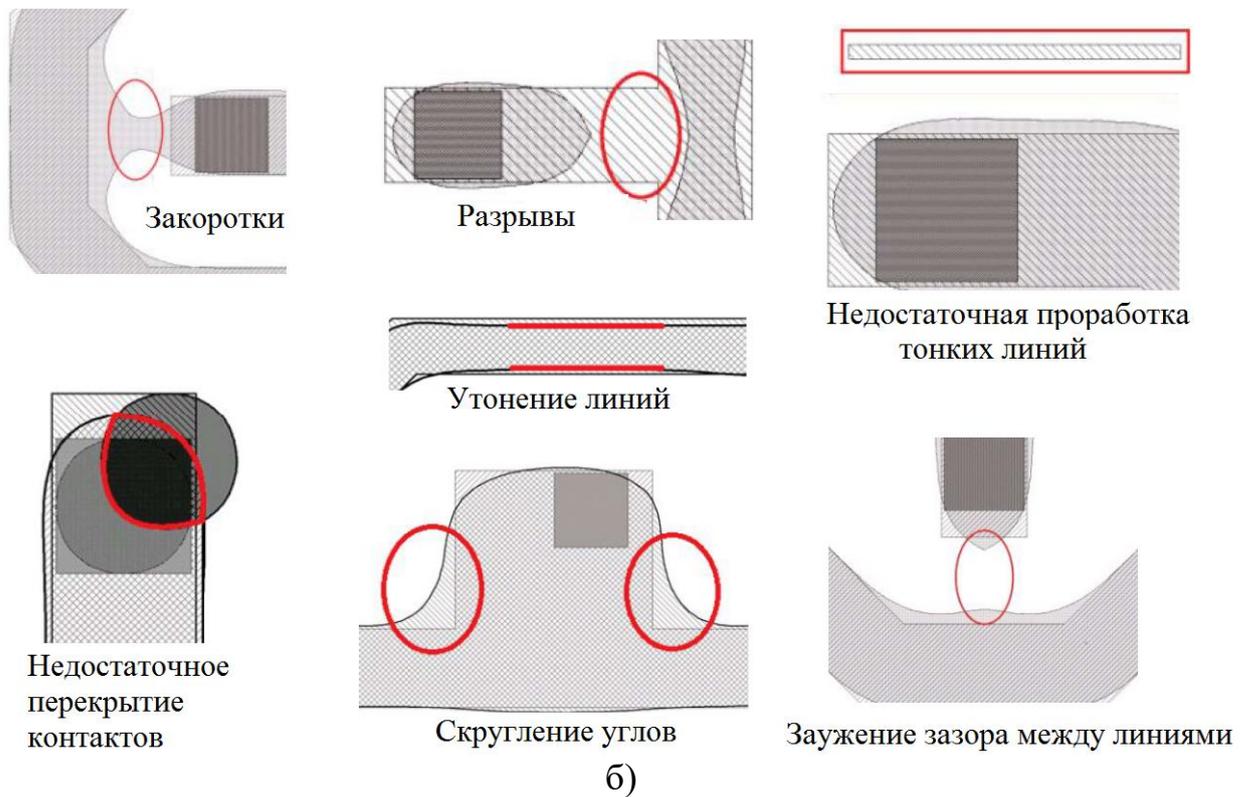
Параметры β и η зависят от ускоряющего напряжения и материала подложки. Таким образом, происходит облучение области резиста, превышающей по размерам электронный пучок, а доза облучения **близко расположенных** топологических элементов оказывается выше, чем предполагалось бы без учета описываемого эффекта (**эффекта близости**). Методы компенсации влияния эффекта близости в электронной литографии успешно развиваются уже достаточно долгое время [44, 45].

Искажения изображения, формируемого в резисте при проекционной фотолитографии, часто проявляются похожим образом и называются эффектами «**оптической близости**» по аналогии с электронно-лучевой литографией, однако имеют **иную природу** (дифракционную).

Отсечка высших дифракционных порядков, обусловленная ограниченностью апертуры проекционного объектива, приводит к



а)



б)

Рис. 1.7.

- а) эффект близости в электронно-лучевой литографии: траектории рассеиваемых электронов и искажение передаваемого изображения в резисте;
- б) виды дефектов фоторезистивной маски, обусловленных эффектом оптической близости в проекционной фотолитографии

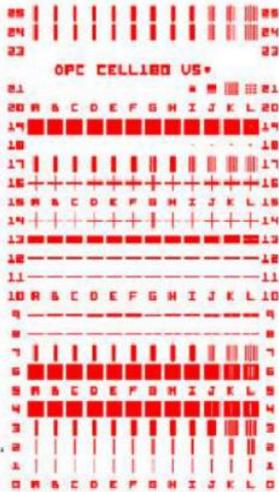
существенной деградации оптического изображения: прямоугольная характеристика пропускания фотошаблона дает синусоидальное распределение интенсивности в плоскости пластины (в случае формирования изображения двумя дифракционными порядками) с сохранением пространственных расстояний, но с потерей резкости краев элементов рисунка, что неизбежно приводит к искажениям формируемой ФРМ в силу порогового характера ее формирования.

Таких искажений существует целое семейство – это сокращение и скругление концов линий, искажения при переносе зазоров, углов и т.д. (Рис. 1.7б). Борьба с дифракционными искажениями состоит в упреждающей коррекции изображения на ФШ, а также в добавлении в шаблонную топологию специальных непропечатываемых вспомогательных элементов (SRAF), которые в силу своих небольших размеров сами не переносятся на пластину, но позволяют корректно воспроизвести требуемое изображение.

Подходов к реализации коррекции эффектов оптической близости в настоящее время существует три.

Самым простым из них, применяемым в случаях незначительных дифракционных искажений, является использование методов упрощенной топологической коррекции на основе экспериментальных данных или результатов физического моделирования (Рис. 1.8а). На основе указанных данных разрабатывается некоторое семейство правил, согласно которым производятся добавление вспомогательных элементов (**RBSRAF** – Rule Based Sub-Resolution Assist Features) и топологическая коррекция (**RBOPC** – Rule Based Optical Proximity Correction). Такой метод является относительно быстрым и малозатратным с точки зрения требуемых вычислительных мощностей, однако необходимо некоторое время (иногда довольно продолжительное) на разработку правил. Данный подход обычно используется на некритичных литографических слоях. К RBOPC относятся припуски (bias), а также дополнение топологии изделия специальными фигурами, минимизирующими эффекты скругления углов, [7] (Рис. 1.8б).

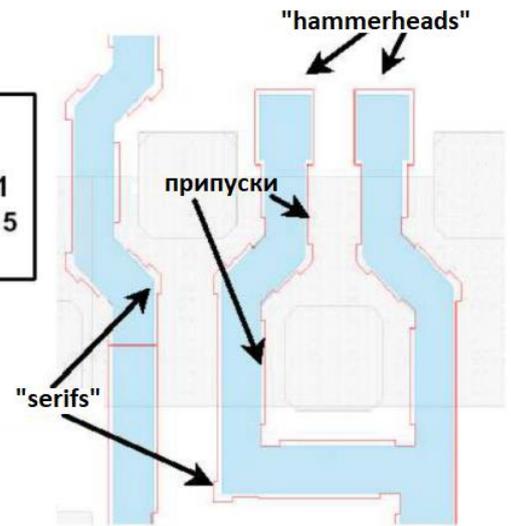
1) Пропечатки и измерения тестовых элементов



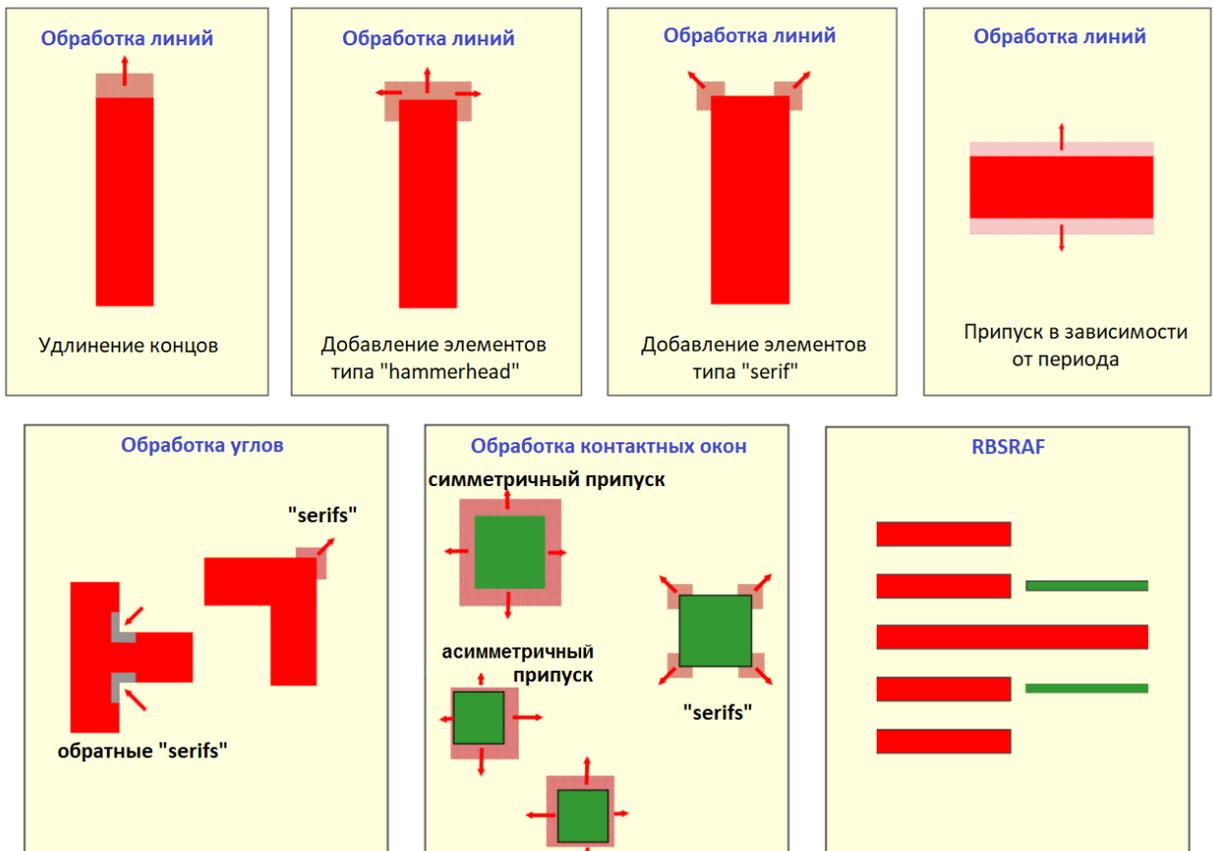
2) Формирование правил

```
POLY_OPC =
BIAS POLY
SPACE >0.18 <=0.26 MOVE .01
SPACE >0.26 <=0.34 MOVE .015
SPACE >0.34 MOVE .02
```

3) Топологическая коррекция



а)



б)

Рис. 1.8. Иллюстрация методики (а) и основных видов (б) топологической коррекции на основе правил

Наиболее широко используемый на сегодняшний день подход к методам коррекции эффектов оптической близости связан с реализацией итерационных методов подбора приемлемой формы топологии на основе прямого моделирования формирования оптического изображения и фоторезистивной маски. Это прежде всего метод **МВОРС** (Model Based Optical Proximity Correction, коррекция оптической близости на основе моделирования), обладающий значительно большими возможностями, чем **РВОРС**, но в то же время требующий для своей реализации большого количества сложных вычислений.

Типовая схема работы МВОРС показана на Рис. 1.9а. Топология литографического слоя делится на небольшие участки, а элементы изображения в каждом из участков сегментируются с определенным шагом. Далее для каждого участка топологии рассчитывается оптическое изображение – распределение интенсивности вблизи поверхности пластины.

Следующая стадия моделирования состоит в расчете конфигурации фоторезистивной маски, полученной после экспонирования и проявления резиста. После расчета изображения в резисте в пределах выбранного участка оно сравнивается с требуемым, и, в случае неудовлетворительного результата, исходное изображение корректируется путем смещения границ на величину, зависящую от величины расхождения положения расчетной границы ФРМ с исходным топологическим рисунком (т.н. EPE – Edge Placement Error).

Далее процесс моделирования в пределах выбранного участка повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто соответствие расчетного изображения в резисте требуемому. Для следующего участка топологии производятся те же самые процедуры, и т.д. до тех пор, пока не будет просчитана вся топология литографического слоя.

ОРС-рецепт включает в себя:

- типизацию топологических структур;

- определение размеров фрагментов, количества вершин разбиения и их расположения;
- определение позиций контрольных точек на фрагментах для вычисления значения EPE;
- задание коэффициента смещения фрагментов по результатам моделирования;
- задание количества циклов моделирования и величины смещения фрагментов.

Третий подход – ИЛТ (Inverse Lithography Technique) подразумевает решение обратной задачи в виде интегрального уравнения Фредгольма первого рода типа свертки каким-либо из основательно развитых на сегодняшний момент методов решения задач реконструкции изображений [46]. Для получения скорректированной фотошаблонной топологии промежуточный результат в виде полутонового изображения переводится в наиболее соответствующий ему бинарный вид (Рис. 1.9в). Импульсный отклик системы учитывает форму источника и искажения, вносимые объективом. К возможностям ИЛТ относится в частности иллюстрируемая Рис. 1.9в. генерация зависящих от формы осветителя сложных **MBSRAF** (Model Based Sub-Resolution Assist Features) [47].

Данный подход в сочетании с внеосевым освещением и использованием фазовых ФШ позволяет фактически исчерпать имеющийся потенциал уменьшения k_1 . Следует, впрочем, отметить, что для реализации ИЛТ требуются значительно бóльшие вычислительные ресурсы, чем во всех остальных подходах к коррекции эффекта близости, поэтому данный подход применим лишь к небольшим областям кристалла и используется, как правило, в наиболее опасных точках.

Основной принцип коррекции эффекта оптической близости вне зависимости от применяемого подхода может быть проиллюстрирован на примере Рис.1.10.

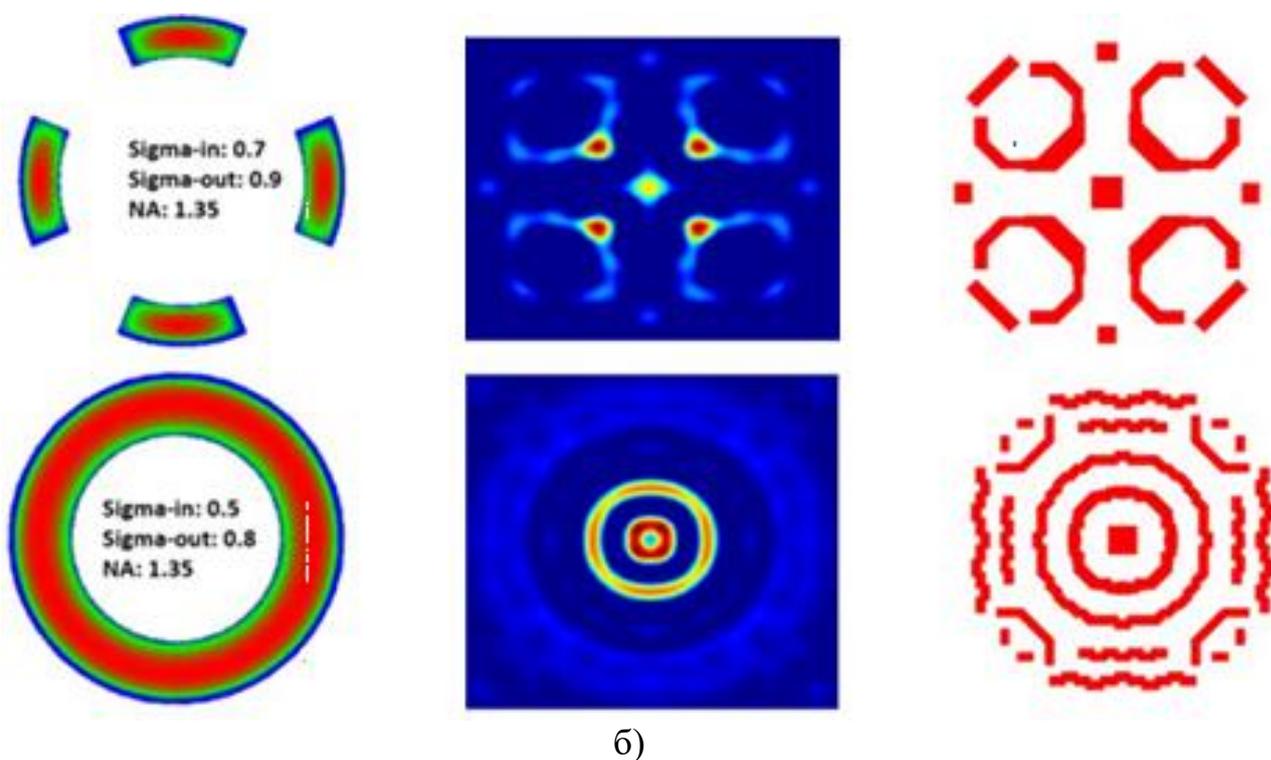
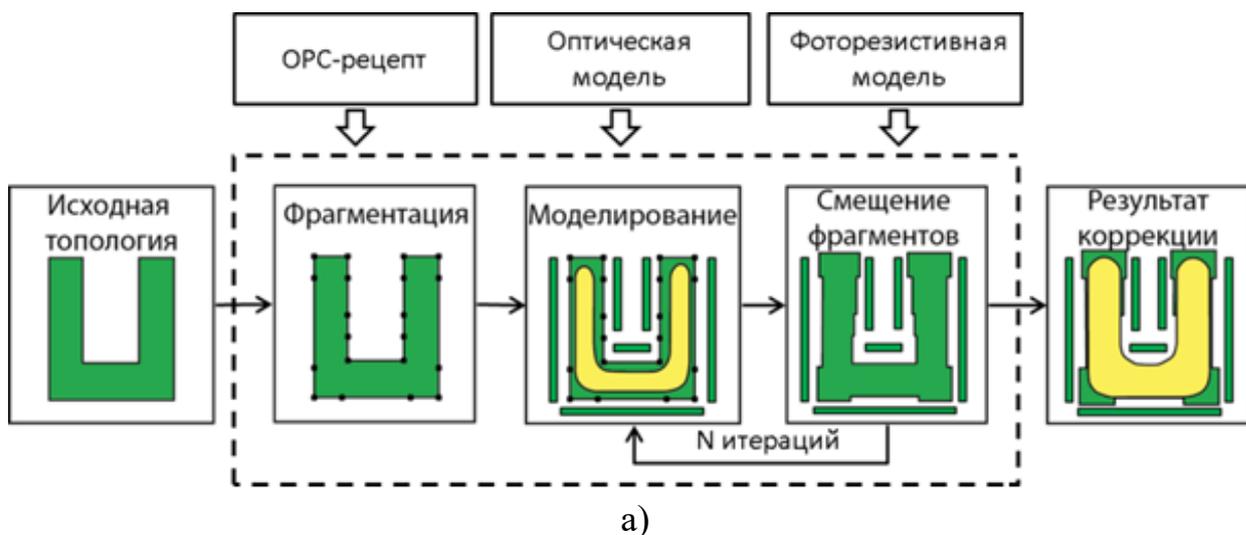


Рис. 1.9. Основные подходы к реализации коррекции эффекта оптической близости на основе моделирования литографического процесса:

а) типовая схема работы алгоритма MBOPC с добавлением RBSRAF;

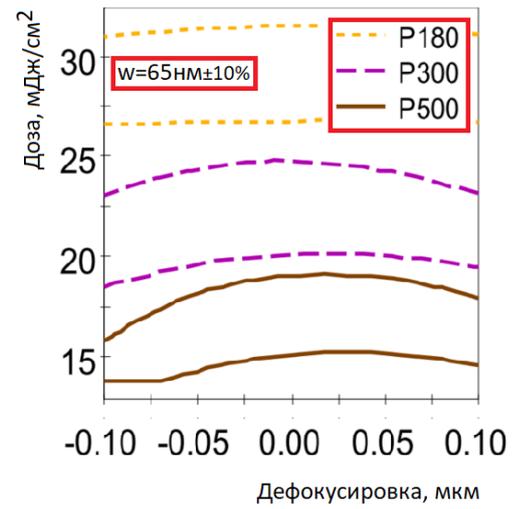
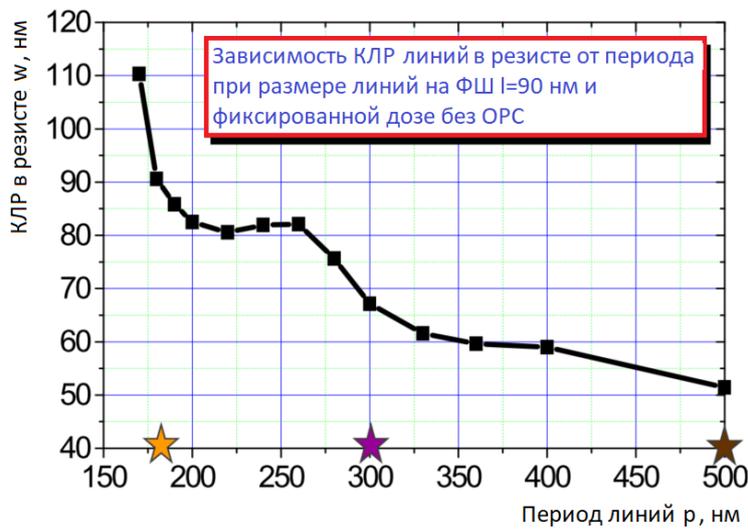
б) формирование топологии одиночного контактного окна на фотошаблоне методом ИЛТ [47]: форма осветителя – промежуточное полутоновое изображение – окончательное бинаризованное изображение на ФШ

В случае отсутствия какой либо топологической коррекции (Рис.1.10а) при фиксированных дозе и КЛР на ФШ (90 нм) размер пропечатываемых в резисте линий находится в сильной зависимости от их периода. Варьирование дозы позволяет добиться удовлетворительной пропечатки линий некоторых периодов, при этом области удовлетворительной пропечатки для линий разных периодов не пересекаются друг с другом. Применение топологической коррекции (Рис.1.10б) делает возможным пересечение областей удовлетворительной пропечатки и формирование конечного окна процесса для линий всех рассматриваемых периодов. За образование в координатах «фокус-доза» области удовлетворительной пропечатки периодических структур некоторого вида отвечают тип используемого фотошаблона (бинарный или фазовый), форма осветителя и настройки проекционной системы, а за положение этой области по оси дозы – коррекция рисунка на ФШ. Для одиночных, краевых и любых других элементов рисунка, воспроизводимых с недостаточным качеством, применяются непропечатываемые вспомогательные топологические элементы (SRAF).

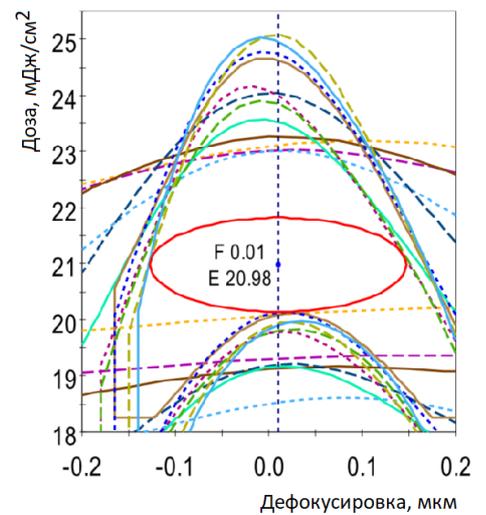
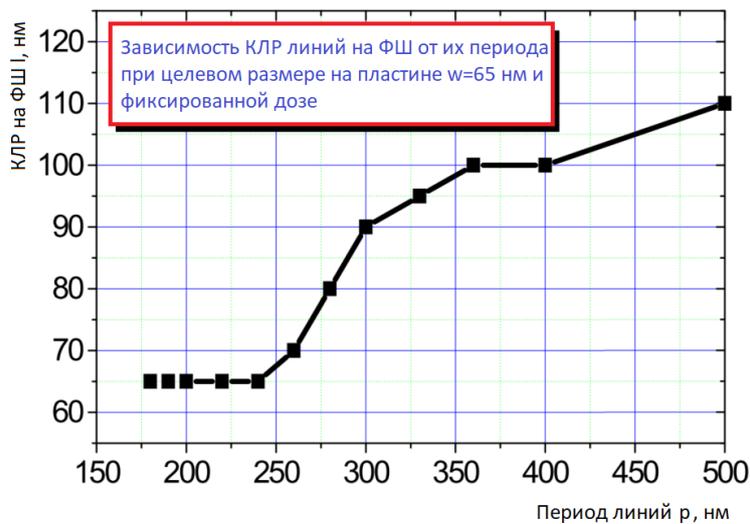
Кроме того, существенное ограничивающее влияние на общее окно процесса оказывает качество самого фотошаблона (неплоскостность фотошаблонной заготовки, допуски на КЛР на ФШ и другие параметры) [48, 49, 50, 51]. Этот вопрос будет подробно рассмотрен далее в настоящей работе (п.2.4).

Таким образом, применение различных методик RET, направленных на минимизацию технологического коэффициента k_1 , нельзя рассматривать в отрыве друг от друга, поскольку каждая из них решает свою часть задачи повышения разрешающей способности проекционной фотолитографии.

Комбинирование перечисленных методик позволяет добиться значения $k_1 \approx 0,3$ (или даже менее), что соответствует уровню технологии 28 нм при применении литографических установок, работающих на длине волны 193 нм с иммерсионным объективом с числовой апертурой $NA = 1,35$.



а)



б)

Рис. 1.10. Иллюстрация основного принципа коррекции эффекта оптической близости на примере групповых линий (без учета масштабирования):

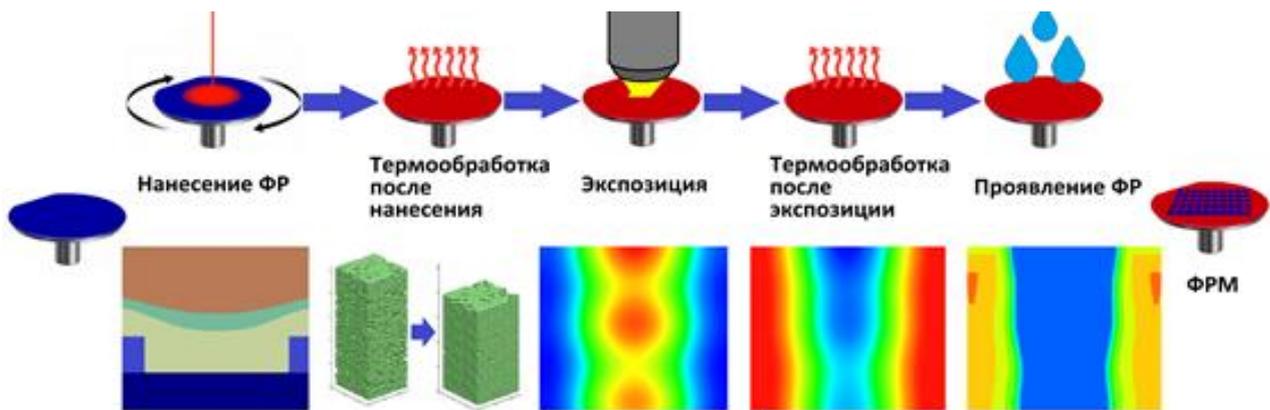
а) пропечатка линейчатых структур различного периода в отсутствии коррекции эффекта оптической близости;

б) коррекция эффекта оптической близости позволяет добиться пересечения областей удовлетворительной пропечатки для линий всех рассматриваемых периодов

1.2. Основные подходы к моделированию процессов переноса изображения с фотошаблона в фоторезист в проекционной фотолитографии

Важнейшим разделом вычислительной литографии является моделирование процесса формирования фоторезистивной маски (ФРМ). Это моделирование, так или иначе всегда выполняемое при реализации перечисленных выше методик, направленных на уменьшение технологического коэффициента k_1 , реализуется в двух видах [27, 52, 53]:

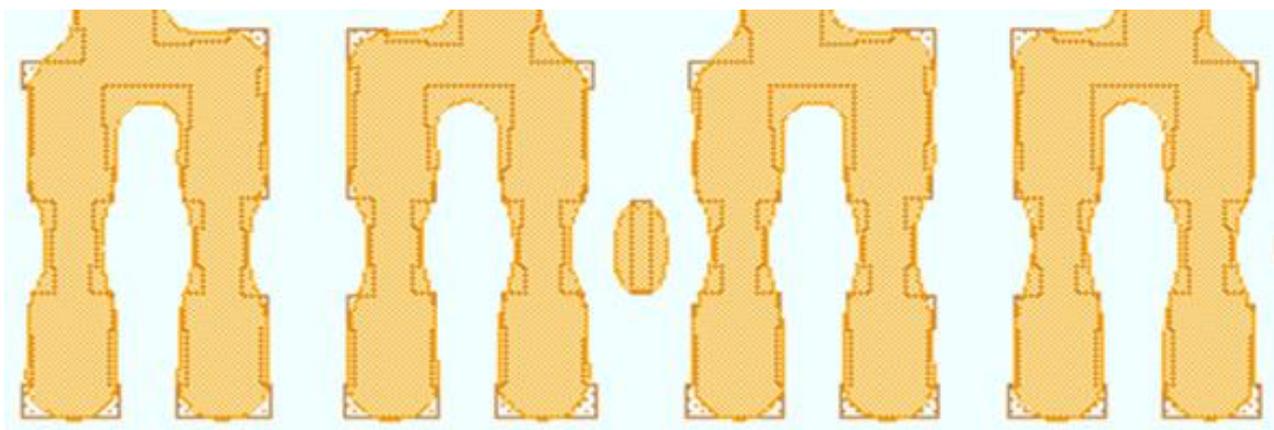
– т.н. **«полное» моделирование, основанное на физико-химических принципах.** Полное моделирование используется в так называемых «процессных» САПР (KLA Prolith, GenISys Lab, Panoramic Hyperlith и др.), предназначенных для разработки технологических процессов фотолитографии [54], и учитывает с той или иной степенью точности все этапы формирования ФРМ (Рис. 1.11а) – от нанесения пленок резистивного стека до экспонирования и проявления маски, пред- и постэкспозиционных термообработок и т.д. Процессные САПР позволяют рассчитать трехмерную конфигурацию маски на сравнительно небольших участках пластины (единицы или десятки мкм) (Рис. 1.11б). В процессе полного моделирования используются сложные и ресурсоемкие модели на основе законов фотохимии, химической кинетики, диффузии и т.д. Возможность расчета профиля ФРМ позволяет прогнозировать возникновение стоячих волн, получать т.н. «колебательные кривые» – зависимости какого-либо параметра (например, критического размера или дозы полной засветки) от толщины фоторезистивной маски, а также с высокой точностью оценивать окна процесса [55, 56]. Полное моделирование применяется при настройке процедуры коррекции оптической близости, при разработке правил расстановки вспомогательных непропечатываемых топологических элементов (SRAF) [57], правил введения фазового сдвига [21, 22, 23, 58].



а)



б)



в)

Рис. 1.11. Моделирование формирования ФРМ:

- а) процесс формирования фоторезистивной маски;
- б) расчет трехмерной конфигурации ФРМ при помощи «полного» моделирования, основанного на физических принципах (САПР KLA Prolith);
- в) расчет контура ФРМ при помощи компактных моделей (САПР Mentor Graphics Calibre)

В процессе разработки новых модификаций фоторезиста такой вид моделирования позволяет предсказывать зависимость конфигурации формируемой маски от концентрации составляющих исследуемой композиции;

– **аппроксимационно-эмпирическое моделирование**, дающее возможность относительно быстро рассчитать конфигурацию (как правило, только контур) получаемой маски для полноразмерной топологии кристалла при помощи ряда упрощенных интерполяционных моделей, называемых также «компактными» [59, 60] (Рис. 1.11в). Этот вид моделирования реализован в так называемых «конструкторско-технологических» САПР и по сути представляет собой различной степени сложности (в зависимости от решаемой задачи) пороговую обработку рассчитанного двумерного оптического изображения, формируемого в слое резиста проекционной системой литографической установки, и используется при коррекции эффектов оптической близости на полноразмерной топологии изделия. Правила обработки изображения определяются путем анализа экспериментальных данных, полученных в результате измерения тестовых структур, пропечатанных на пластине в условиях реального производства (таким образом производится **калибровка модели**). Возможен вариант модельного эксперимента, производимого при помощи полного моделирования пропечатки калибровочных структур.

Основные существующие на настоящий момент коммерческие литографические САПР рассматриваются в п.1.4 настоящей работы.

1.2.1. Методы расчета оптического изображения

В типовой фотолитографической установке освещение шаблона осуществляется по схеме Кёлера (Köhler illumination), в которой конденсор проецирует изображение источника освещения на входной зрачок проекционного объектива [2, 3, 61]. Между осветительной системой и

проекционным объективом помещается фотошаблон, на элементах которого проходящий свет претерпевает дифракцию (см., например, Рис. 1.3). Дифрагированное поле преобразуется проекционным объективом, и в районе поверхности пластины формируется т.н. «воздушное» изображение, выражаемое двумерной функцией $I(x, y)$.

Для расчета воздушного изображения применяется два подхода. Подход Аббе или подход интегрирования по источнику [2, 3] состоит в том, что источник представляется как совокупность точек, каждая из которых создает полностью когерентное освещение предмета, а оптическая система – соответствующее ему изображение. Второй подход (Хопкинса) [62] использует для моделирования формирования изображения т.н. взаимный коэффициент пропускания (также называемый «передаточным кросс-коэффициентом»), который не зависит от свойств ФШ и полностью описывает влияние оптической системы и освещения на формирование изображения. Взаимный коэффициент пропускания вычисляется посредством трудоемкого интегрирования, но один раз, а затем многократно используется для моделирования изображений различных фотошаблонов. Разница между подходами Аббе и Хопкинса состоит по сути в порядке интегрирования выражения для амплитуды электрического поля.

У каждого из обозначенных подходов есть своя область применения.

Так, например, подход Аббе преимущественно используется при «полном» моделировании формирования фоторезистивной маски, для оптимизации формы источника и других параметров процесса. Кроме того, при этом виде моделирования для расчета «скрытого» изображения требуется знание трехмерного распределения интенсивности, которое вычисляется на основе двумерного, с учетом отражения и преломления света на границах пленок фоторезистивного стека [3].

Подход Хопкинса удобен при обработке полноразмерной топологии изделия, например, при реализации процедуры МВОРС или верификации ее результатов.

Комплексная амплитуда плоской волны, падающей на фотошаблон под некоторым углом θ' , выражается следующим образом:

$$E_i(x, y) = e^{i2\pi \sin \theta' \frac{x}{\lambda}} \quad (1.7)$$

В плоскости пространственных частот освещение под углом эквивалентно сдвигу дифракционной картины на некоторую величину $f'_x = \sin \theta' / \lambda$. Поэтому амплитуда и интенсивность на пластине могут быть выражены следующим образом:

$$\begin{aligned} E(x, f'_x) &= F^{-1}\{T_m(f_x - f'_x)P(f_x)\}; \\ I(x, f'_x) &= |E(x, f'_x)|^2, \end{aligned} \quad (1.8)$$

где $P(f_x) = \begin{cases} 1, f_x \leq NA/\lambda \\ 0, f_x > NA/\lambda \end{cases}$ – функция зрачка, $T_m(f_x) = F\{E_i(x)t_m(x)\}$

– фурье-образ произведения амплитуды падающего на фотошаблон излучения на функцию пропускания фотошаблона (в общем случае комплексную), собственно и являющуюся исходным изображением. Для простоты рассмотрен одномерный случай.

Простая замена переменных приводит к выражению:

$$E(x, f'_x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(f_x + f'_x)T_m(f_x)e^{2\pi i(f_x + f'_x)x}df_x. \quad (1.9)$$

И, соответственно:

$$I_{total}(x) = \iint_{-\infty}^{\infty} TCC(f_x, \tilde{f}_x)T_m(f_x)T_m^*(\tilde{f}_x)e^{2\pi i(f_x - \tilde{f}_x)x}df_xd\tilde{f}_x, \quad (1.10)$$

где $TCC(f_x, \tilde{f}_x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(f_x + f'_x)P^*(\tilde{f}_x + f'_x)\tilde{S}(f'_x)df'_x$ – так называемый

«передаточный кросс-коэффициент» (или взаимный коэффициент пропускания), зависящий только от свойств оптической системы и формы осветителя, $\tilde{S}(f_x)$ – нормализованная функция осветителя.

Если принять во внимание, что $T_m(f_x) = \int_{-\infty}^{\infty} t_m(x) e^{-i2\pi f_x x} dx$, $T_m^*(\tilde{f}_x) = \int_{-\infty}^{\infty} t_m^*(x) e^{-i2\pi \tilde{f}_x x} dx$, импульсный отклик системы (по электрическому полю) –

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(f_x) e^{-i2\pi f_x x} df_x, \quad (1.11)$$

а т.н. «функция взаимной когерентности» $J_0(x)$, согласно теореме Ван-Циттерта-Цернике [2], есть преобразование Фурье распределения интенсивности в плоскости источника освещения (или нормализованной функции осветителя):

$$J_0(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}(f_x) e^{-i2\pi f_x x} df_x, \quad (1.12)$$

то выражение Хопкинса для интенсивности (1.10) переписывается следующим образом:

$$I(x) = \iint_{-\infty}^{\infty} V(x - x', x - x'') t_m(x') t_m^*(x'') dx' dx''. \quad (1.13)$$

Функция V , которая зависит только от источника и зрачка, определяется следующим образом:

$$V(a, b) = J_0(a - b) h(a) h^*(b). \quad (1.14)$$

Она может быть разложена в ряд по ортогональной системе собственных функций ϕ_n :

$$V(a, b) = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n \phi_n(a) \phi_n^*(b) \quad (1.15)$$

Выраженный таким образом интеграл Хопкинса приобретает вид:

$$\begin{aligned} I(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n \iint_{-\infty}^{\infty} \phi_n(x - x') \phi_n^*(x - x'') t_m(x') t_m^*(x'') dx' dx'' \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n \int_{-\infty}^{\infty} \phi_n(x - x') t_m(x') dx' \int_{-\infty}^{\infty} \phi_n^*(x - x'') t_m^*(x'') dx'' \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n |\phi_n(x) \otimes t_m(x)|^2. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Итак, для заданных формы источника и функции зрачка может быть определена ортогональная система собственных функций, каждая из которых

играет роль когерентного импульсного отклика по амплитуде электрического поля. Результат свертки каждой из этих функций с функцией пропускания фотошаблона дает электрическое поле от каждого определенного таким образом когерентного источника в плоскости пластины. Распределение интенсивности излучения в плоскости пластины определяется взвешенной суммой квадратов амплитуд.

Для случая точечного освещения выполняются следующие условия: $J_0(x) = 1, \lambda_1 = 1, \phi_1 = h(x), \lambda_n = 0$ для $n > 1$. Фактически, простейшее разложение в ряд по когерентным источникам состоит в том, что каждое n соответствует точке на источнике, при этом λ_n – ее интенсивность, а ϕ_n – импульсный отклик системы, соответствующий заданному положению точки осветителя. Таким образом, уравнение (1.16) является вариантом формулировки Аббе, выраженным в виде свертки.

Для реального расчета суммирование должно быть закончено при конечном N :

$$I(x) = \sum_{n=1}^N \lambda_n |\phi_n(x) \otimes t_m(x)|^2. \quad (1.17)$$

Увеличение N приводит к повышению точности расчета.

Описанный подход называется методом суммы когерентных источников (Sum of Coherent Sources – SOCS) [63]. Ключевым моментом здесь является поиск набора собственных функций, который позволяет минимизировать N с сохранением приемлемой точности. Поскольку новый набор собственных функций и собственных значений должен определяться каждый раз при изменении функции источника или зрачка, этот подход, как правило, используется в тех случаях, когда оптимальные форма источника и числовая апертура объектива уже определены (см. Главу 2).

Учет aberrаций (и, в частности, расфокусировки) производится путем внесения дополнительной фазовой ошибки в функцию зрачка [3]:

Вид aberrации	Выражение для волновой aberrации	Профиль волнового фронта
Расфокусировка	$c_{20}R_2^0(\rho)$, где $R_2^0(\rho) = 2\rho^2 - 1$	
Сферическая aberrация 3-го порядка	$c_{40}R_4^0(\rho)$, где $R_4^0(\rho) = 6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	
Сферическая aberrация 5-го порядка	$c_{60}R_6^0(\rho)$, где $R_6^0(\rho) = 20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1$	
Поперечное смещение, при различных значениях по полю описывает дисторсию	$c_{11}R_1^1(\rho) \cos \varphi$, где $R_1^1(\rho) = \rho$	
кома 3-го порядка	$c_{31}R_3^1(\rho) \cos \varphi$, где $R_3^1(\rho) = 3\rho^3 - 2\rho$	
кома 5-го порядка	$c_{51}R_5^1(\rho) \cos \varphi$, где $R_5^1(\rho) = 10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho$	

Рис. 1.12. Выражение некоторых aberrаций через полиномы Цернике [64]

$$P(f_x, f_y) = P_0(f_x, f_y) e^{2\pi i W(\rho, \phi)}, \quad (1.18)$$

где $P_0(f_x, f_y)$ – идеальная функция зрачка, а $W(\rho, \phi)$ – функция волновой aberrации, которую удобно выражать в т.н. «полиномах Цернике» [2, 64] следующим образом:

$$W(\rho, \phi) = \sum_{n=0}^p \sum_{m=0}^n c_{mn} R_n^m(\rho) \cos(m\phi) + \sum_{n=0}^p \sum_{m=0}^n s_{mn} R_n^m(\rho) \sin(m\phi). \quad (1.19)$$

Здесь $R_n^m = \sum_{k=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m-k}{2}\right)! \left(\frac{n-m-k}{2}\right)!} \rho^{n-2k}$, а координаты в плоскости пространственных частот выражаются через полярные следующим образом:

$$f_x = \frac{NA}{\lambda} \rho \cos\phi, \quad f_y = \frac{NA}{\lambda} \rho \sin\phi. \quad (1.20)$$

На Рис. 1.12 приведены примеры того, как некоторые aberrации выражаются через полиномы Цернике. В частности, в случае расфокусировки, обусловленной сдвигом пластины относительно оптимальной позиции по фокусу, имеем (в параксиальном приближении):

$$c_{20} = \frac{\delta NA^2}{4\lambda}. \quad (1.21)$$

В случае сдвига фотошаблона:

$$c_{20} = \frac{\delta_{\text{ФШ}} NA^2}{4\lambda M^2}. \quad (1.22)$$

Здесь δ и $\delta_{\text{ФШ}}$ – соответственно сдвиг пластины и фотошаблона относительно оптимальной позиции по фокусу, M – коэффициент масштабирования проекционного объектива.

