

На правах рукописи

УДК 621.382

Родионов Илья Анатольевич

**РАЗРАБОТКА ЛИТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ СБИС С РАЗМЕРАМИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕНЬШЕ
ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЭКСПОНИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

05.11.14 – Технология приборостроения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель

член-корр. РАН,
профессор Шахнов Вадим Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор Медведев Аркадий Максимович
(МАИ)

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией Рыжиков Илья Анатольевич
(ИТПЭ РАН)

Ведущая организация

Федеральное государственное унитарное
предприятие «Научно-производственное
предприятие «Пульсар» (Москва)

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2010 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д212.141.18 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв в 1 экземпляре просим высылать по указанному адресу.

Автореферат разослан «_____» _____ 2010 г.

Телефон для справок: 8(499) 267-89-63.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н., профессор

Цветков Ю.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Массовое производство современных сверхбольших интегральных микросхем (СБИС), светодиодов высокой яркости, жестких дисков, плоских дисплеев, печатных плат, дифракционных решеток и т.п. стало возможным благодаря применению технологии проекционной микролитографии (МЛ). МЛ является в настоящее время основным технологическим процессом (ТП) в микроэлектронике, который определяет возможность формирования субмикронных топологических элементов, причем конкурирующие виды МЛ с более высокой разрешающей способностью (рентгенолитография, электронно-лучевая литография и т.п.) все еще не обеспечивают возможности массового производства.

Сохраняющиеся тенденции последних 20 лет к уменьшению размеров элементов СБИС требуют решения задач повышения разрешения, ужесточения допусков на размеры и их воспроизводимость, а также точность совмещения топологических слоев.

В настоящее время передовыми производителями СБИС используются литографические установки с длиной волны источников излучения $\lambda = 365$ нм, 248 нм и 193 нм. Основная особенность современных процессов МЛ заключается в том, что критические линейные размеры (КЛР) получаемых топологических элементов значительно меньше λ . В таких ТП при экспонировании наблюдается сильное разрушение топологических элементов. Проблемы создания проекционных систем с $\lambda < 193$ нм поставили под угрозу тенденцию дальнейшей миниатюризации. Поэтому особое значение приобрели конструкторско-технологические методы, позволяющие достигать лучшего разрешения за счет учета особенностей конкретного технологического оборудования, материалов и режимов обработки.

Состояние проблемы. Большой вклад в изучение процесса МЛ внесли фундаментальные работы У. Моро «Микролитография. Принципы, методы, материалы», Я. Таруи «Основы технологии СБИС» и К.А. Валиева и А.В. Ракова «Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике». Вопросы моделирования МЛ отражены в статьях и научных трудах Р. Дилла (R. Dill), К. Мака (C. Mack), Ю. Граника, Д. Левелина (J. Lewellen) и др.

В настоящее время в РФ созданы предпосылки для быстрого развития микроэлектронной промышленности. В ОАО «Микрон» подходит к завершению пуск производственной линии, которая обеспечит изготовление СБИС с проектными нормами 0,18 мкм. Группой предприятий «Ангстрем» заключен контракт на покупку оборудования с лицензией на выпуск СБИС по технологии 0,13 мкм. ФГУП НИИИС им. Ю.Е. Седакова ведутся работы по пуску и наладке оборудования, которое обеспечит выпуск СБИС по технологии 0,35 мкм.

В НИИ Системных Исследований РАН (НИИСИ РАН) функционирует технологическая линия изготовления СБИС субмикронного уровня (0,5 мкм и 0,35 мкм). В НИИСИ РАН используется проекционная установка «PAS5500/250C» фирмы «ASML» (Голландия) с $\lambda = 365$ нм (степпер), обеспечивающая разрешение до 0,3 мкм. Разработка нового ТП изготовления

СБИС с проектными нормами 0,25 мкм потребовала оптимизации процесса МЛ и внедрения методов повышения разрешения (МПР) процесса МЛ.

Цель работы заключается в повышении степени интеграции и процента выхода годных, а также расширении номенклатуры ТП на имеющемся оборудовании за счет разработки методологии проектирования и изготовления СБИС с размерами элементов меньшими длины волны экспонирующего излучения с применением проекционной литографии.

Решаемые задачи:

1. Провести анализ современного состояния литографических процессов, применяемых оборудования и материалов, методов повышения разрешающей способности и средств моделирования проекционной литографии.
2. Проанализировать методики калибровки и откалибровать физическую модель процесса МЛ (на примере слоя затворов) для используемого в НИИСИ РАН степпера и применяемых материалов.
3. С использованием разработанной модели провести оптимизацию технологических режимов процесса МЛ с целью повышения разрешения и стабильности воспроизведения номинальных размеров затворных структур.
4. Провести модельные исследования влияния оптического эффекта близости и методов его коррекции (OPC, optical proximity correction).
5. Экспериментально подтвердить результаты моделирования на примере фоторезистивной маски (ФРМ) слоя затворов с КЛР $\leq 0,25$ мкм.
6. Разработать комплект фотошаблонов (ФШ) для калибровки и верификации полуэмпирических моделей (для критических слоев СБИС).
7. Разработать процедуру фильтрации экспериментальных данных, используемых при калибровке полуэмпирических моделей МЛ и травления.
8. Разработать методику и провести калибровку полуэмпирических моделей для САПР «Calibre», используемых в процедуре коррекции топологии СБИС.
9. Разработать процедуры коррекции и верификации топологии функциональных блоков тестового кристалла СОЗУ и блоков характеристики ТП с минимальными размерами элементов 0,25 мкм.
10. Разработать методологию проектирования и технологию формирования критических слоев СБИС, выполненных по проектным нормам 0,25 мкм.
11. Экспериментально апробировать разработанные методы.

Методы исследования. Для оптимизации технологических режимов и разработки МПР применено моделирование процесса МЛ. Для оценки качества процесса МЛ и методов МПР использован критерий ширины процессных окон в пространстве «фокус – доза экспозиции». Работа типовых ячеек и функциональных блоков СБИС оценивалась по электрофизическим параметрам. При решении задач использованы теория оптимизации, теория вероятностей и математическая статистика.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика калибровки физических моделей процесса литографии в условиях реального производства, отличающаяся экспериментальным определением скорости экспонирования модели резиста по колебательным

кривым дозы полного вскрытия и скоростей проявления модели резиста на основе анализа временной зависимости ухода резиста в процессе проявления;

2. Разработаны рекомендации по повышению точности и стабильности полуэмпирических моделей литографии и травления за счет изменения формы полинома, оптимизации значений собственного вектора и адаптивной фильтрации калибровочных тестовых структур по предложенной формуле расчета значений их весовых коэффициентов, которая включает параметры пространственного изображения структуры и позволяет учесть возможность ее изготовления в технологическом процессе и достоверного измерения;

3. Разработана и внедрена методика проектирования и изготовления СБИС с размерами элементов меньше длины волны экспонирующего излучения, позволяющая скомпенсировать неравномерность скоростей травления различных типов топологических структур за счет предложенной в работе схемы коррекции оптического эффекта близости при формировании резистовой маски.

