

Московский Государственный Технический Университет

им. Н.Э. Баумана

На правах рукописи

Родионов Илья Анатольевич

УДК: 535.853.4

***ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ
I-LINE ДИАПАЗОНА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СБИС
С СУБМИКРОННЫМИ РАЗМЕРАМИ ЭЛЕМЕНТОВ***

А в т о р е ф е р а т

квалификационной работы бакалавра по направлению 551100:

Проектирование и технология электронно-вычислительных средств

Москва – 2006

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете
им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: доцент, кандидат технических наук Макачук В.В.

Научные консультанты:

Амирханов А.В. – руководитель группы отдела проектирования микросхем НИИСИ РАН,
к.ф.-м.н.

Ведущее предприятие: Научно – исследовательский институт системных исследований
Российской Академии Наук (НИИСИ РАН, г. Москва)

Защита квалификационной работы бакалавра состоится 29 июня 2006 года на заседании
Государственной квалификационной комиссии по направлению 220500: «Проектирование и
технология электронно-вычислительных средств» в Московском Государственном
Техническом Университете им. Н.Э. Баумана (ауд. 278).

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба высылать по
адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, ИУ4.

Автореферат разослан «19» мая 2006 г.

Ученый секретарь Государственной квалификационной комиссии по направлению 220500:
«Проектирование и технология электронно-вычислительных средств»
к.т.н., доцент Лавров А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность. Фотолитография, являясь на сегодняшний день одной из наиболее часто и широко используемых в микроэлектронике операций, открывает широкие возможности для получения защитных масок с элементами субмикронного размера и в то же время представляет собой один из наиболее сложных, противоречивых процессов в производстве микроэлектронных компонентов. Несомненно, в связи с бурным развитием технологии вообще, и особенно с приближением к ее физическим границам, фотолитография претерпела значительные изменения, и многие исходные утверждения подверглись значительным корректировкам. Также необходимо отметить, что на данный момент только литография обеспечивает возможность массового производства ИС с минимальными критическими размерами.

Основной идеей любого из видов литографии является получение кислотостойкой двумерной защитной маски на поверхности какого-либо подслоя. Если эта маска будет обладать необходимой конфигурацией, то ее можно использовать как шаблон для локального воздействия на подслоя в ходе следующей технологической операции. Такой операцией могут быть как операции травления подслоя, так и изменения его электрофизических свойств (диффузия, ионная имплантация) и даже нанесения на подслоя следующего слоя (технология взрывной литографии). Для получения такой маски, а также для ее удаления используется целый ряд технических и технологических приемов. Удаление маски после локального воздействия на подслоя и технологию таких воздействий, как правило, выделяют в отдельные технологические операции.

Требуемые размеры элементов в фоторезистивной маске (ФРМ) должны выполняться с учётом технологии последующих обработок ФРМ и технологической коррекции, которая учитывает уход размера в процессе переноса изображения и процессов травления и легирования через сформированную резистивную маску. В процессе травления и легирования технологическим трансформациям подвергается не только технологический слой, но и резистивная маска, что приводит к необходимости учёта трёхмерной конфигурации маски, как при её получении, так и учитывать её стойкость к соответствующим физико-химическим факторам, действующим в процессах травления и легирования. Все основные технологические операции можно разделить на несколько больших групп:

- подготовка поверхностей для предстоящей обработки;
- нанесение слоев (окисление, осаждение, распыление);
- изменение рельефа слоев (травление, планаризация);
- изменение электрофизических свойств слоев (ионная имплантация, диффузия);
- создание маски для последующей локальной обработки (ФЛ);
- вскрытие контактных площадок в слое пассивации готовых микросхем;
- функционального тестирования микросхем на пластине с целью определения их соответствия требуемым рабочим характеристикам (годности) и отбраковки негодных схем;
- сборки микросхем на кристалле в корпус;
- функционального тестирования корпусированной ИМС.