Следующим этапом является определение объемного распределения интенсивности светового излучения в пленке фоторезиста. Оно может быть рассчитано с использованием ряда приближений, простейшим из которых является представление распределения интенсивности в форме

$$I(x, z) = I_I(x) I_S(z), \quad (1.23)$$

где $I_I(x)$ – интенсивность «воздушного» изображения, определенная, например, методом Аббе или Хопкинса, а $I_S(z)$ – распределение

интенсивности по толщине пленки, рассчитываемое с использованием соотношений Френеля [2, 3] в предположении нормального падения плоской волны на поверхность резиста. Это простейшее приближение было использовано Диллом в 1975 году в [65] при выводе уравнений, описывающих формирование скрытого изображения в слое фоторезиста. Рассмотренное приближение удовлетворительно работает лишь для малых числовых апертур, более точные модели описаны в [3].

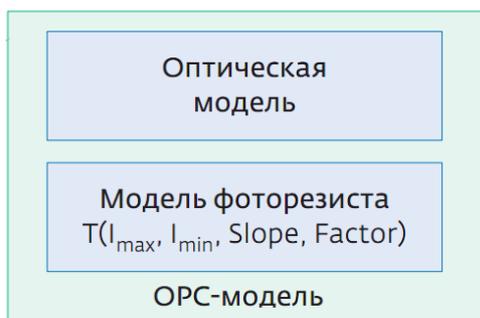
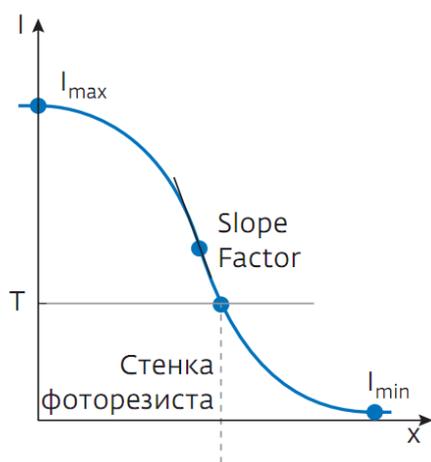
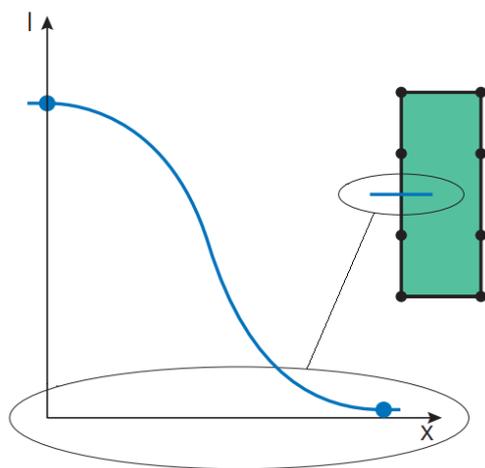
Распределение интенсивности по толщине пленки часто имеет осциллирующий характер в силу интерференции прошедшей и отраженной волн. Применение антиотражающих слоев (BARC – Bottom Anti-Reflecting Coating), согласованных по толщинам и показателям преломления с пленкой резиста, позволяет свести к минимуму осцилляции интенсивности.

1.2.2. Применение «компактных» моделей при расчете контура ФРМ для полноразмерной топологии изделия

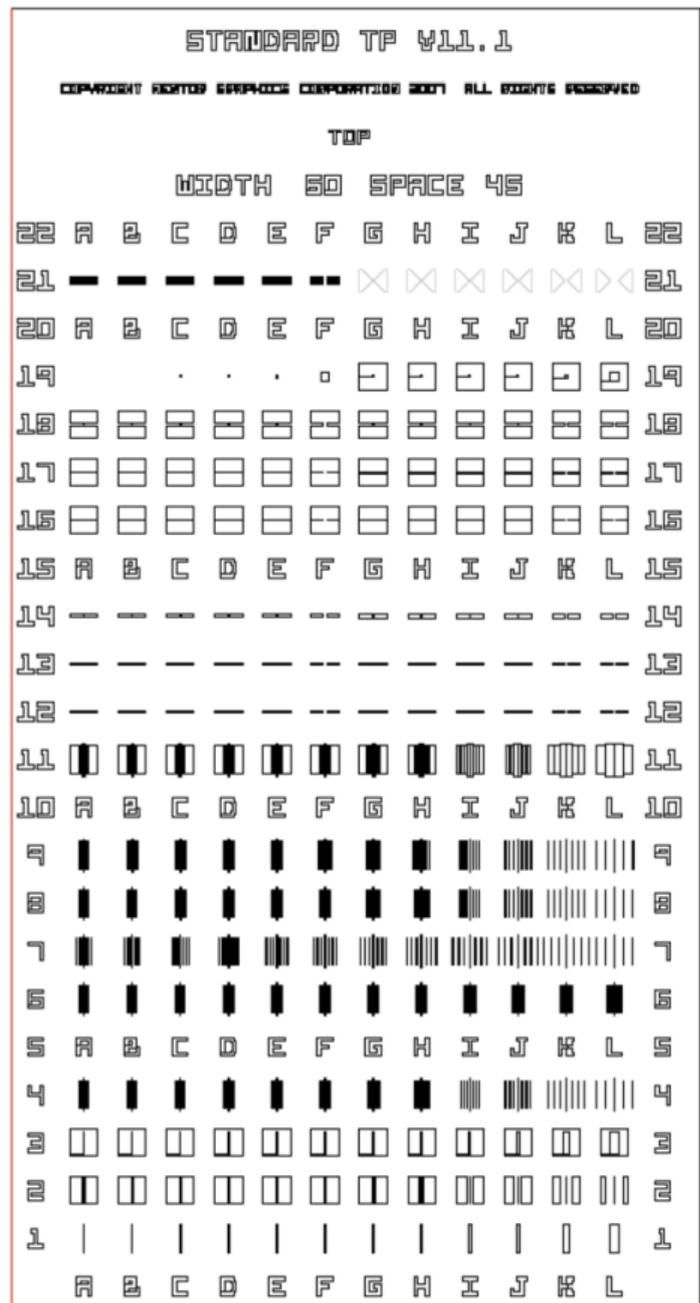
Основное предназначение аппроксимационно-эмпирического моделирования при расчете контура ФРМ состоит, как правило, в быстром получении двумерной геометрии фоторезистивной маски на полноразмерной топологии литографического слоя в процессе реализации топологической коррекции искажений, обусловленных эффектом оптической близости.

Как уже отмечалось выше, такое моделирование фактически является пороговой обработкой двумерного воздушного изображения, рассчитанного методом Хопкинса.

Иногда становится целесообразным применение компактных моделей формирования ФРМ, в том числе для задач процессного моделирования. Таким образом, например, может быть произведена оптимизация формы осветителя [19] или экспресс-оценка площади окна процесса [66], опираясь по сути лишь на рассчитанное двумерное оптическое изображение.



а)



б)

Рис. 1.13.

а) схема моделирования VT5;

б) пример тестовой калибровочной матрицы (упрощенной), предназначенной для калибровки компактных моделей формирования ФРМ

Имеется несколько типов компактных моделей, применяемых для расчета двумерной конфигурации ФРМ для полноразмерной топологии изделия, из которых наиболее часто используемой для технологий проектных норм до 65 нм включительно является модель VT5 (Variable Threshold 5), реализованная в САПР Mentor Graphics Calibre.

Модель VT5 является результатом развития более простых моделей переменного порога, таких как VTR и VTRE [67], и функционирует по следующему принципу. На границах полигонов топологии расставляются контрольные метки, для которых определяются параметры изображения: максимальная и минимальная интенсивность вдоль метки, а также первая и вторая производная интенсивности по координате в точке, где интенсивность равна значению, называемому «опорным» порогом (reference threshold). Положение стенки фоторезиста определяется через значение порога T , зависящее в свою очередь от установленных параметров воздушного изображения $T = T(I_{max}, I_{min}, dI/dx, dI^2/dx^2)$ в контрольной точке (Рис.1.13а). Здесь I_{max} – максимальное значение интенсивности; I_{min} – минимальное значение интенсивности; значения первой и второй производных интенсивности в точке размещения ребра фрагмента в топологическом рисунке называются соответственно *Slope* и *Factor*. Функция определения порога T представляет собой, как правило, полином первого или второго порядка, содержащий линейные, квадратичные и перекрестные члены относительно аргументов функции T .

Точность моделирования положения стенки фоторезиста в рамках рассматриваемой модели может быть увеличена, если вместо исходного изображения использовать результат его свертки с предварительно определенным набором ядер и уже к полученному распределению применять функцию порога. Такой подход позволяет учесть эффекты диффузии компонент фоторезиста и эффекты травления [68].

В работах [60, 69], а также в [70] обосновывается применение моделей с переменным порогом для моделирования контура ФРМ, достаточно

подробно описываются принципы моделирования и процесс калибровки таких моделей.

Калибровка модели сводится к определению коэффициентов полинома T в процессе анализа результатов пропечатки так называемой тестовой калибровочной матрицы, содержащей набор тестовых структур (Рис.13б), обеспечивающих максимально возможный охват пространства параметров воздушного изображения.

Функция порога (полином T) выражается следующим образом:

$$T = a_{\alpha} q^{\alpha}, \quad (1.24)$$

где a_{α} ($\alpha = 1, \dots, m$) – коэффициенты полинома, которые требуется найти, q^{α} – члены полинома, m – количество членов полинома. Здесь и далее в настоящем параграфе суммирование ведется по повторяющимся индексам.

После проведения пропечатки тестовой матрицы для n тестовых структур имеем систему n линейных уравнений относительно коэффициентов a (являющуюся переопределенной, поскольку, как правило, $n > m$):

$$a_{\beta} q_k^{\beta} = T_k, \quad (1.25)$$

где $k = 1, \dots, n$, порог T_k определяется из измерения КЛР в фоторезисте для k -й тестовой структуры, члены полинома q_k^{β} определяются при моделировании воздушного изображения, формируемого k -й тестовой структурой. Минимизируя невязку методом наименьших квадратов, получим

$$a_{\beta} q_k^{\beta} q_{\alpha}^k = T_k q_{\alpha}^k \quad (1.26)$$

или, в случае если экспериментальные результаты представлены с весами, выражаемыми диагональной матрицей W_k^k :

$$a_{\beta} q_i^{\beta} W_k^k q_{\alpha}^k = T_i W_k^k q_{\alpha}^k \quad (1.27)$$

(чем больше значение W_k^k , тем точнее должно выполняться уравнение k , то есть его невязка учитывается с большим весом).

Соотношение (1.26) именуется нормальной системой линейных алгебраических уравнений для (1.25) и представляет собой систему с квадратной матрицей $Q_{\alpha}^{\beta} = q_k^{\beta} q_{\alpha}^k$, которая, однако, в большинстве случаев является плохо обусловленной, поэтому для ее решения имеет смысл применять метод, состоящий в разложении решения по системе собственных ортогональных векторов матрицы Q_{α}^{β} :

$$a_{\beta} = b_i v_{\beta}^i. \quad (1.28)$$

Подставляя (1.28) в (1.26) и принимая во внимание, что $Q_j^{\alpha} v_{\alpha}^i = \lambda_j^i v_j^i$, получим:

$$a_{\alpha} = \frac{T_k q_{\beta}^k v_i^{\beta}}{\lambda_i^i} v_{\alpha}^i. \quad (1.29)$$

Здесь λ_i^i – собственные числа матрицы Q .

Как видно, в выражении для коэффициентов a_{α} присутствует операция деления на собственные числа λ_i^i , что в случае их малых значений приводит к возникновению нежелательных шумов и, как следствие, к нестабильности модели. Для исключения этой проблемы в разложении (1.28) используются только те собственные векторы матрицы Q , для соответствующих которым собственных чисел λ_i^i выполняется условие

$$\sqrt{\frac{\lambda_i^i}{\lambda_1^1}} > K, \quad (1.30)$$

где λ_1^1 – наибольшее собственное число матрицы Q , K – величина, обратная H -числу обусловленности матрицы Q [71] после исключения из рассмотрения минимальных собственных чисел, вносящих шум. Выполнение условия (1.30) позволяет получить модель с оптимальными характеристиками точности и стабильности.

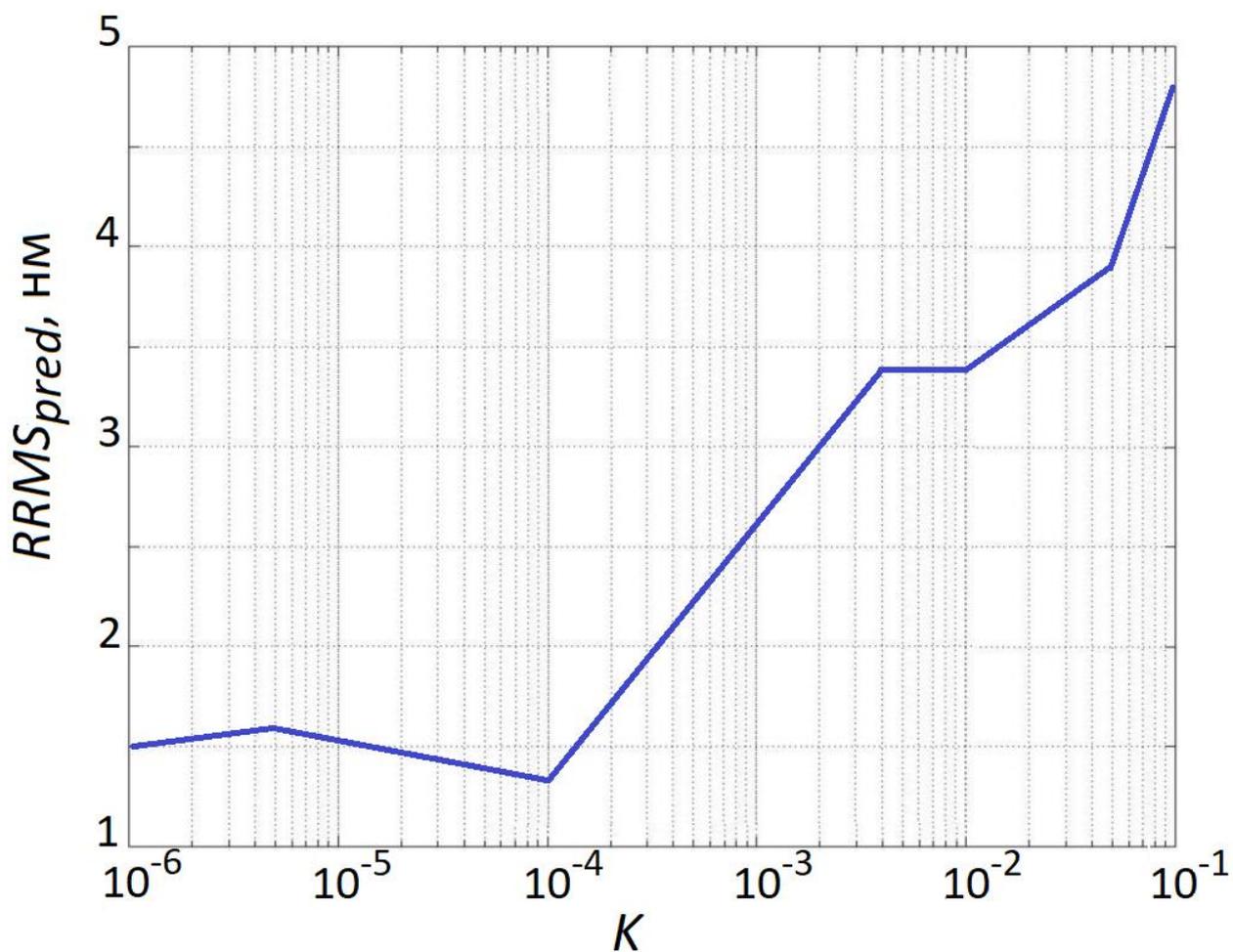


Рис. 1.14. Зависимость $RRMS_{pred}$ от K , посчитанная для множества из 261 тестовой структуры для слоя медной металлизации с центральным значением КЛР 110 нм [70]. Модель контура ФРМ – VT5 с 17-ю членами полинома (1.24). Минимум $RRMS_{pred}$ приходится на $K=10^{-4}$, что соответствует разложению решения нормальной системы (1.26) по 12-ти собственным векторам матрицы \mathbf{Q}

Значение критерия K определяется следующим образом. Калибровочное множество тестовых структур равномерно разбивается на ряд подмножеств, по каждому из которых производится калибровка модели VT5. Каждое из указанных подмножеств должно по возможности максимально охватывать пространство параметров воздушного изображения. Далее производится верификация откалиброванных моделей по всем полученным таким образом подмножествам тестовых структур и рассчитывается e_i^j – значение на подмножестве j СКО модели (см., например, ф-лу (3.2)), откалиброванной на подмножестве i . После этого вычисляется значение т.н. «СКО предсказания» $RRMS_{pred}$ по соотношению

$$RRMS_{pred} = \|e_i^i - e_j^j\| / \sqrt{l-1}, \quad (1.31)$$

где l – число подмножеств тестовых структур.

В простейшем случае, когда множество тестовых структур делится на два подмножества, $RRMS_{pred} = \sqrt{(e_1^2 - e_1^1)^2 + (e_2^1 - e_2^2)^2}$. Чем меньше значение $RRMS_{pred}$, тем более модель адекватна, стабильна и способна предсказывать контур ФПМ на тестовых структурах, не входящих в калибровочное множество. Если для калибровки моделей используются «лишние» собственные векторы, то значения e_1^2 и e_2^1 возрастают, что приводит к увеличению $RRMS_{pred}$. На Рис. 1.14 показана зависимость $RRMS_{pred}$ от K из [70], посчитанная для множества из 261 тестовой структуры для слоя медной металлизации с центральным значением КЛР 110 нм[70]. В работе [70] использовалась модель VT5 с 17-ю членами полинома (1.24). Минимум $RRMS_{pred}$ приходится на $K=10^{-4}$, что соответствует разложению решения нормальной системы (1.26) по 12-ти собственным векторам матрицы Q .

1.3. Требования к параметрам литографических операций

Известно, что наиболее корректным способом классификации технологий массового производства микроэлектроники по т.н. «уровням» или «проектным нормам», выражаемым в нм, является сопоставление рассматриваемого технологического процесса с размером полупериода регулярной структуры максимально возможной плотности упаковки, воспроизводимой в процессе проекционной фотолитографии на первом уровне разводки ДОЗУ (DRAM 1/2 pitch) [72]. В последние годы около 50% мирового рынка микроэлектроники занимают схемы проектных норм 28 нм и менее, оставшаяся половина делится между изделиями уровня от 32 нм до 250 нм и более [73].

Для литографических процессов, применяемых при производстве интегральных схем, нормируется ряд требований к технологическим параметрам и возможностям литографического оборудования, в том числе допуски на дефокусировку (глубина фокуса или ширина окна процесса), на измеряемый критический размер контрольного элемента и на точность совмещения слоев. Основные требования к возможностям проекционной фотолитографии для критических слоев технологий различных проектных норм, типовые значения параметров процесса, а также обычно используемые виды RET [21, 26, 29, 74, 75] сведены в Таблице 1.

Таблица 1 составлена на основе материалов ITRS и ISMI [76, 77, 78, 79], и содержит данные, которые могут расходиться с параметрами реальных технологических процессов, но, тем не менее, отражают достаточно строгие требования к результату операции проекционной фотолитографии критических слоев той или иной технологии.

Таблица 1. Типовые требования к основным параметрам процесса проекционной фотолитографии для критических слоев технологий ряда проектных норм по данным ITRS³ и ISMI⁴

Проектные нормы (DRAM ½ pitch), нм	250		180		130		90	65	45	32	28
	Длина волны литографии, нм	365	248	248	193	248	193	193	193	193	193
Кэф. масштабирования	4×	4×	4×	4×	4×	4×	4×	4×	4×	4×	4×
Типовое значение NA	0,6	0,55	0,65	0,6	0,8	0,7	0,8	0,9	1,2	1,2	1,35
Иммерсия	-	-	-	-	-	-	-	-	да	да	да
Применяемые RET	OAI, MBOPC, SRAF	OAI, RBOPC	OAI, MBOPC, SRAF, PSM	RBOPC	OAI, MBOPC, SRAF, PSM	OAI, MBOPC, SRAF, (PSM)	OAI, MBOPC, SRAF, PSM	OAI, MBOPC, SRAF, PSM	OAI, MBOPC, SRAF, PSM	OAI, MBOPC, MBSRAF, PSM	SMO, MBOPC/ILT, MBSRAF, PSM
Поляризованный осветитель	-	-	-	-	-	-	-	-	-	да	да
Двойная экспозиция/двойное впечатывание	-	-	-	-	-	-	-	-	да	да	да
Глубина фокуса по полю кристалла, нм	>1000	>1000	>650	>650	>600	>500	>400	>200	>200	>150	>150
Номинальный критический линейный размер (КЛР), нм	250	250	180	180	150	100	85	65	41	31	28
Допуск на КЛР, 3σ, нм	25	25	18	18	11	11	8	6,5	4,7	3,3	2,8
Диапазон доз для используемых резистов, мДж/см ²	100÷300	20÷50	20÷50	20÷50	20÷50	20÷50	20÷50	20÷50	20÷50	10÷50	10÷50
Литографическая точность совмещения, 3σ, нм	71	71	50	50	40	40	25	18	10	6,4	5,7

³ International Technology Roadmap for Semiconductors – Международный план-прогноз по развитию полупроводниковой технологии – набор документов, периодически выпускавшийся с 1993 г. по 2013 г. сообществом экспертов SIA (Semiconductor Industry Association) из США, Европы, Японии, Южной Кореи и Тайваня, охватывающий исчерпывающее количество показателей развития полупроводниковой технологии, в том числе технологии литографии. С 2016 года функции ITRS перешли к IRDS — International Roadmap for Devices and Systems – Международному плану-прогнозу для устройств и систем, существующему под эгидой IEEE по настоящее время.

⁴ International SEMATECH Manufacturing Initiative – дочерняя организация SEMATECH – некоммерческого консорциума ведущих мировых предприятий полупроводниковой промышленности, в 1987-2014 годах проводившего исследования в области производства интегральных микросхем и внедрявшего новые технологии в производство.

1.4. Современные коммерческие САПР, используемые для исследования и коррекции эффектов оптической близости при разработке литографических процессов и проектировании фотошаблонов

Литографическое моделирование обычно реализуется в двух направлениях [54], для каждого из которых разработаны соответствующие САПР.

Выбор и оптимизация технологических режимов и параметров топологической коррекции производится, как правило (а начиная с уровня технологии 180 нм – в обязательном порядке), с использованием так называемых «процессных» САПР (см. Таблицу 2), реализующих помимо расчета оптического изображения полное моделирование фотохимических процессов, происходящих в слое фоторезиста. Это значительно удешевляет исследовательские работы и снижает загрузку оборудования.

Таблица 2 – Процессные литографические САПР

САПР	Производитель	URL
Sentaurus Litho	Synopsys	https://www.synopsys.com/silicon.html
Prolith TM	KLA-Tencor	https://www.kla-tencor.com/products/chip-manufacturing/patterning-simulation.html
HyperLith TM	Panoramic Technology	http://panoramictech.com/
LAB	GenISys	https://www.genisys-gmbh.com

В процессных САПР на первом этапе моделируются процессы нанесения и сушки резиста, на втором – поглощение им света, и на последнем этапе – процесс проявления резиста, который также требует достаточно сложного математического описания. Такие модели требуют досконального понимания всех сопутствующих физико-химических явлений и являются крайне ресурсоемкими с точки зрения вычислительных затрат, но зато дают возможность расчета параметров, необходимых для выбора корректных технологических режимов фотолитографии.

Так называемые «конструкторско-технологические» САПР представляют собой сложнейшие программные комплексы, состоящие из множества модулей и оперирующие весьма крупными объемами информации. Они предназначены преимущественно для подготовки управляющей информации для фотошаблонов, выполняя обработку исходных топологических решений заказных проектов, включая операции автоматического формирования компоновки фотошаблона, анализа топологической информации, осуществления процедур коррекции оптической близости на полноразмерной топологии изделия, верификации управляющей информации, аттестации и контроля.

Такие системы демонстрируют колоссальный выигрыш по времени расчета контура ФРМ в сравнении с «процессными» [54], однако точность в данном случае находится в сильной зависимости от количества и качества калибровочных данных, которые, помимо экспериментов, в некоторых случаях могут быть получены при помощи процессных САПР.

Геометрические преобразования исходных проектных топологических решений заказчика для подавления дифракционных эффектов, верификации, аттестации на дефектность и контроль линейных размеров осуществляется соответствующими опциями программных продуктов Synopsys CATS и Mentor Graphics Calibre.

В Таблицах 3 и 4 представлено соответствие программных продуктов от компаний Synopsys и Mentor Graphics разным уровням технологии. Компания Cadence также выпустила линейку программных продуктов для реализации коррекции эффектов оптической близости, однако она получила наименьшее распространение среди разработчиков ОРС.

Средства Synopsys CATS имеют более гибкие настройки для осуществления процесса фрагментации исходной топологии, подготовки управляющей информации для изготовления фотошаблонов, а также обладают возможностью автоматизации различных задач посредством применения скриптов. В Таблицах 5, 6 и 7 представлено краткое описание

назначения программных модулей Mentor Graphics Calibre, Synopsys CATS и Cadence, связанных с подготовкой OPC.

Таблица 3 – Области применения модулей Mentor Graphics Calibre.

Модуль САПР	Уровень технологии				
	180 нм	130 нм	90 нм	65 нм	32 нм
Базовые операции	+	+	+	+	+
DRC	+	+	+	+	+
LVS	+	+	+	+	+
Parasitic Extraction	+	+	+	+	+
DFM			+	+	+
LFD				+	+
SRAF		+	+	+	+
Multi Patterning					+
TDOPC rule based	+	+	+	+	+
MBOPC sparse		+	+	+	+
MBOPC dense					+
Post OPC verification		+	+	+	+

Таблица 4 – Области применения модулей Synopsys CATS.

Модуль САПР	Уровень технологии				
	180 нм	130 нм	90 нм	65 нм	32 нм
Базовые операции	+	+	+	+	+
Proteus Pipeline Framework		+	+	+	+
Proteus DPT					+
Proteus MBAF			+	+	+
Proteus LRC		+	+	+	+
TCAD MS Progen		+	+	+	+
Proteus MetroKit		+	+	+	+

Таблица 5 – Описание модулей Calibre для проведения OPC.

Модуль САПР	Назначение
Calibre WorkBench	Интерактивная среда разработки моделей фотолитографии и настройки процессов моделирования. Имеет встроенный визуализатор топологии. Поддерживает функции корректировки топологии, а также автоматической генерации тестовой матрицы.
Calibre nmDRC	Проверка на соответствие правилам проектирования. Поддерживает работу с иерархической структурой топологии.
Calibre LFD	Система моделирования процесса фотолитографии и влияния его отклонений на выход годных. Генерирует индекс вариативности проекта (DVI), позволяя выделить проблемные зоны и выбрать конфигурацию, обеспечивающую максимальный выход годных.
Calibre TDOPC	Система коррекции ширины и окончания линий.
Calibre OPCpro	Полнофункциональная система оптической коррекции для увеличения выхода годных. Поддерживает sparse-режим работы.
Calibre nmOPC	Полнофункциональная система оптической коррекции для увеличения выхода годных. Поддерживает dense-режим работы.
Calibre PRINTImage	Система пост-OPC верификации в sparse-режиме для моделей типа VTR/VTRE/VT5
Caibre OPCverify	Система пост-OPC верификации в dense-режиме для моделей типа CM1/PLM

Таблица 6 – Описание модулей Synopsys CATS для реализации OPC.

Модуль САПР	Назначение
CATS-Synthesis Module	RVOPC
CATS Manuf. Rules Checking	Проверка фотошаблонов на соответствие правилам проектирования с возможностью распараллеливания.
Proteus LRC Base	Инструмент для сравнения кремния и топологии. Используется для литографической верификации для разработки маршрута синтеза фотошаблонов и осуществления послепроизводственного нормоконтроля синтеза фотошаблонов.
IC WorkBench Plus	Автоматизированная рабочая среда визуализации топологии, фотошаблонов и литографической информации.
Proteus PipeLine Framework	Инструмент для управления подготовкой входных данных в конвейерном режиме
Proteus DPT Base	Инструмент для подготовки фотошаблонов в режиме multi patterning.
Proteus MBAF	Добавление вспомогательных фигур на основе моделей.
TCAD MS Progen, OPC Mod Gen	Программируемое ядро моделирования, необходимое для создания моделей.
Proteus MetroKit	Инструмент для поддержки измерений и моделирования процедуры оптической коррекции. Включает возможности генерации тестовых фигур, управления сканирующим электронным микроскопом и экстракцию данных SEM.

Таблица 7 – Описание модулей Cadence для реализации OPC.

Модуль САПР	Назначение
LVS	Программный модуль, обеспечивающий проверки на соответствие правилам проектирования, на соответствие топологии с электрической схемой и подсчет паразитных параметров.
Process Proximity Compensation	Коррекция с помощью вычислительной литографии. Поддерживает расстановку вспомогательных фигур, инверсную литографию и процессные модели травления.
Litho Physical Analyzer	Поиск и исправление литографических опасных точек для повышения выхода годных.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения цели диссертационной работы, а именно для разработки методов коррекции эффектов оптической близости для затворного слоя технологии производства СБИС проектных норм 65 нм, необходимо решить следующие научно-технические задачи:

- На основе моделирования процесса проекционной фотолитографии для затворных слоев проектных норм 65 нм произвести:

- оптимизацию настроек проекционной системы литографической установки;
- предварительное определение параметров используемых непропечатываемых вспомогательных структур (SRAF);
- разработку типовой оценочной спецификации на фотошаблоны затворного слоя проектных норм 65 нм.

- Разработать калибровочный фотошаблон, предназначенный для экспериментального исследования эффективности используемых SRAF и калибровки компактных моделей формирования контура фоторезистивной маски затворных слоев проектных норм 65 нм, провести эксперименты по пропечатке калибровочных и тестовых матриц.

- На основе проведенных экспериментов произвести уточнение основных параметров используемых SRAF.

- На основе анализа экспериментальных данных произвести процедуру калибровки компактной модели VT5 формирования контура ФРМ.

- С учетом результатов моделирования процесса проекционной фотолитографии, результатов экспериментов по пропечатке тестовых структур и оценок ограничений, накладываемых спецификацией на топологию ФШ, разработать базовую процедуру расстановки структур SRAF для затворного слоя технологии проектных норм 65 нм.

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

Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОРС-РЕШЕНИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ФШ

Реализация необходимых RET в части, касающейся разработчиков ФШ, практически всегда начинается с выбора наилучших настроек проекционной системы литографической установки (числовая апертура и форма осветителя), обеспечивающих оптимальную проработку всех критических структур переносимого в резист рисунка, а также разработки требований к используемым фотошаблонам. На этом же этапе определяется необходимость использования структур SRAF и оцениваются их основные параметры. Указанные работы производятся в тесном взаимодействии с технологами фотолитографии по причине очевидной необходимости экспериментального подтверждения получаемых результатов.

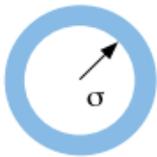
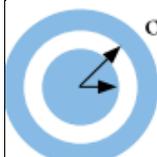
Основной целью данной главы является определение оптимальных настроек проекционной системы литографической установки, предварительное определение параметров SRAF, а также выработка требований фотошаблонной спецификации для затворного слоя технологии проектных норм 65 нм.

Искомые параметры находятся посредством моделирования процесса проекционной фотолитографии исходя из соображений удовлетворения определяемых характеристик литографического изображения требованиям к технологии проектных норм 65 нм (см. Табл.1).

2.1 Исходные данные

В Таблице 8 приводятся характеристики имеющегося в распоряжении оборудования экспонирования и основные виды требуемого рисунка в резисте, используемые в настоящей работе в качестве исходных данных при моделировании процесса фотолитографии с целью определения оптимальных настроек проекционной системы и параметров непропечатываемых структур SRAF.

Таблица 8. Основные характеристики используемого оборудования экспонирования и передаваемого рисунка затворного слоя для технологии проектных норм 65 нм

Основные характеристики	
ASML PAS 5500/1150C (Рис. В.1)	
Проекционная система: $\lambda = 193$ нм; $NA = 0,5 \div 0,75$; Размер кадра: 26мм×33мм; Коэффициент масштабирования: $M=4$	
Осветитель:	
«Conventional» 	$\sigma_{\min} = 0,33$ $\sigma_{\max} = 0,88$
«Annular» 	$\sigma_{\text{in}} = 0,16 \div 0,64$ $\sigma_{\text{out}} = 0,40 \div 0,85$
Используемое оборудование	Опционально – применение ДОЭ для формирования осветителя сложной формы («Dipole», «Quasar» и т.д.), доступно для источника «Quasar»: $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 40^\circ$, σ_{in} и σ_{out} – те же, что и в «Annular»
	Совмещение: $OL_{\text{Tool-to-Tool}} = 20$ нм; $OL_{\text{Tool-to-Itself}} = 12$ нм
	Опционально – возможность улучшения $OL_{\text{Tool-to-Itself}}$ до 10 нм
ФРМ⁵	Тип рисунка вертикальные и горизонтальные групповые и изолированные линейчатые структуры
	КЛР 80 нм на пластине
	Период групповых линий 190÷540 нм на пластине
	Глубина фокуса ≥ 250 нм (EL=10%, $\Delta\text{КЛР} = \pm 10\%$)
Тип ФШ	ЕАРSM: кодируемый элемент – темный, коэф. пропускания $t = 0,06$; угол сдвига фазы $\varphi = 180^\circ$

⁵ Приведенные здесь требования к КЛР в резисте ослаблены по сравнению с указанными в Таблице 1 в силу специфики рассматриваемого техпроцесса. По этой же причине (а также по причине использования методов моделирования на основе анализа воздушного изображения, дающих оценочную точность) требования к глубине фокуса ужесточены. Далее, при расчете параметров фотошаблонной спецификации будут использованы требования Таблицы 1.

2.2. Подбор оптимальных настроек проекционной системы

Решение задачи подбора оптимальных параметров проекционной системы литографической установки является важнейшим этапом применения RET, реализуемым, как правило, на основе анализа воздушного изображения периодических элементов топологии литографического слоя.

Для моделирования формирования контура фоторезистивной маски и для оценки процессных окон использовалась простейшая модель с постоянным порогом по интенсивности, которая калибровалась с применением так называемого «якорного» топологического элемента.

Суть метода заключается в следующем. Из всего набора тестовых рисунков выбирается один, не подвергающийся впоследствии какой-либо топологической коррекции, который при литографии дает заданное значение КЛР в резисте (необязательно соответствующее КЛР на ФШ с учетом масштабирования – см. Рис.2.1а). В данном случае это 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 определяется порог воздушного изображения (доля максимального значения интенсивности), соответствующий номинальной дозе литографии. При расчете областей удовлетворительной пропечатки производится вариация значений порога воздушного изображения (в данном случае соответствующего дозе литографии) и дефокусировки и для каждой из тестовых топологических структур проверяется соответствие рассчитанного в рамках данной модели КЛР в резисте заданным допускам (см. Таблицы 8 и 9). Области удовлетворительной пропечатки и процессные окна оцениваются для всех исследуемых структур топологии. Наилучшая форма источника подбирается исходя из требований к глубине фокуса (или ширине окна процесса). Все исследуемые элементы рисунка, кроме «якорного», подвергаются топологической коррекции в целях выведения центров областей их

"Якорный" элемент топологии

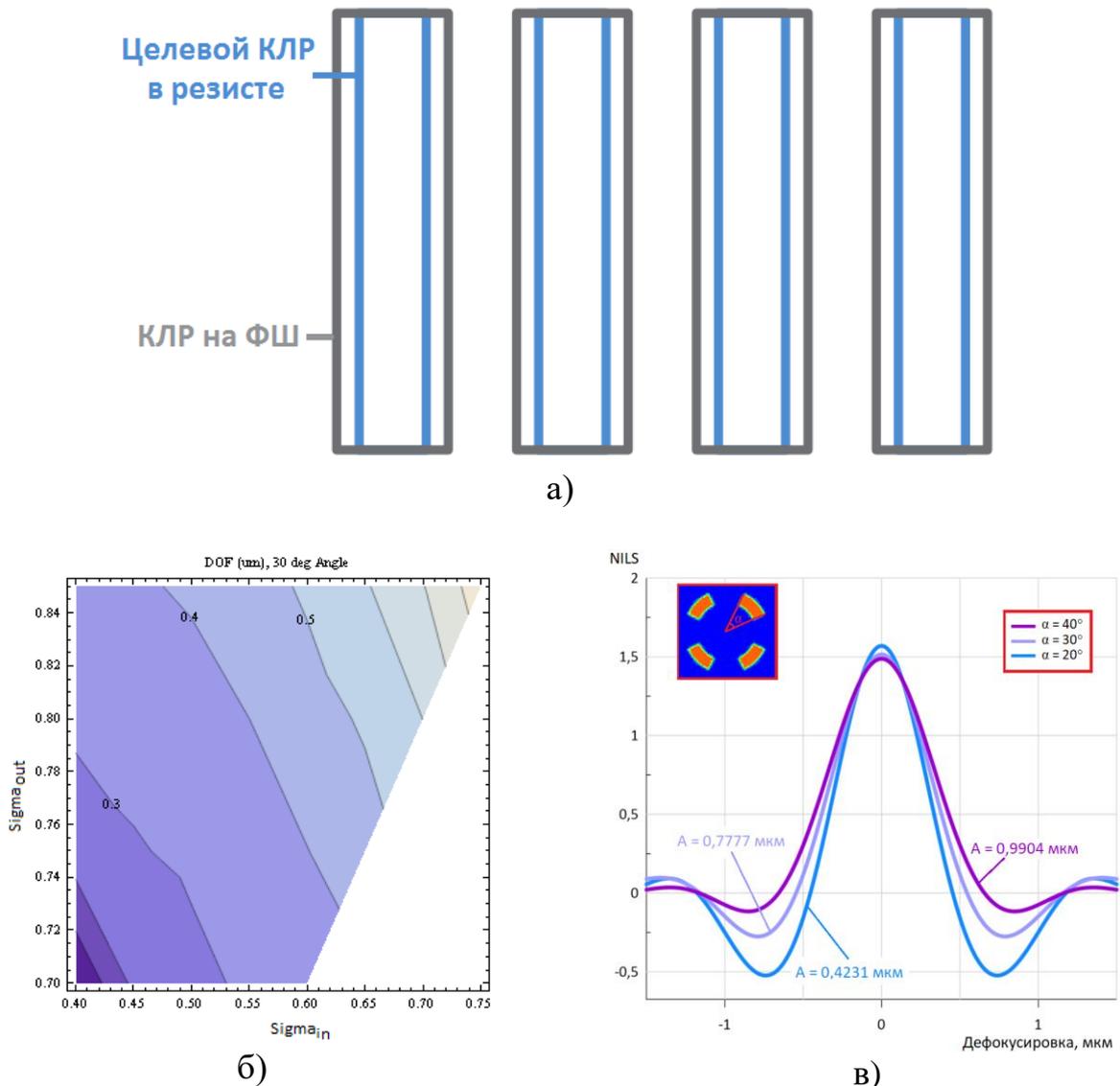


Рис. 2.1.

а) использование «якорных» элементов топологии для калибровки упрощенной модели контура ФРМ с постоянным порогом по интенсивности воздушного изображения;

б) зависимость DOF от σ_{in} и σ_{out} для осветителя типа «Quasar» ($\alpha = 30^\circ$) для «якорной» структуры (периодический групповой элемент типа «линия» темного тона с шириной 320 нм и периодом 760 нм на ФШ, целевой размер структуры в ФРМ – 80 нм), полученная в рамках упрощенной модели контура ФРМ с постоянным порогом по интенсивности воздушного изображения;

в) зависимость NIS от дефокусировки для «якорной» структуры при использовании осветителя типа «Quasar» при $\sigma_{in} = 0,60$ и $\sigma_{out} = 0,85$ для разных значений α . Для предварительной оценки ширины процессных окон

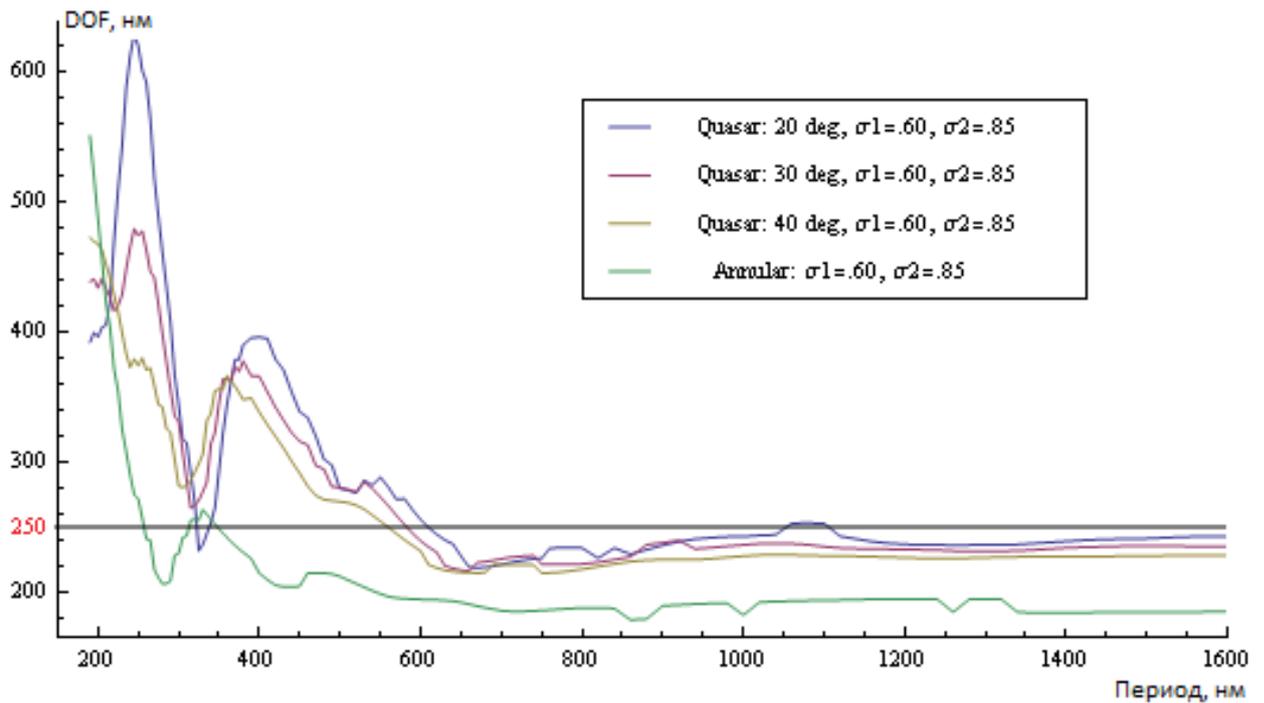
может быть использован интегральный параметр $A = \int_{-F_{max}}^{F_{max}} NIS(f) df$

удовлетворительной пропечатки на один уровень по оси дозы с областью удовлетворительной пропечатки «якорного» элемента и получения таким образом максимально возможного общего окна процесса (Рис. 1.10б, Рис.2.3). Параметры вычислительных экспериментов по нахождению оптимальных настроек проекционной системы приведены в Таблице 9.