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждена результатами проведенных экспериментальных исследований и результатами внедрения разработанных методик и режимов работы технологического оборудования в НИР и ОКР, проводимых НИИСИ РАН.

Полученные результаты достоверно демонстрируют эффективность разработанного комплекса методов для решения задач повышения разрешения, расширения процессных окон, повышения стабильности процесса МЛ и воспроизводимости КЛР, как по пластине, так и в партии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Определение параметров экспонирования физических моделей резиста необходимо проводить по колебательным кривым дозы полного вскрытия, а скорости проявления оценивать по временным зависимостям изменения толщины резиста на отрезке от начала проявления и до 150% рабочего времени проявления. Это позволяет минимизировать число экспериментов и снизить ошибку моделирования до $\pm 5,5\%$ от минимального размера.

2. Адаптивную фильтрацию результатов измерений топологических структур, используемых при калибровке полуэмпирических моделей процессов литографии и травления, необходимо выполнять с использованием предложенной в работе формулы расчета их весовых коэффициентов, что позволяет повысить точность и сократить время калибровки моделей.

3. Внедрение предложенных в работе технологических режимов процесса литографии и процедуры коррекции оптического эффекта близости, учитывающих особенности конкретной технологической линейки, позволяет расширить процессные окна, улучшить качество переноса топологии сложных элементов, в результате чего повышаются потребительские качества и процент выхода годных СБИС.

Практическая значимость и результаты внедрения. Разработанные в диссертации комплекс методов, алгоритмы и модели, реализующие МПР, внедрены в НИИСИ РАН. Это позволило перейти к меньшим проектным нормам при требуемой стабильности ТП (повысить глубину резкости (ГР) до

0,6-0,8 мкм при диапазоне дозы экспонирования $\approx 8-10\%$), повысить быстродействие за счет уменьшения размеров (на 30%), улучшить массогабаритные параметры за счет повышения степени интеграции (на 40%). Универсальность разработанных методик и используемых моделей позволяет применять их на других предприятиях аналогичного профиля.

Полученные математические модели, методики и комплекс модельных исследований ТП внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Основной практической ценностью работы является снижение стоимости СБИС за счет увеличения процента выхода годных, вследствие повышения стабильности ТП литографии и воспроизводимости размеров элементов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на VIII и IX-й молодежных научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы», (Москва, 2006, 2007), X и XI-й молодежных международных научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы», (Москва, 2008, 2009), опубликованы в журналах «Технология и конструирование в электронной аппаратуре» (Одесса, 2007, №3 и №4), «Вестник МГТУ» (Москва, 2010, спец. выпуск: Наноинженерия), «Микроэлектроника» (Москва, 2010, №5) и сборнике научных трудов «Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты» (Москва, 2009).

Работа отмечена дипломами 1 степени молодежных научно-технических конференций «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы», (Москва, 2007 и 2008), стипендиями Правительства Москвы и Клуба Императорского Технического Училища.

Публикации. По материалам и основному содержанию работы опубликованы 13 научных работ в научно-технических журналах и трудах конференций, из них 2 научные работы опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 165 страницах, включая 146 страниц машинописного текста, 89 рисунков, список литературы из 93 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность решения поставленных в диссертации задач, сформулирована цель и задачи исследования, обоснована научная новизна, показано место ТП литографии в технологическом маршруте производства КМОП СБИС и роль технологических САПР.

В первой главе проведен анализ современного состояния и тенденций развития процессов МЛ, а также физических ограничений проекционной оптики при использовании бинарных ФШ. В соответствии критерием Рэлея (1) разрешение (R) определяется дифракционным пределом:

$$R = \frac{K_1 \cdot \lambda}{NA} = \frac{K_1 \cdot 365}{0,6} = 608 \cdot K_1 \text{ [нм]} \quad (1)$$

где NA – числовая апертура, а коэффициент K_1 определяется уровнем технологии. Для высокоточных проекционных систем значение $K_1 = 0,5$. Это дает аппаратное разрешение используемого степпера ~ 300 нм. Применение МПР позволяет снизить значение K_1 (рис. 1).

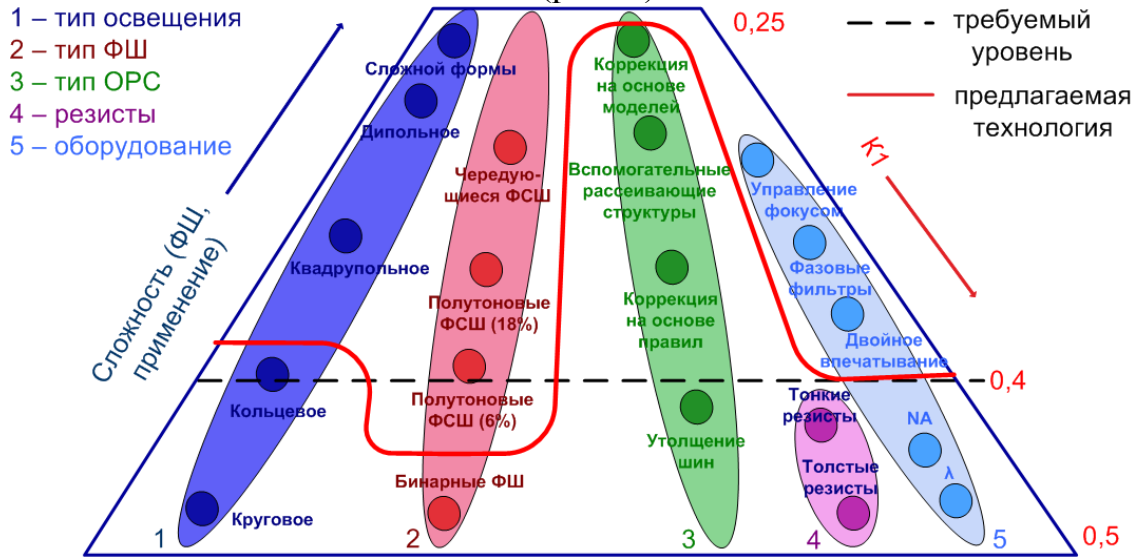


Рис. 1. Методы повышения разрешающей способности литографии

При использовании степпера PAS5500/250C, требуемое разрешение 0,25 мкм достигается при $K_1 \approx 0,4$ (рис. 1). Стоимость изготовления полутонных ФШ в разы превышает стоимость бинарных ФШ, поэтому было предложено альтернативное решение (рис. 1), т.е. упор был сделан на разработку методов ОРС на основе моделей, оптимизацию толщины резиста и параметров кольцевого освещения.

