

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

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

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы диссертации

Прогресс в области полупроводниковой технологии, наблюдающийся в последние десятилетия, привел к фактическому переходу твердотельных микроэлектронных приборов в область наноразмеров.

При производстве интегральных схем важнейшим компонентом технологического оснащения кристального производства является фотошаблон (ФС) с топологическим рисунком одного или нескольких литографических слоев интегральной схемы (ИС) в маскирующем слое, используемый для переноса на полупроводниковую пластину (ТУП) методом проекционной литографии.

Технические требования к ФС определяются нормами проектирования интегральных микросхем (TechnologyNodes).

Переход от одной ступени проектной нормы к следующей влечет за собой уменьшение размеров элементов интегральных схем усложнение технологических процессов проектирования дизайна фотошаблонов и

формирования изображения интегральной схемы на полупроводниковой пластине.

Сложность технологического процесса формирования изображения топологического рисунка интегральной схемы на П/П связана с тем, что качество изображения топологического рисунка при одних и тех же значениях длины волны экспонирующего излучения и числовой апертуры объектива степпера (сканера) непропорционально ухудшается с уменьшением проектных норм ИС.

Улучшение качества изображения достигается совокупностью технических и технологических решений, а именно: применяются новые высококонтрастные резисты, улучшаются технические характеристики установок проекционного переноса изображения, разрабатываются программные средства проектирования интегральных схем и моделирования технологических процессов переноса изображения с использованием элементов ОРС, которые позволяют компенсировать ограничения разрешения оптических систем технологических автоматов переноса, изготавливаются и используются сложные бинарные ФШ с элементами ОРС для формирования топологического рисунка ИС с применением техник повышения разрешающей способности проекционной фотолитографии.

Очевидно, ошибки, допущенные при проектировании фотошаблонов, 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 фотошаблонов в условиях перехода на новые уровни технологии имеет первоочередную важность. Его решение лежит в том числе в области оптимизации методов коррекции оптической близости (или ОРС - Optical Proximity Correction).

Успешное решение задач разработки ОРС-решений требует проведения комплекса теоретико-экспериментальных исследований процесса переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину, позволяющих сделать оптимальный выбор параметров проекционной системы, корректно определить вклад фотошаблонной составляющей в общую литографическую погрешность, осуществить адекватную коррекцию топологии фотошаблона, сократив по возможности затрачиваемые на это временные и вычислительные ресурсы.

Крупнейшие мировые производители САПР производят программные продукты, ориентированные на осуществление различных стадий процесса проектирования фотошаблонов, однако законченные реализации OPC-решений, применяемые на маскшопах и предприятиях, занимающихся производством микроэлектроники, являются закрытой коммерческой информацией.

Более того, отсутствует методология их разработки, которая сохраняла бы общую последовательность этапов при переходе к следующим проектным нормам технологии производства СБИС.

Поэтому исследования в диссертации, направленные на решение задач коррекции эффектов оптической близости при переносе изображения методом проекционной литографии, включая проектирование фотошаблонов, являются актуальными и своевременными.

Оценка содержания диссертации

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

В первой главе описаны основные подходы к решению задачи повышения разрешающей способности проекционной фотолитографии, основное внимание уделяется методикам RET (Resolution Enhancement Techniques), минимизирующим коэффициент k_1 в соотношении Рэля. Описаны последние мировые достижения в этой области. С учетом проведенных обзорно-аналитических исследований производится постановка задач диссертации.

Вторая глава посвящена моделированию процесса проекционной фотолитографии с целью определения ряда необходимых при разработке OPC-решения параметров, таких как настройки проекционной системы объектива сканера, геометрия структур SRAF, а также основные требования масочной спецификации для критических литографических слоев технологии проектных норм 65 нм (в данном случае – для затворного слоя). Искомые параметры найдены посредством моделирования процесса проекционной фотолитографии исходя из соображений удовлетворения определяемых характеристик литографического изображения требованиям к технологии проектных норм 65

нм. При выработке требований фотошаблонной спецификации использовалось «полное» литографическое моделирование на основе физико-химических принципов. При определении предварительных параметров SRAF и оптимальной формы осветителя для оценки получаемых в фоторезистивной маске структур была применена упрощенная модель с постоянным порогом по интенсивности экспозиции, калибруемым на экспериментально установленный минимальный обрабатываемый полупериод рисунка в резисте (т.н. «якорную» структуру).