Все технологические операции обработки пластины, кроме ФЛ, воздействуют на всю поверхность пластины одновременно. Но для воспроизведения топологии ИС необходимо воздействовать на предыдущий слой или кремниевую подложку селективно. Поэтому перед выполнением очередной технологической операции ФЛ необходимо формировать защитную маску для предохранения смежных участков пластины от воздействия активного фактора. Таким образом, ФЛ служит инструментом для формирования планарной топологической структуры ИС, и от ее разрешающей способности во многом зависят предельные размеры элементов получаемых изделий. От этого в свою

очередь зависят такие важные потребительские качества ИС как быстродействие и степень интеграции.

Необходимость в создании защитных **масок** для селективной обработки слоев **возникла** вместе с **изобретением ИС**. С конца 1950-х годов и до наших дней удалось **уменьшить** минимальный получаемый **размер** от сотен микрон до десятых и сотых долей микрона. Такое многократное увеличение разрешающей способности ФЛ было бы невозможно без разработки совершенных технологических установок, а, следовательно, и без всестороннего изучения теории используемых физических явлений.

Наиболее быстрыми темпами литография стала развиваться с 1970-х годов. Толчком к этому послужили первые статьи с **математическим описанием** процессов **литографии**. В начале 1970-х годов в **исследовательском центре IBM** в Йорктауне Рик Дилл начал работы по созданию основных **математических уравнений** литографии. В то время работы такого рода воспринимались с большой долей скептицизма, поскольку результаты интуитивной подгонки параметров процесса давали вполне приемлемые для того уровня технологии результаты. Не смотря на такую оценку, результаты этих работ были опубликованы в 1975 году и сейчас широко известны под названием **“Dill papers”**. Таким образом, эти материалы явились первой серьезной попыткой описать литографию с научной точки зрения.

В 1992 году был преодолен барьер в 0.35 мкм, для этого использовалась i-линия ртутной лампы высокого давления с длиной волны 365 нм. Дальнейшее **уменьшение критических размеров** на пластине происходило за счет **сокращения длины волны** источника излучения. В 1996-98 г. в качестве источников излучения начали использовать излучение **эксимерных лазеров** на KrF и ArF, что позволило сократить длину волны излучения до 248 нм и 193 нм соответственно.

Благодаря **переходу** на источники излучения, действующие в спектре **глубокого и экстремального ультрафиолета (УФ)**, с длиной волны 248 нм (эксимерные KrF-лазеры) и 193 нм (эксимерные ArF-лазеры), стало возможным **получать 45-нанометровые** линии, а это уже **четверть длины волны**. При использовании **иммерсионных жидкостей** этот показатель может достигнуть значения в **одну шестую λ** .

Достижение топологических размеров в 100 нм и меньше, потребовало уменьшения длины волны излучения. **Переход** на излучение с длиной волны **157 нм** (эксимерные F-лазеры) пока **не возможен**, т.к. возникают **проблемы** как с **оптикой** для данной длины волны, так и с **источниками излучения**, удовлетворяющими требуемым параметрам (мощность, когерентность, направленность и т.д.). Также существует **проблема** с поиском **ФР**, имеющиеся материалы-кандидаты обладают коэффициентом теплового расширения, в десятки раз большим, чем у кварца, поэтому искажений избежать будет очень трудно. Для масок можно было бы применять особые виды кварца, но приемлемые ФР материалы для излучения с подобной длиной волны пока еще не найдены.

Целью выполнения данной работы **является исследование параметров технологического процесса** проекционной фотолитографии i-line диапазона, влияющих на качество, получаемых на кремниевой пластине структур. **Отработка технологических режимов** процесса **получения скрытого изображения** на фоторезистивной маске с минимальными критическими размерами 500 и 350 нм путем построения процессных окон в пространстве «фокус — доза экспозиции». **Разработка фигур оперативного контроля технологического процесса** проекционной фотолитографии и **методики** их использования.