При использовании объектива с большей числовой апертурой существенно уменьшается ГР, которая обратно пропорциональна квадрату апертуры:

$$ГР = \frac{\pm \lambda \cdot K_2}{2 \cdot NA^2} = \frac{\pm 365 \cdot K_2}{2 \cdot 0,6^2} = 507 \cdot K_2 \text{ [нм]} \quad (2)$$

где K_2 – коэффициент ($K_2 > 1$). Исходя из необходимости обеспечения стабильности ТП МЛ при известных допусках на разброс сопутствующих технологических параметров (неравномерность нанесения, неплоскостность и т.д.) рекомендуемая для 0,25 мкм технологии ГР составляет 0,6-0,8 мкм.

Применение МПР позволяет улучшить значения коэффициентов K_1 и K_2 . В диссертации рассмотрены современные МПР:

1. Применение внеосевого освещения позволяет повысить R и $ГР$ за счет изменения формы источника освещения.

Световая волна, проходя через ФШ, дифрагирует с образованием четных и нечетных порядков. В случае топологии с равными по ширине линиями и зазорами образуются только нечетные порядки (рис. 2). При уменьшении периода, угол β растет, и меньшее количество дифракционных порядков попадает во входную апертуру. Качественное изображение определяется интерференцией 3-х лучей – 0-го и ± 1 -х (рис. 2, слева), 0-й порядок содержит информацию об амплитуде интенсивности, а ± 1 – о ее пространственном

распределении. ГР сильно зависит от значения разности световых путей лучей 0-го и ± 1 -го порядков.

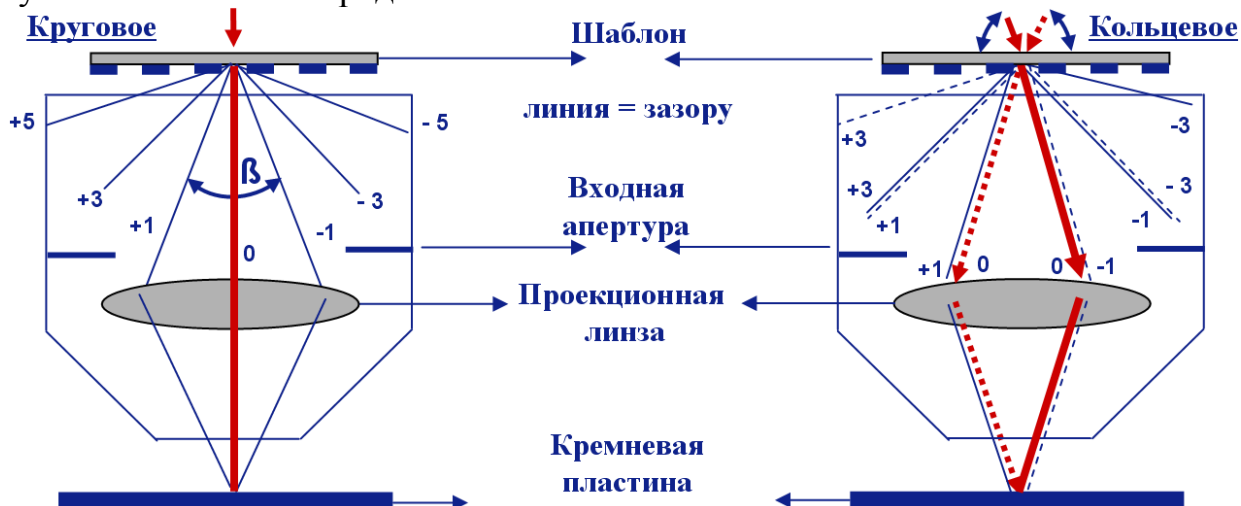


Рис. 2. Сравнение типов источников освещения

В случае кольцевого освещения (рис. 2, справа) волна падает на ФШ под углом. Положение 0-го порядка смещается, а во входную апертуру попадают 0-й и -1-й порядки падающего под углом потока справа, и 0-й и +1-й слева. В этом случае наблюдается интерференция 2-х лучей 0-го и -1-го или 0-го и +1-го порядков, в результате улучшается R (вместо угла β имеем $\beta/2$) и ГР (световые пути лучей 0 и ± 1 порядков практически равны).

Конструкцией степпера PAS5500/250C предусмотрено круговое или кольцевое освещение. Для выполнения поставленных задач было использовано кольцевое освещение, параметры которого были оптимизированы в ходе работы.

2. Применение фазосдвигающих шаблонов. В бинарных шаблонах дифракция света на элементах, расположенных на расстояниях порядка $4-6\lambda$, приводит к разрушению топологических элементов. При уменьшении КЛР этот эффект значительно усиливается. В работе рассмотрены ФСШ двух типов: полутоновые и чередующиеся. Отмечено, что из-за крайне сложной технологии производства и проблем с дефектностью чередующиеся ФСШ практически не применяются.

3. Метод двойного впечатывания. Метод подразумевает разделение топологии критических слоев СБИС на два шаблона для поочередного впечатывания, с целью снижения влияния деструктивной дифракции (групповые структуры впечатываются через одну). Применение двойного впечатывания позволяет существенно улучшить разрешение проекционной МЛ.

4. Применение иммерсионных жидкостей. Использование иммерсионных жидкостей вместо воздушной среды между объективом установки экспонирования и кремневой пластиной позволяет получить значения $NA > 1$ за счет увеличения угла полного отражения на границе раздела сред «объектив – воздушный зазор». Благодаря иммерсии предел разрешения МЛ был отодвинут в нанометровый диапазон.

5. OPC. Метод заключается в коррекции топологии СБИС на стадии проектирования ФШ либо по правилам расстановки фигур OPC, либо итеративно на основании результатов литографического моделирования. В первом случае количество правил зависит от типа СБИС (память, логика и т.п.) количества типов фигур OPC, их параметров, применяемого оборудования и т.д.

Коррекция на основе моделей – более сложный метод, в котором результат литографического моделирования (2D контур резиста или травления) итеративно сравнивается с исходной топологией, и, в случае превышения заданных допусков, топология корректируется в местах несоответствий (рис. 3). Его применение позволяет существенно расширить возможности процесса МЛ, однако является сложным в использовании, требующим наличия специальных дорогостоящий САПР и вычислительных кластерных комплексов.