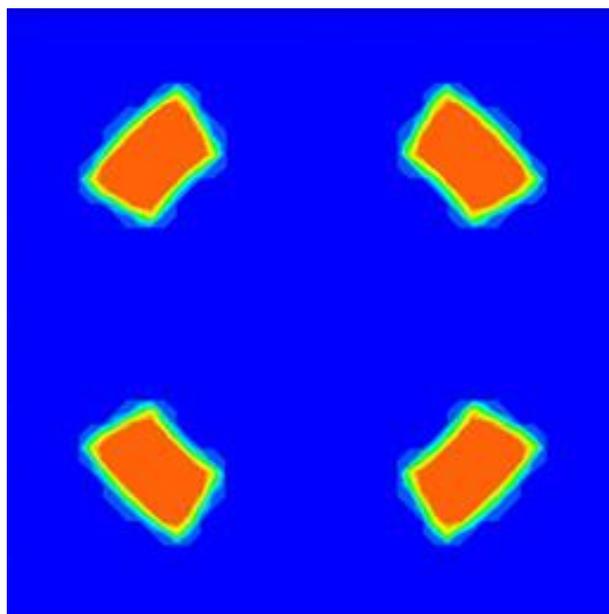
Таблица 9. Основные параметры вычислительных экспериментов по подбору оптимальных настроек проекционной системы сканера ASML PAS 5500/1150С для литографии затворного слоя технологии проектных норм 65 нм

Тип моделирования	анализ воздушного изображения
Проекционная система	$\lambda = 193$ нм; $NA = 0,75$; $M = 4$; типы осветителя «Annular», «Quasar»; $\sigma_{in} = 0,16 \div 0,64$, $\sigma_{out} = 0,40 \div 0,85$; для «Quasar» значения угла α : 20° , 30° и 40° ; поляризация осветителя не учитывается
ФШ	ЕAPSM: $t = 0,06$; $\varphi = 180^\circ$, кодируемый элемент темный, приближение Кирхгофа
Топология на ФШ	вертикальные и горизонтальные групповые линейчатые структуры КЛР: $l = 320$ нм; период: $p = 760 \div 2160$ нм
«Якорный» топологический элемент	КЛР на ФШ: $l = 320$ нм; период на ФШ: $p = 760$ нм; КЛР в резисте: 80 нм
Номинальный порог воздушного изображения для «якорного» элемента	$\Omega = 0,3408$
Окно процесса	эллиптическое; $\Delta\Omega = 10\%$, $\Delta\text{КЛР} = \pm 10\%$

Как известно, осветитель типа «Conventional» не позволяет достичь приемлемой глубины фокуса для структур мелких периодов, а тип «Annular» оказывается недостаточно эффективен для структур со средними значениями периода [80], демонстрируя т.н. «Forbidden Pitches» (определенные значения периодов, при которых линии прорабатываются с недостаточной глубиной фокуса [3] в силу паразитной засветки от незадействованных в формировании полезного сигнала участков источника – см. Рис.1.3). Поэтому основным вариантом осветителя для данной задачи рассматривался тип «Quasar».



а)



б)

Рис. 2.2. Подбор оптимальной формы осветителя:

а) результаты вычислительных экспериментов по расчету зависимости глубины фокуса от периода линий для разных форм осветителя (период указан в масштабе пластины);

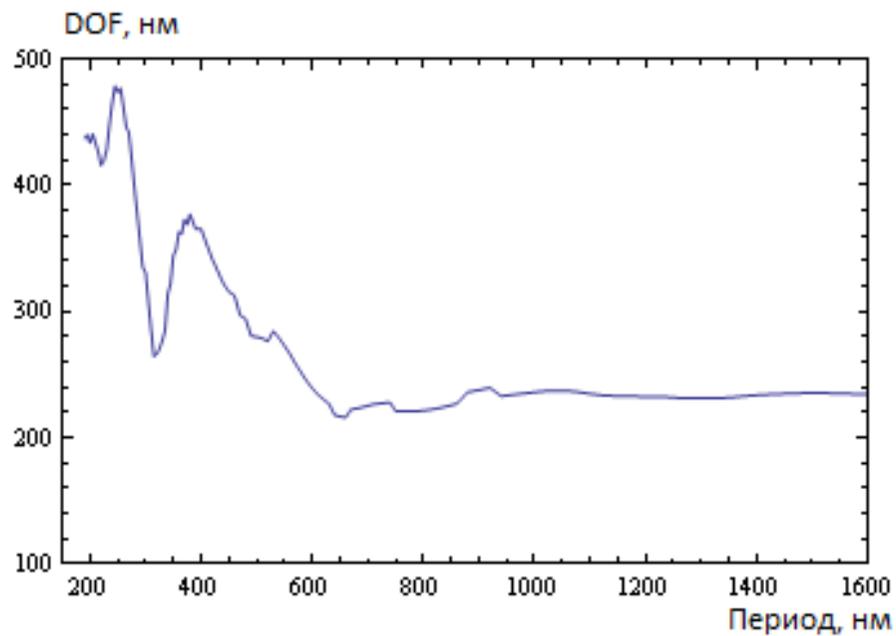
б) распределение интенсивности осветителя типа «Quasar» с параметрами $\sigma_{in} = 0,60, \sigma_{out} = 0,85, \alpha = 30^\circ$

При максимально возможной числовой апертуре проекционного объектива $NA = 0,75$ для «якорной» топологической структуры были признаны оптимальными значения $\sigma_{in} = 0,60$ и $\sigma_{out} = 0,85$ (Рис.2.1б). Наилучшим значением угла α при литографии «якорной» структуры, имеющей самый малый период из рассматриваемых, оказалось $\alpha = 40^\circ$ ⁶ (Рис.2.1в). Здесь для сравнения окон процесса использовался интегральный

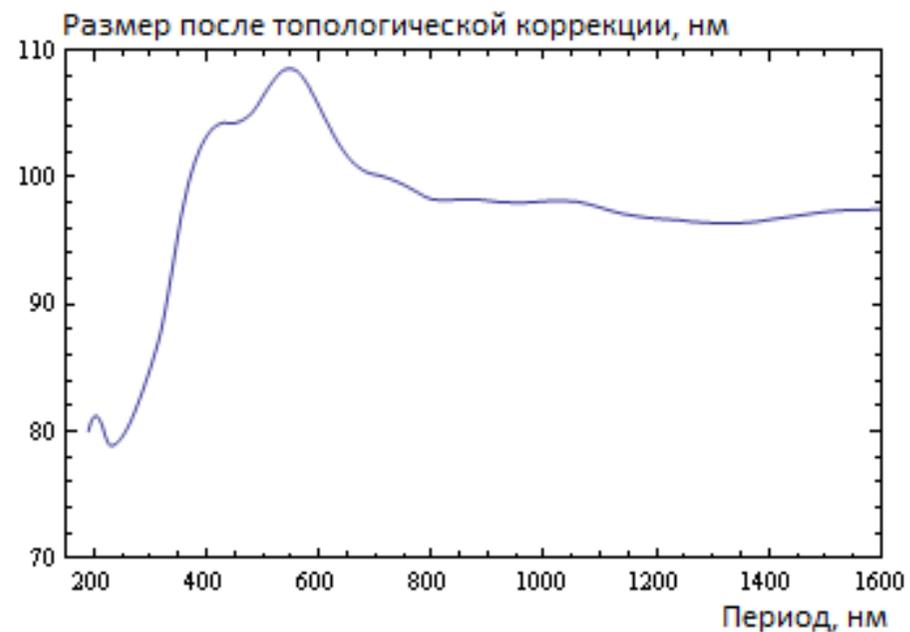
параметр $A = \int_{-F_{max}}^{F_{max}} NIS(f)df$ [66, 81], имеющий размерность длины и в некоторой мере соответствующий площади области удовлетворительной пропечатки (поскольку максимально допустимое значение разброса дозы пропорционально NIS [3]).

Далее для всех топологических структур и четырех видов осветителя была рассчитана глубина фокуса описанным выше методом (Рис 2.2а). Полученные графики показывают зависимости DOF от периода групповых линий. Видно, что источник типа «Annular» дает удовлетворительные результаты лишь для линий периода менее 250 нм в масштабе пластины. Источник типа «Quasar» с параметрами $\sigma_{in} = 0,60$, $\sigma_{out} = 0,85$, $\alpha = 20^\circ$ представляется наилучшим, однако при его использовании неудовлетворительно отображаются линии с периодом 320 нм в масштабе пластины. Все рассматриваемые источники не дают требуемой глубины фокуса на периодах более 620 нм в масштабе пластины (линии, расположенные с бóльшим периодом, могут считаться изолированными). По этой причине оптимальным из рассматриваемых был признан источник типа «Quasar» с параметрами $\sigma_{in} = 0,60$, $\sigma_{out} = 0,85$, $\alpha = 30^\circ$ (Рис 2.2б). 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.

⁶ Следует отметить, что для «якорной» топологической структуры источник типа «Annular» дает еще бóльшую глубину фокуса (см. Рис.2.2а)



а)



б)

Рис. 2.3. Для осветителя типа «Quasar» с параметрами $\sigma_{in} = 0,60$, $\sigma_{out} = 0,85$, $\alpha = 30^\circ$:

а) зависимость глубины фокуса от периода линий (в масштабе пластины);

б) скорректированный КЛР линий на ФШ в зависимости от периода (в масштабе пластины)

2.3. Предварительное определение параметров непропечатываемых вспомогательных структур (SRAF)

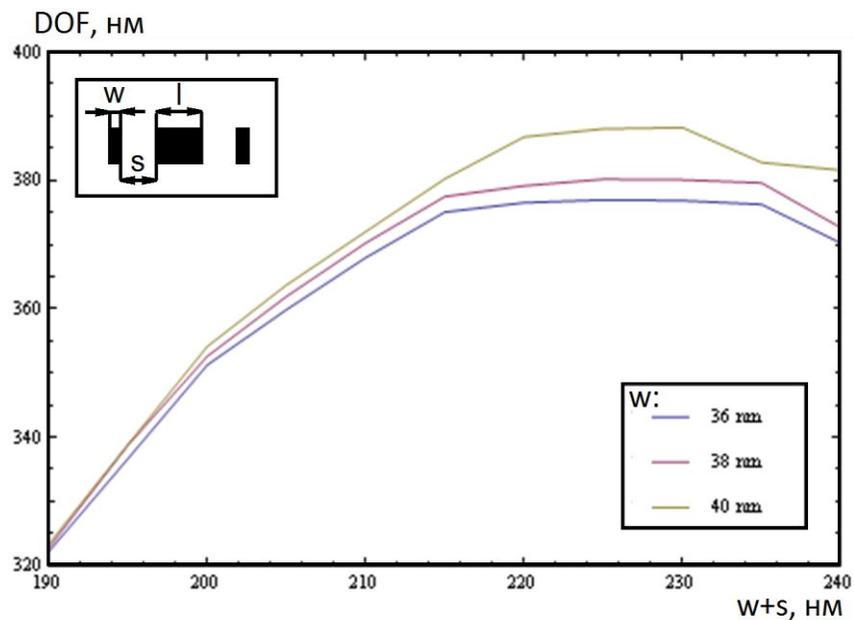
Как было отмечено выше, структуры SRAF предназначены для улучшения качества пропечатки прежде всего **непериодических** элементов топологии, например, одиночных или краевых линий (а также контактов или других фигур). Кроме того, непропечатываемые вспомогательные элементы могут служить для увеличения ширины окна процесса периодических структур, позволяющих добавить элемент SRAF в промежуток между элементами структуры без отрицательного влияния на результат литографии (структуры SRAF не должны пропечатываться в резисте во всем требуемом диапазоне доз и дефокусировок).

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 (см. Таблицу 9). В рамках используемой модели было принято удовлетворительным отношение относительной интенсивности SRAF к порогу $\sim 1,3 \div 1,4$ (Рис 2.4б).

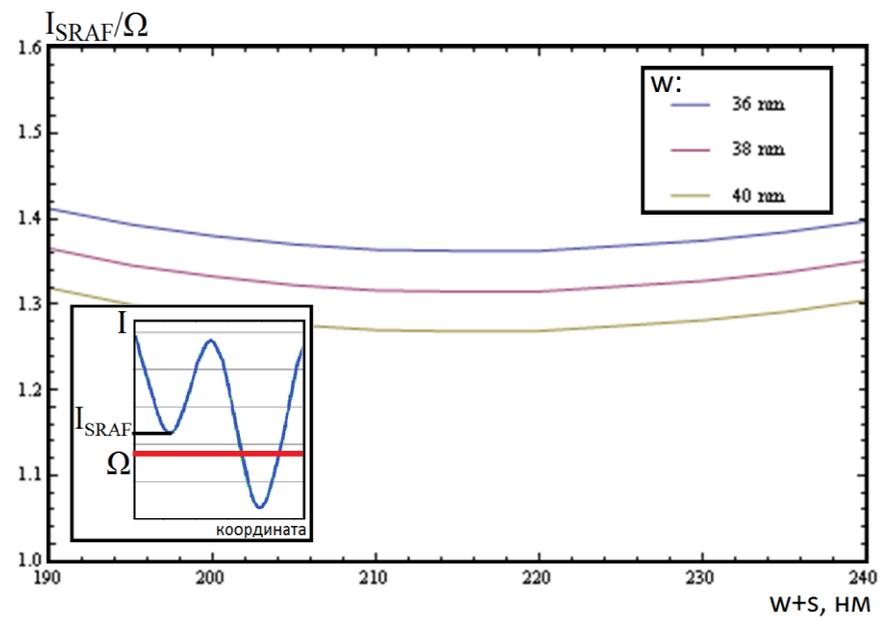
Для изолированных линий номиналом 80 нм в масштабе пластины, имеющих по одному элементу SRAF с каждой стороны, были произведены оценки глубины фокуса и величины отношения I_{SRAF}/Ω в зависимости от ширины элемента SRAF w , а также суммы ширины элемента SRAF и его расстояния до основной структуры (линии) $w+s$ – так называемого «периода»⁷ SRAF (Рис 2.4). Из полученных графиков зависимостей видно, что приемлемой по значению I_{SRAF}/Ω шириной SRAF (для изолированной линии) может считаться $w = 36$ нм, а максимальная глубина фокуса (~ 360 нм) достигается при $w+s = 216$ нм (все величины в масштабе пластины).

Расчет показал, что для данной задачи подобное размещение SRAF

⁷ Слово «период» взято в кавычки, поскольку в случае одного элемента SRAF трудно говорить о его периоде



а)



б)

Рис. 2.4. Для изолированной линии, 1 SRAF с каждой стороны, масштаб пластины, осветитель «Quasar», $\sigma_{in} = 0,60$, $\sigma_{out} = 0,85$, $\alpha = 30^\circ$:

а) зависимость глубины фокуса от «периода» SRAF ($w+s$);

б) зависимость I_{SRAF}/Ω от «периода» SRAF ($w+s$)

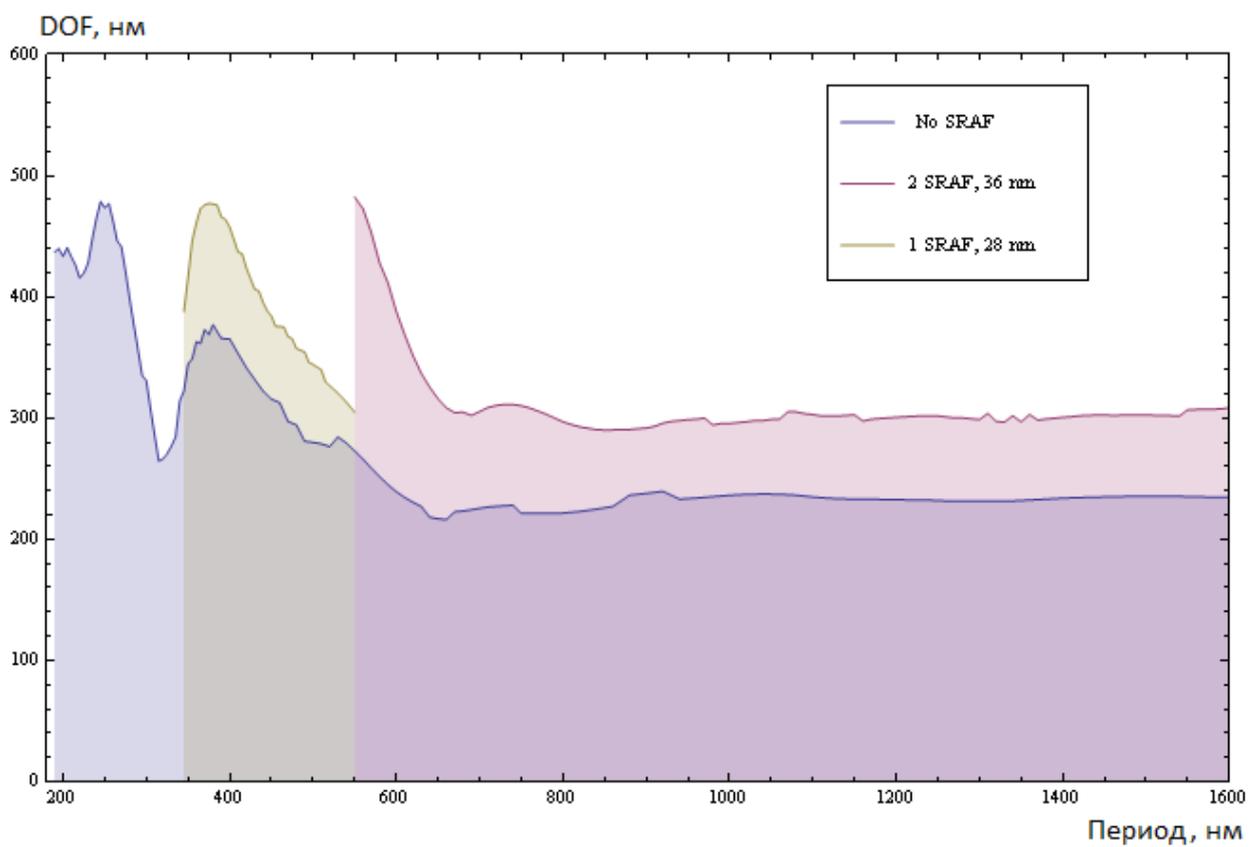


Рис. 2.5. Расчетная зависимость глубины фокуса от периода групповых линий в масштабе пластины после применения SRAF

приемлемо в применении к линиям с периодом от 560 нм и более. Для диапазона периодов от 340 нм до 560 нм применялись элементы SRAF с $w = 28$ нм, расположенные по одному в центрах промежутков между основными линиями. Для линий с периодом менее 340 нм элементы SRAF не использовались (здесь все размеры указаны в масштабе пластины). Суммарная зависимость глубины фокуса от периода основных линий при применении SRAF приведена на Рис 2.5.

Таким образом, расчеты показывают, что описанная методика применения SRAF в комплексе с внеосевым освещением («Quasar», $\sigma_{in} = 0,60$, $\sigma_{out} = 0,85$, $\alpha = 30^\circ$) позволяет достичь глубины фокуса проекционной фотолитографии более 260 нм для всех рассматриваемых топологических структур.

2.4. Разработка спецификации на ФШ

Создание спецификации на комплект ФШ является, как правило, завершающей стадией разработки технологии изготовления полупроводниковых изделий тех или иных проектных норм и основывается на сформулированных ранее требованиях к литографическим операциям технологического маршрута, которые в свою очередь определяются в процессе теоретико-экспериментальных исследований, проводимых при разработке полупроводниковых приборов и технологических операций по их изготовлению.

В данном разделе описывается метод составления типовой спецификации на ФШ с точки зрения удовлетворения требованиям к литографическим операциям.

2.4.1. Основные требования, содержащиеся в спецификации на фотошаблон для проекционной фотолитографии современных проектных норм

Спецификация на ФШ включает в себя следующие виды требований:

- 1) **требования к фотошаблонной заготовке или т.н. «фотобланку»** (прежде всего, к величине неплоскостности подложки);
- 2) **требования к качеству рисунка** (допуски на точность размещения элементов топологии и критический линейный размер);
- 3) **требования к фазовому слою в случае его наличия** (допуски на коэффициент пропускания и угол вращения фазы излучения);
- 4) **требования к дефектности фотошаблона;**
- 5) **дополнительные требования** (как правило, указывается количество точек измерения критического линейного размера и положения элементов топологии, параметров фазосдвигающего слоя, а также размеры минимальных темного и светлого элемента на ФШ, которые могут быть существенно меньше контролируемого критического размера в случае использования методов коррекции оптической близости и непропечатываемых вспомогательных структур).

Далее требования к параметрам ФШ, перечисленные в пунктах 1-4, будут рассмотрены более подробно.

1) Требования к фотобланку складываются из требований к качеству материала маскирующих слоев и самой кварцевой подложки, а также к ее неплоскостности.

Классификация применяемых подложек описана в стандарте SEMI P1 [82]. Типовые габаритные размеры подложки 153x153x6,35 мм (6025 по SEMI P1) – для использования в большинстве современных промышленных установок проекционной фотолитографии (ASML, Nikon).

Под неплоскостностью подложки (также нормируемой стандартом SEMI P1) понимается максимальный перепад высот по контролируемой области подложки. Качество маскирующего хромового покрытия (по дефектам и оптической плотности) и фазосдвигающего покрытия (для фазовых шаблонов) нормируется соответственно стандартами SEMI P2 [83] и SEMI P29 [84].

Обычно в спецификации, направляемой на маскшоп (предприятие-производитель ФШ), из параметров, касающихся характеристик фотобланка, указываются только уровень неплоскостности, вид контролируемой области, длина волны рабочего излучения и тип будущего фотошаблона (бинарный или фазосдвигающий).\

2) Требования к качеству рисунка включают в себя:

- требования к точности расположения элементов топологии фотошаблона («**Registration**»);
- требования к критическому линейному размеру элементов топологии фотошаблона (допуск на размер) описываются двумя компонентами – **МТТ** (Mean-to-Target – |усредненное значение измеренной на ФШ ширины контрольных структур - номинал|) и **3σ** (остаточная компонента или однородность).

Структуры для контроля качества рисунка размещаются по всему полю ФШ. Количество контрольных элементов составляет от 50-100 шт. Или больше в зависимости от предъявляемых требований. Кроме того, контроль допуска на размер по обеим координатным осям может осуществляться как на изолированных, так и на групповых структурах. Номинальный линейный размер контрольной структуры как правило соответствует размеру минимального топологического элемента на фотошаблоне, прорабатываемого на пластине в процессе фотолитографии. В случае невозможности размещения контрольных структур в поле фотошаблона контроль производится по заранее указанным элементам топологии изделия.

3) Требования к фазовому слою

Требования, предъявляемые к коэффициенту пропускания фазового слоя и углу сдвига фазы для полутонных фазосдвигающих фотошаблонов указываются отдельно от требований к фотобланку, поскольку итоговые параметры фазовых слоев находятся в тесной зависимости от технологии

изготовления фотошаблона и должны контролироваться в процессе его производства.

В большинстве случаев в спецификации на ФШ указываются:

- номинальное значение угла вращения фазы на рабочей длине волны (как правило, 180°);
- систематическая компонента допуска на сдвиг фазы (МТТ);
- остаточная компонента допуска на сдвиг фазы или однородность (3σ);
- пропускание фазосдвигающего слоя по интенсивности на длине волны рабочего излучения, номинал (как правило, 6% или 7%);
- систематическая компонента допуска на пропускание фазосдвигающего слоя по интенсивности (МТТ);
- остаточная компонента допуска на пропускание фазосдвигающего слоя по интенсивности (3σ).

Контроль пропускания и фазового сдвига производится на изготовленном фотошаблоне в 50-100 (или более) точках [85, 86].

4) Требования к дефектности ФШ

Дефект фотошаблона определяется как некоторое локальное несоответствие между управляющей информацией (шаблонной топологией) и сформированным рисунком ФШ. Как правило, это вырыв или, наоборот, – дополнение в маскирующем покрытии. Величина критичного дефекта тесно связана с группой качества ФШ. Возможные виды дефектов ФШ классифицируются стандартом SEMI P22 [87]. В спецификации на ФШ обычно указывается размер недопустимого дефекта. Шаблон, содержащий дефекты размером более указанного, считается негодным, поскольку обусловленные им т.н. «повторяющиеся дефекты» фоторезистивной маски в конечном итоге делают изделие неработоспособным. В данной работе размер недопустимого дефекта определяется как $\sim \text{КЛР}/4,5$ или же квадратный корень из площади минимального пропечатываемого элемента, подобно

тому, как это сделано в ITRS. Так, для технологии проектных норм 65 нм размер недопустимого дефекта на ФШ составляет величину порядка 50 нм.

2.4.2. Формирование допусков на параметры литографических операций. Вклад фотошаблонной составляющей

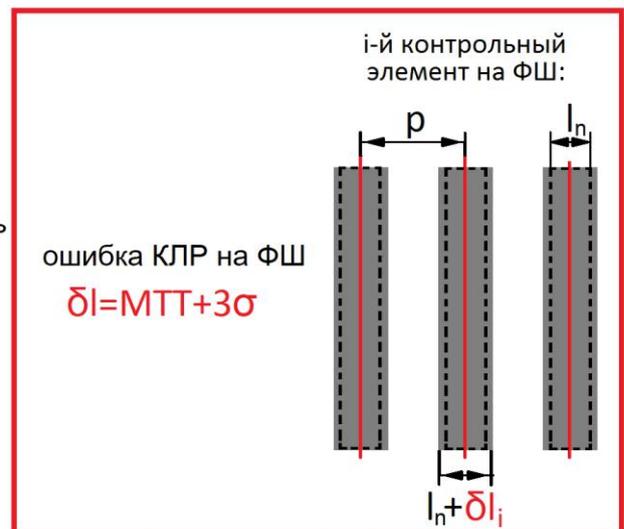
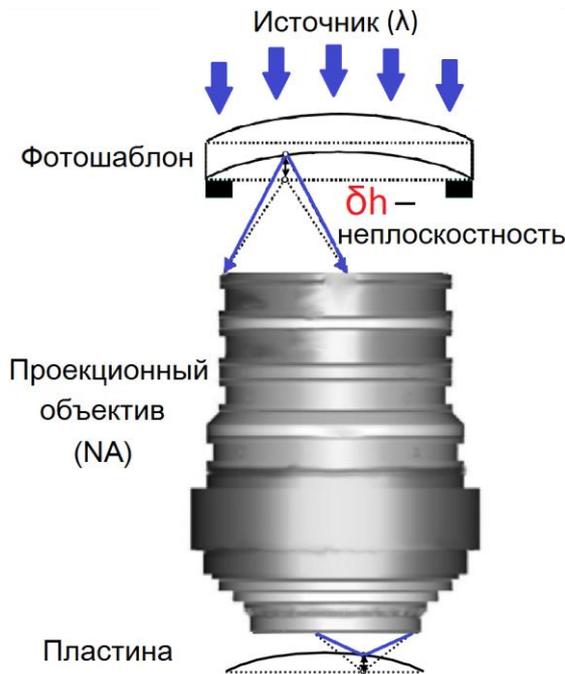
Допуски на параметры литографических операций очевидно формируются из многих компонент, связанных с характеристиками оборудования и используемых технологических процессов, погрешностями шаблона и т.д. Основной идеей рассматриваемого метода разработки спецификации на фотошаблон является анализ вклада основных составляющих в литографические допуски (или бюджеты) с последующим определением фотошаблонной составляющей в предположении, что остальные компоненты являются известными (в частности, из выпускаемых поставщиками спецификаций на оборудование, материалы и т.д.).

2.4.2.1. Точность совмещения

Источники возможных ошибок совмещения в проекционной фотолитографии подробно описаны в работах [88, 89]. Укрупненно основные составляющие допустимой суммарной литографической погрешности совмещения представлены на Рис. 2.6а. Они делятся на две части: вносимые условной литографической установкой (включая трек), формирующей фоторезистивную маску на кремниевой пластине, и вызванные ошибкой расположения элементов на используемых фотошаблонах. Предполагая, что совмещение и экспонирование фоторезиста происходит на установках одной модели, возможно считать, что погрешность, связанная с литографической установкой, равна т.н. «допуску на совмещение от установки к установке» ($OL_{Tool-to-Tool}$) – величине, включаемой производителями оборудования в стандартные спецификации на установки проекционной литографии. Для расчета допустимой литографической погрешности совмещения (OL)



а)



δt – ошибка значения коэф. пропускания темного элемента фазового ФШ

$\delta \varphi$ – ошибка сдвига фазы

б)

Рис. 2.6.

а) основные составляющие допустимой литографической погрешности совмещения;

б) основные виды отклонений на ФШ, вызывающих ухудшение характеристик литографического процесса

фотошаблонная компонента погрешности ($OL_{Photomask}$) в силу ее детерминированного характера линейно прибавляется к допуску на совмещение от установки к установке.

В случае простого совмещения двух литографических слоев фотошаблонная компонента погрешности совмещения равна [90]:

$$OL_{Photomask} = \sqrt{2(1-r)} \frac{R}{M}, \quad (2.1)$$

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

$$r = \frac{\sum_i (R1_i - \bar{R1})(R2_i - \bar{R2})}{\sqrt{\sum_i (R1_i - \bar{R1})^2} \sqrt{\sum_i (R2_i - \bar{R2})^2}} \quad (2.2)$$

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 $r = 0,65$):

$$OL \approx OL_{Tool-to-Tool} + 0,83 \frac{R}{4}. \quad (2.3)$$

В предположении, что экспонирование критических слоев ведется на одной установке, вместо параметра $OL_{Tool-to-Tool}$ используется $OL_{Tool-to-Itself}$, что позволяет ослабить требования к величине ошибки расположения топологических элементов на фотошаблоне.

В случае технологических процессов, использующих операции двойного экспонирования или двойного впечатывания с жесткой маской,

когда для формирования одного приборного слоя используются две операции фотолитографии, в рамках каждой из которых производится совмещение к некоему «нулевому» слою, выражение для фотошаблонной компоненты погрешности совмещения принимает вид:

$$OL_{Photomask} = \sqrt{2 - r_{10} - r_{20}} \frac{R}{M}, \quad (2.4)$$

где r_{10} и r_{20} – соответственно линейные коэффициенты корреляции ошибки расположения топологических элементов фотошаблонов, формирующих композиционное изображение при операции двойной экспозиции или двойного впечатывания, относительно фотошаблона, отвечающего за «нулевой» слой. При $r_{10}=0,65$, $r_{20}=0,5$ и в предположении того, что обе литографии производятся на одной и той же установке, величина литографической погрешности совмещения будет равна:

$$OL_{DP} \approx OL_{Tool-to-Itself} + 0,92 \frac{R}{4}. \quad (2.5)$$

Соотношения (2.3) и (2.5) позволяют зная величину общей литографической погрешности совмещения и погрешности совмещения используемой литографической установки оценить требуемую точность расположения элементов топологии фотошаблона. В частности, для технологии уровня 65 нм требуемое значение R составит 14 нм в предположении того, что $OL_{Tool-to-Tool} = 15$ нм и $r = 0,65$, и 8,6 нм при $OL_{Tool-to-Tool} = 15$ нм и $r = 0$.

2.4.2.2. Требования к глубине фокуса и допускам на литографический КЛР

На Рис. 2.7б показаны основные виды отклонений на фотошаблоне, вызывающих потерю качества литографического процесса. В первую очередь это ошибка критического линейного размера на шаблоне δl , которую, как уже указывалось ранее, в предположении ее распределения по гауссовому закону делят на две компоненты:

$$\delta l = MTT_{\delta l} + 3\sigma_{\delta l}, \quad (2.6)$$

где

$$MTT_{\delta l} = |\bar{l} - l_n| = \left| \frac{\sum l_i}{N} - l_n \right|, \quad (2.7)$$

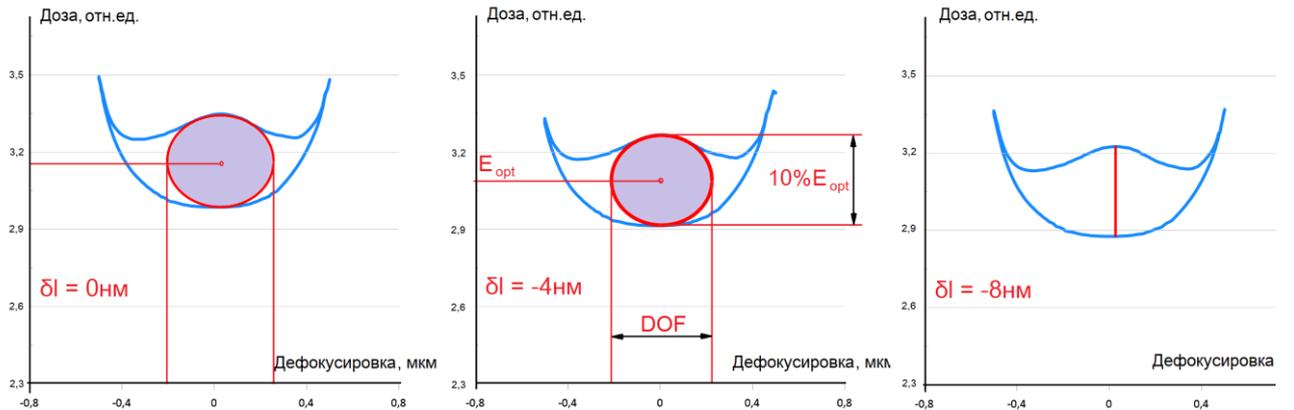
$$3\sigma_{\delta l} = 3\sqrt{\frac{\sum (l_i - \bar{l})^2}{N}}. \quad (2.8)$$

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

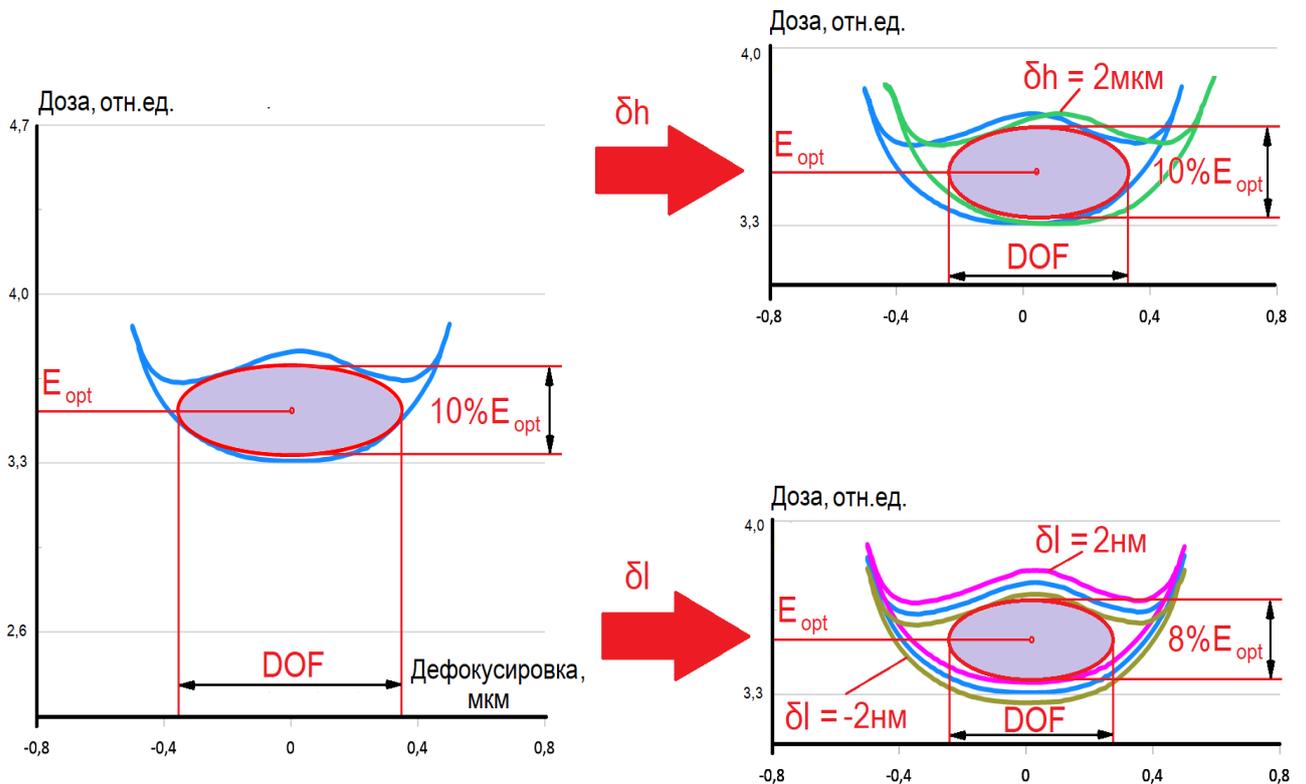
Величина $MTT_{\delta l}$ отражает общую (систематическую) часть ошибки КЛР по всей площади ФШ (точнее, по всем контрольным структурам) – центр распределения, а $3\sigma_{\delta l}$ характеризует разброс измеренных значений l_i относительно центра распределения. Таким образом, значение $MTT_{\delta l}$ отвечает за положение центра суммарного окна процесса по оси дозы, а $3\sigma_{\delta l}$ – за его площадь как результат перекрытия областей удовлетворительной пропечатки всех структур, переносимых в резист в процессе проекционной фотолитографии (Рис. 2.7б).

При одновременном уменьшении ширины всех контрольных структур имеется некоторое ее минимальное значение, при котором не существует окна процесса с требуемым разбросом дозы (например, 10%), поскольку при уменьшении размеров рисунка на ФШ область удовлетворительной пропечатки, помимо смещения вниз вдоль оси дозы, претерпевает изменение формы (Рис. 2.7а). Лимит одновременного увеличения контрольных элементов ФШ тесно связан с верхней⁸ границей диапазона доз используемого резиста (см. Табл.1).

⁸ Здесь, как и выше, идет речь о рисунке с темным тоном кодируемого элемента. Как правило, это топология активных областей, затворного слоя, алюминиевой металлизации. В случае рисунка со светлым тоном кодируемого элемента (контакты, переходные отверстия, медная металлизация) ситуация прямо противоположна.



а)



б)

Рис. 2.7.

а) смещение области удовлетворительной пропечатки с одновременным сужением по оси дозы в зависимости от величины δl в масштабе шаблона при уменьшении размера периодической контрольной структуры с периодом $p = 520$ нм и шириной темной линии (номинал) $l = 228$ нм. Требуемый литографический КЛР – 65 нм $\pm 5\%$, коэффициент масштабирования $M = 4$;

б) расхождение областей удовлетворительной пропечатки, обусловленное неплоскостью подложки ФШ и конечной однородностью ($3\sigma_{\delta l}$) ошибки КЛР на ФШ для периодических контрольных структур с периодом $p = 520$ нм и шириной темной линии (номинал) $l = 260$ нм. Требуемый литографический КЛР – 65 нм $\pm 5\%$, $M = 4$

Неплоскостность ФШ δh приводит к расхождению областей удовлетворительной пропечатки по оси дефокусировки (Рис. 2.7б) и, как следствие, уменьшению ширины окна процесса.

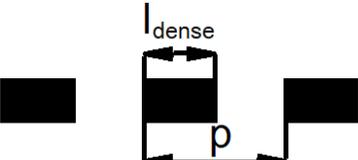
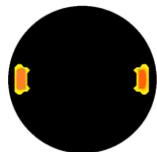
Для составления оценочной фотошаблонной спецификации в части требований к неплоскостности подложки ФШ и допускам на критический линейный размер на ФШ была проведена серия многофакторных вычислительных экспериментов, реализующих моделирование формирования фоторезистивной маски одиночных и групповых линейчатых структур для некоторого диапазона величин дозы и дефокусировки, с анализом ширины суммарного окна процесса при варьируемых факторах $MTT_{\delta l}$, $3\sigma_{\delta l}$ и δh . По причине того, что степень влияния ошибок фазы EAPSM-шаблонов на качество литографического процесса значительно ниже, их учет производился отдельно.

Параметры моделирования приведены в Таблице 10.

Корректный подбор параметров осветителя и фоторезистивного стека является самостоятельной задачей, методы решения которой обсуждались в предыдущих разделах данной главы и в работах [19, 55]. В данном случае рассматривались изолированные и групповые линии одного направления, соответствующие требованиям из Таблицы 1 относительно технологического процесса проектных норм 65 нм, поэтому был выбран тип осветителя «Dipole», оптимизированный под линии рассматриваемого периода. Использовалось «полное» моделирование формирования ФРМ в САПР «S-Litho». Параметры резиста, необходимые при моделировании засветки, термообработок и проявления, приведены в Приложении 1.

В ITRS [79] предполагается, что обусловленный фотошаблоном вклад в допуск на литографический КЛР, составляет около 40%. В данной работе использовалось допущение, что вклады фотошаблона и установок экспонирования и обработки равны, поэтому моделирование проводилось в предположении $\pm 5\%$ допуска на литографический КЛР.

Таблица 10. Параметры вычислительных экспериментов по определению требований к допускам на КЛР и неплоскостность ФШ критических литографических слоев технологии проектных норм 65 нм

Тестовые рисунки	Фоторезистивный стек				Проекционная система	Требования к ф-р маске
<p>Групповые линии:</p>  <p>$l_{dense} = 206 \text{ нм}; p = 520 \text{ нм}.$</p> <p>Одиночные линии:</p>  <p>$l_{iso} = 280 \text{ нм}; w = 80 \text{ нм};$ $s_1 = 340 \text{ нм}; s_2 = 380 \text{ нм}.$</p> <p>Для темных элементов: коэф. пропускания $t = 0,06$ угол сдвига фазы $\varphi = 180^\circ$</p>	Материал	Толщина	n	k	<p>$\lambda = 193 \text{ нм};$ $NA = 0,88;$ $M=4;$</p> <p>Осветитель:</p>  <p>$\sigma_{внеш} = 0,85;$ $\sigma_{внутр} = 0,75;$ $\alpha = 20^\circ$</p>	<p>КЛР = $65 \text{ нм} \pm 5\%;$ $DOF \geq 200 \text{ нм};$ $EL = 7\%$</p>
	Фоторезист	180 нм	1,75	0,005		
	BARC	86 нм	1,82	0,34		
Кремний	-	0,88	2,78			

На Рис. 2.8. изображено суммарное окно процесса для рассматриваемых одиночных и групповых структур, а также удовлетворяющая приведенным в Таблице 10 условиям область в пространстве варьируемых факторов $MTT_{\delta l}$, $3\sigma_{\delta l}$ и δh , которая в первом приближении описывается неравенством:

$$\frac{3\sigma_{\delta l}}{3\sigma_0} + \frac{MTT_{\delta l}}{MTT_0} + \frac{\delta h}{\delta h_0} \leq 1, \quad (2.9)$$

где MTT_0 , $3\sigma_0$ и δh_0 – максимальные значения каждого из варьируемых факторов при равных нулю остальных.