В работе **рассмотрены математические модели засветки фоторезиста** и изменения **коэффициента отражения** от структуры фоторезист-подложка при сложной структуре последней. Проведен анализ оптических эффектов и основных законов, сопровождающих процесс проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете. Также рассмотрен метод коррекции топологии на фотошаблоне, учитывающий наличие оптических эффектов близости (ОРС).

Разработаны **фигуры контроля разрешения**, точности **совмещения** и проработки **линейных размеров** элементов топологии на кремниевой пластине. Разработана методика использования фигур контроля процесса фотолитографии.

Проведено **исследование влияния** процессных **параметров** на получаемые критические размеры элементов на пластине. **Построены 4 процессных окна** в координатах «фокус — доза экспозиции». В результате анализа процессных окон сформулированы рекомендации по использованию режимов экспонирования для получения оптимальных параметров, получаемых на кремниевой пластине структур.

Как можно видеть даже без пристального изучения вопроса, **литография охватывает очень большой круг технологий**. Поскольку на данный момент субмикронная **фотолитография** занимает одну из **ключевых позиций** в микроэлектронном производстве, то вопросам отработки ее технологии необходимо уделять особое внимание. В настоящее время обойтись без использования глубоких исследований физических процессов и физико-математического моделирования не представляется возможным.

Достаточно большое количество работ посвящено как рассмотрению отдельных явлений возникающих при проведении процессов фотолитографии, так и разного рода оптимизации процесса в целом. Однако подробный анализ этого материала не приводит к созданию общей картины возникающих при практической работе задач и способов их совместного решения. Данная **работа ставит своей целью** получение такой картины и **решения задачи** получения защитной маски с элементами субмикронных размеров обладающей заданными свойствами на заданном материале. **Дополнительным условием является** принципиальная **возможность выполнения работы** в рамках и с **использованием штатного** производственного **оборудования и оснастки**.

Цели и задачи работы: отработка технологических режимов процесса получения изображения на фоторезистивной маске с минимальными критическими размерами 0.5 и 0.35 мкм. Разработка фигур оперативного контроля технологического процесса фотолитографии, отработка методики их использования.

Решаемые задачи: Для достижения поставленных в работе целей решены следующие задачи:

1. исследованы существующие литографические материалы (УФ-резисты, антиотражающие покрытия, травители), оснастка (фотошаблоны) и оборудование (на примере установки проекционной пошаговой мультипликации PAS 5500/250С фирмы ASML, Голландия);
2. разработаны фигуры оперативного контроля технологического процесса фотолитографии при производстве СБИС с проектными нормами 0.5 мкм и 0.35 мкм;
3. спроектированы ФШ с разработанными фигурами;
4. исследованы параметры ТП проекционной фотолитографии путем построения процессных окон в пространстве «фокус — доза экспозиции» и определены оптимальные технологические режимы;
5. проведен анализ результатов исследования и разработаны рекомендации по использованию в ТП производства СБИС фигур контроля качества литографии и оптимальных технологических режимов;
6. проведен анализ возможности получения значений критических размеров элементов ≤ 300 нм на имеющемся оборудовании.

Методы исследования: Для анализа различных режимов работы осветителя установки проекционной пошаговой мультипликации ASML PAS 5500/250С построены процессные окна в пространстве «фокус — доза экспозиции».

Важнейшей технологической характеристикой литографического процесса является ширина процессного окна, т.е. диапазон изменения фокуса и дозы экспозиции, в пределах

которого размер контрольного элемента не выходит за поле допуска. При решении поставленных задач использованы теория экспертных систем и обработки знаний, теория оптимизации, теория вероятностей и математическая статистика.

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций бакалаврской работы подтверждена:

1. результатами экспериментальных исследований;
2. результатами внедрения разработанных методов контроля ТП фотолитографии на фабрике НИИСИ РАН. Полученные экспериментальные образцы получили высокую оценку Министерства обороны РФ;

Полученные в работе результаты наглядно демонстрируют эффективность использования разработанных фигур оперативного контроля ТП и технологических режимов экспонирования для решения задач получения субмикронных размеров (0.35 мкм) на кремниевых пластинах.