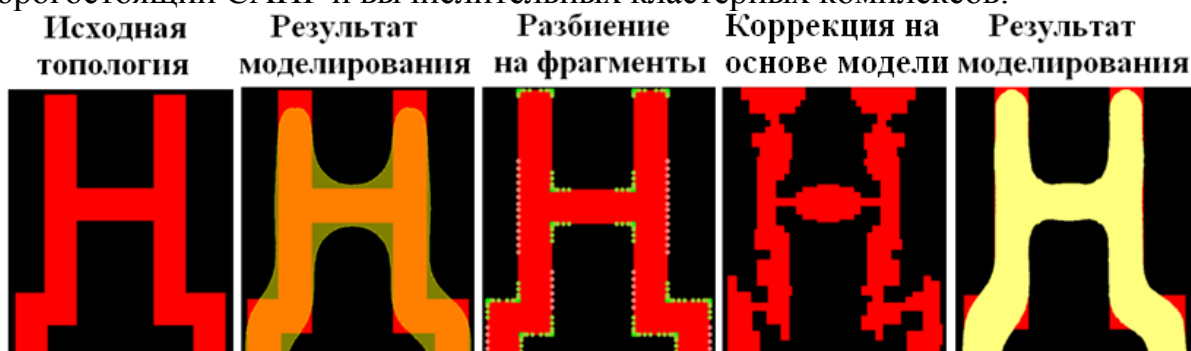


Рис. 3. OPC коррекция на основе моделей

Солидную часть стоимости производства кристаллов СБИС составляет стоимость комплекта ФШ. В диссертации разработаны технические требования к ФШ для изготовления СБИС с проектными нормами 0,25 мкм и компоновочное решение для комплекта ФШ по критерию минимизации стоимости. В завершении первой главы рассмотрены критерии оценки качества процесса проекционной МЛ.

Во второй главе рассмотрены математические модели и алгоритмы оптимизации процессов МЛ, особенности построения и типовая структура современных САПР МЛ. Проведен анализ и классификация САПР МЛ. Приведены аналитические зависимости и сравнительный анализ методов Аббе и Хопкинса для описания высокоапертурных проекционных систем.

САПР моделирования процесса МЛ по решаемым задачам можно разделить на две группы. В первой группе САПР применяются физические модели, во второй – «быстрые» полуэмпирические модели.

САПР первой группы используются для исследований процесса МЛ. В них применяются сеточные методы 3D моделирования, которые требуют большого количества оперативной памяти, что накладывает ограничение на размеры области моделирования. САПР второй группы применяются для обработки всей топологии кристалла СБИС, они позволяют промоделировать «отклик» одного режима ТП на различные топологии.

В работе применены обе группы САПР, в качестве первой был использован литографический симулятор «ProLith» компании «KLA-Tencor» (США), второй – САПР «Calibre» компании «Mentor Graphics».

Рассмотрены математические модели поглощения света (модель «ABC» Р. Дилла) и теоретические основы кинетики экспонирования резиста.

Рассмотрены модели проявления Дилла, Мака, Кима и «Notch». В третьей главе проведено их исследование. Основной выбрана «Notch» модель.

Рассмотрены полуэмпирические модели с переменным порогом чувствительности процессов МЛ и травления, алгоритм их калибровки по экспериментальным данным, критерии достаточности калибровочных данных для обеспечения стабильности и точности моделирования.

Процесс «переноса» топологии ФШ в реальную структуру на пластине можно разделить на три части. Первая – перенос топологии ФШ в распределение интенсивности света в области пластины (пространственное изображение), т.е. оптическая составляющая, которая описывается точно методом Хопкинса. Вторая – поглощение света резистом и его проявление. Третья – травление функционального слоя по полученной ФРМ. Резистивные эффекты для ускорения расчетов описывают математически – степенным полиномом, слагаемыми которого являются реальные физические величины.

В третьей главе проведено исследование предельных возможностей проекционной МЛ с $\lambda = 365$ нм для получения поликремневых затворных структур с КЛР = 0,25 мкм. Материал главы разделен на две части: 1) разработка модели МЛ, с помощью которой оптимизированы технологические режимы и параметры фигур ОРС; 2) подтверждающие эксперименты.

Разработка модели процесса литографии. Разработана методика определения параметров модели резистов в условиях реального производства (объем выборки > 100 пластин). При нахождении значений $R_{\max}$ и $R_{\min}$ исследованы три способа подачи проявителя на пластину: ручной, полуавтоматический, автоматический, что особенно важно при определении $R_{\max}$, т.к. время проявления резиста Ultra-i123 составило < 4 секунд.

Для определения коэффициента С модели Дилла, который оказывает наибольшее влияние на процесс экспонирования, и уточнения коэффициента преломления резиста была использована методика калибровки по экспериментальным колебательным кривым дозы полного вскрытия E0.

В процессе калибровки модели были также установлены: параметры резиста и объектива степпера, коэффициент соответствия дозы, нулевое положение фокуса (зависит от процедуры аттестации степпера), доля полной дозы, приходящаяся на ненаправленную засветку резиста, параметры термообработок, значения аберраций объектива и ряд других параметров.

При верификации полученной модели среднеквадратичное отклонение ошибки моделирования для 60 тестовых структур 6 типов (одиночные (групповые) шины (зазоры), окончания шин и т.п.) составило < $\pm 13,5$ нм.

Исследование и оптимизация процесса МЛ с $\lambda = 365$ нм для получения затворов СБИС с размерами элементов $\leq 0,25$ мкм. Разработанная ранее модель была использована для оптимизации режимов процесса МЛ и МПР, после чего для экспериментальной апробации был спроектирован тестовый ФШ.

Для оптимизации толщины резиста с точки зрения воспроизводимости КЛР и уменьшения амплитуды стоячих волн промоделирована зависимость

отражательной способности резиста от его толщины, что в условиях реального производства возможно только средствами моделирования. В результате выбраны 4 значения толщины в точках максимумов и минимумов отражения.

Проведены модельные исследования влияния параметров кольцевого освещения на ФРМ затворов с размерами 0,24 мкм (рис. 4). Построение подобных экспериментальных зависимостей потребовало бы > 1500 пластин, 10000-12000 часов загрузки технологического и измерительного оборудования.

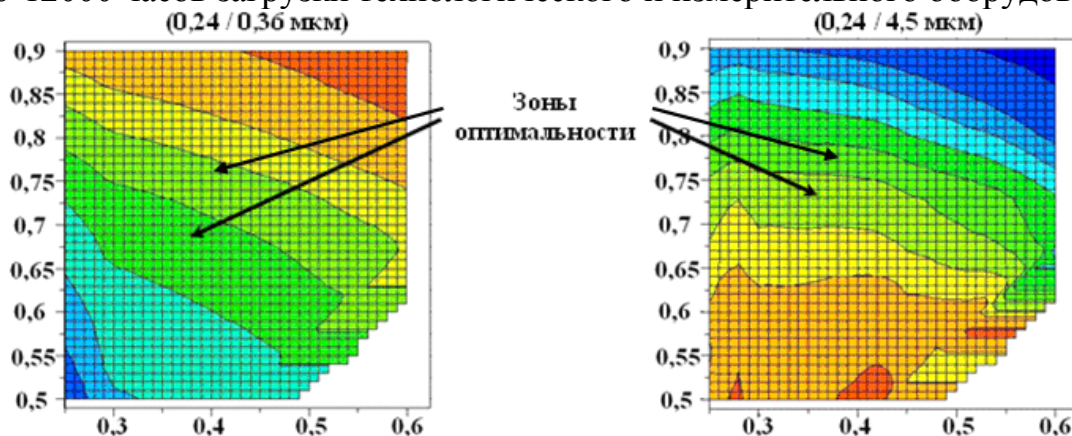


Рис. 4. Оптимизация параметров кольцевого источника (ось X – внутренний радиус кольцевого источника (σ_{IN}), Y – внешний радиус (σ_{OUT}))

По результатам моделирования определены оптимальные параметры кольцевого освещения (по критерию ширины процессных окон одиночных и групповых элементов) для случаев использования фигур ОРС и без них. Цветом на рисунке 4 показано изменение размера шины по ФРМ.