Для приближенной оценки допусков на КЛР на ФШ и неплоскостность достаточно определить три указанных параметра и выбрать наиболее подходящую точку в области допустимых значений $MTT_{\delta l}$, $3\sigma_{\delta l}$ и δh .

Оценка результатов проведенных вычислительных экспериментов показывает, что $MTT_0 \approx 32$ нм, $3\sigma_0 \approx 6,5$ нм, $\delta h_0 \approx 600$ нм. Таким образом, для технологии проектных норм 65 нм приемлемыми значениями допусков на КЛР и неплоскостность ФШ могут считаться: $MTT_{\delta l} \leq 5$ нм; $3\sigma_{\delta l} \leq 2,7$ нм; $\delta h \leq 250$ нм, что демонстрирует некоторое сходство с данными, представленными в ITRS-2007 [79] (см. Табл.12). Столь низкое значение $3\sigma_{\delta l}$ обусловлено тем, что в составе тестовых рисунков использовались одиночные линии.

2.4.2.3. Требования к фазовому слою ФШ

Приведенные в ITRS требования к параметрам фазосдвигающего слоя EAPSM шаблонов (Табл.11) меняются в зависимости от проектных норм технологии очень незначительно. В работах [91, 92] подробно изучен механизм влияния погрешностей фазы и коэффициента пропускания EAPSM шаблонов на качество литографического процесса. Отмечается, что при возрастании числовой апертуры влияние фазовой ошибки уменьшается, и предлагаются требования к фазовым слоям для ФШ проектных норм 90 нм, 65 нм и 45 нм, значительно ослабленные по сравнению с требованиями ITRS.

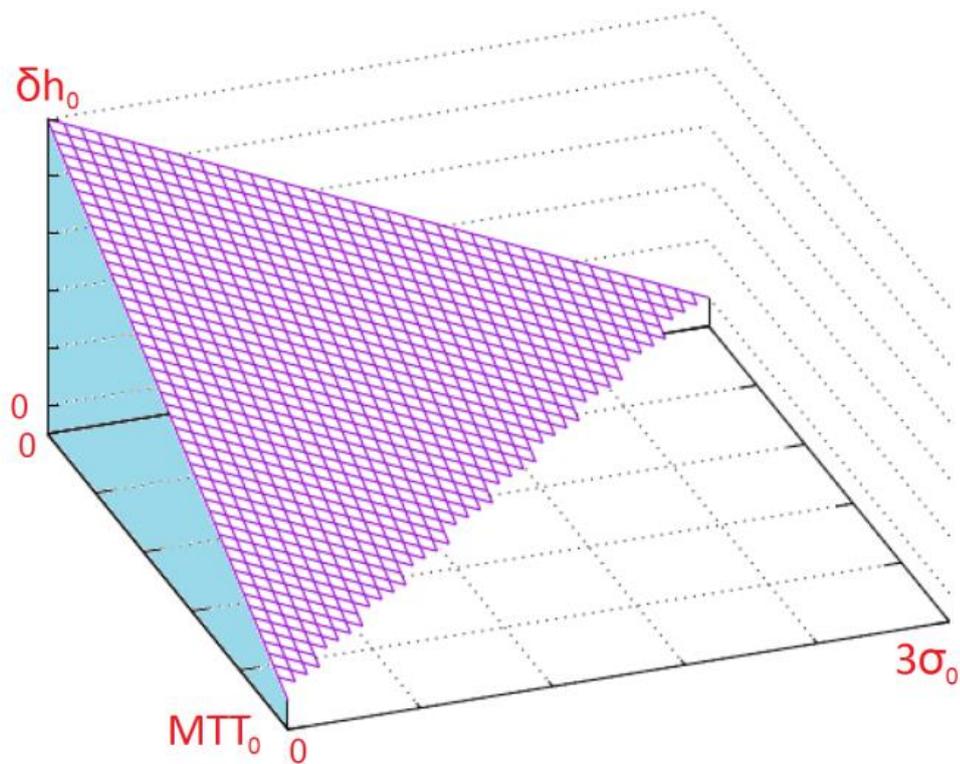
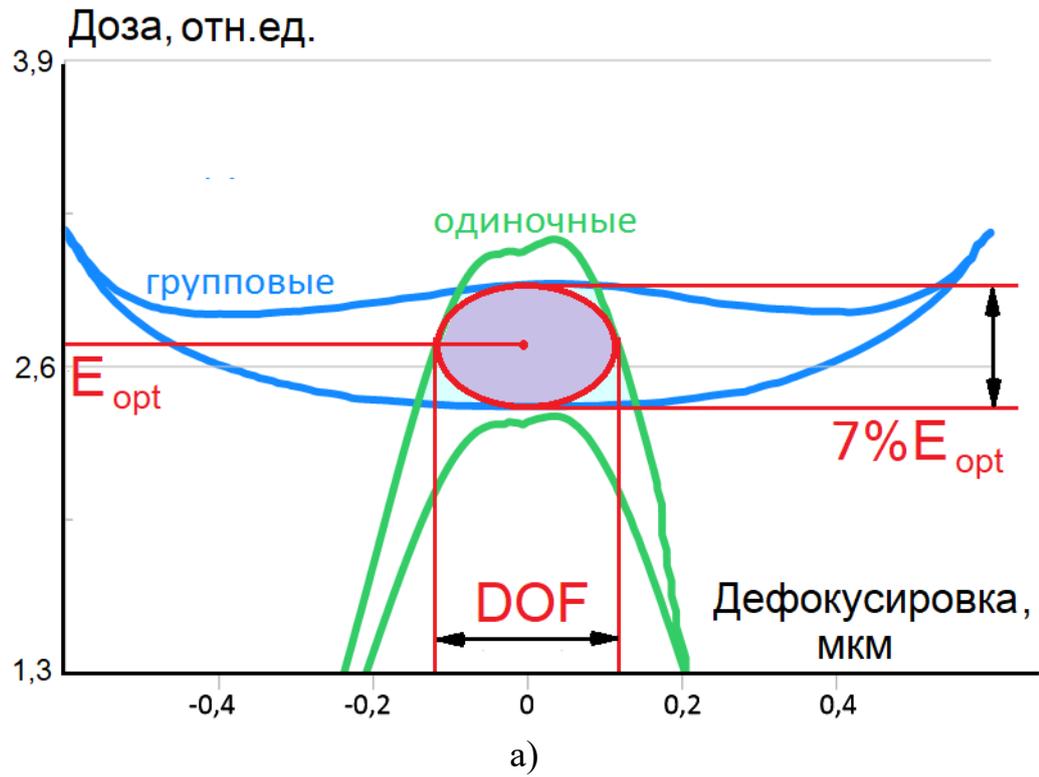


Рис. 2.8. Суммарное окно процесса (а) для тестовых структур из Табл.10 и область допустимых значений факторов $MTT_{\delta l}$, $3\sigma_{\delta l}$ и δh (б), не приводящих к нарушению требований к литографическому КЛР

Таблица 11. Требования ITRS к фазовому слою EAPSM-шаблонов

Проектные нормы, нм	Допуск на коэф. пропускания (МТТ), % целевого значения	Допуск на коэф. пропускания (3σ), % целевого значения	Допуск на ошибку сдвига фазы (МТТ), °	Допуск на ошибку сдвига фазы (3σ), °
180-130	5	4	4	
90	5	4	3	
65	4	4	3	
45-28	4	3	3	3

Таблица 12. Типовая оценочная спецификация на ФШ критических литографических слоев для технологии проектных норм 65 нм, составленная с использованием представленного в настоящей работе метода, в сравнении с данными ITRS-2007 [79]

	Точность расположения элементов топологии ФШ, нм	Допуск на КЛР			Неплоскостность подложки ФШ, нм	Размер недопустимого дефекта на ФШ, нм	Требования к фазовому слою EAPSM ⁹				
		Ном. размер структуры КЛР, нм	МТТ, нм	3σ, нм			Угол сдвига фазы, номинал, °	Коэф. пропускания, номинал, %	Допуск на коэф. пропускания (МТТ), % ном.	Допуск на коэф. пропускания (3σ), % ном.	Допуск на ошибку сдвига фазы (МТТ), °
расчет	9	260	5	2,7	250	50	180	0,6	4	4	3
ITRS-2007	7,8		5,2	2,6(iso)	250	52					

⁹ Для нормирования параметров фазового слоя в настоящей работе использовались рекомендации ITRS-2007

Тем не менее, при составлении спецификации на EAPSM шаблоны рекомендуется использовать требования ITRS. В дальнейшем они могут быть ослаблены в процессе согласования спецификации с производителем ФШ.

2.4.3. Типовая оценочная спецификация на ФШ критических литографических слоев для технологии проектных норм 65 нм

В Табл.12 сведены основные параметры спецификации на ФШ критических литографических слоев проектных норм 65 нм, определенные с использованием представленного метода.

Следует отметить, что в данной работе не учитывался ряд факторов, вообще говоря, оказывающих некоторое влияние на качество литографического процесса. Например, здесь не рассматривались вклады в литографические допуски неоднородности толщины защитной пленки (пелликла), бликов на гранях ФШ, аббераций проекционного объектива, ошибок центрирования осветителя, неравномерности распределения интенсивности и т.д. Тем не менее, предложенный метод позволяет произвести вполне адекватную предварительную оценку параметров фотошаблонной спецификации на основе заранее известных требований к литографическим процессам.

Выводы по Главе 2

1. 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).

2. 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.

3. 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;
- $w = 36$ 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.

4. Посредством «полного» моделирования процесса проекционной фотолитографии проведен анализ вклада допусков на параметры ФШ в литографическую погрешность, что позволило составить оценочную спецификацию на ФШ затворного слоя технологии проектных норм 65 нм.

Глава 3. РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУР РАССТАНОВКИ SRAF И КАЛИБРОВКА КОМПАКТНЫХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТУРА ФОТОРЕЗИСТИВНОЙ МАСКИ

В составе работ по созданию OPC-решения для критических слоев технологии проектных норм 65 нм разработка процедур расстановки SRAF и калибровка компактных моделей формирования контура ФРМ являются взаимосвязанными этапами, основанными на экспериментах по пропечатке специальных тестовых структур в условиях реального технологического процесса. На основе результатов комплекса проводимых экспериментов и измерений принимаются решения о пригодности тех или иных конфигураций непропечатываемых вспомогательных структур, а также настраиваются компактные модели формирования контура ФРМ, предназначенные для использования в процессе коррекции эффектов оптической близости на полноразмерной топологии изделия.

В настоящей главе описывается разработка процедуры размещения SRAF и калибровка оптических и фоторезистивных компактных моделей, реализованных в САПР Mentor Graphics Calibre, в применении к затворным слоям СБИС проектных норм 65 нм.

3.1. Разработка калибровочного фотошаблона и изготовление тестовых структур

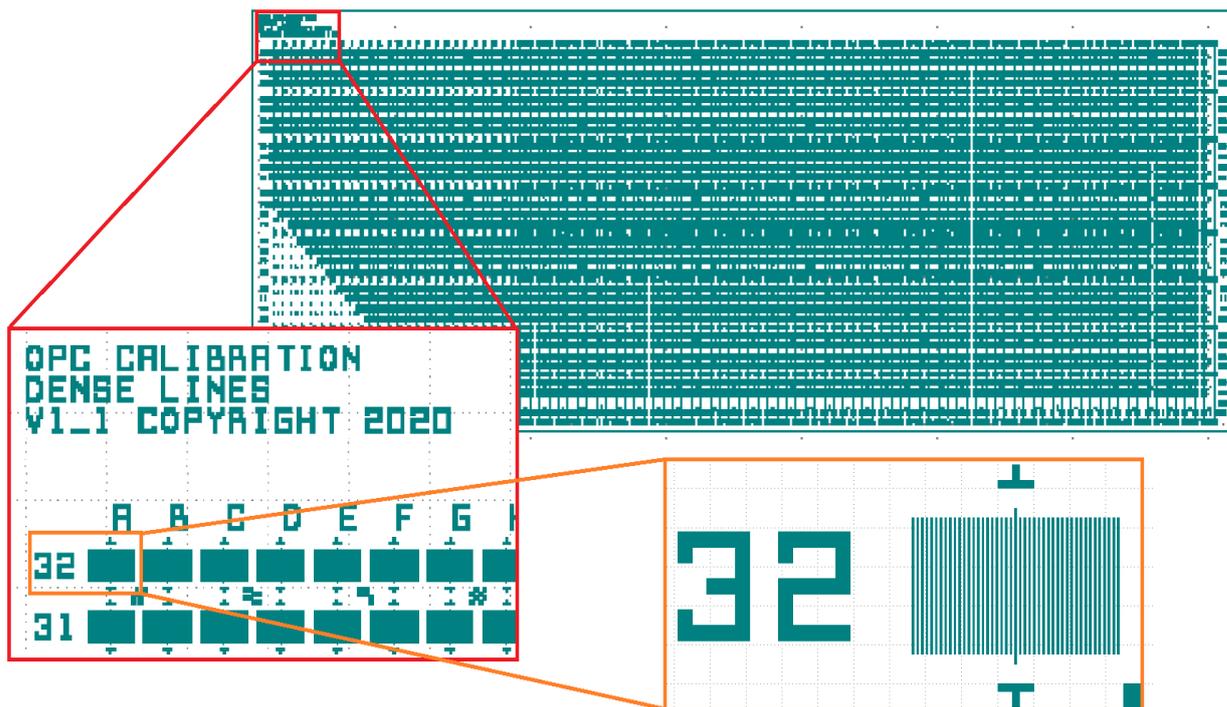
В качестве калибровочных ячеек для настройки параметров оптических моделей и калибровки компактных моделей формирования контура ФРМ используются матрицы, содержащие большое количество топологических фигур, отражающих разнообразные конфигурации рисунка, встречающиеся в реальном дизайне. Большую часть этого набора фигур составляют так называемые «параметрические тестовые паттерны», не имеющие схемотехнической функции, но позволяющие имитировать функциональные элементы дизайна. Пример простейшей тестовой ячейки

представлен на Рис.1.13б. Современные САПР имеют возможность генерации таких матриц как с помощью внутренних сценариев, так и на основе скриптового описания, подготовленного разработчиком OPC.

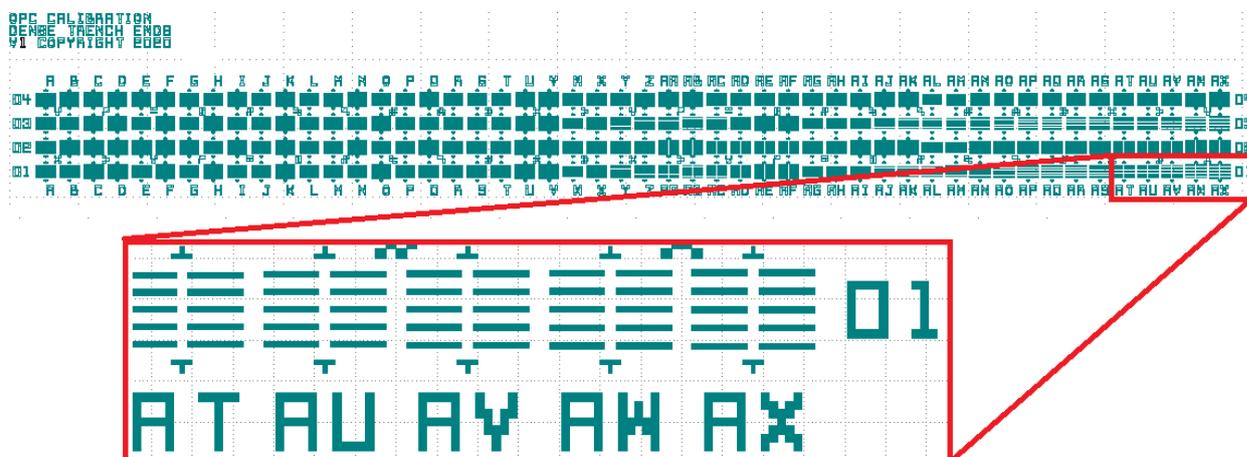
В целях настройки и калибровки оптической и фоторезистивной моделей, необходимых для расчета топологической коррекции затворного слоя, а также для уточнения правил расстановки структур SRAF, был разработан калибровочный ФШ «LITHO90-65», включающий в свой состав ряд топологических модулей, в частности, модули «DENSE_LINES», «PULLBACKS» (Рис.3.1), валидационный модуль «SLOTS» (Рис.3.2) и модуль «SRAF_TEST» (Рис.3.3), предназначенный для проверки правил расстановки SRAF на одиночных и периодических элементах топологии.

Топология модуля «DENSE_LINES» (Рис.3.1а) представляет собой матрицу, содержащую около 3000 периодических («pitch») и изолированных («iso») линейчатых структур. Ширина одиночных линий варьируется в диапазоне 55÷900 нм с шагом 5 нм. Основная масса измерительных структур модуля представляет собой наборы периодических линий шириной 55÷200 нм с шагом 5 нм. Период линий варьируется с шагом 5 нм в диапазоне 130÷1000 нм для линий шириной до 120 нм включительно. Для остальных структур период варьируется в диапазоне $(l+10)÷1000$ нм с шагом 5 нм (l – ширина линии). Измерительные структуры чередуются со вставками для буквенных обозначений столбцов и маркерами для сканирующего электронного микроскопа. Размер модуля составляет 725×285 мкм. Все размеры приведены в масштабе пластины. Модуль «DENSE_LINES» присутствует в составе ФШ «LITHO90-65» в прямом и инвертированном вариантах.

Топология модуля «PULLBACKS» (Рис.3.1б) представляет собой матрицу, содержащую 200 структур типа «встречные линии с зазором» («lineend», «dense_lineend»). Ширина линий варьируется в диапазоне 55÷300 нм с шагом 5 нм. Модуль содержит периодические измерительные структуры (dense_lineend) с соотношениями «ширина:зазор:встречный зазор» 1:1:1, 1:2:1,



a)



б)

Рис. 3.1. ФШ «LITHO90-65»: калибровочные топологические модули, предназначенные для настройки и калибровки оптической и резистивной моделей:

а) модуль «DENSE_LINES»;

б) модуль «PULLBACKS»

1:1:2 и 1:2:2 по 50 шт. каждого вида, а также изолированные (lineend) с соотношениями «ширина:встречный зазор» 1:1 и 1:2 по 50 шт.

Измерительные структуры чередуются с маркерами для сканирующего электронного микроскопа. Размер модуля составляет 375×65 мкм. Все размеры приведены в масштабе пластины. Модуль «PULLBACKS» присутствует в составе ФШ «LITHO90-65» в прямом и инвертированном вариантах.

Модуль «SRAF_TEST» (Рис.3.2) представлен в виде матрицы из одиночных и периодических линейчатых тестовых структур. Ширина основных линий всех структур составляет 80 нм. Период линий варьируется в диапазоне $340 \div 580$ нм с шагом 60 нм (в каждой строке период не меняется). Одиночные структуры и периодические структуры с периодом 580 нм содержат элементы SRAF с каждой стороны основной структуры с ширинами, варьируемыми в диапазоне $24 \div 40$ нм с шагом 4 нм и расстоянием до основной структуры, варьируемым в диапазоне $100 \div 220$ нм с шагом 40 нм. Остальные периодические структуры содержат в середине каждого промежутка по одному элементу SRAF с шириной, варьируемой в диапазоне $24 \div 40$ нм с шагом 1 нм. Размер модуля составляет 152×93 мкм. Тестовые структуры чередуются со вставками для буквенных обозначений столбцов, а также маркерами для сканирующего электронного микроскопа. Все размеры приведены в масштабе пластины. Данный модуль предназначен для уточнения правил расстановки SRAF как для изолированных, так и периодических структур. Кроме того, модуль может быть использован при калибровке оптической и фоторезистивной моделей.

Модуль «SLOTS» (Рис.3.3) представляет собой матрицу двумерных валидационных структур типа «шина в зазоре». Ширина шины l варьируется в диапазоне $70 \div 125$ нм с шагом 5 нм. Ширина зазора варьируется в диапазоне $l \div (l+255)$ нм с шагом 5 нм. Всего модуль содержит 1040 структур. Размер модуля составляет 740×370 мкм. Тестовые структуры чередуются со вставками для буквенных обозначений

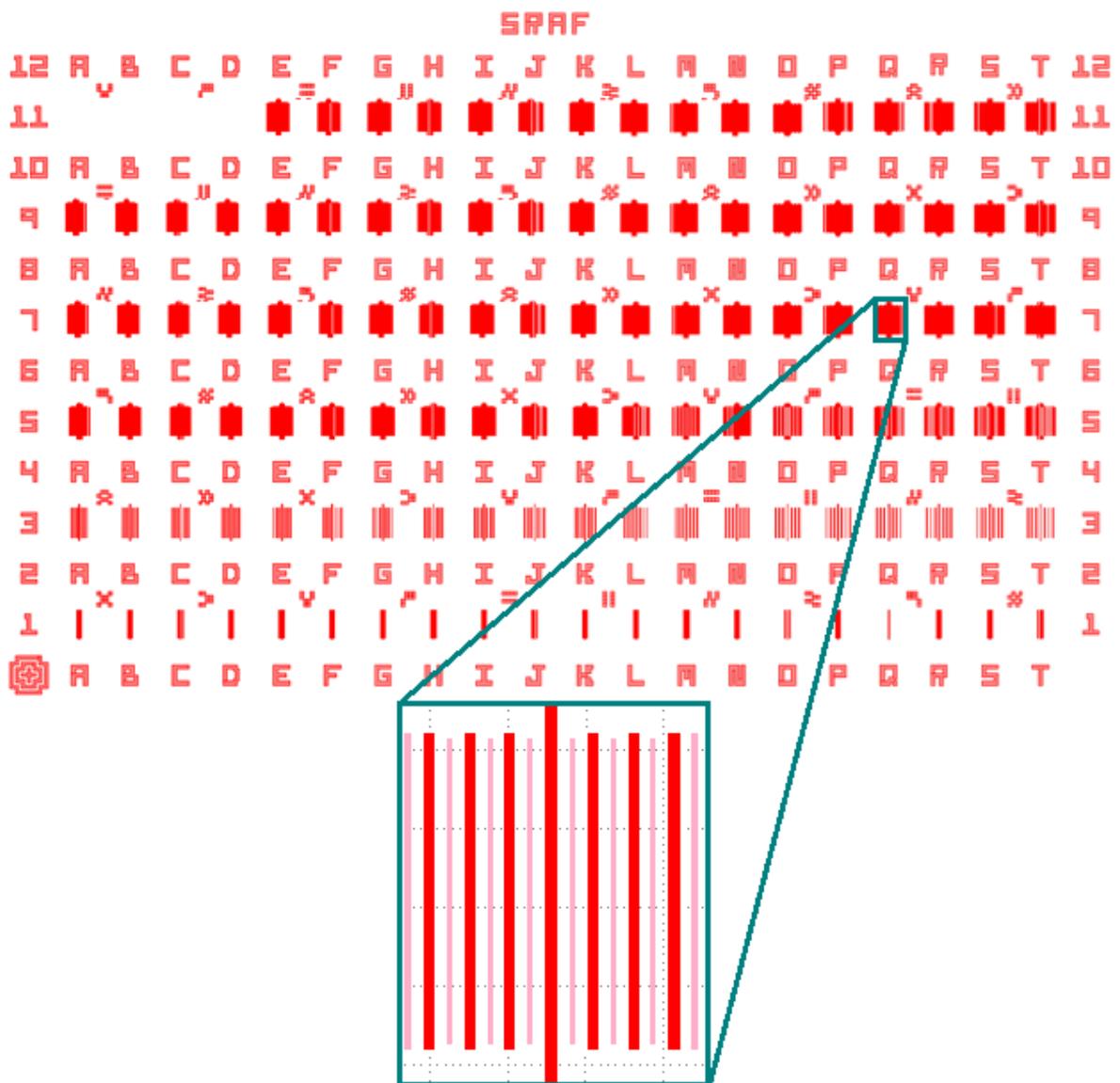


Рис. 3.2. ФШ «LITHO90-65»: топологический модуль «SRAF_TEST», предназначенный для отработки методик расстановки структур SRAF на одиночных и периодических элементах топологии. Может также использоваться при настройке и калибровке оптической и резистивной моделей

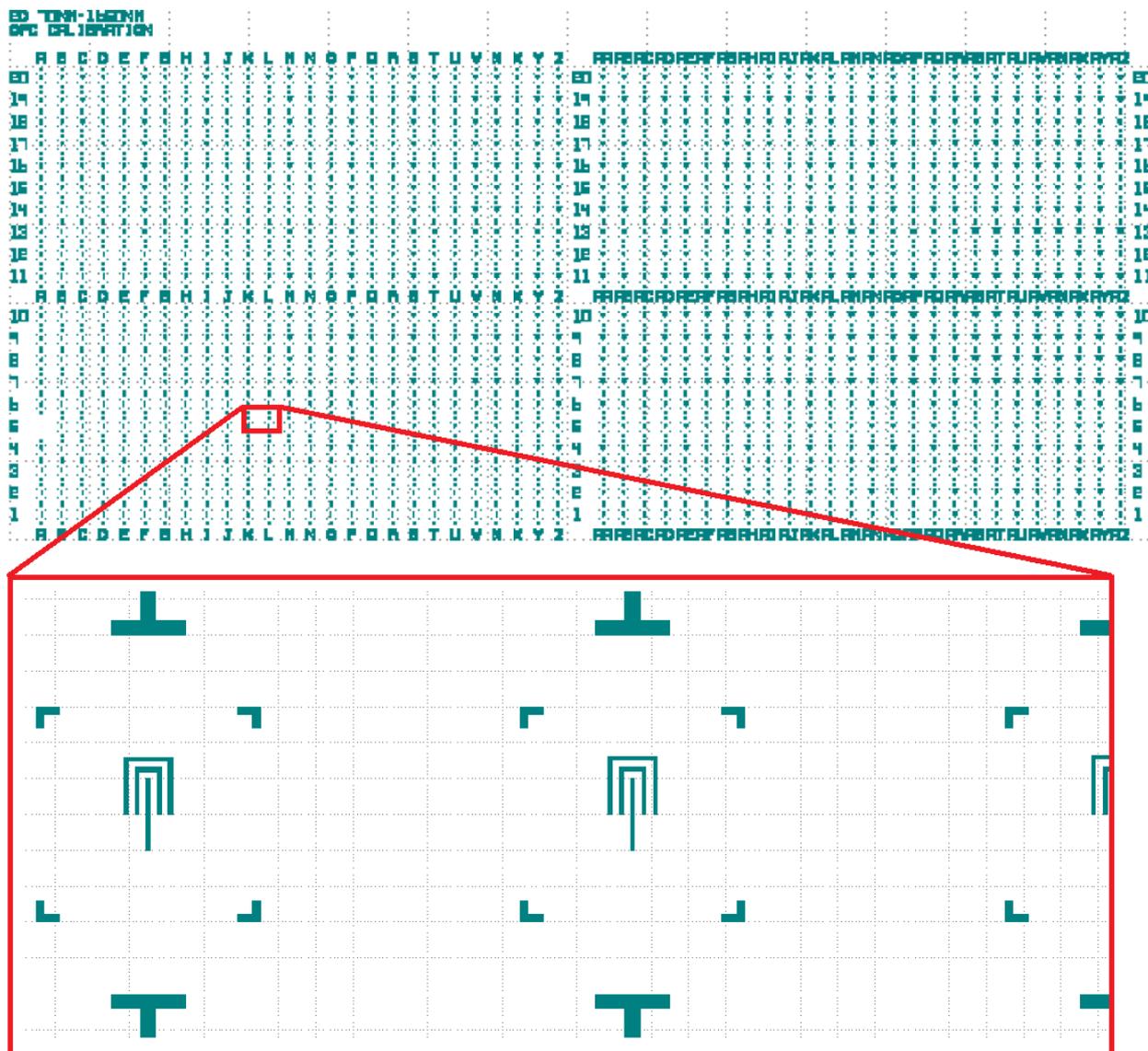


Рис. 3.3. ФШ «LITHO90-65»: топологический модуль «SLOTS», предназначенный для валидации фоторезистивной модели

столбцов, а также маркерами для сканирующего электронного микроскопа. Все размеры приведены в масштабе пластины.

С использованием ФШ «LITHO90-65», выполненного по составленной в рамках настоящей работы (п.2.4) спецификации, были произведены пропечатки на сканере ASML PAS 5500/1150C с настройками, определенными выше (см. п.2.2). Оптические параметры фоторезистивного стека приведены в Таблице 13. 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 13. Оптические параметры фоторезистивного стека (при $\lambda=193 \text{ нм}$)

	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	-

3.2. Проверка и коррекция рекомендаций к параметрам SRAF по результатам пропечатки тестового модуля «SRAF_TEST»

На этапе первоначального подбора оптимальных параметров непропечатываемых вспомогательных структур SRAF (п.2.3) использовались приближенные модели формирования контура фоторезистивной маски по постоянному порогу воздушного изображения. Результаты, полученные таким методом, требуют экспериментальной проверки и, при необходимости, дальнейшей коррекции.

В процессе проверки и корректировки рекомендаций к параметрам SRAF исследовались структуры модуля «SRAF_TEST» (Рис.3.2), полученные при пропечатках ФШ «LITHO90-65», описанных выше (п.3.1).

На Рис.3.4-3.6 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 (Рис.3.4а). При незначительных следах SRAF в резисте результат может считаться приемлемым по причине их предположительно небольшого влияния на дальнейший процесс травления поликремния¹⁰.

Как уже указывалось ранее, 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 (Рис.3.4б), линии с периодом 580 нм и одним элементом SRAF на каждую сторону основной структуры (Рис.3.5), а также изолированные линии (Рис.3.6).

При подборе оптимальных параметров SRAF необходимо учитывать ряд противоречащих друг другу требований, находя между ними возможный компромисс. Так, например, увеличение ширины структуры SRAF повышает ее вклад в расширение процессного окна основной структуры [93], однако приводит к сужению процессного окна самой структуры SRAF (уменьшается диапазон значений дозы и дефокусировки, при которых структуры SRAF не прорабатываются в резисте). Похожая ситуация возникает при уменьшении

¹⁰ Следует отметить, что на данной стадии исследования эксперименты по травлению поликремния не проводились, а слои фоторезистивного стека наносились на «голые» кремниевые 200 мм пластины

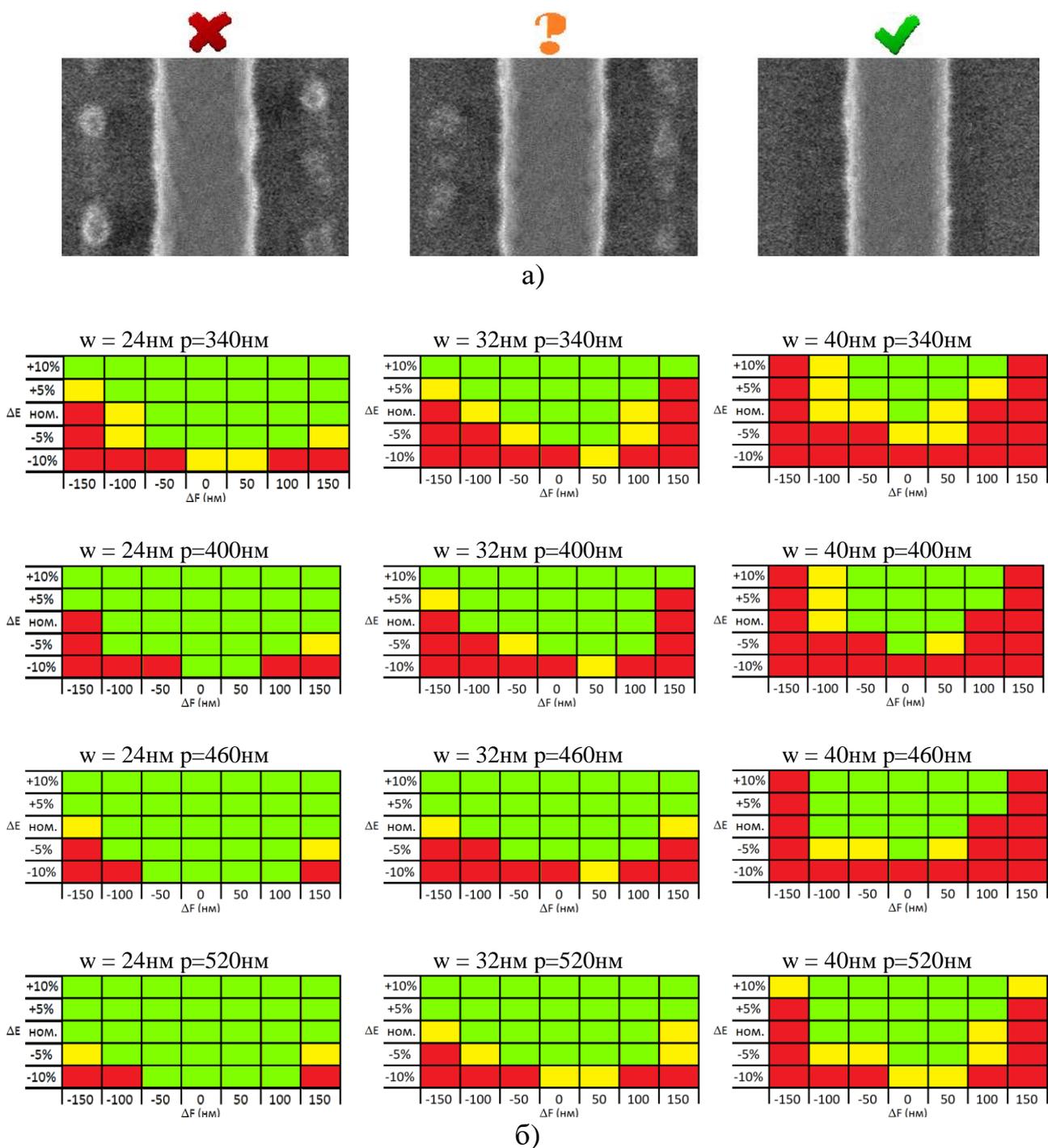


Рис. 3.4. Результаты эксперимента по проверке первоначальных рекомендаций к параметрам SRAF (основная структура – периодические линии с шириной 80 нм и периодом 340÷520 нм, 1 SRAF в центре зазора – т.н. «полу-SRAF»):

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 ($\Delta E = +5\%$ ном., $\Delta F = -100$ нм), удовлетворительный результат ($\Delta E = +5\%$ ном., $\Delta F = 0$ нм);

б) экспериментально определенные процессные окна SRAF

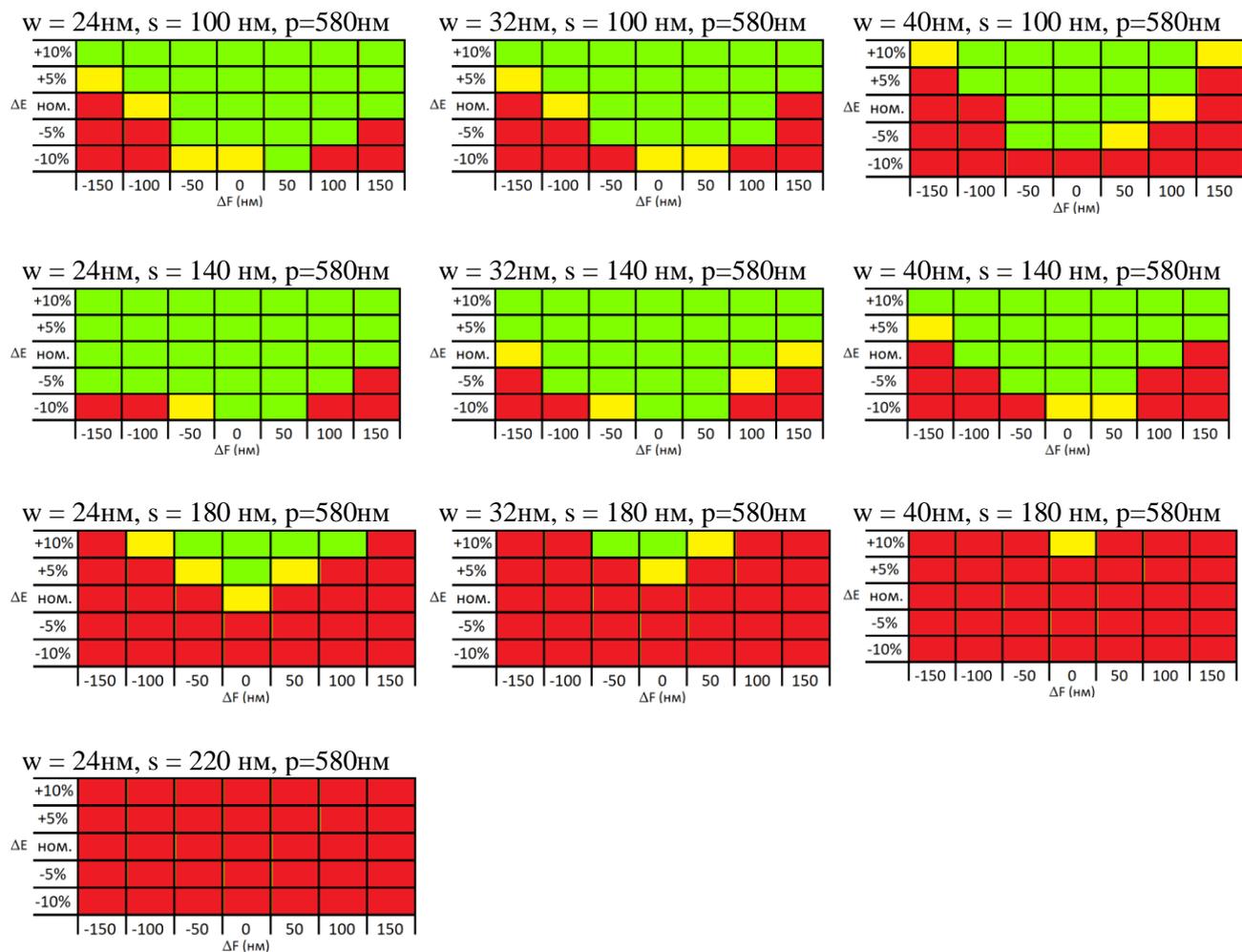


Рис. 3.5. Результаты эксперимента по проверке первоначальных рекомендаций к параметрам SRAF (основная структура – периодические линии с шириной 80 нм и периодом 580 нм, по 1 SRAF с каждой стороны линии основной структуры): экспериментально определенные процессные окна SRAF

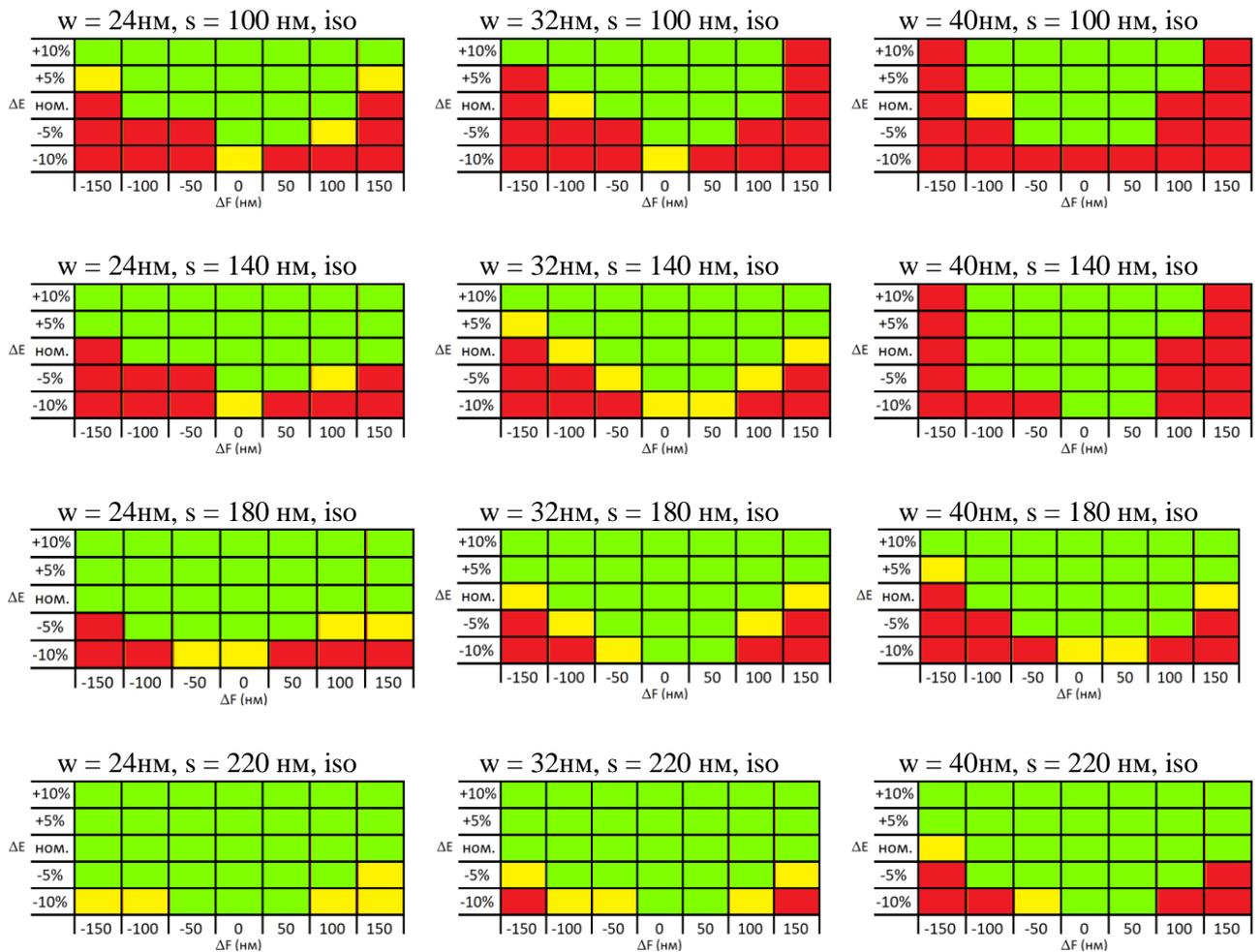


Рис. 3.6. Результаты эксперимента по проверке первоначальных рекомендаций к параметрам SRAF (основная структура – изолированные линии шириной 80 нм, по 1 SRAF с каждой стороны линии основной структуры): экспериментально определенные процессные окна SRAF

расстояний от структуры SRAF до основной структуры, или расстояний между соседними структурами SRAF (Рис.3.5).