Положения, выносимые на защиту:

1. результаты разработки фигур оперативного контроля технологического процесса фотолитографии при производстве СБИС с проектными нормами 0.5 мкм и 0.35 мкм;
2. результаты проектирование ФШ с разработанными фигурами;
3. результаты построения процессных окон в пространстве «фокус — доза экспозиции» и определение оптимальных технологических режимов;
4. рекомендаций по использованию в ТП производства СБИС фигур контроля качества фотолитографии и оптимальных технологических режимов;
5. выводы о возможности получения элементов с критическими размерами ≤ 300 нм на имеющемся оборудовании.

Практическая ценность работы. Разработанные фигуры оперативного контроля ТП позволяют:

1. осуществлять эффективный мониторинг ТП;
2. делать выводы о результатах технологических операций фотолитографии без использования специализированного дорогостоящего измерительного оборудования;
3. сократить время контроля отработки технологических операций – оператор имеет возможность вооруженным глазом оценить проработку минимальных критических размеров, разрешения и рассовмещения по всей пластине при помощи фигур контроля на скрайберных дорожках;
4. проводить отработку параметров ТП.

Результаты данной работы будут использованы для разработки ТП изготовления СБИС по проектным нормам 0.25 мкм. При соответствующей отработке параметров процесса фотолитографии для размеров элементов 500 нм и 350 нм, и установки PAS 5500/250 и накоплении соответствующей статистики, может быть построена модель процесса в САПР PROLIT. Данная работа выполняется с целью отработки ТП и накопления статистических данных. В дальнейшем модель с достаточной степенью точности может быть экстраполирована на проектные нормы 250 нм и ниже. Также подобное моделирование позволит провести экономическую оценку целесообразности перехода на новое оборудование перед использованием более дорогой оснастки (фазосдвигающие шаблоны) и материалов (BARC).

Реализация результатов. Результатами является внедрение разработанных методов контроля ТП фотолитографии на фабрике НИИСИ РАН. Полученные экспериментальные образцы получили высокую оценку Министерства обороны РФ;

Полученные в работе результаты наглядно демонстрируют эффективность использования разработанных фигур оперативного контроля ТП и технологических режимов экспонирования для решения задач получения субмикронных размеров (0.35 мкм) на кремниевых пластинах.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на Международной молодежной научно-технической конференции "Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы", (Москва, 2006).

Публикации. По материалам и основному содержанию работы имеется 2 публикации в научно-технических журналах и трудах конференций и представлены во всемирной сети Интернет на сервере лаборатории «Микроэлектронных и нанотехнологий» кафедры ИУ4 МГТУ им. Н.Э. Баумана (<http://nanotech.iu4.bmstu.ru>).

Структура и объем работы. Бакалаврская работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы 86 страниц, 56 рисунков, список использованных источников из 14 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении освещено современное состояние микроэлектроники и занимаемое проекционной фотолитографией место. Проведен анализ тенденций развития микроэлектроники с учетом роста числа полупроводниковых элементов в современной ЭВА. Рассмотрены темпы роста количества выпускаемых микросхем и снижения их габаритов. Проведен анализ факторов, влияющих на темпы минимизации как компонентов ЭВА, так и ЭВА в целом. Рассмотрены вопросы снижения стоимости ЭВА за счет увеличения темпов роста количества производимых ИМС, т.е. снижения стоимости на элемент, а значит и на функцию. Также рассмотрена возможность достижения физического предела проекционной литографии, проведен анализ конкурирующих технологий, которые могли бы прийти на смену литографии.

В своем первоначальном прогнозе Гордон Мур предположил, что удвоение числа элементов в интегральных схемах будет происходить за счет трех факторов: на 50% – за счет увеличения разрешающей способности литографии; на 25% – за счет увеличения размера кристалла благодаря улучшению производственных процессов и литографии; и на остающиеся 25% – за счет разного рода инноваций, в частности появления новых методов формирования элементов на кристалле (из которых подавляющее число составляют транзисторы).