Для выбранных толщин резиста и параметров кольцевого освещения построены зависимости получаемого профиля резиста от дозы и фокуса. По результатам моделирования выбрана оптимальная толщина резиста.

Проведенная оптимизация позволила повысить разрешение процесса МЛ до 0,25 мкм. Однако было доказано, что требуемая точность переноса топологии СБИС может быть обеспечена только при условии применения ОРС. На рисунке 5 приведен пример оптимизации параметров фигур ОРС типа «serif» по критерию минимизации сокращения окончания шины (цветом показано изменение величины зазора между окончаниями шин, КЛР = 0,24 мкм).

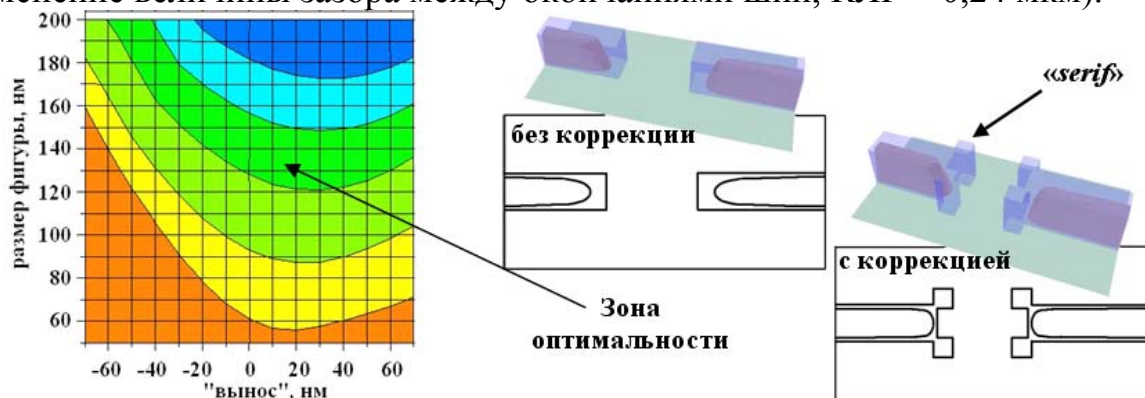


Рис. 5. Результаты оптимизации параметров ОРС фигур типа «serif»

Также выявлено, что при снижении шага групповых структур до 0,48-0,5 мкм, их размеры, получаемые на пластине, отличаются на 20% от размеров одиночных структур, которые имели такой же номинальный размер на ФШ. Для обеспечения работы в едином технологическом режиме и существенного расширения процессных окон, проведена модельная оптимизация параметров фигур ОРС типа «вспомогательные рассеивающие структуры».

Для экспериментальной апробации был спроектирован тестовый ФШ, в основу которого были заложены результаты моделирования. На ФШ были размещены 4 модуля (9,7×9,7 мм) с различным шагом групповых структур: 0,5 мкм, 0,48 мкм, 0,46 мкм и 0,44 мкм. В каждом модуле были размещены ТС для оптимизации ТП и подбора параметров фигур ОРС различных типов.

Подтверждающие эксперименты. При попытке получить ТС в стандартном процессе наблюдалась непроработка КЛР, существенная деструкция ФРМ и т.д. Применение технологических режимов, найденных по результатам моделирования, позволило добиться требуемого разрешения. На рисунке 6 приведены SEM-снимки характерных ТС (предельных с точки зрения дифракции), по которым можно судить о разрешении процесса МЛ (одиночная и групповые шины, окончания шин со стороны свободного края).

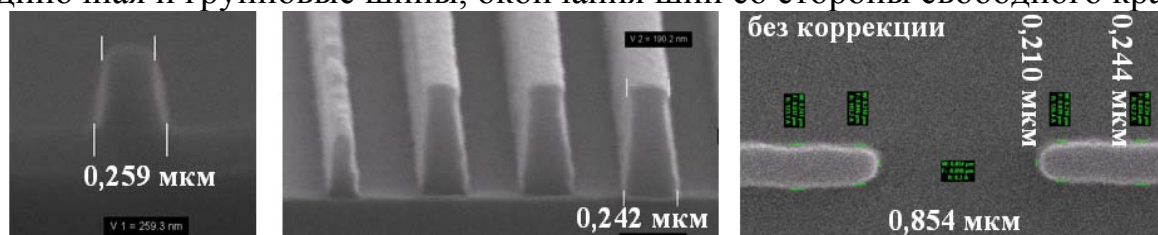


Рис. 6. Применение разработанных технологических режимов

Результаты моделирования согласуются с экспериментом с ошибкой менее $\pm 10\%$. Экспериментально получен качественный профиль резиста для групповых шин 0,24/0,48 мкм ($ГР = 0,6$ мкм), но одиночная шина (рис. 6, слева) получена при значении дозы на 20-30% меньше. Наблюдается сильная деструкция крайней в группе шины. Также наблюдается существенное сокращение шин со стороны свободного края на величину $\sim 0,13$ мкм (рис. 6, справа) и уменьшение номинального размера шины на «вылете» до 0,21 мкм.

На рисунке 7 представлены результаты применения всех типов фигур ОРС. Одиночная шина номинальным размером 0,24 мкм (слева) и групповые шины номинальным размером 0,24/0,48 мкм (посередине) получены в едином режиме экспонирования/проявления ($ГР > 0,8$ мкм). Необходимо отметить, что крайняя в группе шина имеет размер, лежащий в заданном допуске.

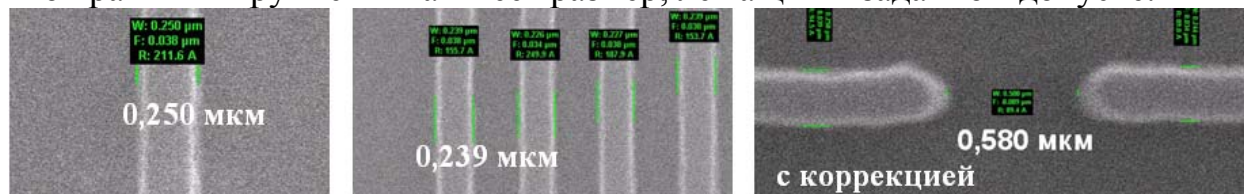


Рис. 7. Результаты применения фигур ОРС

Справа приведены скорректированные окончания одиночных шин, которые также удовлетворяют заданным требованиям, исключая возможность сокращения длины канала МОП транзистора.