Анализ экспериментальных результатов пропечатки тестового модуля «SRAF_TEST» позволил скорректировать и дополнить сформулированные ранее требования к параметрам непропечатываемых вспомогательных топологических структур SRAF следующим образом:

- $w = 24$ 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.

Все размеры в п.3.2 приведены в масштабе пластины.

Является целесообразным повторное проведение описанного эксперимента на эпитаксиальных структурах, имитирующих затворный слой (поликремний на изоляторе), с дальнейшим исследованием образцов после процесса травления поликремния.

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

3.3. Настройка оптической и фоторезистивной моделей

3.3.1. Настройка оптической модели

Для моделирования распределения интенсивности в плоскости пластины должна быть корректно настроена модель оптической системы литографической установки. Настройка заключается в указании ряда параметров процесса, определенных ранее на этапе подбора оптимальных настроек проекционной системы (см. п.2.2), а также параметров самой модели, от которых зависит скорость и точность расчета.

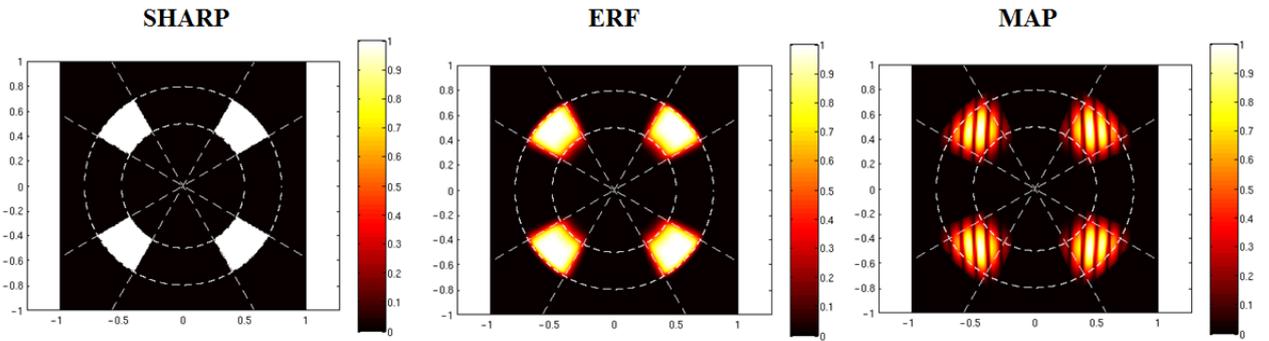
1. Параметры проекционной системы. Данный набор параметров относится непосредственно к проекционной системе литографической установки и включает в себя:

- длину волны экспонирующего излучения;
- числовую апертуру источника излучения;
- показатель преломления среды (данный параметр используется при настройке оптической модели установки с иммерсионной средой).

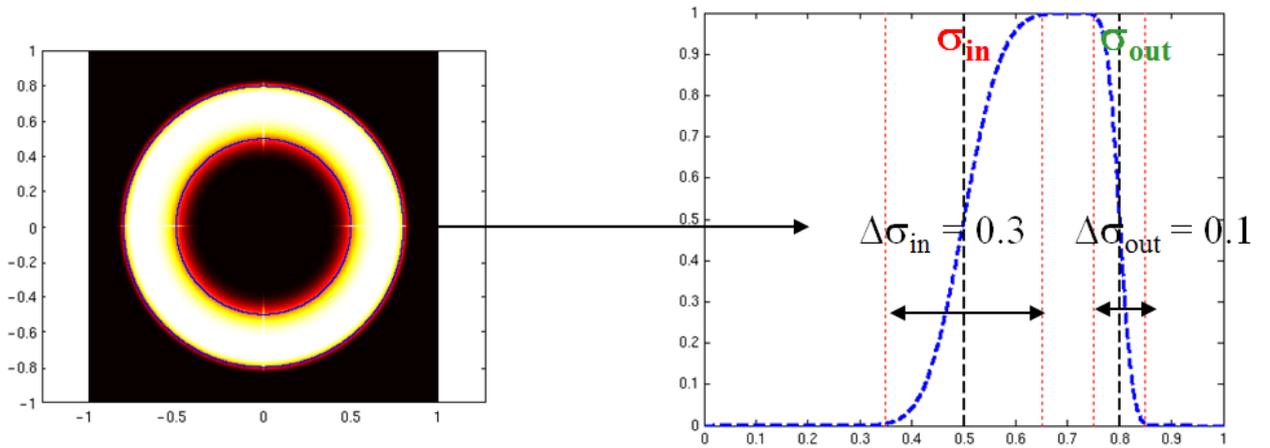
2. Форма источника излучения. Наиболее распространенными являются дисковая, кольцевая (Annular), дипольная и квадрупольная (Quasar) формы источника (Рис.1.3в). Кроме того, должен быть определен тип представления источника излучения. В САПР Mentor Graphics Calibre доступны следующие типы представления источника излучения (Рис.3.7а):

- SHARP – модель представления источника в качестве ступенчатой функции с резкими переходами между светлыми и темными областями источника;

- ERF – модель, в которой источник представляет собой функцию с постепенным переходом между светлыми и темными областями (характер перехода описывается функцией ошибок erf). Для типа ERF необходимо указание параметров размытия краев источника (Рис.3.7б), в частности, для источника Quasar доступны параметры dsigma_in, dsigma_out и dillumangle;



а)



б)

Рис. 3.7. Представление источников излучения в САПР Mentor Graphics Calibre:

- а) типы представления источника излучения;
- б) смысл параметров размытия краев источника типа ERF

- MAP – модель, в которой источник представляется в форме карты с заданными значениями интенсивности.

При использовании векторной модели высокоапертурных оптических систем (критично при $NA > 0,8$) необходим также учет поляризации источника.

3. Параметры, связанные с фокусировкой. Обычно в САПР Mentor Graphics Calibre используются два параметра: «beamfocus» и «def_start» (Рис.3.8а). Параметр «beamfocus» соответствует положению плоскости наилучшей фокусировки воздушного изображения относительно поверхности фоторезистивного стека. На Рис.3.8б показана зависимость профиля распределения интенсивности в фоторезистивной пленке от положения плоскости фокусировки воздушного изображения. Параметр «def_start» также отсчитывается от поверхности фоторезистивного стека, но соответствует плоскости фокусировки изображения с учетом фоторезистивного стека. Параметры «beamfocus» и «def_start» определяются в процессе калибровки оптической модели, которая производится по результатам пропечаток калибровочных матриц (п.3.1) на литографической установке с корректно настроенным «нулем фокуса» [94] в условиях, соответствующих литографии данного слоя. При калибровке оптической модели расчет контура фоторезистивной маски производится по постоянному порогу воздушного изображения [68].

4. Параметры оптических ядер. Оптические модели в САПР Calibre используют приближение суммы когерентных источников (SOCS). Данное приближение использует конечное число ядер (см. Гл.1). Увеличение числа ядер повышает как точность модели, так и время вычисления.

Помимо точности и быстродействия модели, одним из наиболее важных условий выбора количества ядер является характер симметрии источника излучения. В САПР Calibre функция kernsum возвращает заключение о состоянии симметрии ядра в виде упорядоченного набора

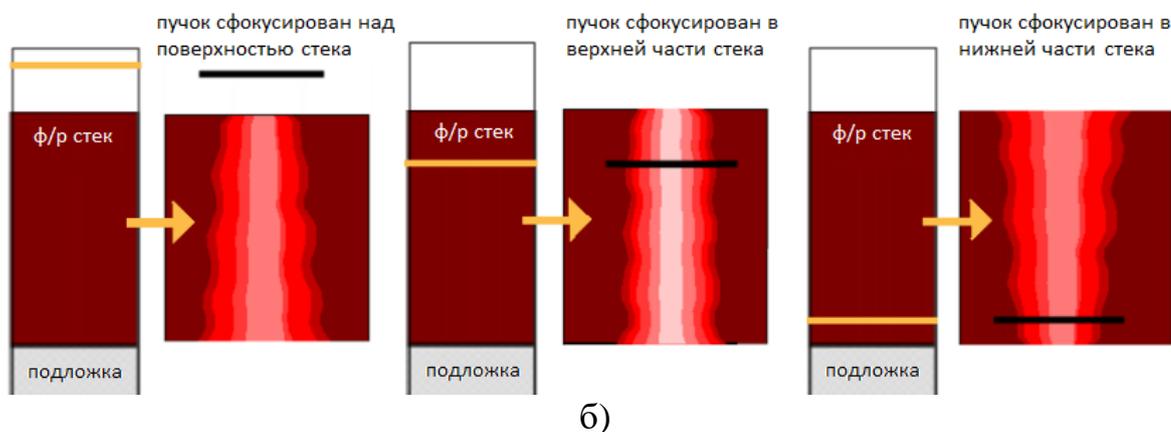
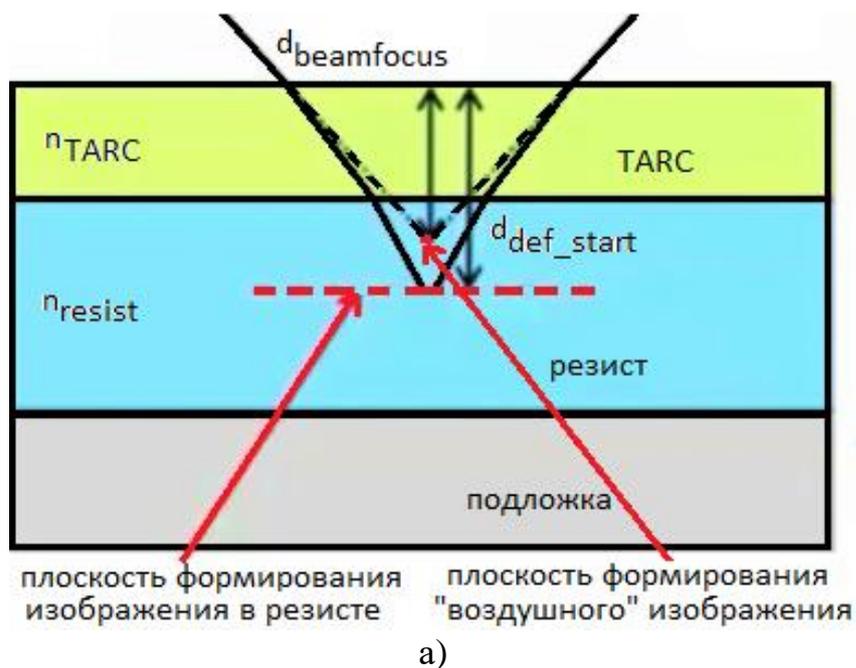
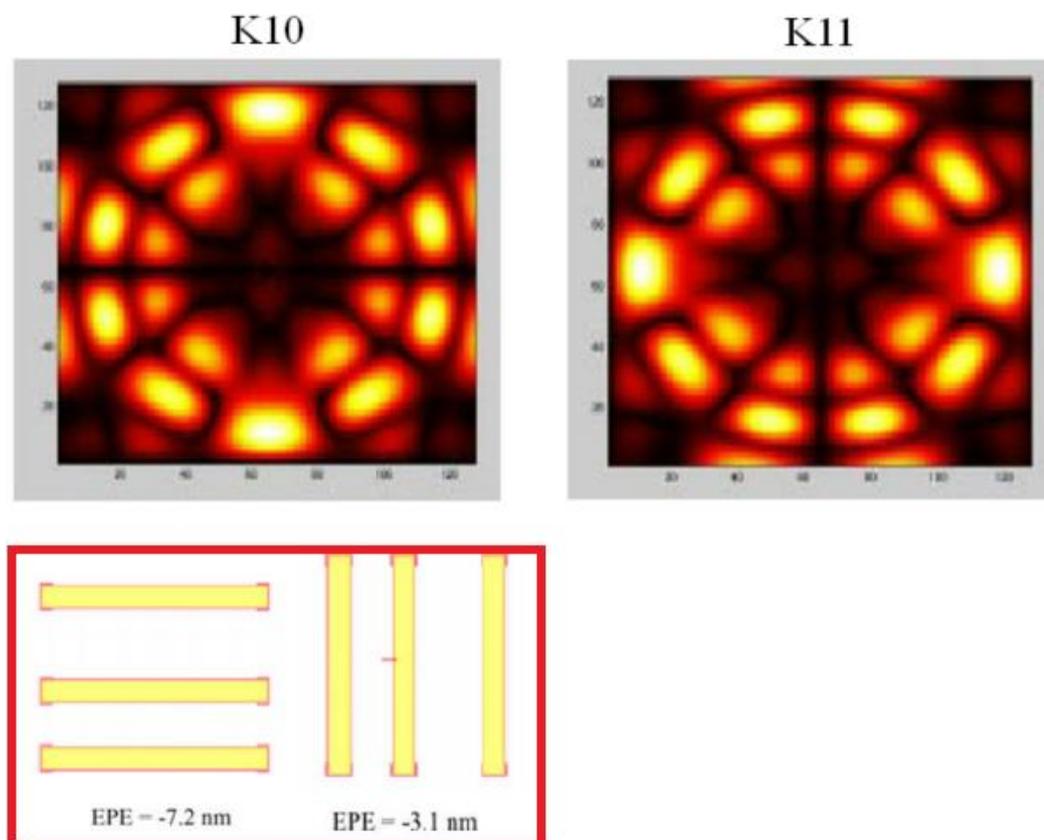
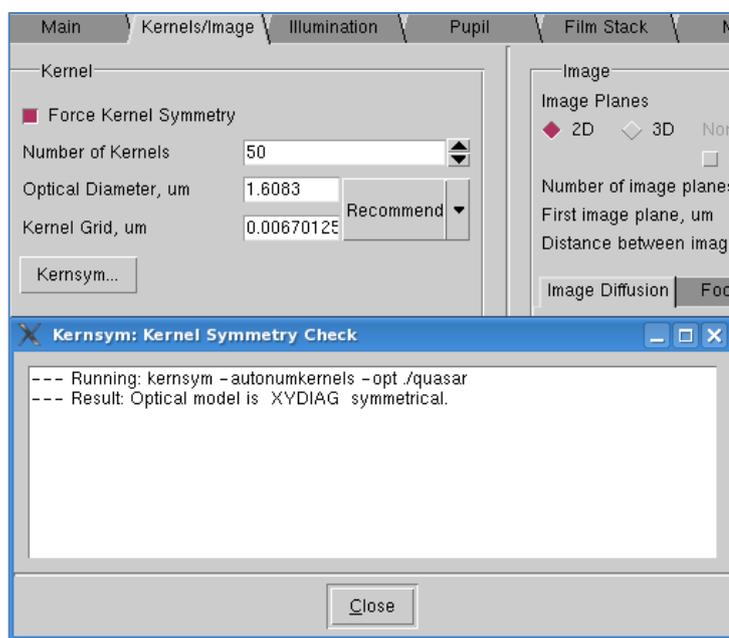


Рис. 3.8. Параметры фокусировки в оптической модели САПР Mentor Graphics Calibre:

- а) к объяснению физического смысла параметров beamfocus и def_start;
- б) зависимость профиля распределения интенсивности в фоторезистивной пленке от положения плоскости фокусировки воздушного изображения



а)



б)

Рис. 3.9. Настройка параметров ядер SOCS в САПР Mentor Graphics Calibre:

- а) влияние обусловленной количеством ядер SOCS асимметрии моделируемого источника на значение EPE для структур разной ориентации;
- б) вывод команды kernsym о симметрии источника излучения

пар (Рис.3.9), а также проверяет модель на отражение по оси X, отражение по оси Y и симметрию вращения на 90 градусов. В предположении, что оптическая система имеет эти симметрии, генерируемая модель должна иметь ту же симметрию.

Выходные значения kernsym отображаются в окне консоли. Если последнее ядро асимметрично (значение равно 0), количество ядер необходимо увеличивать или уменьшать, пока вывод kernsym для самого высокого ядра не будет симметричным (значение равно 1). Сетка ядра определяет степень детализации вычислений ядра.

5. Значение т.н. «оптического диаметра». Под этой величиной подразумевается размер области пространственного «влияния» топологических структур друг на друга. Взаимодействие между ближайшими ребрами возможно, когда ребра разделены расстоянием меньше оптического диаметра.

Значение оптического диаметра можно приближенно оценить следующим образом. В общем случае размер минимального полупериода, который может быть отображен оптической системой, по порядку величины эквивалентен $(\lambda/NA)/(1+\sigma_{max})$, где σ_{max} – максимальный нормированный радиус источника освещения с ненулевой интенсивностью. Оптический диаметр модели ОРС должен соответствовать области, которая примерно на порядок больше минимального воспроизводимого оптической системой объекта. Таким образом, с учетом внеосевого освещения оценку величины оптического диаметра можно произвести, используя следующее соотношение:

$$OD = 10 \cdot \frac{\left(\frac{\lambda}{NA}\right)}{(1 + \sigma_{max})}. \quad (3.1)$$

От правильно подобранного значения оптического диаметра зависит точность и стабильность модели [60].

6. Оптические параметры слоев фоторезистивного стека.

Точная информация об оптических параметрах слоев фоторезистивного стека, а именно значения толщин, коэффициенты преломления и коэффициенты поглощения (см. Табл.13), значительно улучшает точность модели, поскольку дает возможность адекватно рассчитать распределение интенсивности в пленке резиста в зависимости от положения плоскости фокусировки воздушного изображения. При использовании векторной оптической модели задание информации о параметрах стека является обязательным.

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 ($\Omega = 0,3408$; КЛР на ФШ: $l = 320$ нм; период на ФШ: $p = 760$ нм; КЛР в резисте: 80 нм – см. п.2.2).

Поиск оптимальных значений указанных параметров производился методом полного перебора. Минимизировалась взвешенная среднеквадратичная ошибка моделирования [68]:

$$errRrms_{CD} = \sqrt{\frac{\sum_i PCW_i \frac{\sum_j W_{i,j} (CD_{Sim} - CD_{Meas})^2}{\sum_j W_{i,j}}}{\sum_i PCW_i}}, \quad (3.2)$$

где суммирование производится как по тестовым структурам (j), так и по условиям процесса (i), PCW_i – весовой коэффициент i -х условий технологического процесса (например, для тех или иных значений дефокусировки), $W_{i,j}$ – весовой коэффициент j -й тестовой структуры для i -х условий процесса.

Существует ряд способов подбора весовых коэффициентов PCW_i и $W_{i,j}$ [59]. 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 14. Скрипт оптической модели для САПР Mentor Graphics Calibre приведен в Приложении 2.

Таблица 14. Параметры оптической модели после оптимизации

Длина волны	193 нм
Коэф. масштабирования	4
NA	0,75
Осветитель	Quasar
$\sigma_{\text{внеш}}$	0,85
$\sigma_{\text{внутр}}$	0,60
α	30°
$\Delta\sigma_{\text{внеш}}$	0,019
$\Delta\sigma_{\text{внутр}}$	0,012
$\Delta\alpha$	0,011
$n_{\text{ФР}}$	1,698
$k_{\text{ФР}}$	0,023
$t_{\text{ФР}}$	185 нм
n_{BARC}	1,82
k_{BARC}	0,34
t_{BARC}	75 нм
$n_{\text{подложки}}$	1,6
$k_{\text{подложки}}$	3,97
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

3.3.2. Сбор экспериментальных данных, калибровка и валидация «компактной» модели (VT5) формирования контура фоторезистивной маски

В настоящей работе решалась задача подбора коэффициентов фоторезистивной модели, представленной в виде полинома:

$$\begin{aligned}
 T(I_{\max}, I_{\min}, Slope, Factor) = & \\
 = a_0 + a_1 I_{\max} + a_2 I_{\min} + a_3 Slope + a_4 Factor + a_{11} I_{\max}^2 + a_{22} I_{\min}^2 + & \\
 + a_{33} Slope^2 + a_{44} Factor^2 + a_{12} I_{\max} I_{\min} + a_{13} I_{\max} Slope + & \\
 + a_{14} I_{\max} Factor + a_{23} I_{\min} Slope + a_{24} I_{\min} Factor + a_{34} Slope Factor &
 \end{aligned} \quad (3.3)$$

где T – пороговое значение интенсивности освещения для фоторезиста; 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 (см. Рис.1.13), a_0, \dots, a_{34} (всего 15 шт.) – калибруемые коэффициенты фоторезистивной модели. Ядра свертки не использовались.

Наиболее длительным этапом в процедуре калибровки компактных моделей формирования контура ФРМ является сбор измерений. В случае неавтоматизированных измерений сбор данных может занимать десятки часов, что существенно задерживает время разработки ОРС модели и ОРС решения в целом. Необходимость снижения количества измерений 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. Целью исследования было определение минимального количества структур, обеспечивающего приемлемую точность модели, которая оценивалась результатами измерений структур верификационного множества, не использовавшихся при калибровке.

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 определяется следующим образом:

$$errRrms_{EPE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{50} SW_i \frac{\sum_{j=1}^5 PW_{i,j} (EPE_{i,j}^{Sim} - EPE_{i,j}^{Meas})^2}{\sum_{j=1}^5 PW_{i,j}}}{\sum_{i=1}^{50} SW_i}}. \quad (3.4)$$

Здесь суммирование производится по точкам измерения (j) каждой структуры, а потом – по порядковым номерам тестовых структур (i), SW_i – весовой коэффициент i -й тестовой структуры, $PW_{i,j}$ – весовой коэффициент j -го измерения i -й тестовой структуры.

Характеристикой точности откалиброванной модели в данном случае служило значение $errRrms_{EPE}$ с весовыми коэффициентами, определяемыми методом экспертных оценок, на верификационном множестве тестовых структур.

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.3.10а) [52, 95], соответствующая которой тестовая структура и учитывается при калибровке.

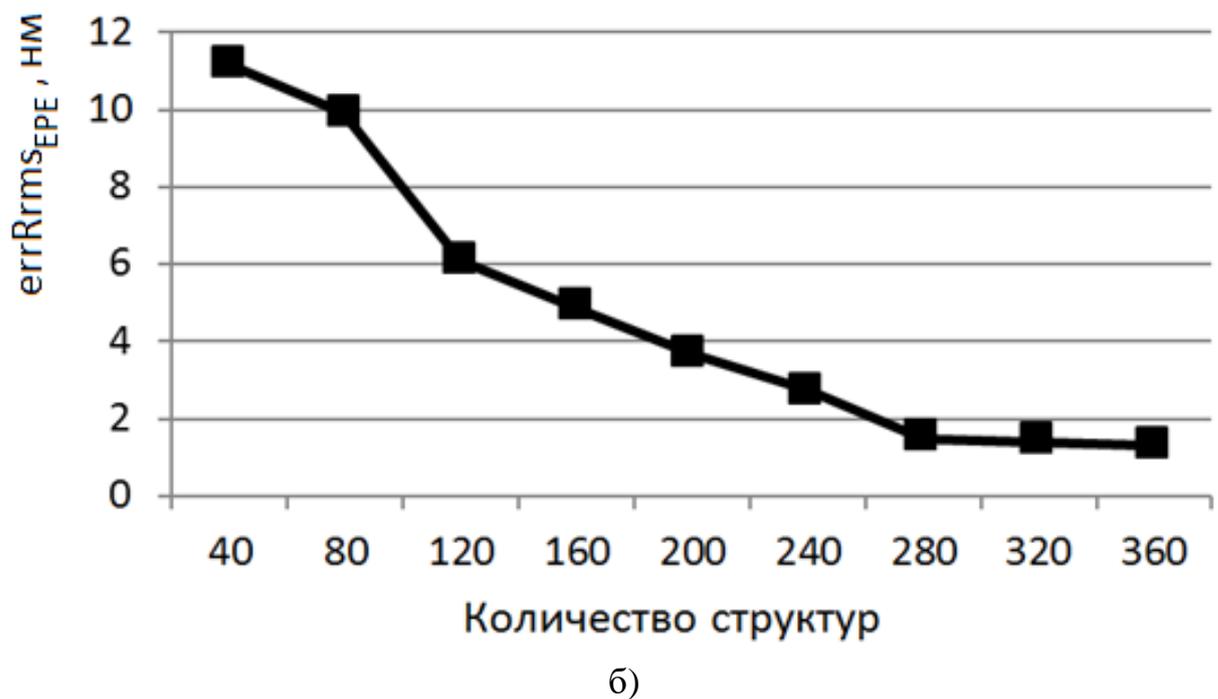
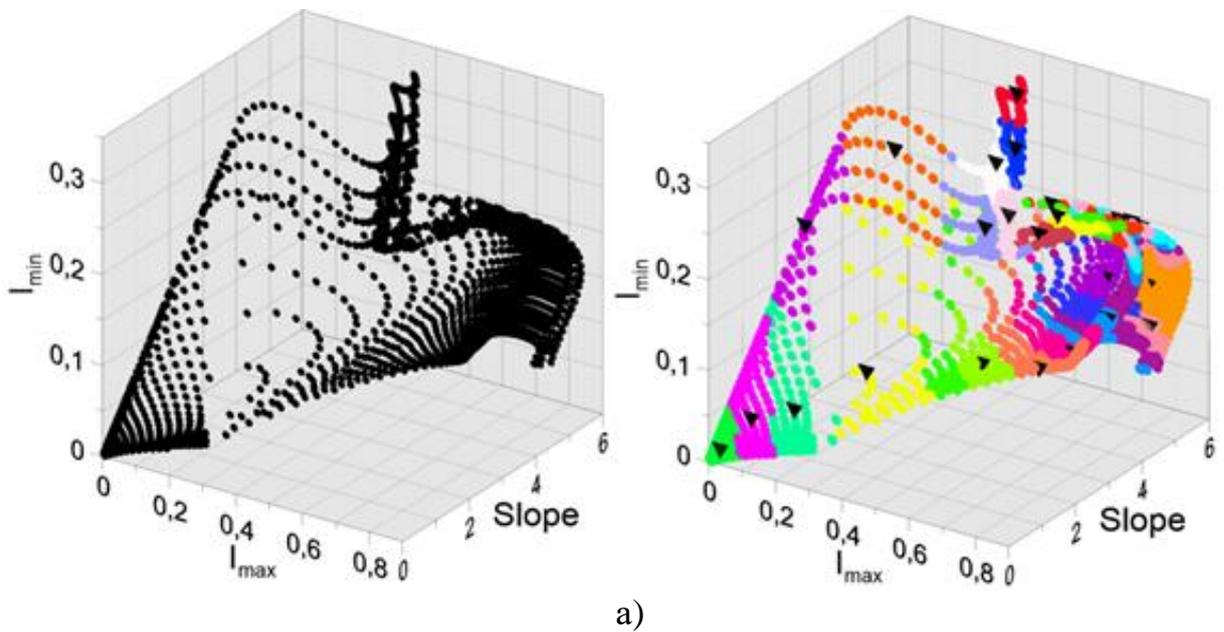
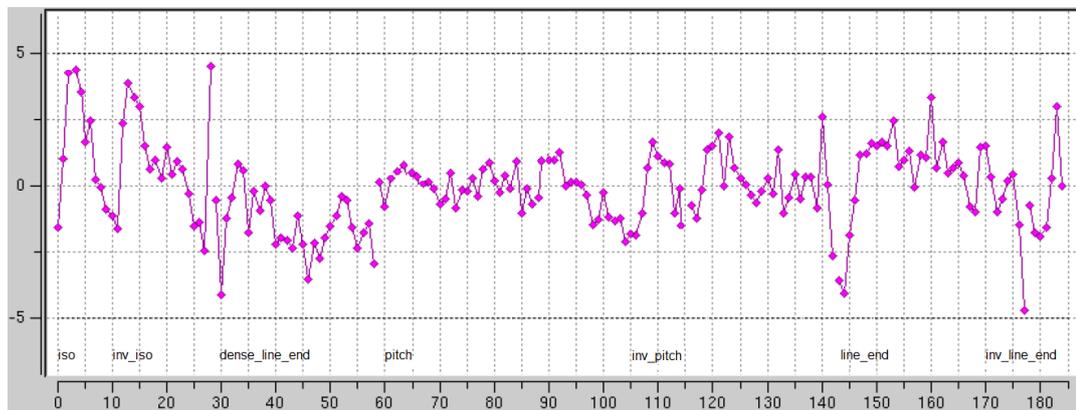


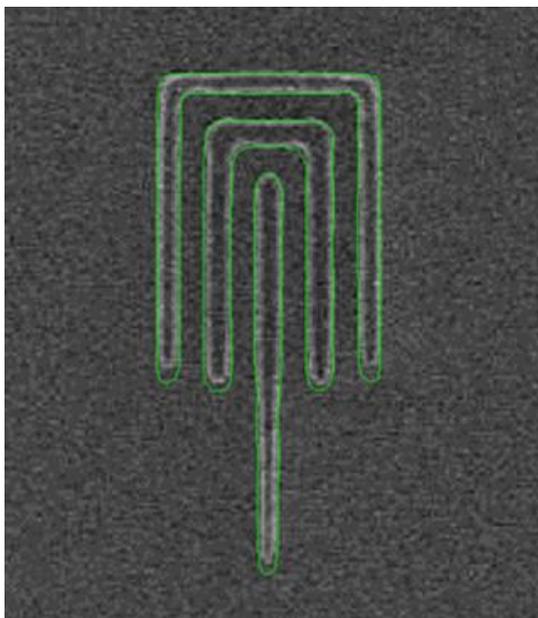
Рис. 3.10. Калибровка и верификация модели VT5:

а) кластеризация точек в пространстве параметров изображения (точка соответствует одной тестовой структуре);

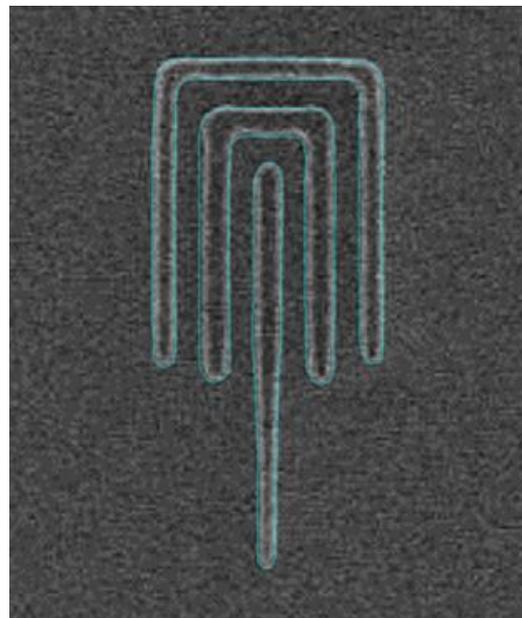
б) зависимость $errRrms_{EPE}$ модели VT5 на верификационном множестве от числа структур калибровочных выборок, сформированных посредством кластеризации множества параметров изображения методом k-средних



а)



б)



в)

Рис. 3.11. Калибровка и верификация модели VT5:

а) различие между измеренными и промоделированными линейными размерами тестовых структур калибровочного множества ($CD_{Sim} - CD_{Meas}$, выборка – 190 структур);

б) промоделированный контур верификационной структуры в резисте, наложенный на SEM-снимок этой же структуры (slot, $l/s - 80\text{нм}/80\text{нм}$), калибровка модели по 100 структурам, $errRrms_{EPE} = 7,57 \text{ нм}$;

в) промоделированный контур верификационной структуры в резисте, наложенный на SEM-снимок этой же структуры (slot, $l/s - 80\text{нм}/80\text{нм}$), калибровка модели по 320 структурам, $errRrms_{EPE} = 1,46 \text{ нм}$

Таблица 15. Значения коэффициентов модели VT5, описываемой полиномом (3.3) для использования в скрипте фоторезистивной модели САПР Mentor Graphics Calibre. Калибровка по 320 тестовым структурам (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_{23}	0,000987581
a_{24}	-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

Для каждого из сформированных наборов данных была откалибрована модель VT5 и исследованы её точность и стабильность методом, приведенным в [70] (см. п.1.2.2). Результат представлен на Рис.3.10б. и Рис.3.11.

Как и ожидалось, наборы, состоящие из 40 и 80 структур, дают ошибку более 8 нм, которая монотонно уменьшается с увеличением количества калибровочных измерений. Начиная с 280 задействованных калибровочных структур, спад отклонения уменьшается и выходит почти на постоянный уровень 1,5 нм. Таким образом, оптимальным вариантом является использование для калибровки от 300 до 350 тестовых структур при условии формирования выборки при помощи кластерного анализа (метод k-средних) [27, 52, 53, 96].

Скрипт модели VT5, откалиброванной по 320 тестовым структурам, приведен в Приложении 3. Значения коэффициентов a_0, \dots, a_{34} приведены в Таблице 15. Значение минимального собственного числа матрицы

нормальной системы алгебраических уравнений (1.26) для определения коэффициентов a_0, \dots, a_{34} составило $\lambda_{\min} = 0,000816453$ при 11-ти членах разложения из 15-ти возможных, что соответствовало минимальному значению $RRMS_{pred} = 0,8$ нм.

3.4. Разработка базовой процедуры расстановки непропечатываемых вспомогательных элементов (SRAF)

Задача разработки процедуры расстановки SRAF с использованием САПР Mentor Graphics Calibre (инструмент OPCsbar [97]) сводится к составлению программного кода на языке SVRF (Standard Verification Rule Format [98]), содержащего параметры используемых непропечатываемых структур и команды, описывающие процесс их расстановки в зависимости от геометрических характеристик анализируемой топологической информации [57]. По сути, процесс размещения SRAF представляет собой топологическую коррекцию на основе правил (во всяком случае, для рассматриваемых в настоящей работе проектных норм технологии).

Параметры SRAF и правила их размещения определяются по результатам моделирования процесса проекционной фотолитографии (п.2.3), экспериментов по пропечатке тестовых структур (п.3.2), а также правил MRC (Mask Rule Check), формулируемых, в частности, на основе требований фотошаблонной спецификации (п.2.4). Кроме того, существует возможность выделения приоритетных элементов SRAF, например, относящихся к затворным узлам схемы, – для этого необходим учет топологии двух литографических слоев: поликремния и активных областей. На основе указанной информации разрабатывается **базовая процедура** расстановки элементов SRAF, которая в дальнейшем может быть скорректирована с учетом индивидуальных особенностей производимых изделий или используемых в их составе библиотечных элементов.

Процедура формирования слоя SRAF может быть разделена на три этапа:

- 1) задание геометрических параметров непропечатываемых элементов и топологии основных слоев, необходимых для успешного размещения SRAF (создание правил);
- 2) расстановка элементов SRAF согласно сформулированным правилам;
- 3) «очистка» топологического слоя SRAF от фрагментов, способных неблагоприятно повлиять на результат проекционной фотолитографии.

Далее указанная процедура описывается более детально.

3.4.1. Определение первоначальных принципов размещения элементов SRAF

Обычно под правилами расстановки SRAF понимается некоторый набор значений и диапазонов, соответствующий характерным размерам, которые можно встретить в топологии. В случае обработки одномерной топологии характерными размерами являются:

- размеры промежутков между структурами, в которые должны ставиться SRAF;
- ширины структур, для которых должны ставиться SRAF;
- ширины элементов SRAF;
- положение элемента SRAF (расстояние от края основной структуры).

Перечисленные размеры были определены ранее на этапах моделирования процесса проекционной фотолитографии (п.2.3) и экспериментов по пропечатке тестовых структур (п.3.2).

3.4.2. Дополнительные топологически обусловленные ограничения

Реальные топологии не являются одномерными, поэтому набор характеристик, описывающих расстановку SRAF, включает ряд дополнительных ограничений.

Как уже отмечалось выше, SRAF должны иметь достаточно малую ширину, чтобы не пропечатываться в резисте. С другой стороны, чем больше ширина элементов SRAF, тем эффективнее они выполняют свою функцию по расширению процессного окна основной структуры. Эти два противоречащих друг другу требования приводят к необходимости экспериментального поиска оптимальных геометрических параметров используемых SRAF. Такой поиск, как правило, производится с применением пропечаток одномерных тестовых структур (п.3.2) и не дает исчерпывающий ответ на вопрос о пропечатываемости в резисте элементов SRAF в двумерной топологии, в частности, по причине ограниченности числа закладываемых вариантов тестовых паттернов.

Моделирование контура фоторезистивной маски с использованием компактных моделей позволяет с достаточной точностью прогнозировать пропечатываемость практически любых конфигураций топологических элементов (при условии корректной настройки и калибровки используемых моделей).

Ниже описаны основные особенности, связанные с размещением SRAF в реальных топологиях и приводящие к необходимости введения дополнительных ограничений на их геометрию [57, 99, 100].

1. Угловые и пересекающиеся SRAF

На Рис.3.12а показаны результаты моделирования фоторезистивной маски для топологических элементов с угловыми SRAF (ширина центральной структуры 80 нм). Результаты были получены для нулевого значения дефокусировки с помощью САПР Calibre на основе модели VT5 формирования контура ФРМ, откалиброванной в п.3.3.2. Ширина SRAF составляет 36 нм. Модель предсказывает проработку в резисте мест пересечения и близкого примыкания SRAF, поэтому представляется целесообразным запрет на пересечение непропечатываемых структур и уточнение минимального возможного расстояния между углами

примыкающих SRAF как параметра, необходимого для учета при их расстановке.

2. Обработка концов линий

Как известно, при пропечатке линий в силу эффектов близости происходит укорачивание и скругление их концов. Минимизировать этот эффект позволяет коррекция эффектов оптической близости, однако помехой для этой операции могут стать топологические элементы SRAF (Рис.3.12б). Для исключения негативного влияния SRAF на операцию топологической коррекции концов линий достаточно ввести параметр, накладывающий ограничение на минимальное расстояние от концов линий основной топологии до начала элемента SRAF.

3. Обработка «сколов» между касающимися элементами SRAF

Основная проблема здесь заключается в затрудненной инспекции данного участка топологии [101]. Существует два варианта обработки «сколов» между двумя примыкающими элементами SRAF (Рис.3.12в): создание полноценного «зигзага» либо симметричная обрезка на «сколе» путем задания минимального расстояния между SRAF (как в случае с угловыми и пересекающимися SRAF). Второй способ более предпочтителен и позволяет исключить возможность пропечатки SRAF, но может привести к неоднородности размера основной структуры.

4. Слияние встречных совмещенных SRAF

Для встречных совмещенных SRAF (Рис.3.13а) может быть задано минимальное расстояние между концами элементов. В случае если это расстояние менее заданного, элементы SRAF объединяются друг с другом. Если этот процесс вреден для обработки концов линий, то в этом случае может быть использована приоритезация тех или иных участков топологии.

5. Ограничения MRC

Основная проверка, осуществляемая в процессе MRC, – проверка на минимальный размер и площадь кодируемых элементов топологии.

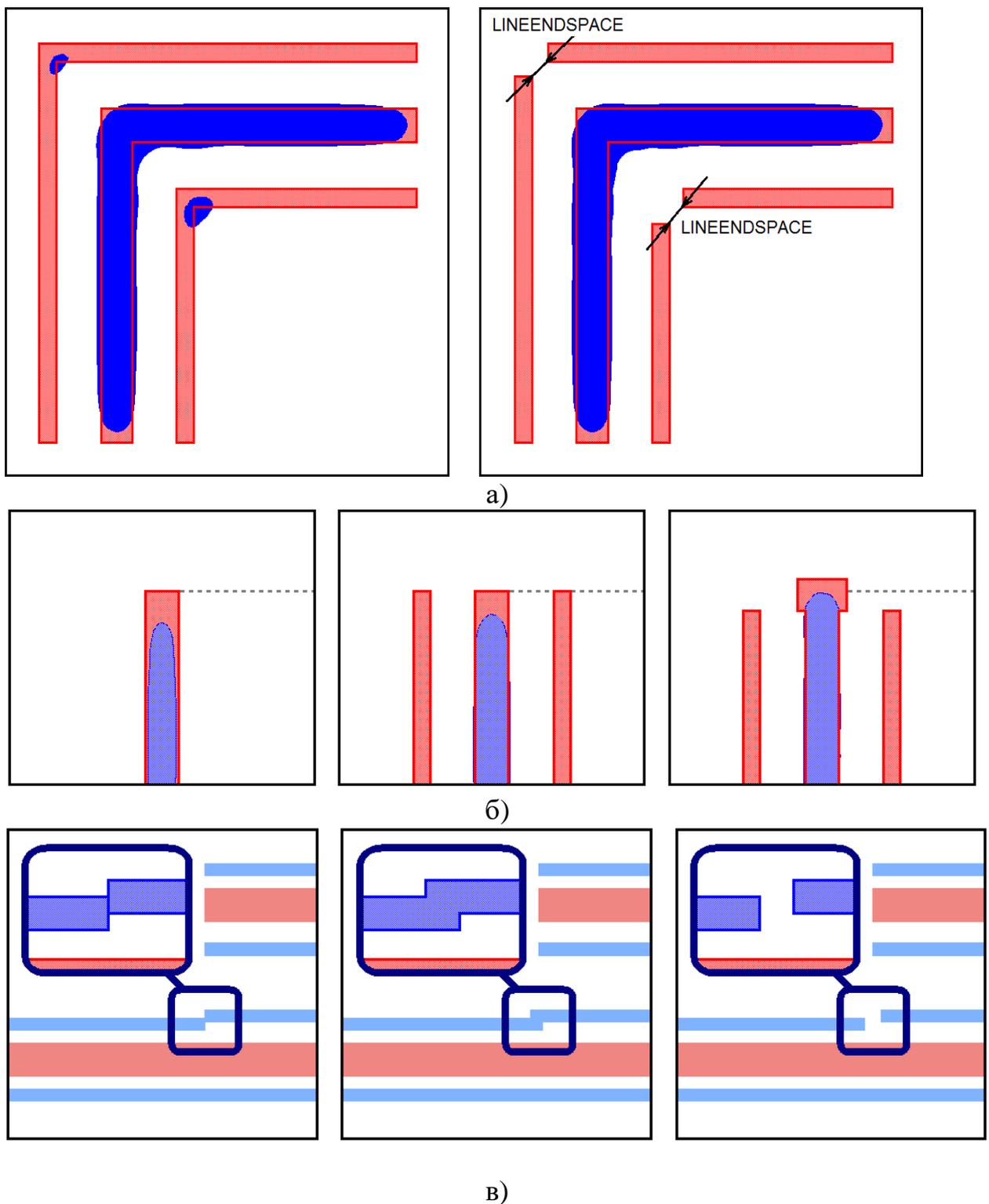


Рис. 3.12. Особенности размещения элементов SRAF в реальных топологиях:
 а) угловые SRAF: проработка углов в резисте;
 б) обработка концов линий;
 в) варианты обработки «сколов» между касающимися элементами SRAF: формирование «зигзага» и симметричная обрезка

Характерные размеры, используемые при данной проверке, определяются из спецификации на фотошаблон. Как правило, минимальный размер топологического элемента должен, как минимум, на порядок превышать величину суммарного допуска на размер пропечатываемого элемента на ФШ (см. п.2.4). В том же соотношении должны находиться площади минимального кодируемого элемента и максимального допустимого дефекта топологии. Таким образом, при расстановке должны быть заданы геометрические параметры минимального возможного элемента SRAF – по меньшей мере, его длина (Рис.3.13а). Разумеется, ширина используемых SRAF должна с запасом удовлетворять требованию MRC к размеру минимального элемента на ФШ.