Третья глава посвящена описанию экспериментальной части работы – исследованию процессных окон применяемых топологических структур SRAF и калибровке реализованных в САПР Mentor Graphics Calibre полуэмпирических моделей формирования «воздушного» изображения и контура фоторезистивной маски. Для этого был разработан и изготовлен специализированный калибровочный фотошаблон, содержащий ячейки с тестовыми и калибровочными структурами, с которого в условиях, характерных для фотолитографии затворного слоя, были произведены пропечатки с проходом по значениям дозы и дефокусировки. Для формирования калибровочной выборки были применены методы кластерного анализа (к-средних) в пространстве параметров оптического изображения используемых калибровочных структур. Исследована достаточность калибровочной выборки для корректной калибровки фоторезистивной модели. С использованием результатов предварительного моделирования, откалиброванных полуэмпирических моделей и результатов проведенных экспериментальных исследований была разработана базовая процедура размещения структур SRAF в двумерных топологиях затворных слоев СБИС проектных норм 65 нм.

В четвертой главе решалась задача оптимизации параметров OPC-рецепта, отвечающих за процесс коррекции топологии (количество, размер сегментов топологии при фрагментации, максимальное число итераций, положение контрольных точек и т.д.). Предложено два вида оценочной функции и, соответственно, два подхода к расчету ее значения. Наиболее эффективным подходом при решении данной задачи оказалось применение метаэвристических методов, позволяющих найти адекватное решение за приемлемое время. Для оптимизации OPC-рецепта в работе использовался один из таких методов – метод дифференциальной эволюции, относящийся к генетическим алгоритмам. Разработанные алгоритмы оптимальной настройки

ОРС-рецепта были реализованы в виде программного средства «ОРС Optimizer».

Научная новизна диссертации

Научная новизна диссертации заключается в усовершенствовании процесса калибровки компактной модели контура ФРМ, для чего в работе был впервые применён кластерный анализ формирования выборок калибровочных структур и исследована эффективность откалиброванной таким образом модели. В рамках данной усовершенствованной методики была 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.

Впервые разработаны универсальный метод составления спецификации на фотошаблон на основе исследования вклада фотошаблонной составляющей в общую литографическую погрешность и 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.

Достоверность основных выводов и результатов диссертации

Достоверность основных выводов и результатов диссертации обеспечивается строгим математическим обоснованием используемых подходов, применением современных экспериментальных методик, а также согласованностью полученных результатов с отечественными и зарубежными литературными данными.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы состоит в следующем:

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

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

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

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

- $w = 28$ нм, расположение в центрах промежутков между основными линиями – для периодов линий от 340 нм до 560 нм;
- $w = 36$ нм, $s = 180$ нм – для периодов линий от 560 нм и более.

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

4. Разработано программное средство «OPC_Optimizer», позволяющее выполнять оптимальную настройку OPC-рецепта с помощью алгоритмов

оптимизации, в том числе, эвристического алгоритма дифференциальной эволюции, а также решать другие оптимизационные задачи в рамках разработки ОРС-решения.

Соответствие автореферата диссертации

Автореферат соответствует основным положениям диссертационной работы.

Основные замечания по существу диссертации

1. В работе автор не приводит пример работы оптимизированного ОРС-рецепта на топологии затворного слоя реального изделия, ограничившись лишь тестовой топологией случайной конфигурации.
2. Не проведена сравнительная оценка временных затрат на обработку топологии исходным и оптимизированным ОРС-рецептами.
3. Недостаточно наглядных примеров по результатам пропечаток тестового модуля

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы.

Общая оценка работы

Задачи, решаемые в диссертационной работе, соответствуют паспорту специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств, в частности, пунктам:

- п. 1 – Разработка и исследование физических основ создания новых и совершенствования существующих приборов, интегральных схем, изделий микро- и нанoeлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (МЭМС), нанoeлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин;

- п. 2 – Исследование и разработка физических и математических моделей изделий по п.1, в том числе для систем автоматизированного проектирования.

В соответствии с п. 9 Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, диссертация Иванова Владимира Викторовича является научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных автором исследований, решается задача разработки методов коррекции эффектов оптической близости для критических литографических слоев технологии производства СБИС проектных норм 65 нм, имеющая существенное значение для создания современных полупроводниковых электронных приборов.

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

Официальный оппонент,
кандидат технических наук по специальности 05.27.06, главный специалист
Акционерного общества «Зеленоградский инновационно-технологический
центр»

В.А. Овчинников

30.05.2019

Адрес места работы: 124527, г. Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, дом 8
Контактные данные: Тел. +7(499)720-69-24; e-mail: ova@photoshablons.ru

Личную подпись Овчинникова Вячеслава Алексеевича удостоверяю:

Начальник отдела кадров АО «ЗИТЦ»
И. Ю. Ейракова