Показано, что применение комплекса МПР, позволило эффективно решить проблемы, возникшие при изготовлении поликремниевых затворов с размерами элементов $\leq 0,25$ мкм с использованием проекционной МЛ с $\lambda = 365$ нм.

Четвертая глава посвящена разработке и внедрению методов ОРС в процесс проектирования ФШ с размерами элементов $< \lambda$. Все примеры приведены для наиболее критичного слоя поликремния.

Внедрение разработанного в третьей главе комплекса МПР в процесс проектирования ФШ, когда количество элементов в слое исчисляется десятками миллионов, связано с рядом противоречивых проблем, которые были решены в данной главе. Главу можно разделить на две независимые части:

1. Калибровка и верификация моделей МЛ и травления для критических слоев СБИС, обеспечивающих требуемую точность, стабильность и быстродействие (обработка больших массивов топологических примитивов);
2. Разработка алгоритмов ОРС на основе моделей и на основе правил для критических слоев СБИС и их верификации после введения ОРС;

В результате анализа САПР, способных решать поставленные задачи, были отобраны три САПР ведущих мировых лидеров. В ходе пробной эксплуатации по критериям точности, быстродействия, стабильности, времени пуско-наладочных работ и т.п. была выбрана платформа «Calibre», которая практически является мировым стандартом САПР в области верификации топологии и введения ОРС.

Для разработки моделей были спроектированы 2 комплекта тестовых ФШ. На первом комплекте были размещены калибровочные и верификационные блоки. Основной идеей калибровочного блока является создание ограниченного набора ТС с характерными измеряемыми КЛР, по которому можно сгенерировать модель ТП заданной точности и стабильности.

Проведен анализ достаточности калибровочных данных для обеспечения требуемого уровня точности и стабильности для моделирования рабочих топологий СБИС (методом покрытия пространства оптических параметров). По результатам анализа калибровочная площадка была дополнена.

Второй комплект ФШ был использован для проверки и уточнения разработанных на первом этапе моделей и алгоритмов ОРС. На втором комплекте ФШ были размещены ТС для верификации разработанной процедуры ОРС, два блока статического оперативного запоминающего устройства (СОЗУ) с ОРС и без, а также блоки транзисторов различных типов и размеров с разводкой под электрофизические измерения с ОРС и без.

ТС первого комплекта ФШ были изготовлены по экспериментальному ТП. При разработке модели для слоя поликремния были использованы более 20000 измерений, выполненных на сканирующем электронном микроскопе «NanoSEM3D» компании «Applied Materials». Для повышения истинности измерений, они проводились в 7 различных кристаллах пластины. Расположение кристаллов на пластине и количество пластин для каждого

технологического режима было выбрано исходя из соображений повышения качества статистической обработки результатов измерений. Для повышения точности модели за счет снижения уровня шумов ТП и измерений, проникающих в процесс калибровки, каждой ТС был присвоен весовой коэффициент. Исследованы 3 способа расчета ВК, в том числе в соответствии с предложенной в диссертации весовой функцией:

$$W = f(CD, I_{MAX}, I_{MIN}, SLOPE, K_M, K_S) \quad (5)$$

где I_{MAX} , I_{MIN} и $SLOPE$ – максимальная, минимальная интенсивности и градиент пространственного изображения соответственно, K_M и K_S – коэффициенты, учитывающие тип ТС, возможность их достоверного измерения и результаты статистической обработки полученных измерений. В работе предложены значения K_M и K_S для всех типоразмеров ТС.

Проведено исследование и разработана методика калибровки оптической модели (14 различных подходов, отличающиеся методом расчета ВК, составом оптимизируемых параметров, составом калибровочных и оценочных ТС). Проведено исследование влияния применяемого метода оптимизации параметров оптической модели на ее точность и стабильность.

Проведено исследование и разработана методика калибровки моделей МЛ и травления. Исследованы два подхода, когда процессы МЛ и травления описываются 2-мя различными полиномами, которые калибруются независимо и одним общим полиномом, т.е. менее обоснованная с точки зрения физики модель. Проведено исследование влияния формы и параметров модели, используемых кернфункций, значения собственного вектора, способа расчета ВК на точность и стабильность процессных моделей (более 100 различных подходов).



Рис. 8. Распределение ОРГ при калибровке

На рисунке 8 приведен пример анализа результатов калибровки процессной модели (после травления) – распределение абсолютной ошибки моделирования расположения границы топологической структуры (ОРГ). ОРГ для 97% ТС $\leq \pm 10$ нм, что соответствует $\pm 4\%$ от КЛР, а для одномерных ТС $\leq \pm 6$ нм. Взвешенная среднеквадратичная ошибка ОРГ при калибровке составила 2,51 нм. Увеличение ОРГ на двумерных ТС вызвано снижением их

воспроизводимости, т.к. они подвержены серьезной деструкции в процессе МЛ, когда их КЛР лежат на границе разрешения. В результате деструкции достоверность их измерения ограничена (рис. 9).

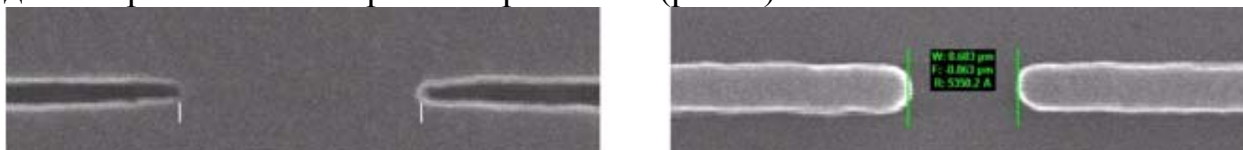


Рис. 9. SEM снимки структур типа «окончания зазоров» (слева) и «окончания шин» (справа)

Верификация модели была проведена в три этапа: сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для ТС, параметры которых лежат за пределами пространства параметров калибровочной площадки (рис. 10); верификация модели по сложным двумерным ТС и верификация по «узким местам» топологий рабочих проектов СБИС.

ОРГ одномерных ТС верификационной площадки составила $\leq \pm 6$ нм. Среднеквадратичная ОРГ при верификации составила 4,74 нм. Последние две группы ТС с заметно большей ОРГ (хотя она и лежит в заданном допуске ± 20 нм) – это ТС типа «окончаний шин» с минимально допустимыми КЛР.