В процессе MRC, кроме того, производится проверка на близость сторон элементов топологии друг к другу. Правила расстановки SRAF должны изначально учитывать эти требования, в случае появления подобных ошибок они должны устраняться в процессе «очистки» посредством обрезки того SRAF, конец которого вызывает ошибку (Рис.3.13б).

3.4.3. Основные параметры базовой процедуры расстановки структур SRAF для двумерной топологии затворного слоя

С учетом изложенных соображений, а также результатов моделирования процесса проекционной фотолитографии, результатов экспериментов по пропечатке тестовых структур (п.3.2) и оценок ограничений, накладываемых правилами MRC, были разработаны основные требования к **базовой процедуре** расстановки структур SRAF для затворного слоя технологии проектных норм 65 нм (см. Таблицу 16). Скрипт базовой процедуры расстановки SRAF на языке SVRF для CAIP Mentor Graphics Calibre (инструмент OPCSbar) приведен в Приложении 4.

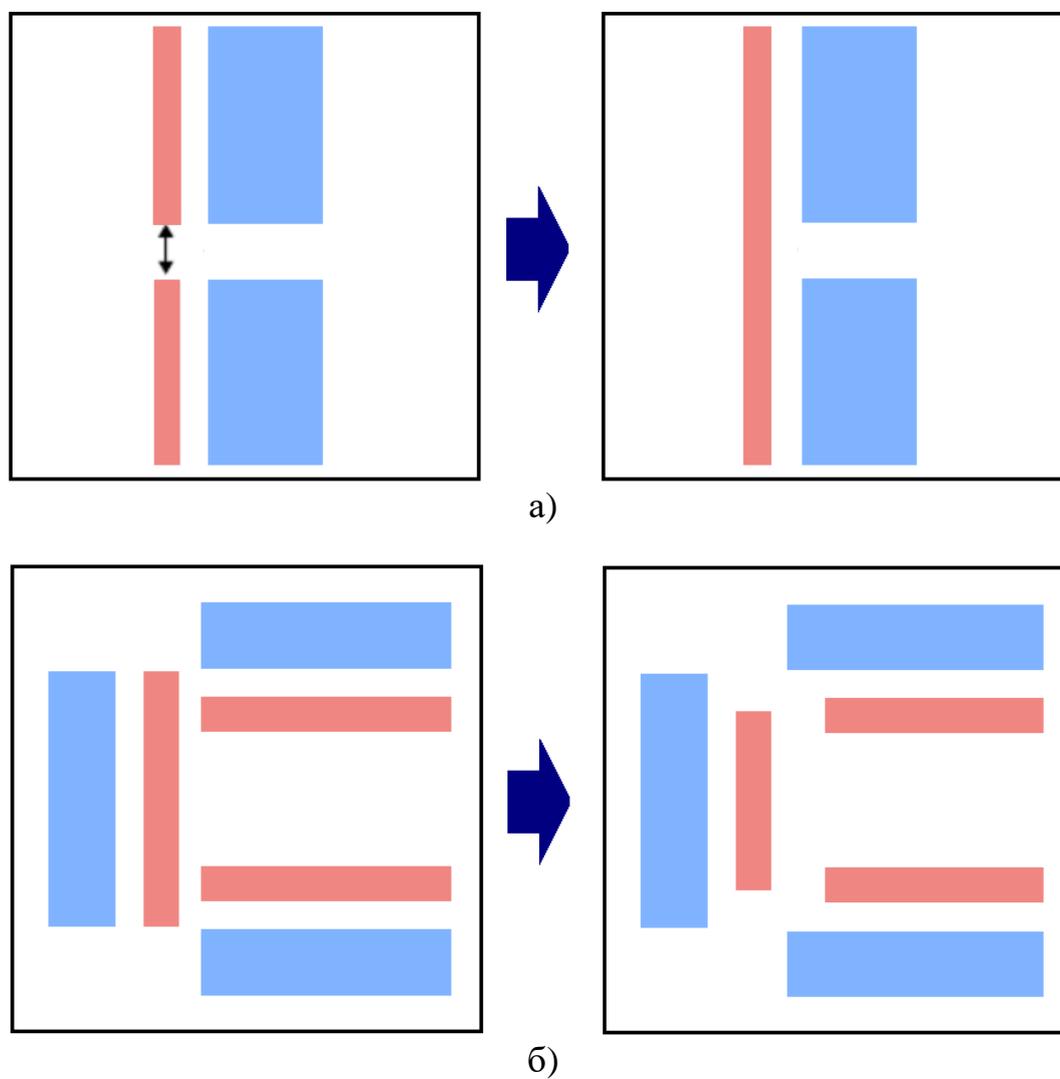


Рис. 3.13. Особенности размещения элементов SRAF в реальных топологиях:
 а) слияние встречных совмещенных SRAF;
 б) удовлетворение требованиям MRC: обрезка SRAF, расположенных близко друг к другу и к элементам основной топологии

Таблица 16. Основные требования к базовой процедуре расстановки структур SRAF для двумерной топологии затворного слоя технологии проектных норм 65 нм, разработанные на основе моделирования процесса проекционной фотолитографии, экспериментов по пропечатке тестовых структур и правил проектирования ФШ (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

Выводы по Главе 3

1. Разработана топологическая информация для калибровочного фотошаблона «LITHO90-65», включающая в свой состав ряд модулей, предназначенных для калибровки оптической и компактной фоторезистивной модели VT5, а также для проверки правил расстановки структур SRAF на одиночных и периодических элементах топологии.

2. С использованием фотошаблона «LITHO90-65», изготовленного в соответствии с составленной в рамках настоящей работы спецификацией, на сканере ASML PAS 5500/1150C были произведены пропечатки основных тестовых и калибровочных модулей с настройками проекционной системы, определенными в рамках настоящей работы, с последующими измерениями линейных размеров тестовых структур. 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».

3. Анализ экспериментальных процессных окон SRAF, построенных в результате пропечаток модуля «SRAF_TEST» фотошаблона «LITHO90-65» позволил скорректировать и дополнить сформулированные ранее требования к параметрам SRAF следующим образом (все размеры приведены в масштабе пластины):

- $w = 24 \text{ нм}$, расположение в центрах промежутков между основными линиями – для периода линий от 340 нм до 420 нм ;
- $w = 32 \text{ нм}$, расположение в центрах промежутков между основными линиями – для периода линий от 420 нм до 580 нм ;
- $w = 24 \text{ нм}$, $s = 120 \text{ нм}$ – для периодов линий от 580 нм до 620 нм ;
- $w = 32 \text{ нм}$, $s = 140 \text{ нм}$ – 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.

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

5. С использованием результатов пропечаток «прямых» и инвертированных тестовых структур типа «pitch», «lineend» и «dense_lineend» модулей «DENSE_LINES» и «PULLBACKS» фотошаблона «LITHO90-65» откалибрована оптическая модель. Для моделирования контура ФРМ использовалась модель с постоянным порогом, соответствующим номинальному значению дозы для наилучшей проработки «якорного» элемента топологии ($\Omega = 0,3408$; КЛР на ФШ: $l = 320$ нм; период на ФШ: $p = 760$ нм; КЛР в резисте: 80 нм – см. Гл.2). Поиск оптимальных параметров производился методом полного перебора. Максимальное значение $errRms_{CD}$ в результате калибровки оптической модели с использованием постоянного порога составило 10,058 нм. Значение $errRms$ на верификационном множестве составило 13,493 нм.

6. С использованием результатов пропечаток тестовых структур типа «pitch», «lineend» и «dense_lineend» модулей «DENSE_LINES» и «PULLBACKS» фотошаблона «LITHO90-65» откалибрована оптическая модель VT5, исследованы ее точность и стабильность. Для верификации результатов калибровки использовались тестовые структуры модуля «SLOTS». Калибровочная выборка формировалась методом кластерного анализа (к-средних) в пространстве параметров оптического изображения

используемых калибровочных структур. При оптимальном числе калибровочных структур (300÷350) значение $errRrms_{EPE}$ на верификационном множестве составило 1,5 нм. Значение минимального собственного числа матрицы нормальной системы алгебраических уравнений для определения коэффициентов модели VT5 составило $\lambda_{мин} = 0,000906753$ при 11-ти членах разложения из 15-ти возможных, что соответствует минимальному значению $RRMS_{pred} = 0,8$ нм.

7. Для двумерных топологий с учетом результатов моделирования процесса проекционной фотолитографии, результатов экспериментов по пропечатке тестовых структур модуля «SRAF_TEST» и оценок ограничений, накладываемых правилами MRC, были разработаны основные требования к базовой процедуре расстановки структур SRAF для затворного слоя технологии проектных норм 65 нм.

Глава 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ОРС-РЕЦЕПТА ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ СЛОЕВ СБИС ПРОЕКТНЫХ НОРМ 65 нм

4.1. Основные настраиваемые параметры ОРС-рецепта

Рецепт коррекции эффектов оптической близости практически в любом специализированном САПР реализуется в виде конфигурационного файла, содержащего значения нескольких десятков параметров, определяющих схему фрагментации топологии, особенности процедуры смещения фрагментов и другие характеристики процесса коррекции топологии. В Таблице 17 перечислены основные параметры ОРС-рецепта в САПР Mentor Graphics Calibre, которые обычно подвергаются настройке.

Таблица 17. Основные параметры ОРС-рецепта в САПР Mentor Graphics Calibre, подвергающиеся настройке

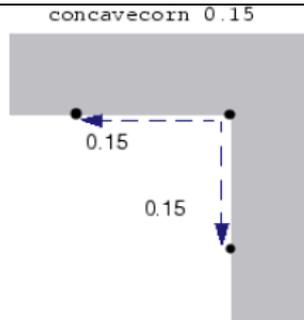
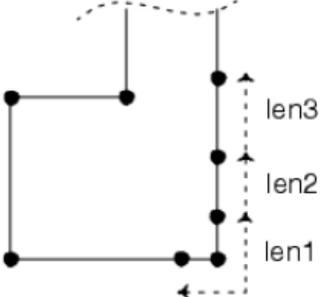
Параметр	Описание параметра	
iterations	Один из ключевых параметров рецепта, определяющий количество циклов моделирования с последующим смещением фрагментов. Большее количество итераций приводит к более агрессивной коррекции топологических структур, что позволяет повысить точность воспроизведения контура топологии на пластине. В то же время, меньшее значение параметра сокращает временные затраты на проведение коррекции. Допустимое значение – целое число в диапазоне 2÷5	
concavicorn1 ... concavicornN	Параметры, контролирующие количество и размер сегментов для внутренних углов при фрагментации в областях взаимного влияния топологических структур. Допустимое значение – вещественное число в диапазоне 0,08÷0,018 мкм	
cornedge1 ... cornedgeN	Параметры, контролирующие количество и размер сегментов для внешних углов при фрагментации в областях взаимовлияния топологических структур. Допустимое значение – вещественное число в диапазоне 0,08÷0,018 мкм	

Таблица 17 (продолжение)

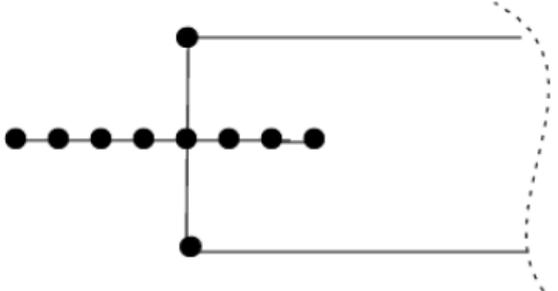
Параметр	Описание параметра
inter_ripplelen	Параметр, определяющий длину одиночного ребра фрагмента. Допустимое значение – вещественное число в диапазоне $0,08 \div 0,018$ мкм
inter_num	Параметр, определяющий количество точек фрагментации, которые создаются по обе стороны от концевой участка линии начиная с нулевой точки. Допустимое значение – целое число в диапазоне от 1 до 3. Значение по умолчанию – $0,5 \lambda / (NA \cdot inter_ripplelen)$
inter_distance	Параметр, определяющий максимальную дистанцию между структурами, при которой необходимо выполнить фрагментацию. Допустимое значение – вещественное число в диапазоне $0,3 \div 0,671$ мкм. Значение по умолчанию – $1,5 \lambda / NA$
inter_shield	Параметр, определяющий минимальное количество близкорасположенных ребер, при наличии которых необходимость выполнения фрагментации отсутствует. Допустимое значение – целое число в диапазоне $0 \div 4$
lineEndLength	Параметр, задающий критерий принадлежности ребра к концевому участку линии. Ребра такого типа подвергаются специфической фрагментации. Допустимое значение – вещественное число в диапазоне $0,12 \div 0,28$ мкм
site_num	Параметр, определяющий количество контрольных точек для измерения величины EPE в заданных контрольных областях фрагмента. Допустимое значение – целое число в диапазоне $1 \div 8$. Значение по умолчанию зависит от заданного типа контрольной области
site_center	Параметр, определяющий параметры выравнивания контрольных точек относительно ребра фрагмента. Допустимое значение – целое число в диапазоне $1 \div 8$ (не может превышать значение site_num) <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <pre> siteinfo ----- -num 8 -center 3 </pre> </div>  </div>
stepsize	Параметр, определяющий минимальную дистанцию, на которую может быть смещено ребро фрагмента в рамках одной итерации. Используется в качестве множителя при определении величины смещения ребра на базе полученного по результатам моделирования значения величины EPE. Допустимое значение – вещественное число в диапазоне $0,001 \div 0,01$ мкм

Таблица 17 (продолжение)

Параметр	Описание параметра
lea	Параметр, используемый для определения сегментов ребер на смежных внутренних углах концевых участков линий, которые должны подвергаться специфической фрагментации. Задаёт расстояние между вершинами сегментов для таких областей. Допустимое значение – вещественное число в диапазоне $0,08 \div 0,018$ мкм
sea	Параметр, используемый для определения сегментов ребер на смежных внешних углах концевых участков отступов, которые должны подвергаться специфической фрагментации. Задаёт расстояние между вершинами сегментов для таких областей. Допустимое значение – вещественное число в диапазоне $0,08 \div 0,018$ мкм
OPC_FEEDBACK_1 ... OPC_FEEDBACK_N	Параметр, определяющий значение множителя, используемого при вычислении величины смещения ребра на базе полученного по результатам моделирования значения величины EPE. Позволяет задать различные значения множителя для разных итераций, что может повысить стабильность процесса коррекции и снизить количество необходимых итераций смещения фрагментов. Как правило, начальные итерации требуют меньшего значения множителя чем заключительные, т.к. изначальное значение ошибки EPE может быть очень велико. Требуемое количество переменных равняется количеству итераций. Допустимое значение – вещественное число в диапазоне – $1 \div 0$ мкм

По причине большой размерности вектора параметров OPC-рецепта и их взаимосвязи, для их настройки целесообразно применение методик и алгоритмов математической оптимизации [102, 103, 104].

4.2. Алгоритм настройки параметров OPC-рецепта на основе оптимизационных методов

4.2.1. Формализация задачи оптимального выбора параметров OPC-рецепта

Формулировка задачи

Как упоминалось выше, OPC-рецепт может определенным набором параметров. Значение каждого из них задается вещественным или целым

числом в некотором диапазоне. Выделим n параметров ОРС-рецепта, которые будут подвергаться настройке. Пусть x_i – значение i -го оптимизируемого параметра, тогда набор управляемых переменных, представляющий собой комбинацию значений параметров рецепта, может быть задан как вектор $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, который, в свою очередь, является элементом множества допустимых решений X – некоторого подмножества n -мерного Евклидова пространства. Исходя из цели задачи, в роли критерия оптимальности для сравнительной оценки различных комбинаций (целевая функция) выступает показатель эффективности рецепта $F(\vec{x})$. Более подробно способы вычисления значений этого показателя и, соответственно, вид целевой функции будут рассмотрены ниже.

Единственным ограничением в рамках задачи оптимизации ОРС-рецепта является область определения значений его параметров. Пусть a_i и b_i – нижняя и верхняя граница диапазона допустимых значений i -го параметра соответственно. В этом случае множество допустимых решений X определяется системой неравенств вида $a_i \leq x_i \leq b_i$.

Таким образом, задача настройки ОРС-рецепта может быть представлена следующим образом: необходимо найти такой вектор значений параметров рецепта \vec{x} , который обеспечивает минимальное (максимальное) значение функции оценки эффективности рецепта $F(x)$ с учетом ограничений области допустимых решений X .

$$\begin{array}{l}
 F(\vec{x}) \rightarrow \min (F(\vec{x}) \rightarrow \max) \\
 \vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \\
 \vec{x} \in X, X \in E^n
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 a_1 \leq x_1 \leq b_1 \\
 a_2 \leq x_2 \leq b_2 \\
 \dots \\
 a_n \leq x_n \leq b_n
 \end{array}
 \right.
 \quad (4.1)$$

где $F(\vec{x})$ – функция оценки эффективности ОРС-рецепта, \vec{x} – вектор оптимизируемых параметров ОРС-рецепта, X – множество допустимых значений параметров ОРС-рецепта, E^n – n -мерное евклидово пространство, x_1, \dots, x_n – значения соответствующих параметров ОРС-рецепта, a_1, \dots, a_n – минимальные значения соответствующих параметров ОРС-рецепта,

b_1, \dots, b_n – максимальные значения соответствующих параметров OPC-рецепта; n – количество оптимизируемых параметров OPC-рецепта.

Для завершения формализации задачи оптимального выбора параметров OPC-рецепта необходимо определиться с видом целевой функции.

Оценка эффективности OPC-рецепта на основе анализа распределения величины ошибки размещения смоделированного контура ФРМ (EPE_RMS)

На этапе фрагментации топологии для каждого фрагмента задается контрольная точка, в которой в дальнейшем происходит вычисление значения EPE, определяющего величину смещения ребра фрагмента, относительно исходного топологического контура на этом участке. Особенности размещения контрольных точек и метод измерений определяется отдельными параметрами OPC-рецепта.

Применение специализированных программных средств, например, программных компонентов платформы Calibre, позволяет существенно упростить процесс измерения. Встроенный язык SVRF и вычислительное ядро Calibre-nmDRC позволяют построить гистограмму плотности распределения EPE, полученную в результате моделирования контура ФРМ для заданной топологии, скорректированной с помощью выбранной комбинации значений параметров OPC-рецепта. Пример такого распределения показан на Рис.4.1а.

Основная задача при анализе полученного распределения заключается не столько в определении предельных значения отклонения топологического контура от исходного рисунка, сколько в оценке степени рассеивания значений величины EPE. При этом, максимальная надежность и точность коррекции топологии может быть достигнута в том случае, когда значения смещения фрагментов максимально близки к нулю.

Исходя из этих соображений, для оценки эффективности ОРС-рецепта предлагается использовать среднеквадратическое отклонение величины EPE от нуля:

$$F = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k EPE_i^2}, \quad (4.2)$$

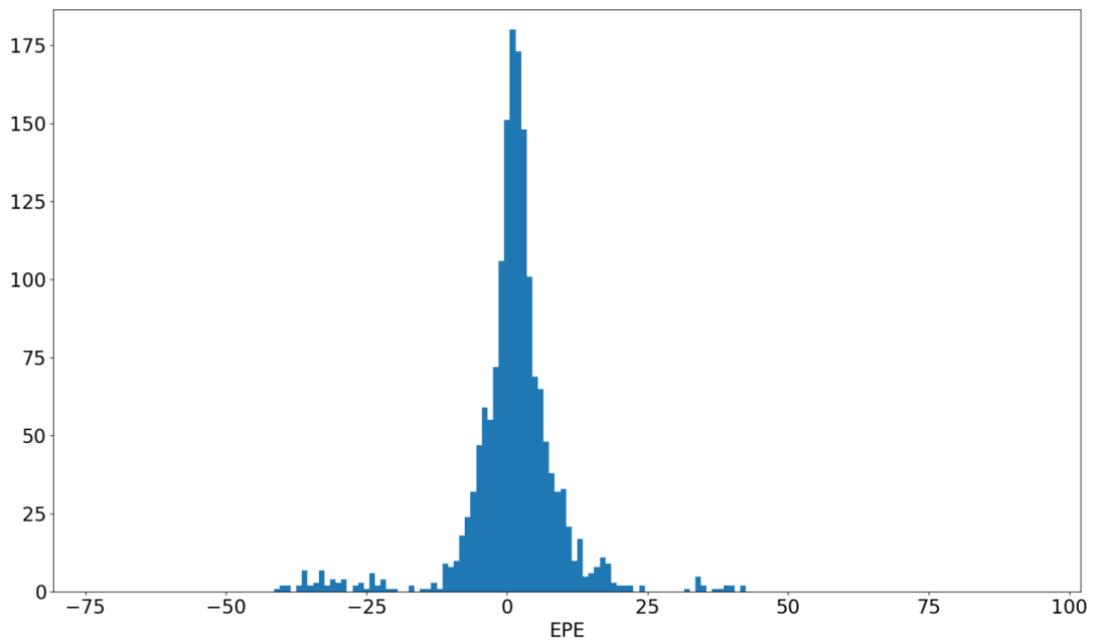
где k – количество фрагментов, сформированных на этапе фрагментации топологии; EPE_i – значение EPE для i -го фрагмента.

Очевидно, что при применении описанного подхода, более эффективная комбинация значений параметров рецепта будет давать меньшее значение целевой функции, следовательно, оптимизационная задача подразумевает ее минимизацию.

Оценка эффективности ОРС-рецепта на основе вычисления площади смещения контура ФРМ относительно исходного топологического рисунка (SQUARE)

В качестве альтернативы оценке эффективности ОРС-рецепта посредством анализа распределения величины EPE предлагается подход на основе вычисления площади фигуры, описывающей смещение смоделированного контура относительно исходного топологического рисунка. Процесс формирования такой фигуры показан на Рис.4.1б.

Исходная топология подвергается коррекции с применением оптимизированного ОРС-рецепта, после чего выполняется моделирование контура ФРМ. Далее, посредством вычитания исходного топологического слоя из полученного в результате моделирования, формируется фигура смещения, представляющая собой совокупность многоугольников, площадь которых вычисляется с применением формулы Гаусса (формула землемера или формула шнурования) [105]:



а)



б)

Рис.4.1. Критерий оптимальности параметров OPC-рецепта:

а) EPE_RMS: по функции распределения EPE в результате моделирования;
 б) SQUARE: по фигуре смещения моделируемого контура относительно исходного топологического рисунка

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^{k-1} x_{i,j} y_{i,j+1} + x_{i,k} y_{i,1} - \sum_{j=1}^{k-1} x_{i,j+1} y_{i,j} - x_{i,1} y_{i,k} \right|, \quad (4.3)$$

где n – общее количество многоугольников; k – количество вершин i -го многоугольника; $x_{i,j}, y_{i,j}$ – координаты вершин i -го многоугольника.

Как и при оценке эффективности ОРС-рецепта посредством анализа распределения величины ЕРЕ, в методе на основе вычисления площади смещения смоделированного контура большая эффективность коррекции достигается при уменьшении значения целевой функции.

4.2.2. Выбор метода оптимизации

Анализируя постановку задачи оптимальной настройки ОРС-рецепта можно сделать вывод, что она относится к классу NP-трудных задач [106]. При этом отсутствие какой-либо информации о виде целевой функции не позволяет сформировать представление о ее характере и свойствах. Дополнительную сложность представляет большая размерность вектора решения. Ввиду того, что применение классических численных методов поиска экстремума полиэкстремальных функций со сложным рельефом поверхностей уровня становится малоэффективным, выбор метода оптимизации ограничен классом приближенных методов глобальной оптимизации, которые позволяют найти решение «высокого качества» за приемлемое время. Наибольшую распространенность среди них получили метаэвристические методы оптимизации, которые основаны на интуитивных подходах и позволяют найти удовлетворительные решения задачи без строгого доказательства корректности применяемых процедур и оптимальности получаемого результата [107]. Одним из таких методов является метод дифференциальной эволюции, выбранный для решения рассматриваемой задачи как наиболее полно удовлетворяющий ее требованиям.

Метод дифференциальной эволюции [108] относится к методам многомерной математической оптимизации и является стохастическим. Это прямой метод оптимизации, предназначенный для нахождения минимума (максимума) недифференцируемых, нелинейных, мультимодальных функций от многих переменных. Алгоритм метода прост в реализации и легко поддается распараллеливанию при реализации на ЭВМ.

В общем виде алгоритм метода дифференциальной эволюции состоит из следующих шагов:

1. **Инициализация** начальной популяции и оценка приспособленности особей.
2. **Мутация** – генерация мутантных особей путем комбинации генов трех различных особей предыдущего поколения.
3. **Скращивание** мутантной особи с базовой путем замещения генов;
4. **Селекция** – оценка пробных особей и формирование новой популяции из наиболее приспособленных особей.

Рассмотрим основные шаги алгоритма более подробно.

Инициализация. В качестве начальной популяции выбирается случайный набор из N векторов из пространства R^n . Распределение исходной популяции должно выбираться исходя из особенностей решаемой оптимизационной задачи. Как правило, используется выборка из n -мерного равномерного или нормального распределения с заданными математическим ожиданием и дисперсией [108].

Мутация. Специфика оператора мутации является одной из характерных особенностей метода. Для каждого члена X_0 популяции выбирается тройка отличных от X_0 и друг от друга особей A , B и C . После этого, посредством применения векторных операций сложения и вычитания хромосом выбранных особей, а также с учетом параметра алгоритма F , определяющим силу мутации, формируется мутантная особь X_1 :

$$X_1 = A + F(B - C). \quad (4.4)$$

Таким образом, для распределенной в пространстве поиска популяции мутации будут значительно больше, чем когда алгоритм сойдется к областям с высокой приспособленностью. Пример генерации мутантной особи показан на Рис.4.2а. Такой подход приводит к тому, что в качестве источника шума используется не внешний генератор случайных чисел, а «внутренний», реализованный как разность между случайно выбранными векторами текущей популяции, т.е. величина мутации зависит от закона распределения точек (особей популяции) на текущем шаге и корректируется по мере локализации поиска. Такой вид адаптивной мутации позволяет алгоритму динамически моделировать особенности рельефа оптимизируемой функции, подстраивая под них распределение «встроенного» источника шума.

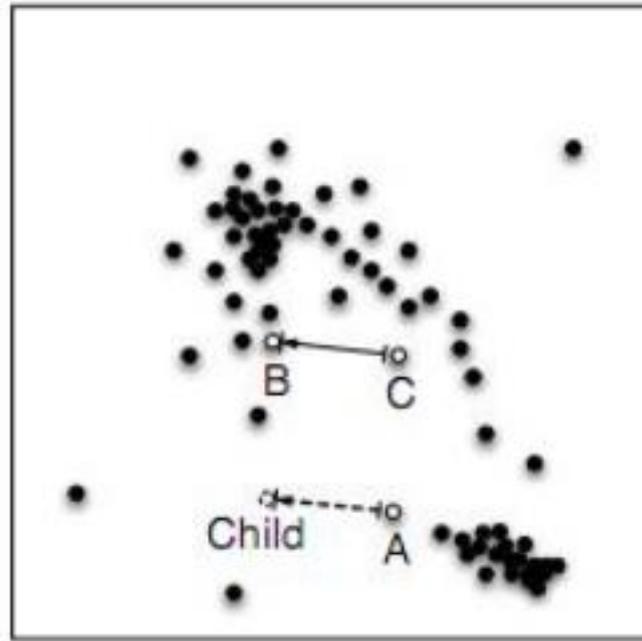
Скрещивание. После завершения мутации выполняется скрещивание исходной особи популяции X_0 и мутантной особи X_1 , с учетом вероятности скрещивания P , значение которой задается в качестве параметра алгоритма. В результате формируется пробная особь X_2 , каждый ген которой может наследоваться либо от исходной, либо от мутантной особей:

$$x_{2i} = \begin{cases} x_{0i}, & \text{при } k > P \\ x_{1i}, & \text{при } k \leq P \end{cases} \quad (4.5)$$

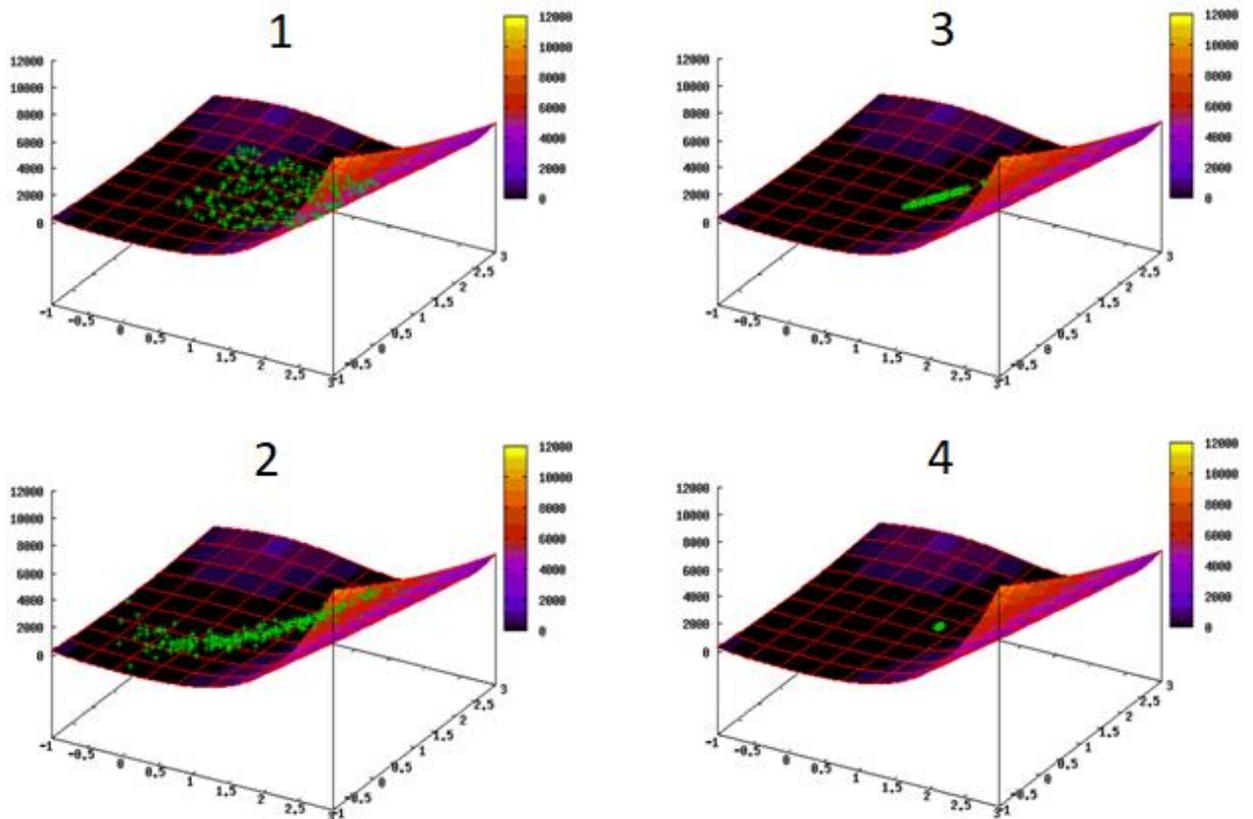
где x_{0i} – i -ый ген исходной особи; x_{1i} – i -ый ген мутантной особи; x_{2i} – i -ый ген пробной особи; P – вероятность скрещивания; k – значение случайной величины с равномерным распределением на интервале $[0, 1]$.

Селекция. После формирования пробной особи X_2 производится оценка ее приспособленности и сравнение полученного значения с показателем приспособленности исходной особи X_0 . В новую популяцию попадает особь с наилучшим значением целевой функции. Таким образом, алгоритм обеспечивает неизменность размера популяции в процессе работы.

К основным параметрам метода ДЭ относятся размер популяции N , сила мутации F и вероятность скрещивания P . Выбор комбинации их значений зависит от особенностей конкретной оптимизационной задачи. Тем



а)



б)

Рис.4.2. Оптимизация методом дифференциальной эволюции:

а) генерация мутантной особи с использованием особей А, В, С;

б) распределение точек тестовой функции Розенброка в процессе работы алгоритма ДЭ [109]: 1 – исходное, 2 – после 15 итераций, 3 – после 25 итераций, 4 – после 35 итераций

не менее, можно сформулировать некоторые общие рекомендации по калибровке их значений, которые позволят повысить эффективность работы алгоритма.

Размер популяции N может быть задан целым числом в диапазоне $[4, \infty)$. Нижняя граница диапазона обусловлена спецификой оператора мутации. При недостаточно большом размере популяции алгоритм напоминает локальный поиск, в то же время при больших значениях N возрастают вычислительные и временные затраты. Как правило, рекомендуется выбирать значение $N = Q \cdot n$, где $5 \leq Q \leq 10$, а n – размер генотипа особи, т.е. количество оптимизируемых параметров.

Сила мутации F задается вещественным числом в диапазоне $(0, 2]$. Более высокое значение расширяет область поиска, делает его более случайным, меньшее значение обеспечивает эффективное уточнение локального решения. В большинстве случаев рекомендуется начинать с меньших значений, постепенно увеличивая силу мутации, в случае быстрого вырождения популяции.

Вероятность скрещивания P может изменяться в диапазоне $(0, 1]$. Значения близкие к единице приближают поиск к случайному, меньшие значения делают его более конвергентным. Обычно рекомендуется начинать с относительно больших значений, чтобы проверить возможность быстрого получения решения, затем следует уменьшать вероятность скрещивания, минимизируя таким образом изменчивость популяции.

Алгоритм дифференциальной эволюции не только наследует классовые преимущества метаэвристических методов, например, генетических алгоритмов, но и обладает индивидуальными особенностями, которые позволяют добиваться высокой эффективности поиска «хорошего» решения для многих оптимизационных задач. К основным преимуществам метода можно отнести [109]:

- отсутствие ограничений, связанных с видом целевой функции (дифференцируемость, линейность, унимодальность) и размерностью вектора аргументов;
- отсутствие необходимости кодирования переменных;
- способность динамически моделировать особенности рельефа целевой функции;
- простота реализации и возможности эффективной параллелизации вычислений.

Одна из главных особенностей метода, а именно его способность быстро проходить вытянутые овраги различной формы и обеспечивать эффективность поиска даже в случае сложного рельефа, показана на примере оптимизации тестовой функции Розенброка от двух переменных [109] $f(x, y) = 100(y - x^2)^2 + (1 - x)^2$, $0 \leq x, y \leq 2$, которая имеет глобальный минимум в точке $f(1,1) = 0$. Результат применения алгоритма при запуске с параметрами $N = 200$, $P = 0.7$, $F = 0.5$ приведен на Рис.4.2б.

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.

4.2.3. Схема алгоритма оптимального выбора параметров ОРС-рецепта

Обобщенная схема алгоритма оптимальной настройки ОРС-рецепта с применением метода дифференциальной эволюции представлена на Рис. 4.3.

В качестве особи популяции выступает комбинация значений калибруемых параметров ОРС-рецепта, каждое из которых определяет один

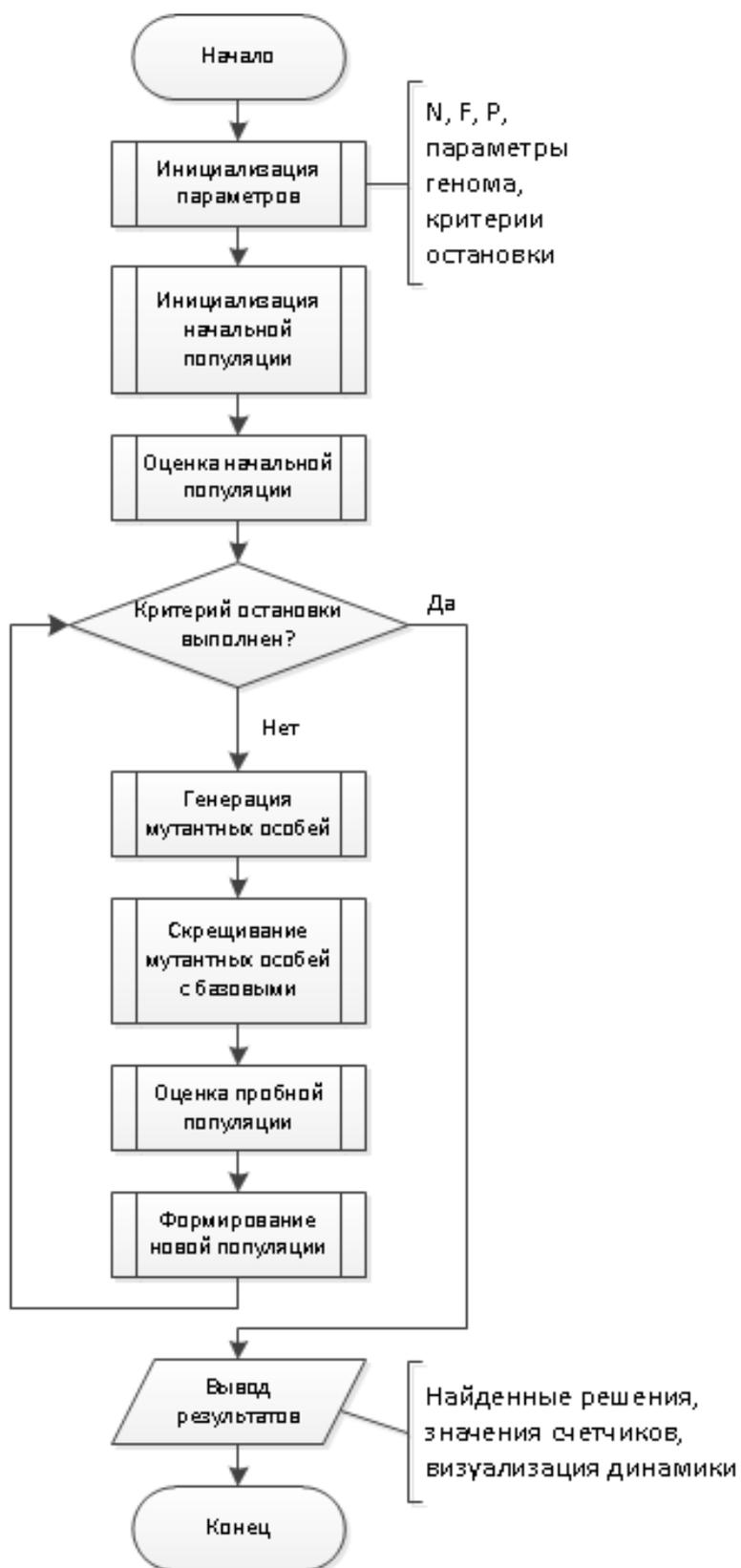


Рис.4.3. Обобщенная схема алгоритма оптимальной настройки ОРС-рецепта

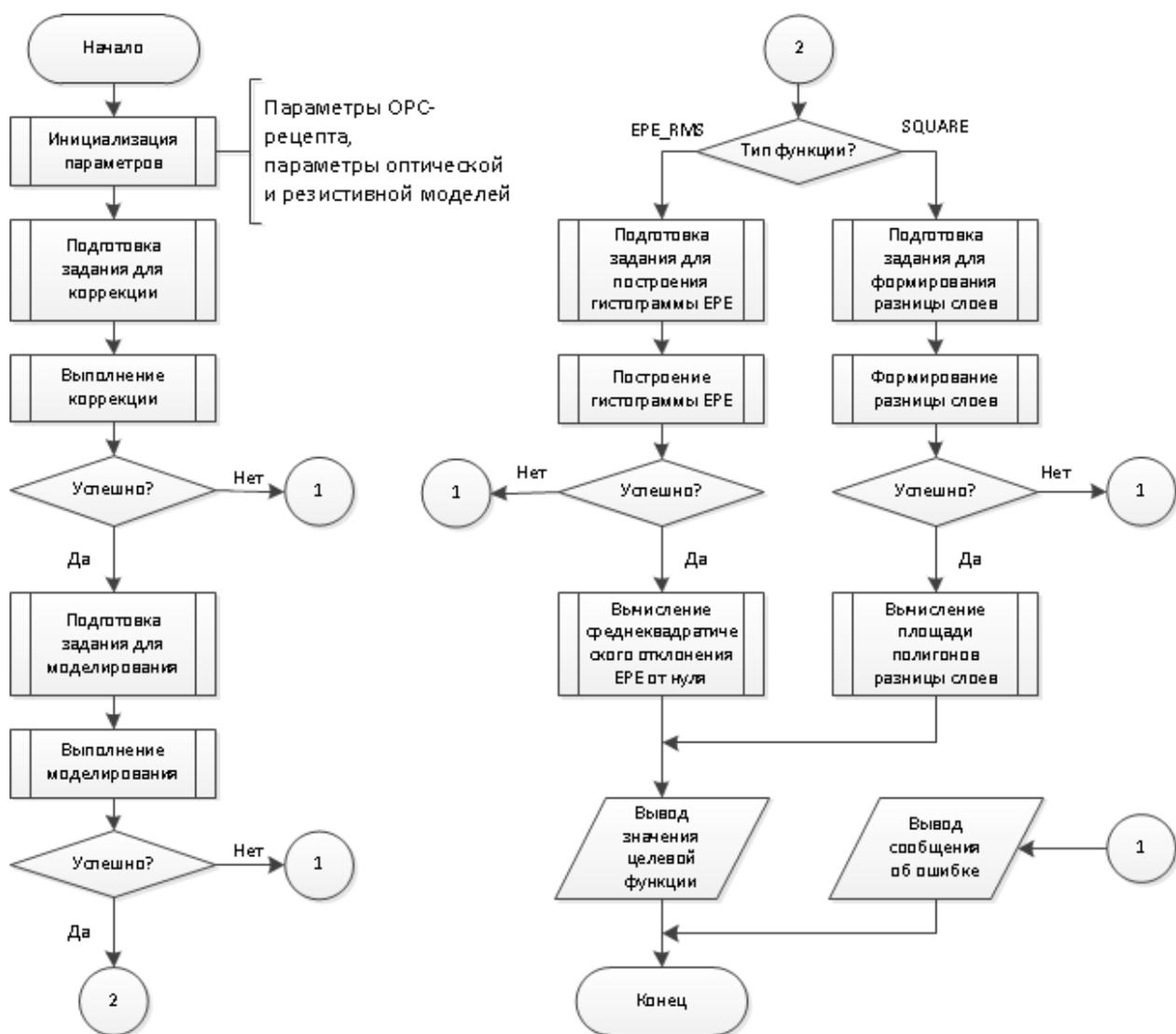


Рис. 4.4. Схема алгоритма оценки приспособленности особи популяции

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.