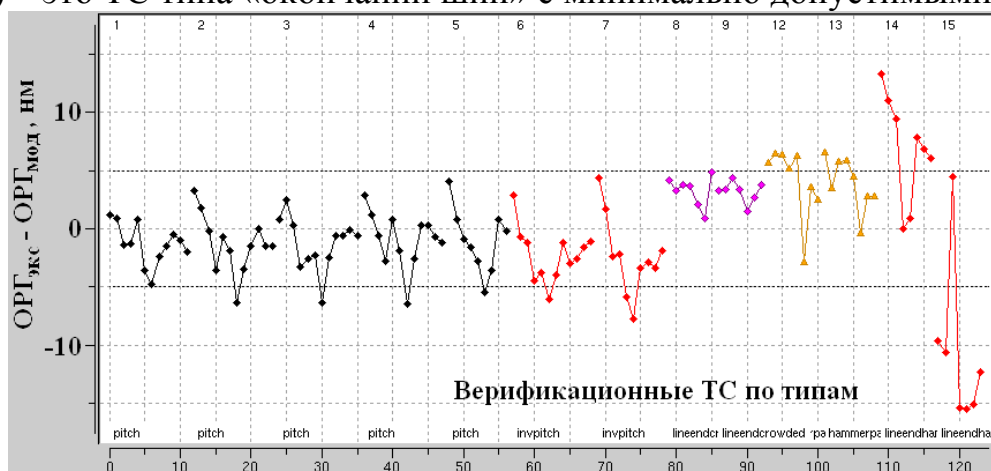


Рис. 10. Распределение ОРГ при верификации

Выявление лучшей модели по значениям среднеквадратичной ошибки не всегда является корректным. При использовании полуэмпирических моделей, калибруемых по ограниченному набору ТС, минимальная ошибка может достигаться при различных сочетаниях калибруемых параметров, ряд из которых может оказаться физических необоснованными. Поэтому были проанализированы получаемые зависимости КЛР для всех типов ТС (рис. 11).

Абсолютная ошибка также не всегда информативна, т.к. ее значение в 5 нм для структуры с КЛР = 250 нм является существенным отклонением, а для структуры с КЛР = 500 нм оказывается на уровне «шума» ТП или измерений.

На рисунке 11 представлен график (левый), на котором для каждой ТС по X отложен результат моделирования, а по Y - результат ее измерения. Идеальная зависимость представляет собой прямую под углом 45° . Приведен

пример зависимости КЛР шины (справа) номинальным размером 0,24 мкм при изменении шага. Черным пунктиром показан размер ТС на ФШ. Для всех моделей рассмотрены зависимости с КЛР = 0,23, 0,24, 0,25, 0,27, 0,28, 0,36, 0,37, 0,38 мкм и шагом групповых структур от 0,6 до 1,8 мкм.

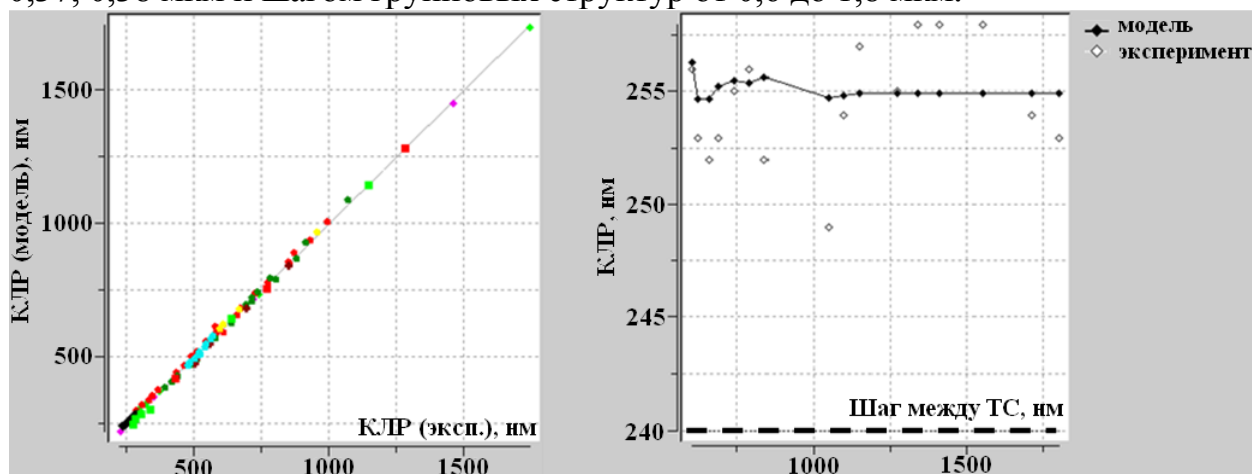


Рис. 11. Пример анализа зависимостей КЛР

Проведена верификация моделей по сложным двумерным ТС (рис. 12), предложен метод экстракции контуров ТС, установлено соответствие алгоритмов измерения САПР «Calibre» и используемого микроскопа. Для процедуры были сняты 23 ТС. Средняя ошибка моделирования, которая оценивалась с шагом 10 нм (18611 точек), составила 9,7 нм.

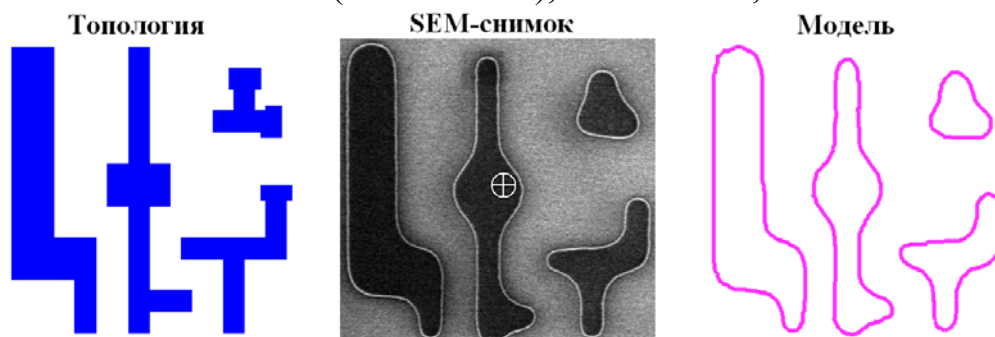


Рис. 12. Пример верификации по сложному топологическому контуру

Проведен сравнительный анализ разработанных моделей по результатам калибровки, всех этапов верификации и зависимостей КЛР. В результате анализа выявлена лучшая модель. Причем ВК ТС этой модели были рассчитаны по предложенной в работе формуле.

В результате проведенного анализа современных МПР, ситуации на рынке полупроводниковых материалов и оснастки, возможностей имеющегося в НИИСИ РАН технологического оборудования и программно-вычислительного комплекса, был предложен комплекс конструкторско-технологических методов, обеспечивающих достижение проектных норм 0,25 мкм (рис. 1).

Предложенный метод коррекции топологии кристаллов является комбинированным: сначала топология обрабатывается «вспомогательными

рассеивающими структурами», после чего критические места корректируются на основе моделей (рис. 13). Для решения поставленных задач такой подход является наиболее целесообразным, как по быстродействию, так и по точности.