Под оценкой популяции подразумевается анализ приспособленности особей, т.е. вычисление показателя эффективности ОРС-рецепта для соответствующей комбинации значений параметров. Схема алгоритма оценки приспособленности особи показана на Рис. 4.4.

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.

4.3. Определение оптимальных параметров ОРС-рецепта в соответствии с разработанным алгоритмом

Методика настройки ОРС-рецепта с помощью разработанного алгоритма разделяется на три этапа:

- подготовка входных данных;
- оптимизация значений параметров рецепта;
- оценка эффективности полученного рецепта.

На этапе подготовки входных данных была произведена настройка оптической и фоторезистивной моделей в соответствии с п.3.3, кроме того, был сформирован комплект тестовых топологий.

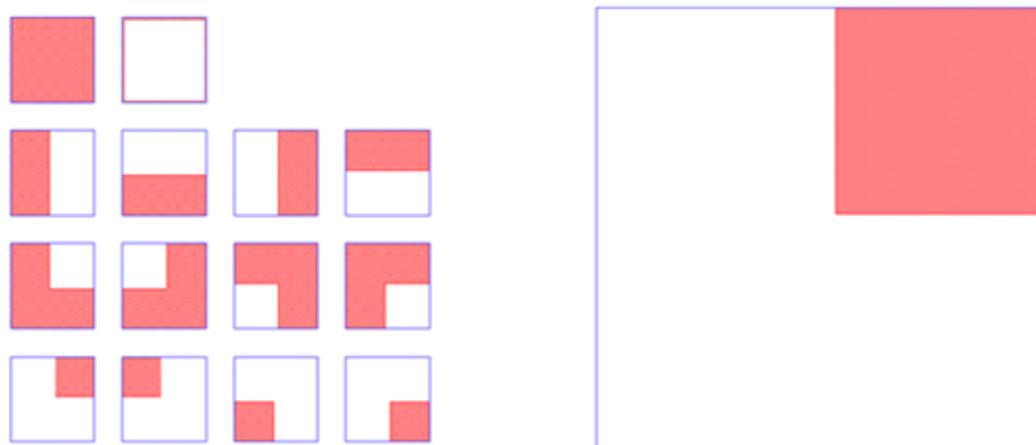
Тестовый комплект топологий используется как для получения универсального откалиброванного ОРС-рецепта, так и для обоснования целесообразности его применения для топологий с различной конфигурацией структур, поэтому он должен отражать разнообразие применяемых в рамках заданного техпроцесса топологических решений. По причине большого разнообразия конфигураций применяемых топологических структур и малопредсказуемого характера построения реальной топологии, наиболее перспективно выглядит использование тестового комплекта топологий случайной конфигурации (Рис. 4.5б).

Основными требованиями к топологии случайной конфигурации являются [110]:

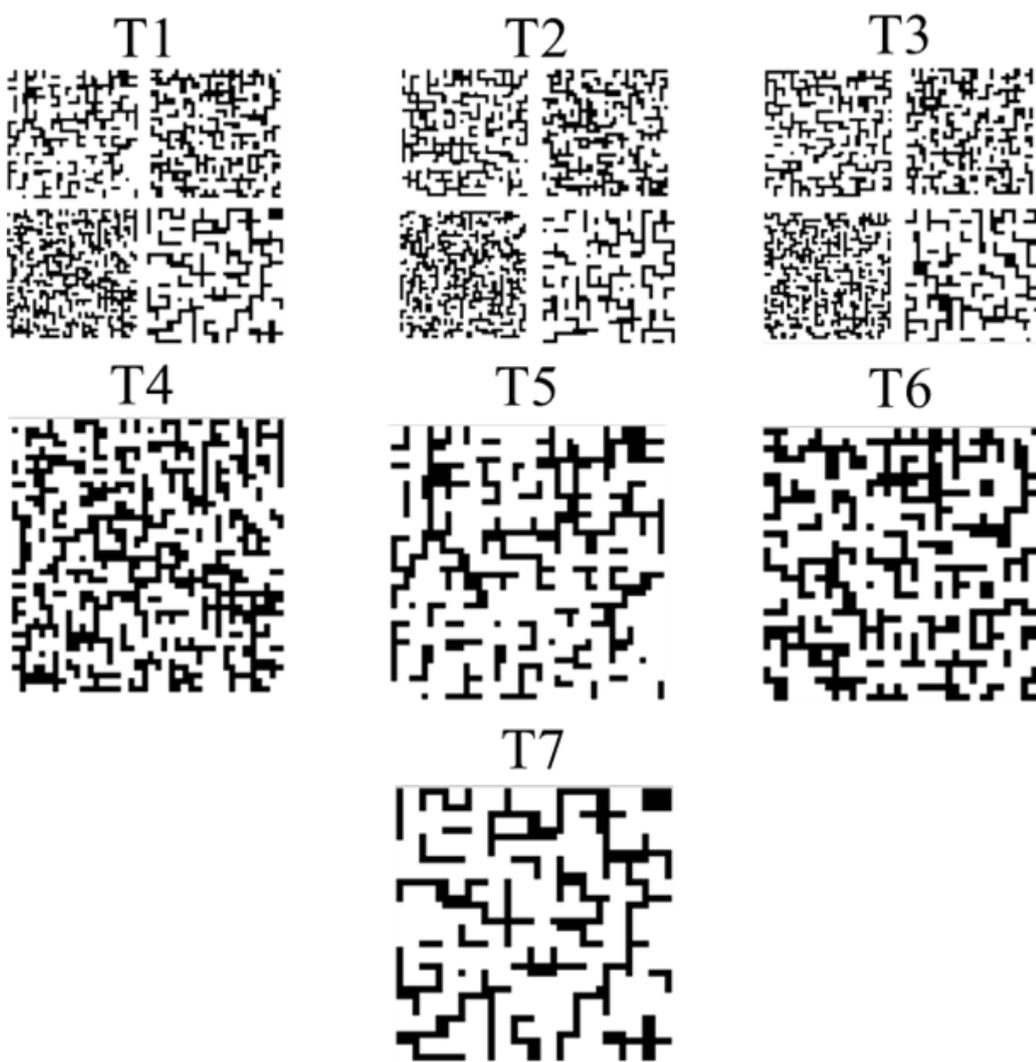
- максимальное разнообразие структур;
- вариативность параметров, определяющих дизайн структур;
- имитация реалистичного дизайна топологии;
- соответствие правилам проектирования.

Для удовлетворения требованиям, предъявляемым к топологии случайной конфигурации, целесообразно формировать ее из элементарных блоков, отражающих основные структурные единицы реального дизайна [111, 112]. Можно выделить 5 видов элементарных блоков (Рис. 4.5а). Каждому блоку соответствует параметр угла поворота для обеспечения наиболее полного набора структур.

Размер блока определяется по формуле $Pitch = Width + Space$, где $Width$ – минимальный размер элемента в выбранном слое, а $Space$ – минимальное расстояние между элементами в выбранном слое, согласно правилам проектирования. $Pitch$ определяет размер элементарного блока, а $Width$ задает ширину топологической структуры внутри элементарного блока.



a)



б)

Рис. 4.5. Тестовые топологии случайной конфигурации:

а) элементарные блоки, используемые при построении топологии случайной конфигурации;

б) комплект тестовых топологий для оптимизации параметров ОРС-рецепта

Тестовый комплект содержит 7 топологий. Диапазоны вариации размера блока и ширины топологической структуры внутри него 190÷420 нм и 80÷120 нм соответственно. Габаритные размеры топологий 10x10 мкм.

На втором этапе производится настройка параметров алгоритма посредством решения оптимизационной задачи:

$$F(N, M, P) \rightarrow \min ; \quad \begin{cases} 5n \leq N \leq 10n \\ 0 < M \leq 2 \\ 0 < P \leq 1 \end{cases}, \quad (4.6)$$

где F – эффективность ОРС-рецепта, полученного после калибровки его параметров; N – размер популяции, n – количество оптимизируемых параметров; M – сила мутации, P – вероятность скрещивания. Кроме того, ищутся оптимальные параметры рецепта с использованием тестовых топологий, в результате чего формируется универсальный откалиброванный рецепт и набор рецептов, специфичных для конкретных топологий.

Третий этап методики посвящен оценке эффективности полученного рецепта. Необходимо вычислить прирост эффективности настроенных рецептов относительно исходных по соотношениям:

$$E_{Si} = \frac{100(F_i(R_D) - F_i(R_{Si}))}{F_i(R_D)} \quad (4.7)$$

$$\text{и } E_{Ui} = \frac{100(F_i(R_D) - F_i(R_U))}{F_i(R_D)}, \quad (4.8)$$

где E_{Si} – прирост эффективности специфичного настроенного рецепта для i -ой топологии; E_{Ui} – прирост эффективности универсального настроенного рецепта для i -ой топологии; $F_i(R_{Si})$ – эффективность специфичного настроенного рецепта для i -ой топологии; $F_i(R_U)$ – эффективность универсального настроенного рецепта для i -ой топологии; $F_i(R_D)$ – эффективность исходного рецепта для i -ой топологии. Наконец, требуется обосновать целесообразность применения полученного рецепта для

топологий с произвольной конфигурацией структур, убедившись в соблюдении неравенства:

$$\Delta = |E_{Si} - E_{Ui}| \leq 5\%. \quad (4.9)$$

Для подбора наиболее эффективной комбинации параметров алгоритма выполнена серия экспериментов по оптимальной настройке ОРС-рецепта с использованием топологии T1, как наиболее полно отражающей разнообразие топологических структур и их комбинаций.

Рецепт с оптимальными параметрами, найденными с использованием топологии T1 при наилучших параметрах алгоритма, считается в дальнейшем универсальным. Параметры исходного рецепта имеют значения, типичные для типового ОРС-рецепта технологии уровня 90 нм.

Результаты экспериментов приведены в Таблице 18. Для оценки качества получаемого решения применялась предложенная методика EPE_RMS, которая показала наилучший результат с точки зрения требуемых временных затрат и потенциала оптимизации. Анализ полученных данных показал, что наилучшее решение с наименьшими временными затратами достигнуто в рамках эксперимента №3, которому соответствует комбинация параметров алгоритма $N = 100$, $M = 0,5$, $P = 0,7$.

После настройки параметров алгоритма выполнен поиск наилучших параметров рецепта для каждой тестовой топологии с применением двух предложенных методик оценки эффективности рецепта. Полученные результаты приведены в Таблице 19.

На заключительном этапе исследования выполнена сравнительная оценка эффективности каждого из полученных рецептов. Ее результаты показаны в Таблицах 20 и 21 и визуализированы с помощью диаграмм на Рис.4.6.

Обозначения в Таблицах 20 и 21: 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.

Таблица 18. Результаты экспериментов по настройке параметров алгоритма

№	T	N	M	P	F, нм
1	T1	100	2	1	5,729
2	T1	100	1	0,7	5,331
3	T1	100	0,5	0,7	5,285
4	T1	100	0,3	0,3	5,285
5	T1	200	1	1	5,313
6	T1	200	0,5	0,7	5,285
7	T1	200	0,3	0,3	5,285

Таблица 19. Результаты настройки OPC-рецепта с помощью методик оценки EMP_RMS и SQUARE

№	T	F(EPE_RMS), нм	F(SQUARE), мкм ²
1	T1	5,285	1,696
2	T2	5,285	1,789
3	T3	5,331	1,720
4	T4	7,857	0,716
5	T5	3,959	0,319
6	T6	3,429	0,426
7	T7	1,852	0,195

Таблица 20. 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 21. Сравнительная оценка настроенных рецептов по методике SQUARE

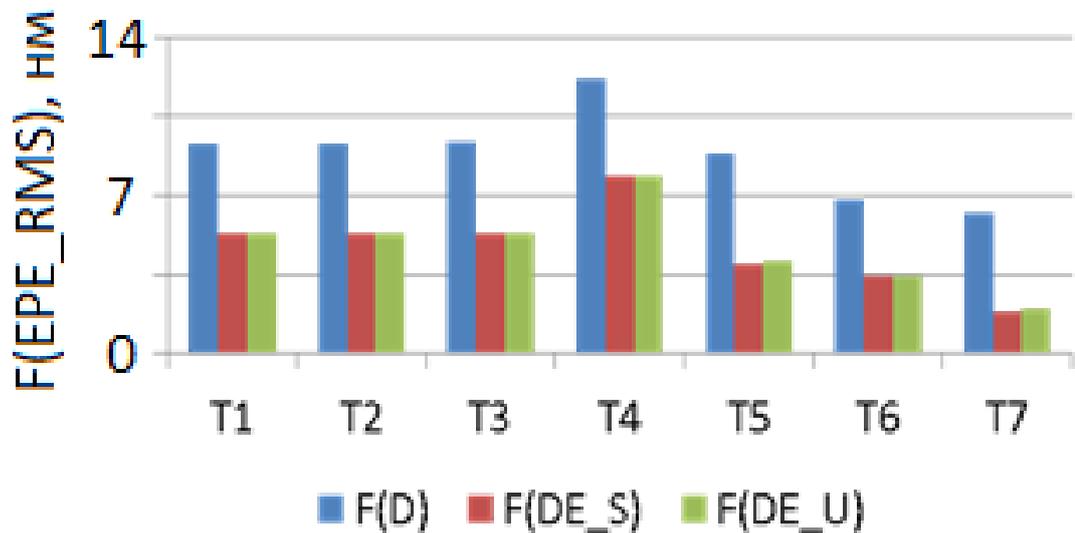
№	T	F(D), мкм ²	F(DE_S), мкм ²	F(DE_U), мкм ²
1	T1	2,322	1,696 (-27%)	1,696 (-27%)
2	T2	2,413	1,789 (-26%)	1,795 (-26%)
3	T3	2,403	1,720 (-28%)	1,722 (-28%)
4	T4	0,903	0,716 (-21%)	0,726 (-20%)
5	T5	0,532	0,319 (-38%)	0,331 (-38%)
6	T6	0,553	0,426 (-23%)	0,433 (-22%)
7	T7	0,335	0,195 (-42%)	0,206 (-39%)

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.

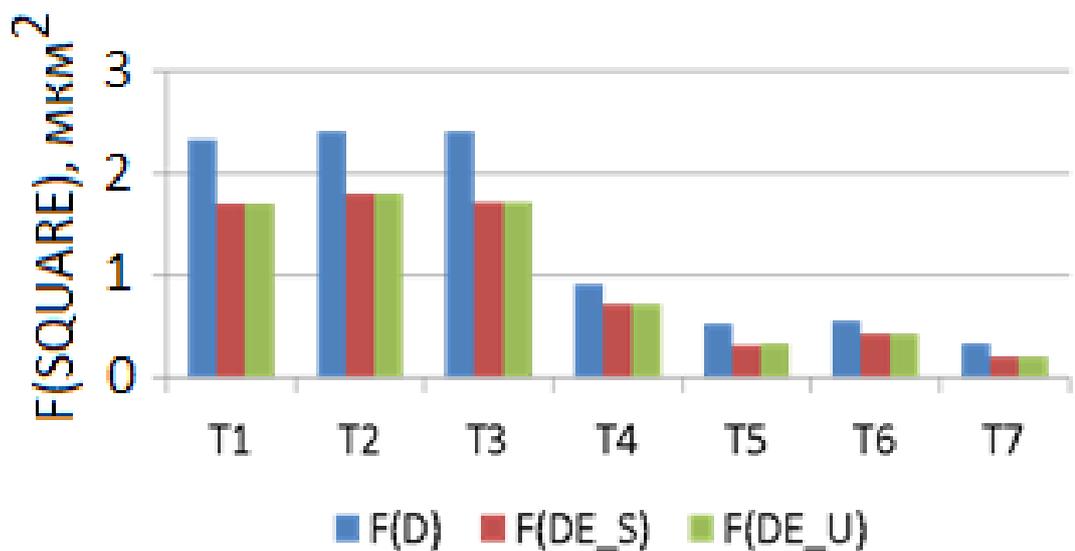
На Рис.4.7 приведены графики динамики изменения лучшего, среднего и худшего по популяции значения целевой функции для эксперимента по поиску оптимального OPC-рецепта для топологии T1, а также визуализирована динамика изменения значений параметров OPC-рецепта, которые в рамках эксперимента давали наилучшее значение целевой функции на соответствующих итерациях. Анализ динамики показывает, что для отдельных параметров значения сходятся к границам соответствующих допустимых диапазонов, для других – стремятся к определенному значению или интервалу.

Дальнейший анализ тенденции изменения значений параметров в процессе их оптимизации может позволить сформировать понятие об их влиянии на эффективность рецепта и в дальнейшем зафиксировать их значения и исключить эти параметры из настраиваемого набора, что позволит сократить временные затраты.

Конфигурационный файл OPC-рецепта с оптимизированными настроенными параметрами для затворного слоя технологии проектных норм 65 нм в формате САПР Mentor Graphics Calibre приведен в Приложении 5.



а)

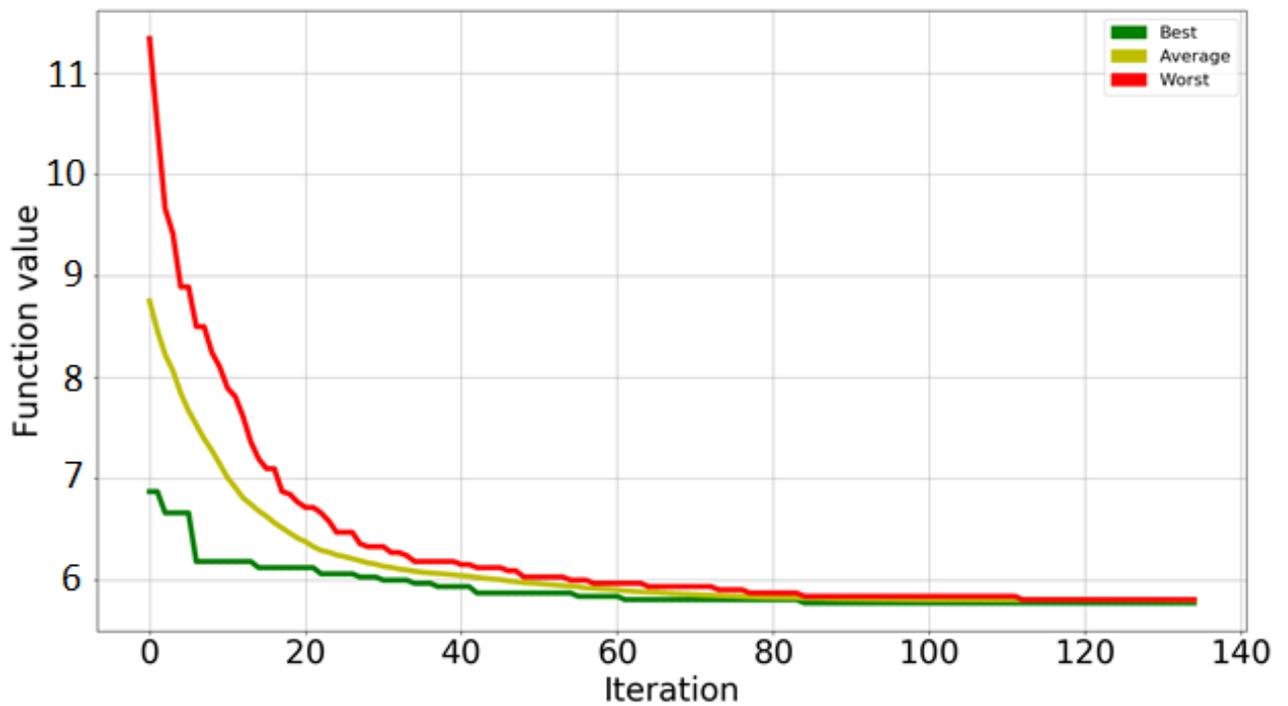


б)

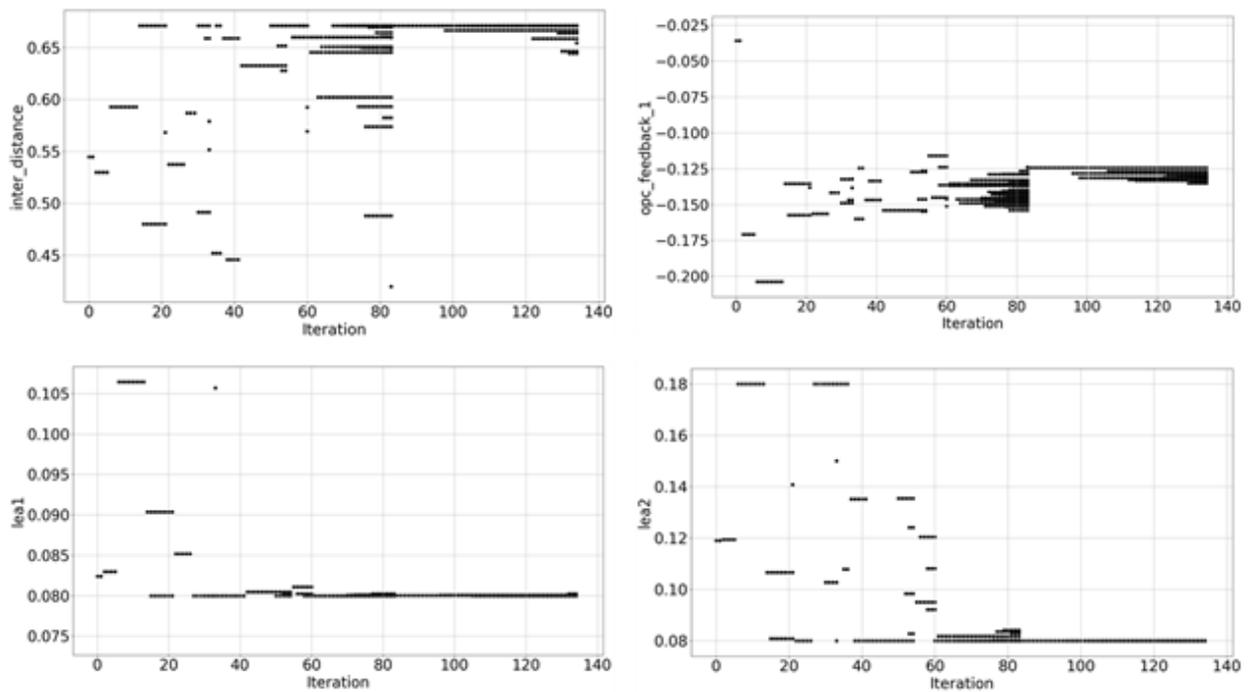
Рис. 4.6. Сравнительная оценка настроенных рецептов:

а) целевая функция на основе анализа распределения величины ошибки размещения смоделированного контура ФРМ (EPE_RMS);

б) целевая функция на основе вычисления площади смещения контура ФРМ относительно исходного топологического рисунка (SQUARE)



a)



б)

Рис. 4.7. Динамика изменения значения целевой функции (а) и значений параметров рецепта (б) при поиске оптимальных параметров OPC-рецепта для топологии T1 с применением методики EPE_RMS

4.4. Разработка программного средства автоматизированной настройки ОРС-рецепта

4.4.1. Требования к программному средству

Разработка ОРС-решения для коррекции топологий подразумевает решение целого комплекса задач оптимизации, который при этом может расширяться по мере освоения новых технологических уровней. Каждая задача, как правило, требует наличия совокупности методик, алгоритмов и программных средств. Эти факторы были учтены при формировании набора требований к программному решению, позволяющему применять разработанные алгоритм и методику оптимальной настройки параметров ОРС-рецепта. Таким образом, программная реализация должна обладать следующими основными свойствами:

- способность решать типичные оптимизационные задачи;
- возможности выбора алгоритмов решения;
- возможности выбора целевой функции;
- визуализация хода выполнения и результатов работы алгоритма (графики, диаграммы и т.д.);
- масштабируемость за счет разработки новых алгоритмов, целевых функций и методов визуализации;
- обеспечение возможности параллелизации вычислений;
- обеспечение возможности просмотра найденного на текущий момент решения и значения целевой функции;
- возможность корректного прерывания работы алгоритма;
- простота в использовании, низкие требования к квалификации пользователя, обеспечение валидации входных данных.

4.4.2. Структурная схема программного средства автоматизированной настройки ОРС-рецепта

Для обеспечения масштабируемости функционала при разработке программного средства принято решения использовать модульную архитектуру. Каждый модуль содержит законченный функционал, который может быть задействован на разных этапах решения задачи оптимизации. Структурная схема программного решения представлена на Рис.4.8.

Конфигурационный модуль предоставляет пользователю возможность выбора пути к каталогу с задачами оптимизации, интерпретаторов скриптов визуализации, путей к этим скриптам и т.д. Помимо этого, модуль отвечает за создание и редактирование задач. Для работы используются конфигурационные файлы в ini-формате, часть из которых является составляющей дистрибутива приложения, а часть создается пользователем с помощью соответствующих элементов интерфейса. При создании конфигурационных файлов обеспечивается валидация их содержимого.

Управляющий модуль осуществляет взаимодействие между конфигурационным и алгоритмическим модулями и, кроме того, обеспечивает связь с модулем графического интерфейса. Взаимодействие осуществляется посредством передачи и обработки специальных сигналов. Интерфейсы взаимодействия между модулями унифицированы, за счет чего обеспечивается возможность замещения конкретных реализаций их функционала при построении задачи.

Алгоритмический модуль предоставляет из себя базовую реализацию функциональности абстрактного алгоритма, которая расширяется за счет дополнительных реализаций из коллекции алгоритмов. На момент выполнения работы, коллекция алгоритмов содержит следующие реализации:

- генетический алгоритм в вариации «дифференциальная эволюция»;
- алгоритм имитации отжига в варианте «быстрый отжиг»;

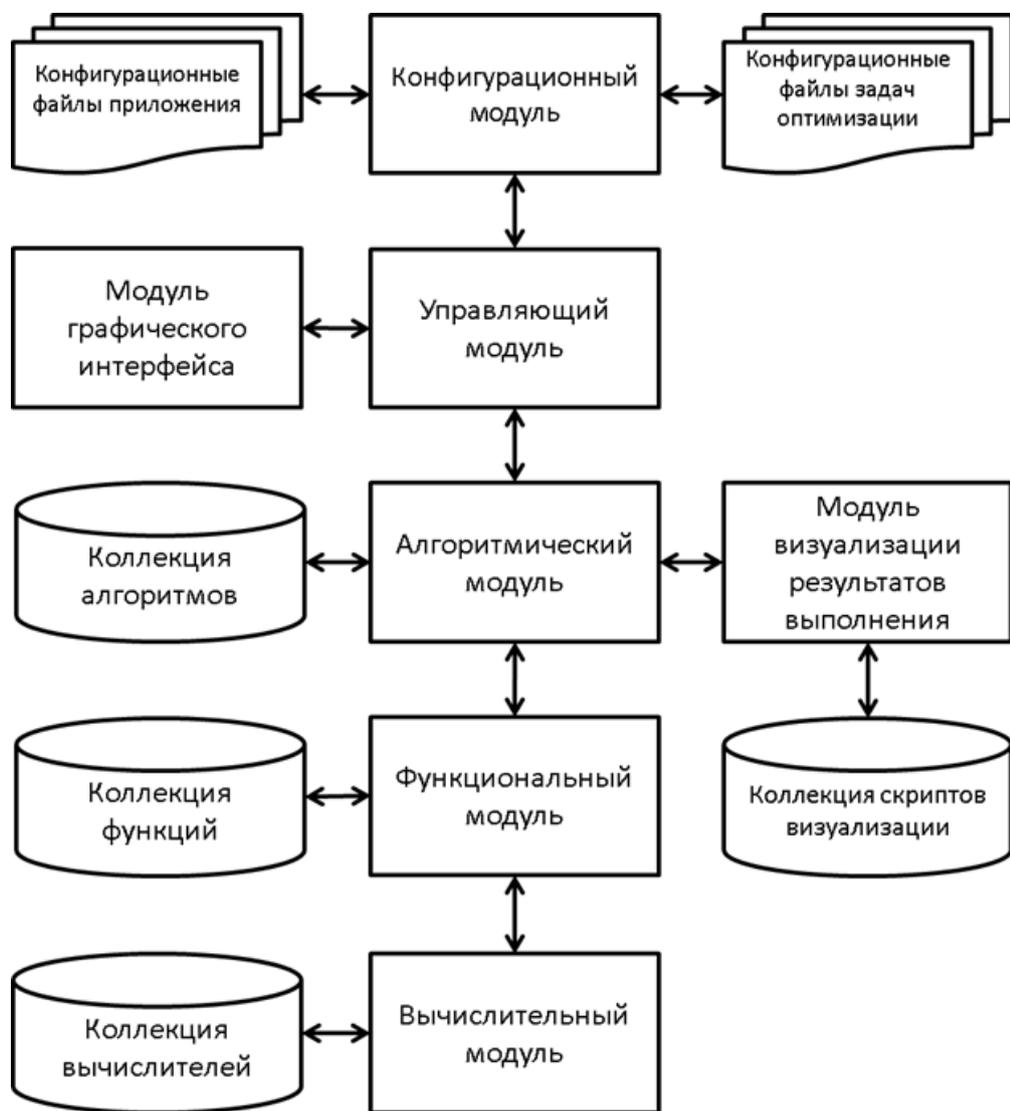


Рис. 4.8. Структурная схема программного средства для решения задач оптимальной настройки ОРС-рецепта

- алгоритм восхождения к вершине с перезапуском;
- универсальная реализация для работы с алгоритмами в виде пользовательских скриптов.

Модуль визуализации результатов дает возможность использовать различные варианты представления данных, полученных при работе алгоритма. Выбор реализации из коллекции скриптов осуществляется пользователем при формировании задачи оптимизации.

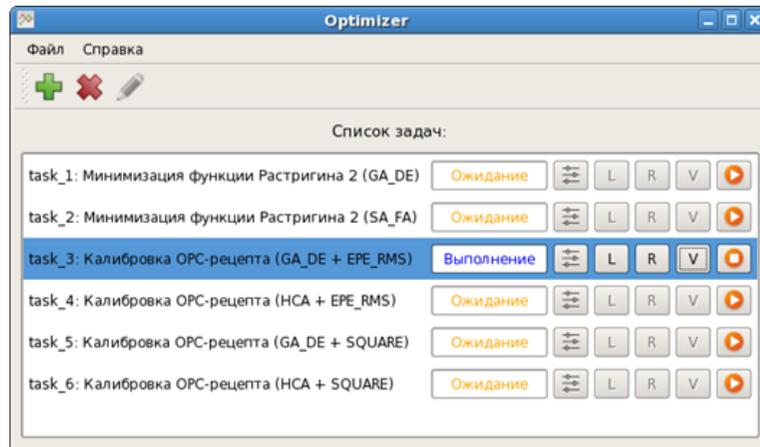
Функциональный модуль обеспечивает базовый интерфейс вычисления целевой функции. Он использует конкретные экземпляры функций из соответствующей коллекции, а также может задействовать различные процедуры, предоставляемые вычислительным модулем. В частности, в рамках задачи калибровки OPC-рецепта используется вычислительное ядро модуля Calibre-nmDRC.

4.4.3. Графический пользовательский интерфейс программного средства автоматизированной настройки OPC-рецепта

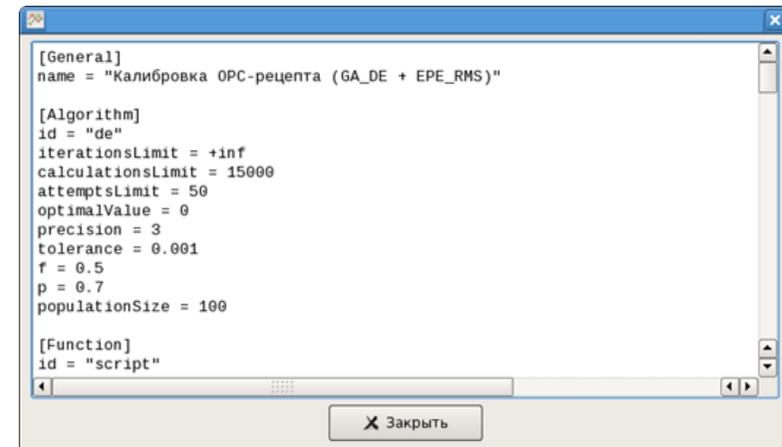
Графический пользовательский интерфейс программы значительно упрощает ее использование. Он предоставляет набор элементов для управления, а также обеспечивает отображение различной информации в удобном формате.

Интерфейс главного окна программы представлен на Рис.4.9а. Помимо возможности запуска интерфейса конфигурации приложения и получения справочной информации он позволяет осуществлять менеджмент оптимизационных задач. Под этим подразумевается выполнение следующих операций:

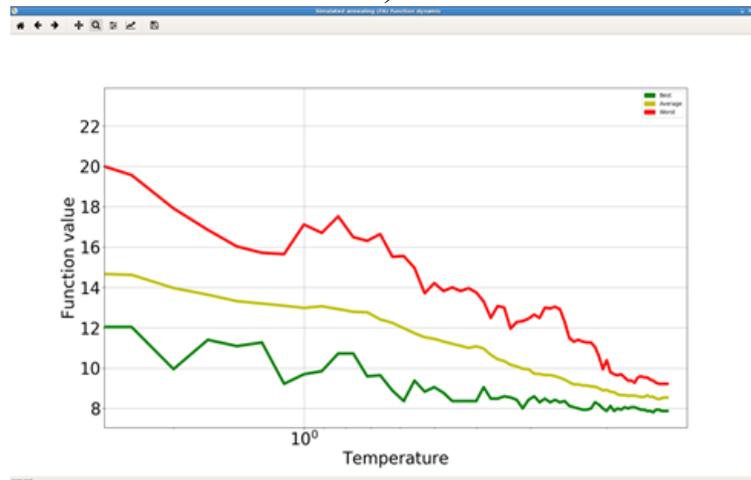
- добавление, удаление и редактирование задачи;
- запуск, прерывание, перезапуск задачи;
- запуск визуализации динамики и результатов выполнения.



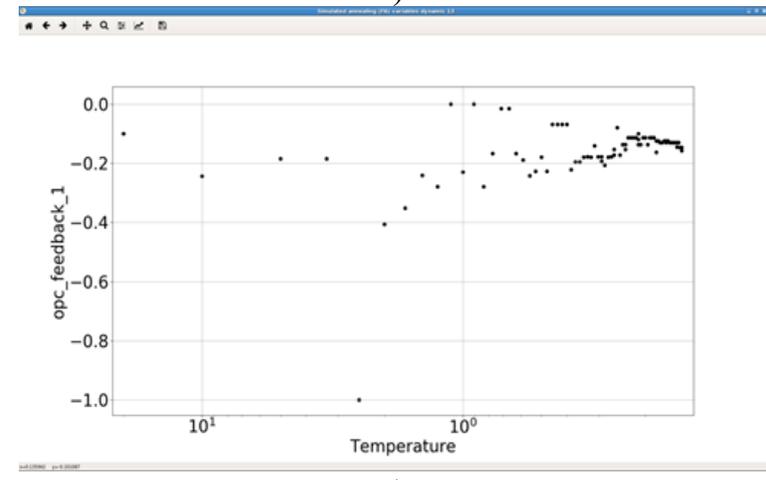
а)



б)



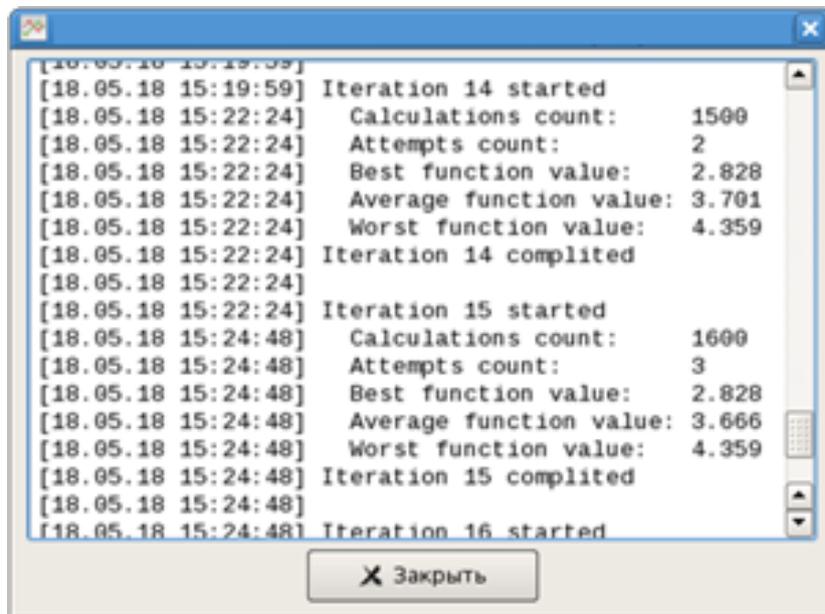
в)



г)

Рис. 4.9. Окна основных интерфейсов программного средства для решения задач оптимальной настройки OPC-рецепта:

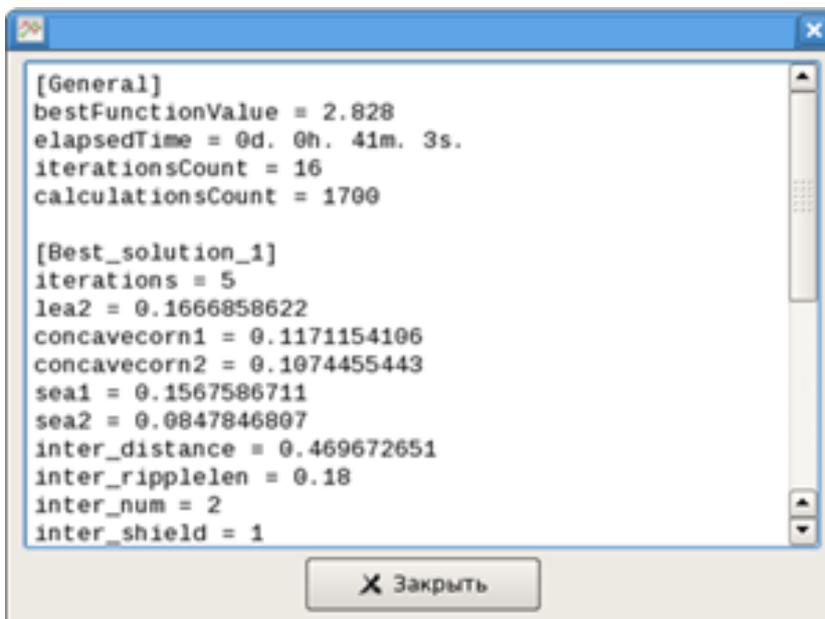
- а) окно интерфейса главного окна программы;
- б) окно интерфейса для просмотра конфигурации задачи;
- в) окно интерфейса визуализации динамики изменения целевой функции;
- г) окно интерфейса визуализации динамики изменения аргументов целевой функции



```
[18.05.18 15:19:59]
[18.05.18 15:19:59] Iteration 14 started
[18.05.18 15:22:24]   Calculations count:    1500
[18.05.18 15:22:24]   Attempts count:      2
[18.05.18 15:22:24]   Best function value:  2.828
[18.05.18 15:22:24]   Average function value: 3.701
[18.05.18 15:22:24]   Worst function value: 4.359
[18.05.18 15:22:24] Iteration 14 completed
[18.05.18 15:22:24]
[18.05.18 15:22:24] Iteration 15 started
[18.05.18 15:24:48]   Calculations count:    1600
[18.05.18 15:24:48]   Attempts count:      3
[18.05.18 15:24:48]   Best function value:  2.828
[18.05.18 15:24:48]   Average function value: 3.666
[18.05.18 15:24:48]   Worst function value: 4.359
[18.05.18 15:24:48] Iteration 15 completed
[18.05.18 15:24:48]
[18.05.18 15:24:48] Iteration 16 started
```

Закреть

а)



```
[General]
bestFunctionValue = 2.828
elapsedTime = 0d. 0h. 41m. 3s.
iterationsCount = 16
calculationsCount = 1700

[Best_solution_1]
iterations = 5
lea2 = 0.1666858622
concavecorn1 = 0.1171154106
concavecorn2 = 0.1074455443
sea1 = 0.1567586711
sea2 = 0.0847846807
inter_distance = 0.469672651
inter_ripplelen = 0.18
inter_num = 2
inter_shield = 1
```

Закреть

б)

Рис. 4.10. Окно интерфейса для отображения информации:

а) лог выполнения алгоритма;

б) полученные на текущий момент результаты

Кроме того, в программе реализован набор визуальных инструментов для отображения информации. В частности, пользователь может просмотреть содержимое конфигурационного файла задачи, в режиме реального времени проанализировать лог выполнения алгоритма и просмотреть найденные на текущий момент лучшие решения, а также полученное для них значение целевой функции. Примеры диалоговых окон для просмотра такой информации приведены на Рис.4.9б и Рис.4.10.

Наконец, при необходимости, существует возможность получить визуализированное представление динамики изменения целевой функции и ее аргументов. Примеры такой динамики, наблюдаемой в время работы алгоритма имитации отжига, приведены на Рис.4.9в и Рис.4.9г. Формат и состав визуализированных данных может варьироваться в зависимости от выбранного для решения задачи алгоритма и используемого скрипта визуализации.

Выводы по Главе 4

1. Выполнена формализация задачи оптимальной настройки параметров ОРС-рецепта. Разработаны две альтернативные методики оценки эффективности ОРС-рецепта, основанные на анализе распределения величины ошибки размещения ребер фрагментов топологических структур и на вычислении площади смещения смоделированного контура относительно исходного топологического рисунка.

2. На базе метода дифференциальной эволюции разработан эвристический алгоритм оптимальной настройки параметров ОРС-рецепта. Произведена серия вычислительных экспериментов по определению наилучших параметров разработанного алгоритма оптимальной настройки ОРС-рецепта.

3. Приведены результаты серии экспериментов по оптимальной настройке ОРС-рецепта с применением двух разработанных методик оценки его эффективности. Анализ результатов показывает, что применение разработанного алгоритма позволяет повысить эффективность 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.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 ($300 \div 350$) 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 ОРС-рецепта.
10. Для исследования эффективности разработанного алгоритма проведена серия вычислительных экспериментов по оптимальной настройке ОРС-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 ОРС-рецепта с помощью предложенного алгоритма, а также решать другие оптимизационные задачи в рамках разработки ОРС-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 ОРС-решения для технологий более продвинутых проектных норм, что значительно облегчает переход к следующим поколениям технологического процесса производства СБИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lin, B.J. The k_3 coefficient in non-paraxial (λ)/NA scaling equations for resolution, depth of focus, and immersion lithography / B.J. Lin // *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*. – SPIE, 2002. – Vol. 1 – № 1 – P. 7–12 – doi:10.1117/1.1445798.
2. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: «Наука», 1973.
3. Mack, C.A. *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication* / C.A. Mack. – John Wiley & Sons, 2007.
4. Балан, Н.Н. Методы повышения разрешающей способности проекционной оптической литографии в полупроводниковой технологии современных проектных норм / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.В. Кузовков, Е.Л. Харченко // Сборник тезисов докладов IX Международной конференции по фотонике и информационной оптике, 29-31 января 2020 года, Москва, НИЯУ МИФИ. – 2020. – P. 575–576.
5. Lin, B.J. *Optical lithography : here is why* / B.J. Lin. – SPIE Press, 2010.
6. Nam, D. How large MEEF is acceptable for the low- k_1 lithography? / D. Nam, D.-G. Lee, B. Kim, S.-Y. Moon, S.-W. Choi, W.-S. Han // 25th Annual VACUS Symposium on Photomask Technology / ed. J.T. Weed, P.M. Martin. – SPIE, 2005. – Vol. 5992 – P. 851–858 – doi:10.1117/12.632066.
7. Сейсян, Р.П. Нанолитография в микроэлектронике (Обзор) / Р.П. Сейсян // Журнал технической физики. – 2011. – Vol. 81 – № 8 – P. 1–14.
8. Trybula, W.J. Status of 157-nm optical lithography / W.J. Trybula // *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*. – SPIE, 2005. – Vol. 4 – № 1 – P. 1–5 – doi:10.1117/1.1860401.
9. Levinson, H.J. *Principles of Lithography* / H.J. Levinson. – 4th ed. – SPIE Press, 2019. – doi:10.1117/3.2525393.
10. Lebert, R. Progress on EUV-source development, tool integration and applications / R. Lebert, B. Jagle, C. Wies, U. Stamm, J. Kleinschmidt, K. Gaebel, G. Schriever, J. Pankert, K. Bergmann, W. Neff, A. Egbert // 21st European Mask and Lithography Conference / ed. U.F.W. Behringer. – SPIE, 2005. – Vol. 5835 – P. 230–243 – doi:10.1117/12.637333.
11. Wu, B. Extreme ultraviolet lithography: A review / B. Wu, A. Kumar // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. – 2007. – Vol. 25 – № 6 – P. 1743–1761 – doi:10.1116/1.2794048.

12. Quesnel, E. Study of ion-beam-sputtered Mo/Si mirrors for EUV lithography mask: influence of sputtering gas / E. Quesnel, C. Teyssier, V. Muffato, J. Thibault // *Advances in Optical Thin Films* / ed. C. Amra, N. Kaiser, H.A. Macleod. – SPIE, 2004. – Vol. 5250 – P. 88–98 – doi:10.1117/12.512972.
13. McClinton, B.M. Mask Roughness Induced Line-Edge Roughness in Extreme Ultraviolet Lithography, PhD Thesis / B.M. McClinton. – EECS Department, University of California, Berkeley, 2011. – № UCB/EECS-2011-127.
14. Pret, A.V. Evidence of speckle in extreme-UV lithography / A.V. Pret, R. Gronheid, J. Engelen, P.-Y. Yan, M.J. Leeson, T.R. YOUNKIN // *Opt. Express.* – OSA, 2012. – Vol. 20 – № 23 – P. 25970–25978 – doi:10.1364/OE.20.025970.
15. ASML Website - EUV Lithography Systems. – <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems>, 2020.
16. Smith, B.W. Approaching the numerical aperture of water immersion lithography at 193-nm / B.W. Smith, A. Bourov, Y. Fan, L.V. Zavyalova, N.V. Lafferty, F.C. Cropanese // *Optical Microlithography XVII* / ed. B.W. Smith. – SPIE, 2004. – Vol. 5377 – P. 273–284 – doi:10.1117/12.537262.
17. Owa, S. Immersion lithography: its history, current status and future prospects / S. Owa, H. Nagasaka // *Lithography Asia 2008* / ed. A.C. Chen, B. Lin, A. Yen. – SPIE, 2008. – Vol. 7140 – P. 265–276 – doi:10.1117/12.804709.
18. Kerkhof, M.A. van de Lithography for now and the future / M.A. van de Kerkhof, J.P.H. Benschop, V.Y. Banine // *Solid-state Electronics.* – 2019. – Vol. 155 – P. 20–26 – doi:10.1016/j.sse.2019.03.006.
19. 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. – P. 208–215.
20. Machin, M. An Integrated Framework for Aerial Image Simulation and Proximity Correction / M. Machin, N. Savinskii, O. Gutchin, A. Prosii, E. Gornev // *Software Development for Process and Materials Design, Satellite Symposium of Nano and Giga Challenges in Microelectronics, Satellite, NGCM 2002, September 15-16, Moscow, Russia.* – 2002.
21. Балан, Н.Н. Место фазосдвигающих фотошаблонов в современной полупроводниковой технологии / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.В. Кузовков, Е.С. Шамин // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника.* – 2019. – № 2(174) – P. 54–63.

22. Горнев, Е.С. Технология субмикронной оптической проекционной литографии с использованием фотшаблонов с фазовым сдвигом / Е.С. Горнев, О.П. Гушин, Л.М. Мячин // Тезисы докладов Всероссийской НТК «Микро- и нанoeлектроника 2001». – Звенигород, 2001. – Vol. 1 – P. 2–5.
23. Горнев, Е.С. Фазосдвигающие маски для низкоапертурных степперов / Е.С. Горнев, О.П. Гушин, А.Д. Просий, Н.Г. Савинский // «3-я научно-техническая конференция АООТ «НИИМЭ и Микрон». Разработка, технология и производство полупроводниковых микросхем», Сборник трудов, под ред. член-корреспондента РАН Красникова Г.Я. – М., Зеленоград, АООТ «НИИМЭ и Микрон», 2000. – Vol. 1 – P. 115.
24. Ma, X. Computational lithography / X. Ma, G.R. Arce. – John Wiley & Sons, Inc, 2010.
25. Иванов, В.В. Использование нейросетевых алгоритмов в задачах вычислительной литографии / В.В. Иванов, Н.Н. Балан, Е.С. Горнев, А.А. Березин, Е.В. Ипатова, А.В. Кузовков, М.Д. Шканакина // Международный форум МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2019, 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули», Сборник тезисов. Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября - 05 октября 2019 г. – 2019. – P. 546–548.
26. Иванов, В.В. Использование нейросетевых алгоритмов в задачах вычислительной литографии / В.В. Иванов, Н.Н. Балан, Е.С. Горнев, А.А. Березин, Е.В. Ипатова, А.В. Кузовков, М.Д. Шканакина // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-2 – P. 543–548 – doi:10.22184/1993-8578.2020.13.3s.543.548.
27. Балан, Н.Н. Основные подходы к моделированию формирования фоторезистивной маски в вычислительной литографии / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.В. Кузовков, Е.В. Соколова, Е.С. Шамин // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2019. – № 22(4) – P. 279–289 – doi:<https://doi.org/10.17073/1609-3577-2019-4-279-289>.
28. Балан, Н.Н. Расчет форм осветителя для литографических процессов технологии уровня 65 нм / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.В. Кузовков, Е.Л. Харченко // Сборник тезисов докладов IX Международной конференции по фотонике и информационной оптике, 29-31 января 2020 года, Москва, НИЯУ МИФИ. – 2020. – P. 237–238.
29. Синюков, Д.В. Проблемы и перспективы развития методов коррекции оптической близости для современных уровней технологии / Д.В. Синюков, Г.Я. Красников // Труды научного совета РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-

- вычислительных и управляющих систем и материалов для ее создания». – 2019. – Vol. 1(3) – P. 17–22.
30. Ban, Y. Self-aligned double-patterning layout decomposition for two-dimensional random metals for sub-10-nm node design / Y. Ban, D.Z. Pan // *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*. – SPIE, 2014. – Vol. 14 – № 1 – P. 1–15 – doi:10.1117/1.JMM.14.1.011004.
 31. Hsu, S. Double exposure technique for 45nm node and beyond / S. Hsu, J. Park, D.V.D. Broeke, J.F. Chen // *25th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology* / ed. J.T. Weed, P.M. Martin. – SPIE, 2005. – Vol. 5992 – P. 557–572 – doi:10.1117/12.633231.
 32. Lee, S.S. Materials modeling and development for use in double-exposure lithography applications / S.S. Lee, K. Jen, C.G. Willson, J.D. Byers, P.A. Zimmerman, N.J. Turro // *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*. – SPIE, 2009. – Vol. 8 – № 1 – P. 1–11 – doi:10.1117/1.3095589.
 33. Zhang, D. Source mask optimization methodology (SMO) and application to real full chip optical proximity correction / D. Zhang, G. Chua, Y. Foong, Y. Zou, S. Hsu, S. Baron, M. Feng, H.-Y. Liu, Z. Li, J. Schramm, T. Yun, C. Babcock, B. IL Choi, S. Roling, A. Navarra, T. Fischer, A. Leschok, X. Liu, W. Shi, J. Qiu, D. Russell // *Proc. SPIE 8326, Optical Microlithography XXV, 83261V*. – 2012. – Vol. 8326 – doi:10.1117/12.916614.
 34. Bekaert, J. Scanner matching for standard and freeform illumination shapes using FlexRay / J. Bekaert, L. Van Look, K. D'havé, B. Laenens, G. Vandenberghe, P. van Adrichem, W. Shao, J. Ghan, K. Schreel, J.T. Neumann // *Proc. SPIE 7973, Optical Microlithography XXIV, 79731I*. – 2011. – Vol. 7973 – doi:10.1117/12.881607.
 35. Nikon Website - Semiconductor Lithography Systems. – <https://www.nikon.com/products/semi/lineup/index.htm>, 2020.
 36. Zhu, J. Source mask optimization study based on latest Nikon immersion scanner / J. Zhu, F. Wei, L. Chen, C. Zhang, W. Zhang, H. Nishinaga, O. El-Sewefy, G.-S. Gao, N. Lafferty, J. Meiring, R. Zhang, C. Zhu // *Optical Microlithography XXIX* / ed. A. Erdmann, J. Kye. – SPIE, 2016. – Vol. 9780 – P. 240–246 – doi:10.1117/12.2223576.
 37. Shirata, Y. High-productivity immersion scanner enabling 1xnm hp manufacturing / Y. Shirata, Y. Shibazaki, J. Kosugi, T. Kikuchi, Y. Ohmura // *Optical Microlithography XXVI* / ed. W. Conley. – SPIE, 2013. – Vol. 8683 – P. 513–522 – doi:10.1117/12.2011123.

38. Wu, R. Freeform lens arrays for off-axis illumination in an optical lithography system / R. Wu, H. Li, Z. Zheng, X. Liu // *Appl. Opt. – OSA*, 2011. – Vol. 50 – № 5 – P. 725–732 – doi:10.1364/AO.50.000725.
39. *Photomask fabrication technology* / ed. J. Benjamin G. Eynon, B. Wu. – McGraw-Hill, 2005.
40. *Calibre® PSMgate™ User’s Manual, v2017.2 49.* – Mentor Graphics Corporation, 2017.
41. Fujimura, A. 2018 mask makers’ survey conducted by the eBeam Initiative / A. Fujimura, J. Willis // *Photomask Technology 2018* / ed. E.E. Gallagher, J.H. Rankin. – SPIE, 2018. – Vol. 10810 – P. 1–10 – doi:10.1117/12.2506273.
42. Fujimura, A. 2019 Mask makers’ survey conducted by the eBeam Initiative / A. Fujimura, J. Willis // *Photomask Technology 2019* / ed. J.H. Rankin, M.E. Preil. – SPIE, 2019. – Vol. 11148 – P. 8–17 – doi:10.1117/12.2536769.
43. Электронно-лучевая технология в изготовлении микронных приборов / Д.Р. Брюэр, Д.С. Гринич, Д.Р. Херриот, Р.К. Хендерсон, Д.П. Балантайн, Ж. Тротель, Б. Фэй. – Под ред. Дж. Брюэра: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1984.
44. Зайцев, С.И. Коррекция эффекта близости как метод кардинального увеличения производительности электронной литографии (30 лет эксплуатации) / С.И. Зайцев, А.А. Свинцов, Б.Н. Гайфуллин // *Труды научного совета РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для ее создания».* – 2019. – Vol. 1(3) – P. 100–121.
45. Aristov, V. Accuracy of proximity correction in electron lithography after development / V. Aristov, B. Gaifullin, A. Svintsov, S. Zaitsev, H. Raith, R.R. Jede // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures.* – 1992. – Vol. 10 – P. 2459–2467 – doi:10.1116/1.586040.
46. Сизиков, В.С. Обратные прикладные задачи и MatLab / В.С. Сизиков. – Лань, 2011.
47. Yenikaya, B. Full chip hierarchical inverse lithography: a solution with perfect symmetry / B. Yenikaya // *Proc. SPIE 10147, Optical Microlithography XXX, 101470L.* – 2017. – Vol. 10147 – doi:10.1117/12.2257608.
48. Балан, Н.Н. Методики расчета вклада допусков на критические линейные размеры и точность размещения элементов рисунка фотошаблона в бюджеты литографических операций / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.Л. Панкратов, Е.Л. Харченко // *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.
49. Балан, Н.Н. Метод разработки спецификации на фотошаблоны для производства СБИС современных проектных норм / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.Л. Панкратов // Наноиндустрия. – АО “Рекламно-издательский центр ”Техносфера" (Москва), 2020. – Vol. 13 – № S4 (99) – Р. 186–187.
 50. 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.
 51. Балан, Н.Н. Метод разработки спецификации на фотошаблоны для производства СБИС современных проектных норм / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.Л. Панкратов // Наноиндустрия. – АО “Рекламно-издательский центр ”Техносфера" (Москва), 2020. – Vol. 13 – № S5-1 (102) – Р. 213–220 – doi:10.22184/1993-8578.2020.13.5s.213.220.
 52. Балан, Н.Н. Основные подходы к моделированию формирования фоторезистивной маски в вычислительной литографии / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.В. Кузовков, Е.С. Шамин // Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов ММЭК-2019, Материалы 1-й международной конференции. г. Москва, 21-23 октября 2019 г. – 2019. – Р. 89–90.
 53. Balan, N.N. Basic approaches to simulation of resist mask formation in computational lithography / N.N. Balan, V.V. Ivanov, A.V. Kuzovkov, E.V. Sokolova, E.S. Shamin // Modern electronic materials. – 2020. – Vol. 6 – № 1 – Р. 37–45 – doi:<https://doi.org/10.3897/j.moem.6.1.55056>.
 54. Амирханов, А.В. Особенности методов проектирования СБИС с учетом результатов моделирования технологического процесса / А.В. Амирханов, А.А. Гладких, А.А. Глушко, Е.П. Михальцов, И.А. Родионов, А.А. Столяров // Труды НИИСИ РАН. – 2013. – Vol. 3 – № 1 – Р. 10–19.
 55. 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 // Международный форум МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2019, Школа молодых ученых

- “Микроэлектроника-2019”, Сборник тезисов. Республика Крым, 23-25 сентября 2019 г. – 2019. – Р. 116–121.
56. Балан, Н.Н. 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 – doi:10.22184/1993-8578.2020.13.3s.589.594.
 57. Шамин, Е.С. Генерация Rule-based SRAF для двумерных топологических структур с учетом правил MRC: проблемы и решения / Е.С. Шамин, Е.В. Ипатова, А.В. Кузовков, В.В. Иванов, Н.Н. Балан // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2019. – № 2(174) – Р. 36–41.
 58. Савинский, Н.Г. Оптическая субмикронная литография с фазосдвигающими шаблонами / Н.Г. Савинский, А.Е. Берников, В.А. Курчидис, Е.С. Горнев, О.П. Гуцин, А.Д. Просий // «Юбилейная 2-я научно-техническая конференция АООТ «НИИМЭ и Микрон». Разработка, технология и производство полупроводниковых микросхем». Сборник трудов под ред. член-корреспондента РАН Красникова Г.Я. – М., Зеленоград, «Микрон-принт», 1999. – Р. 53–55.
 59. Родионов, И.А. Расчет значений весовых коэффициентов топологических структур для калибровки литографических моделей / И.А. Родионов, В.А. Шахнов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2010. – № Спецвыпуск – Р. 149–160.
 60. Родионов, И.А. Разработка литографических процессов изготовления СБИС с размерами элементов меньше длины волны экспонирующего излучения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 05.11.14 - Технологии приборостроения / И.А. Родионов. – Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э.Баумана, г.Москва, 2010. – № 04.2.01 060841.
 61. Goodman, D.S. Condenser Aberrations In Kohler Illumination / D.S. Goodman, A.E. Rosenbluth // Optical/Laser Microlithography / ed. B.J. Lin. – SPIE, 1988. – Vol. 0922 – Р. 108–134 – doi:10.1117/12.968407.
 62. Hopkins, H. On the Diffraction Theory of Optical Images / H. Hopkins // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1953. – Vol. 217 – Р. 408–432.
 63. Cobb, N.B. Fast Optical and Process Proximity Correction Algorithms for Integrated Circuit Manufacturing, PhD Thesis / N.B. Cobb. – EECS Department, University of California, Berkeley, 1998.

64. Домненко, В.М. Моделирование формирования оптического изображения / В.М. Домненко, М.В. Бурсов, Т.В. Иванова. – СПб: НИУ ИТМО, 2011.
65. Dill, F.H. Modeling projection printing of positive photoresists / F.H. Dill, A.R. Neureuther, J.A. Tuttle, E.J. Walker // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1975. – № 7 – P. 456–464 – doi:10.1109/T-ED.1975.18161.
66. Харченко, Е.Л. Разработка и применение экспресс-метода для увеличения окна литографического процесса / Е.Л. Харченко, Е.С. Шамин, А.В. Кузовков, В.В. Иванов // Международный форум МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2019, Школа молодых ученых “Микроэлектроника-2019”, Сборник тезисов. Республика Крым, 23-25 сентября 2019 г. – 2019. – P. 134–139.
67. Родионов, И.А. Исследование методов калибровки процессных OPC моделей VT-5 с переменным порогом чувствительности / И.А. Родионов, А.В. Амирханов, Н.С. Кукина, А.Л. Лохов, Е.П. Михальцов // Микроэлектроника. – 2010. – Vol. 39 – № 6 – P. 468–480.
68. Calibre® WORKbench™ User’s and Reference Manual, Software Version 2013.2. – Mentor Graphics Corporation, 2013.
69. Rodionov, I. Study of the methods of calibration of the process OPC VT-5 models with a variable threshold / I. Rodionov, A. Amirkhanov, N. Kukina, A. Lokhov, E. Mikhal’tsov // Russian Microelectronics. – 2010. – Vol. 39 – P. 443–455 – doi:10.1134/S1063739710060090.
70. Granik, Y. Universal process modeling with VTRE for OPC / Y. Granik, N.B. Cobb, T. Do // Optical Microlithography XV / ed. A. Yen. – SPIE, 2002. – Vol. 4691 – P. 377–394 – doi:10.1117/12.474587.
71. Фаддеев, Д.К. Об обусловленности матриц / Д.К. Фаддеев // Труды математического Института имени В.А. Стеклова АН СССР. – 1959. – Vol. 53 – P. 387–391.
72. Киреев, В.Ю. Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии / В.Ю. Киреев. – М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2008.
73. SEMI Website - Whitepaper: Semiconductor Industry from 2015 to 2025. By Dr. Handel Jones, International Business Strategies (IBS). – <https://www.semi.org/en/semiconductor-industry-2015-2025>, 2015.
74. Балан, Н.Н. Современные методики RET как средство повышения качества литографического изображения в технологиях предыдущих поколений / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.В. Кузовков, Е.Л. Харченко // Наноиндустрия. – АО “Рекламно-издательский центр ”Техносфера” (Москва), 2020. – Vol. 13 – № S4 (99) – P. 226–228.

75. Балан, Н.Н. Современные методики RET как средство повышения качества литографического изображения в технологиях предыдущих поколений / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.В. Кузовков, Е.Л. Харченко // Наноиндустрия. – АО “Рекламно-издательский центр ”Техносфера” (Москва), 2020. – Vol. 13 – № S5-1 (102) – P. 243–245 – doi:10.22184/1993-8578.2020.13.5s.243.245.
76. 180 nm Equipment Performance Metrics – Revision 1. – International SEMATECH, 1998.
77. Unified Equipment Performance Metrics for 130 nm Technology, Version 2.0. – International SEMATECH, 2000.
78. ISMI 450 nm Equipment Performance Metrics v5.0. – International SEMATECH Manufacturing Initiative, 2010.
79. SIA Website - The International Technology Roadmap for Semiconductors. Lithography. 2001-2013 Revisions. – <https://www.semiconductors.org/?s=itrs>.
80. Singer, W. Handbook of Optical Systems, Volume 2, Physical Image Formation / W. Singer, M. Totzeck, H. Gross. – 2005.
81. Харченко, Е.Л. Разработка и применение экспресс-метода для увеличения окна литографического процесса / Е.Л. Харченко, Е.С. Шамин, А.В. Кузовков, В.В. Иванов // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-2 – P. 730–732 – doi:10.22184/1993-8578.2020.13.3s.730.732.
82. SEMI P1-0708E. Specification for Hard Surface Photomask Substrates. – Semiconductor Equipment and Materials International, 2008.
83. SEMI P2-0308. Specification for Chrome Thin Films for Hard Surface Photomasks. – Semiconductor Equipment and Materials International, 2008.
84. SEMI P29-1111. Specification for Characteristics Specific to Attenuated Phase Shift Masks and Masks Blanks. – Semiconductor Equipment and Materials International, 2011.
85. 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 // Международный форум МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2019, Школа молодых ученых “Микроэлектроника-2019”, Сборник тезисов. Республика Крым, 23-25 сентября 2019 г. – 2019. – P. 149–153.
86. 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 – P. 659–664 – doi:10.22184/1993-8578.2020.13.3s.659.664.
87. SEMI P22-0307. Guideline for Photomask Defect Classification and Size Definition. – Semiconductor Equipment and Materials International, 2007.
 88. Escher, G.C. Importance of mask technical specifications on the lithography error budget / G.C. Escher // 14th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management / ed. W.L. Brodsky, G.V. Shelden. – SPIE, 1994. – Vol. 2322 – P. 409–420 – doi:10.1117/12.195839.
 89. Magome, N. Total overlay analysis for designing future aligner / N. Magome, H. Kawai // Optical/Laser Microlithography VIII / ed. T.A. Brunner. – SPIE, 1995. – Vol. 2440 – P. 902–912 – doi:10.1117/12.209316.
 90. Lee, D.-Y. Impact of registration error of reticle on total overlay error budget / D.-Y. Lee, Y.-J. Chun, J.-B. Yoon, S.-H. Lee, S.-J. Lee, H. Cho, J.-T. Moon // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2006. – Vol. 24 – doi:10.1116/1.2395959.
 91. Chou, W.Y. The study of phase angle effects to wafer process window using 193-nm EAPSM in a 300-mm wafer manufacturing environment / W.Y. Chou, S.M. Yen, J.K. Wu, W.B. Shieh, M. Chuang, G. Fan, C.C. Tseng, G.P. Hughes, S.S. MacDonald, C. Holiday, G. Chen // Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XI / ed. H. Tanabe. – SPIE, 2004. – Vol. 5446 – P. 615–623 – doi:10.1117/12.557754.
 92. Chen, G. The study of phase-angle and transmission specifications of 6% att-EAPSM for 90nm, 65nm, and 45nm node wafer manufacturing patterning process / G. Chen, C. Garza // Photomask Technology 2007 / ed. R.J. Naber, H. Kawahira. – SPIE, 2007. – Vol. 6730 – P. 928–934 – doi:10.1117/12.740717.
 93. Pforr, R. Feature biasing versus feature-assisted lithography: a comparison of proximity correction methods for $0.5 \cdot (\lambda/NA)$ lithography / R. Pforr, K.G. Ronse, L.V. den Hove, A. Yen, S.R. Palmer, G.E. Fuller, O.W. Otto // Optical/Laser Microlithography VIII / ed. T.A. Brunner. – SPIE, 1995. – Vol. 2440 – P. 150–170 – doi:10.1117/12.209249.
 94. ASML Applications Documentation. Image Quality Control: How to do the setup and run. – ASML, 2001.
 95. Балан, Н.Н. Основные подходы к моделированию формирования фоторезистивной маски в вычислительной литографии / Н.Н. Балан, В.В. Иванов, А.В. Кузовков, Е.В. Соколова, Е.С. Шамин // Известия ВУЗов. Материалы электронной техники. – 2019. – № 4.

96. Иванов, В.В. Разработка OPC-модели для технологии уровня 65 нм / В.В. Иванов, А.В. Колобов, А.В. Кузовков, Р.А. Арилин // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2016. – № 4(164) – Р. 4–9.
97. Calibre® OPCSbar User’s and Reference Manual, v2020.3. – Mentor Graphics Corporation, 2020.
98. Standard Verification Rule Format (SVRF) Manual, v2020.3, Document Revision 11. – Mentor Graphics Corporation, 2020.
99. 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 – doi:10.22184/NanoRus.2019.12.89.216.218.
100. Харченко, Е.Л. Оптимизация размещения SRAF для увеличения разрешающей способности фотолитографии / Е.Л. Харченко, А.В. Кузовков, В.В. Иванов // Международный форум “Микроэлектроника-2018”, 4-я Международная научная конференция “Электронная компонентная база и микро электронные модули”, Сборник тезисов. Республика Крым, Алушта, 01–06 октября 2018 г. – 2018. – Р. 172–175.
101. Liebmann, L.W. Optimizing style options for subresolution assist features / L.W. Liebmann, J.A. Bruce, W. Chu, M. Cross, I.C. Graur, J.J. Krueger, W.C. Leipold, S.M. Mansfield, A.E. McGuire, D.L. Sundling // Optical Microlithography XIV / ed. C.J. Proglar. – SPIE, 2001. – Vol. 4346 – Р. 141–152 – doi:10.1117/12.435690.
102. 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.
103. 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 – doi:10.22184/NanoRus.2019.12.89.368.372.
104. Медведев, К.А. Алгоритм и методика повышения эффективности OPC-рецепта / К.А. Медведев, А.В. Кузовков, В.В. Иванов // Международный форум “Микроэлектроника-2018”, 4-я Международная научная конференция “Электронная компонентная база и микро электронные модули”, Сборник тезисов. Республика Крым, Алушта, 01–06 октября 2018 г. – 2018. – Р. 187–190.

105. Zwillinger, D. CRC Standard Mathematical Tables and Formulae, 31st Edition / D. Zwillinger. – 31st ed. – Chapman and Hall CRC, 2003.
106. Рафгарден, Т. Совершенный алгоритм. Алгоритмы для NP-трудных задач / Т. Рафгарден. – Питер, 2021.
107. Пантелеев, А.В. Методы глобальной оптимизации. Метаэвристические стратегии и алгоритмы / А.В. Пантелеев, Д.В. Метлицкая, Е.А. Алешина. – М.: Вузовская книга, 2013.
108. Advances in differential evolution: Studies in Computational Intelligence / ed. U.K. Chakraborty. – 1st ed. – Springer-Verlag, 2008.
109. Price, K. Differential evolution a practical approach to global optimization: Natural Computing Series / K. Price, R.M. Storn, J.A. Lampinen. – 1st ed. – Springer-Verlag, 2005.
110. Cobb, N. Flexible sparse and dense OPC algorithms / N. Cobb // Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XII / ed. M. Komuro. – SPIE, 2005. – Vol. 5853 – P. 693–702 – doi:10.1117/12.617198.
111. Ипатова, Е.В. Разработка методики оценки стабильности OPC-решения / Е.В. Ипатова, В.В. Иванов, Е.С. Шамин // Международный форум МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2019, Школа молодых ученых “Микроэлектроника-2019”, Сборник тезисов. Республика Крым, 23-25 сентября 2019 г. – 2019. – P. 154–158.
112. Ипатова, Е.В. Разработка методики оценки стабильности OPC-решения / Е.В. Ипатова, В.В. Иванов, Е.С. Шамин // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-2 – P. 623–626 – doi:10.22184/1993-8578.2020.13.3s.623.626.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

Параметры резиста, использованные для «полного» моделирования формирования ФРМ при определении требований фотошаблонной спецификации затворного слоя проектных норм 65 нм (п.2.4)

Chemically Amplified ArF (193nm)

PAB Parameters

PAB Model (Thermal Decomposition)
0.000000 Thermal Decomposition Ea (kcal/mole)
-20.000000 Thermal Decomposition Ln(Ar) (1/s)
PAB 110C 90s

PEB Parameters

PEB Model Type (Temperature Dependent RxD)
0.000000 Acid Diffusivity Ea (kcal/mole)
1.230000 Acid Diffusivity Ln(Ar) (nm²/s)
0.000000 Room Temperature Acid Diff. Length (nm)
Acid Diffusivity Variation (Constant)
3.000000 Reacted/Unreacted Acid Diffusivity Ratio
1.000000 Exponential Acid Diffusivity Factor
0.000000 Quencher Diffusivity Ea (kcal/mole)
-20.000000 Quencher Diffusivity Ln(Ar) (nm²/s)
Quencher Diffusivity Variation (Constant)
2.000000 Reacted/Unreacted Quencher Diffusivity Ratio
3.000000 Exponential Base Diffusivity Factor
0.000000 Amplification Ea (kcal/mole)
-1.114000 Amplification Ln(Ar) (1/s)
1.000000 Amplification Reaction Order
0.000000 Acid-Quencher Neutralization Ea (kcal/mole)
20.000000 Acid-Quencher Neutralization Ln(Ar) (1/s)
0.000000 Diffusion-Controlled Reaction Ea (kcal/mole)
12.210000 Diffusion-Controlled Reaction Ln(Ar) (1/nm²)
0.000000 Acid Evaporation Ea (kcal/mole)
-20.000000 Acid Evaporation Ln(Ar) (1/s)
0.000000 Bulk Acid Loss Ea (kcal/mole)
-20.000000 Bulk Acid Loss Ln(Ar) (1/s)
PEB 110C 90s

Develop Parameters

Develop Model (Mack)
2704.100098 Development Rmax (nm/s)
0.001000 Development Rmin (nm/s)
0.500000 Development Mth
17.260000 Development n
1.000000 Surface Development Rate
1.000000 Inhibition Depth (nm)
0.000000 Polymer Radius of Gyration (nm)
DEV 60s

Expose Parameters

Exposure Model Type (Dill)
1.000000 PAG Relative Surface Concentration
100.000000 PAG Gradient Depth (nm)
1.000000 Quencher Relative Surface Concentration
20.000000 Quencher Gradient Depth (nm)
0.677000 Relative Quencher Concentration

Wavelength 193.000000 (nm)
DillA 0.029200 (1/um)
DillB 1.385900 (1/um)
DillC 0.200800 (cm²/mJ)
Unexposed n 1.725000
Completely Exposed n 1.725000

ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

**Конфигурационный файл настроек оптической модели затворного слоя
проектных норм 65 нм для САПР Mentor Graphics Calibre (п.3.3.1)**

```
# RET_RELEASE_OPMOD : version 6
version 5
engine TCCcalc
opticalsystem 0.193 0.750
defocuslevels 1 0.100 0.050
magnification 4.
approxorder 11
hoodpix 1.310
kerngrid 0.007
illumtype COMPOSITE
QUASAR ERF weight 1.000 sigma 0.850 sigma_in 0.600
illumangle 30.000 dsigma 0.019 dsigma_in 0.012
dillumangle 0.011
film 0.185 1.698 -0.023 "Resist"
film 0.075 1.82 -0.340 "BARC"
substrate 1.600 -3.97
beamfocus 0.091
vectormodelflag 1
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.

Конфигурационный файл настроек компактной фоторезистивной модели затворного слоя проектных норм 65 нм для САПР Mentor Graphics Calibre (п.3.3.2)

```
type VT-5
version 3
modelFile mcresist.mod
sampleSpacing 0.03
referenceThreshold 0.41793
bound IMAX 0.516981 0.885061
bound SLOPE 2.60955 5.68673
bound ISLOPE 0.41793 0.41793
bound IMIN 0.0125191 0.33494
bound FACTOR -3.61044 4.02615
minThreshold 0.358585
maxThreshold 0.460772
minEigenval 0.000906753
centerRegression 1
hoodpix 1.28
kerngrid 0.01
```

```
TPAR IMAX SLOPE IMIN FACTOR
ttermCount 15
TTERM 0.508245
TTERM -0.0978258 IMAX 1
TTERM -0.118414 IMAX 2
TTERM 0.046329 SLOPE 1
TTERM 0.000987581 SLOPE 2
TTERM 0.124958 IMIN 1
TTERM 0.0985023 IMIN 2
TTERM 0.00152032 FACTOR 1
TTERM -0.0171112 FACTOR 2
TTERM 0.046749 IMAX 1 SLOPE 1
TTERM -0.0712726 IMAX 1 IMIN 1
TTERM 0.00238269 IMAX 1 FACTOR 1
TTERM -0.0254777 SLOPE 1 IMIN 1
TTERM -0.00156329 SLOPE 1 FACTOR 1
TTERM -0.0182512 IMIN 1 FACTOR 1
# RET_RELEASE_RESMOD : version 5
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.

**Скрипт базовой процедуры расстановки SRAF затворного слоя
проектных норм 65 нм для САПР Mentor Graphics Calibre (инструмент
OPCSbar) на языке SVRF**

```

LAYOUT SYSTEM OASIS
LAYOUT PATH "gds/1.oas"
LAYOUT PRIMARY "*"
PRECISION 10000
DRC MAXIMUM RESULTS ALL
DRC RESULTS DATABASE "gdsout/1_out.oas" OASIS PSEUDO
DRC SUMMARY REPORT "reports/1.rep"
LAYER ACTIVE 2
LAYER POLY 30
ACTIVE {copy ACTIVE} DRC CHECK MAP ACTIVE 2
POLY {copy POLY} DRC CHECK MAP POLY 4
// Variables.
VARIABLE SBWid1 0.024 // Width1 of Scattering bar
VARIABLE SBWid2 0.032 // Width2 of Scattering bar
VARIABLE SBWid3 0.036 // Width3 of Scattering bar
VARIABLE SBDist1 0.120 // Parallel Distance1 from feature to SB
VARIABLE SBDist2 0.140 // Parallel Distance2 from feature to SB
VARIABLE SBDist3 0.180 // Parallel Distance3 from feature to SB
//!!!!!!
VARIABLE SBEndDist90 0.07 // Distance from end of SB to
perpendicular corner
VARIABLE minLength 0.140 // Minimum allowed SB length
VARIABLE maxSize .2 // Maximum width to get sb
//!!!!!!
VARIABLE minGap 0.090 // Minimum space between SBs
VARIABLE space1 0.260 // If space < space1, no SB
VARIABLE space2 0.340 // Space between space1 and space2, 1 centered
SB, Width1
VARIABLE space3 0.500 // Space between space2 and space3, 1 centered
SB, Width2
VARIABLE space4 0.540 // Space between space3 and space4, 1 SB to
edge, Width1, Distance1
VARIABLE space5 0.620 // Space between space4 and space5, 1 SB to
edge, Width2, Distance2; Space > space5, 1 SB to edge, Width3, Distance3
VARIABLE minCornerGap 0.090 // Minimum corner space for perependicular SB
VARIABLE perpGap 0.07 // Minimum perpendicular space
VARIABLE jogGap 0.12 // Minimum space where scattering bars jog but
// ends do not project on each other
VARIABLE SBJoinDist .12 // Join SBs if end to end space <= to this
// Identify all lines that are less than maxSize
// Leave out the memories
POLY_4_SB = POLY NOT (SIZE POLY BY maxSize/2 UNDEROVER)
POLY_SB = OPCSBAR POLY_4_SB
SPACE > space1 <=space2 SBWIDTH SBWid1 CENTER
SPACE > space2 <=space3 SBWIDTH SBWid2 CENTER
SPACE > space3 <= space4 SBWIDTH SBWid1 SBOFFSET SBDist1
SPACE > space4 <= space5 SBWIDTH SBWid2 SBOFFSET SBDist2
SPACE > space5 SBWIDTH SBWid3 SBOFFSET SBDist3

MINEDGELENGTH 0.3
MINSBOFFSET SBDist1
MINSBSPACE minGap
MINSBWIDTH SBWid1
MINSBLENGTH minLength
INTERSECTION N

```

```
LINEENDOFFSET SBEndDist90
LINEENDSPACE jogGap
LINEENDMERGE SBJoinDist
OFFSETLAYER POLY
POLY_SB {COPY POLY_SB} DRC CHECK MAP POLY_SB 20
MASKOUT {POLY OR POLY_SB} DRC CHECK MAP MASKOUT 5
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 5.

**Пример конфигурационного файла ОРС-рецепта с оптимизированными
настроечными параметрами для затворного слоя технологии проектных
норм 65 нм в формате САПР Mentor Graphics Calibre**

```

LAYOUT SYSTEM OASIS
LAYOUT PATH "input/1.oas"
LAYOUT PRIMARY "TOPCELL"
PRECISION 10000
DRC MAXIMUM RESULTS ALL
DRC MAXIMUM VERTEX 199
DRC RESULTS DATABASE "output/1 OPC.oas" OASIS
LAYER target 23
LAYER sraf 24

layeropc = LITHO OPC target sraf FILE [
    modelpath model
    opticalmodel Optical
    resistpolyfile poly.mod
    # ----- OPC algorithm -----
    iterations 5
    tilemicrons 100
    stepsize 0.001
    gridsize 0.001
    aspect 3
    siteinfo RESIST -numx 5 -spacing 0.04 -center 2.0
    cornerSiteStyle SITES_ON_ARC 0.0695741539 concave
SITES_ON_ARC 0.08
    lineEndAdjDist 0.120
    convexAdjDist 0.120
    concaveAdjDist 0.120
    # ----- Fragmentation -----
    minfeature 0.128

```

```

minedglength 0.08
maxedglength 1000
cornedge 0.08 0.08 lea 0.08 0.08
concavecorn 0.0800264601 0.08 sea 0.1060567879 0.18
interfeature -interdistance 0.5948375224 -ripplelen 0.08 -
num 3 -shield 3
seriftype 0
minjog 0.07
lineEndLength 0.12
# ----- Layer info -----
background dark
layer 23 target 17 0 opc clear
layer 24 sraf 0 0 visible clear

sse OPC_MIN_INTERNAL 0.128
sse OPC_MIN_EXTERNAL 0.096
sse OPC_FEEDBACK -0.1470267132 -0.2993809028 -0.6239735056 -
0.7149588584 -1
sse INTERACTION_DISTANCE 0.657102484528
]

OPC {copy layeropc}
target {copy target}
sraf {copy sraf}

DRC CHECK MAP target 23
DRC CHECK MAP sraf 24
DRC CHECK MAP OPC 123

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.

**Акты о внедрении и использовании результатов работы и авторские
свидетельства**

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. 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 определены параметры непропечатываемых вспомогательных топологических структур SRAF.

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.

Предложенные в работе подходы были применены в разработке базовой технологии проектирования фотошаблонов и подготовки управляющей информации для их изготовления при производстве СБИС с проектными нормами 65-45 нм, включающие маршрут подготовки управляющей информации для изготовления фотошаблонов технологического уровня 65-45 нм, модели процессов фотолитографии для основных критических слоёв СБИС применительно к технологическому оборудованию предприятия при переносе изображения с фотошаблона на кремниевую пластину методом проекционной литографии. В рамках ОКР «Разработка базовой технологии для изготовления фотошаблонов для производства сверхбольших интегральных схем с проектными нормами 65-45 нм», шифр «Информация 65-45» были

проведены испытания опытных образцов фотошаблонов сверхбольших интегральных схем, результаты которых показали соответствие опытных образцов требованиям ТЗ

Начальник ОПФШ АО «НИИМЭ»

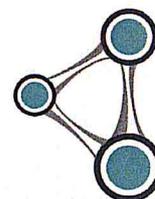
А.Л. Панкратов

Директор по развитию технологий
АО «НИИМЭ»

П.В. Игнатов



Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
молекулярной электроники»
(АО «НИИМЭ»)



Россия, 124460, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, д. 6/1
тел.: +7 495 229 7299, +7 495 229 7000 факс +7 495 229 7773, e-mail: niime@niime.ru, web:
www.niime.ru

«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель генерального
директора
по организационному развитию
и управлению
персоналом АО «НИИМЭ»

Л. В. Поликарпова

2021 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Иванова В.В. «Исследование эффектов оптической близости и разработка методов
их коррекции для критических литографических слоёв технологии производства
СБИС проектных норм 65 нм»

Мы, нижеподписавшиеся Забодаева Нина Николаевна, Степаненко Наталья Владимировна составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Иванова В.В. «Исследование эффектов оптической близости и разработка методов их коррекции для критических литографических слоёв технологии производства СБИС проектных норм 65 нм» использованы в процессе обучения, проводимые на базе Учебного центра АО «НИИМЭ» как в качестве самостоятельного учебного курса по повышению квалификации специалистов-фотолитографов, так и в качестве учебного модуля программы повышения квалификации специалистов в области микроэлектроники.

Так же проведенные исследования были использованы при актуализации профессионального стандарта «Инженер-технолог в области производства наноразмерных полупроводниковых приборов и интегральных схем»

Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 3 февраля 2014 года N 71н. и формировании на его базе профессиональных квалификаций для инженеров-технологов.

Руководитель проектов внедрения
программ обучения, развития и оценки
отдела управления персоналом АО "НИИМЭ"



Н.Н. Забодаева

Руководитель Учебного центра
АО «НИИМЭ»



Н.В. Степаненко

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021669010

**Инструмент для настройки параметров рецепта
коррекции эффектов оптической близости "OPCR
Optimizer"**

Правообладатель: *Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (RU)*

Авторы: *Медведев Константин Александрович (RU), Иванов Владимир Викторович (RU), Балан Никита Николаевич (RU)*

Заявка № **2021668070**

Дата поступления **12 ноября 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **23 ноября 2021 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Г.П. Ивлиев', is written over a horizontal line.

Г.П. Ивлиев