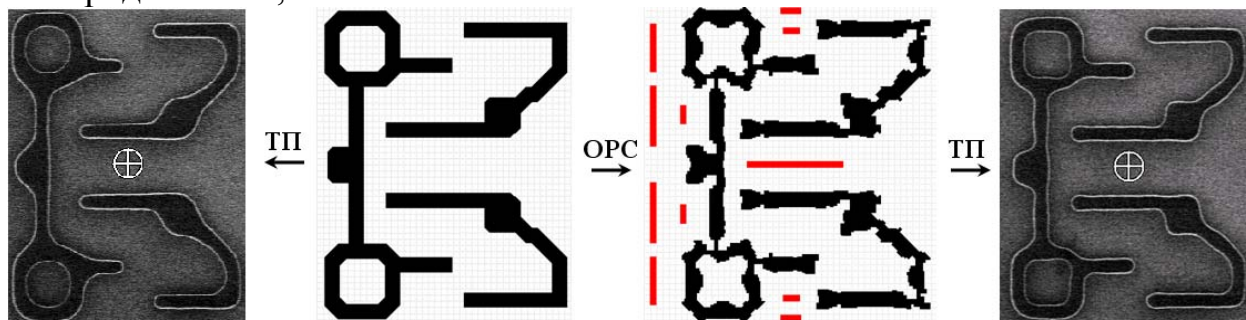


Рис. 13. Фрагменты топологии СОЗУ до, после коррекции и травленные ТС

Эти результаты были заложены во второй комплект ФШ, для которого были разработаны технические требования и компоновочное решение, существенно отличающиеся от предложенного решения для ФШ без фигур ОРС.

Применение разработанного комплекса методов позволило существенно улучшить качество переноса топологии элементов СБИС с проектными нормами 0,25 мкм (рис. 14).



Рис. 14. Фрагменты топологии «Н-транзистора» и травленные ТС с ОРС и без

Затворы нескорректированных «Н-транзисторов» (слева) имеют переменную ширину, а номинальный размер в узком месте (0,29 мкм) превышает номинальный (0,24 мкм), тогда как скорректированные имеют расхождение с исходной топологией менее 8 нм (оценка проведена более чем в 500 точках).

В общих выводах сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен сравнительный анализ методов повышения разрешающей способности процесса проекционной литографии и эффективности их применения при изготовлении СБИС с размерами меньше длины волны экспонирующего излучения.
2. Разработана методика экспериментального определения параметров резистов физических моделей процесса литографии в производственных условиях, позволяющая снизить ошибку моделирования до уровня менее $\pm 5,5\%$ от минимального размера.

3. Экспериментально доказано, что расширение процессных окон (на 65% по глубине резкости и на 73% по диапазону дозы) и повышение точности «переноса» топологии поликремниевых затворов СБИС с размерами 0,25 мкм средствами проекционной литографии с $\lambda = 365$ нм, могут быть достигнуты внедрением методов повышения разрешающей способности при оптимизации процесса литографии посредством физического моделирования.
4. Разработана процедура фильтрации калибровочных данных и предложена формула расчета их весовых коэффициентов, позволяющие повысить точность и возможности по предсказанию полуэмпирических моделей, что особенно важно при коррекции критических слоев СБИС с размерами элементов меньше длины волны источника экспонирующего излучения.
5. Разработана методика калибровки полуэмпирических моделей с переменным порогом чувствительности для критических слоев СБИС с проектными нормами 0,25 мкм, что позволило снизить ошибку моделирования по результатам калибровки и трех этапов верификации до уровня менее $\pm 5\%$ от минимального размера.
6. Разработана процедура коррекции и верификации топологии блоков характеристики ТП и кристалла СОЗУ, выполненных по 0,25 мкм правилам проектирования НИИСИ РАН, что позволило улучшить электрофизические параметры транзисторных структур и повысить процент выхода годных кристаллов СОЗУ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Родионов И.А. Фотолитография в ультрафиолетовом диапазоне длин волн // Научные технологии и интеллектуальные системы 2006: Сборник трудов 8-ой Всероссийской научно-технической конференции. М. 2006. С. 127-135.
2. Родионов И.А. Методы коррекции оптических эффектов близости // Научные технологии и интеллектуальные системы 2007: Сборник трудов 9-ой Всероссийской научно-технической конференции. М. 2007. С. 174-178.
3. Родионов И.А. Анализ динамики развития современного оборудования проекционной литографии // Научные технологии и интеллектуальные системы 2007: Сборник трудов 9-ой Всероссийской научно-технической конференции. М. 2007. С. 210-216.
4. Родионов И.А. Исследование влияния параметров технологического процесса литографии на минимальные критические размеры элементов, получаемых на кремниевой пластине // Научные технологии и интеллектуальные системы 2007: Сборник трудов 9-ой Всероссийской научно-технической конференции. М. 2007. С. 219-224.
5. Родионов И.А., Макачук В.В. Коррекция оптических эффектов близости при проектировании микросхем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2007. №3. С. 30-32.

6. Глушко А.А., Родионов И.А., Макачук В.В. Моделирование технологии изготовления субмикронных КМОП СБИС с помощью систем TCAD // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2007. №4. С.32-34.
7. Родионов И.А. Исследование процесса распределения температуры на поверхности кремниевой пластины в процессе формирования фоторезистивной пленки // Научные технологии и интеллектуальные системы 2008: Сборник трудов 10-ой Международной научно-технической конференции. М. 2008. С. 108-114.
8. Родионов И.А. Исследование влияния введения ОРС фигур на параметры полупроводниковых структур с размерами элементов 0,25 мкм // Научные технологии и интеллектуальные системы 2008: Сборник трудов 10-ой Международной научно-технической конференции. М. 2008. С. 115-120.
9. Родионов И.А. Проектирование СБИС с учетом возможностей технологического процесса // Научные технологии и интеллектуальные системы 2009: Сборник трудов 11-ой Международной научно-технической конференции. М. 2009. С. 135-137.
10. Особенности топологического проектирования субмикронных КМОП СБИС с учетом литографических ограничений / И.А. Родионов [и др.] // Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты: Сб. науч. тр. НИИСИ РАН. М.: РАН, 2009. С. 24-31.
11. Оптимизация плотности заполнения топологии слоев СБИС, направленная на повышение стабильности технологического процесса химико-механической планаризации / И.А. Родионов [и др.] // Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты: Сб. науч. тр. НИИСИ РАН. М.: РАН, 2009. С. 50-55.
12. Родионов И.А., Шахнов В.А. Метод расчета значений весовых коэффициентов топологических структур для калибровки литографических моделей // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Секция: Приборостроение. 2010. Спец. выпуск: Наноинженерия. С. 150-160.
13. Исследование методов калибровки процессных ОРС моделей VT-5 с переменным порогом чувствительности / И.А. Родионов [и др.] // Микроэлектроника. 2010. Том 39, №5. С. 1-13.