Основываясь на предположении, что расходы на производство кристалла будут расти медленнее, чем число элементов, Мур указал также, что результатом роста числа элементов на кристалле станет снижение стоимости на элемент. Результирующее экспоненциальное снижение стоимости на функцию и является реальной движущей силой развития полупроводниковой индустрии и информационных технологий в целом. Суть не в постоянстве темпов роста числа элементов, а в том, что темпы увеличения числа элементов (и функций, соответственно) – выше, чем темпы роста стоимости производства кристалла. Темпы удвоения в законе Мура были пересмотрены однажды в прошлом, и могут измениться вновь, но пока стоимость в пересчете на функцию падает, информационная революция будет продолжаться.

Так как в современных схмотехнических решениях основным и самым распространенным элементом является транзистор, поэтому именно стоимость его получения определяет и стоимость технологии в целом. Особенностью транзисторов является то, что их производительность увеличивается одновременно с тем, как стоимость и размеры уменьшаются. Единственное устройство, имеющее такую же особенность при сравнимых темпах уменьшения габаритов – магнитные диски. Современные транзисторы в 20 раз быстрее и в 100 с лишним раз меньше, чем те, что выпускались два десятилетия лет назад. Однако до сих пор не удается точно спрогнозировать, каким будет предельный минимальный размер транзистора, полученного при помощи проекционной фотолитографии (ФЛ). Этот прогнозируемый предел отодвигался все дальше примерно с той же скоростью, с какой уменьшались реальные размеры транзисторов.

Как показало недавнее исследование, проведенное Тауром, темпы роста производительности наиболее часто используемых в настоящее время транзисторов (комплементарные полевые транзисторы, называемые «КМОП») по мере уменьшения их размеров вскоре снизятся. Пути поддержания темпов роста производительности необходимо искать в транзисторах новых типов, в низкотемпературном режиме работы и повышении степени интеграции функций.

Обоснована актуальность темы квалификационной работы бакалавра, определены цели настоящей работы. Рассмотрена научная и практическая значимость полученных результатов. Отмечена острая необходимость в исследовании процесса проекционной фотолитографии, отработке режимов получения защитного кислотостойкого покрытия на кремниевой пластине и разработке фигур оперативного контроля технологического процесса.

В первой главе проведен анализ современных методов проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете. Исследованы характеристики процесса и динамики развития проекционной фотолитографии. Проведено исследование динамики развития литографического оборудования ведущих мировых лидеров (ASML, NIKON). Рассмотрены проблемы и перспективы проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете. Проведен сравнительный анализ современных конкурирующих видов литографии. Рассмотрен один из наиболее перспективных методов повышения разрешения проекционной фотолитографии – иммерсия.

С момента появления литографии в основном ее совершенствование продвигалось по пути уменьшения длины волны экспонирующего излучения. В современной ситуации это невозможно, поэтому прибегают к другим методам совершенствования процесса фотолитографии. При дальнейшем уменьшении размеров элементов мы сталкиваемся с целым рядом проблем, которые свидетельствуют о наступлении предела возможностей современной фотолитографии. Актуальные проблемы фотолитографии:

1. увеличение сопротивления областей транзистора, уменьшить которое легированием уже не представляется возможным;

2. увеличение паразитных емкостей и токов утечки при приближении элементов друг к другу;

3. ярко выраженные эффекты дифракции и аберрации на зеркалах установок, несмотря на то, что они обработаны со средними квадратичными отклонениями не более 0,1–0,3 нм, и совершенством поверхности не хуже, чем $\lambda/20$, что соответствует 0,5 нм.;

4. проблемы создания источников излучения. До сих пор не удалось создать источника излучения с длиной волны 157 нм на эксимерных лазерах. Альтернативой эксимерным лазерам служит построение источника излучения с длиной волны 13,5 нм на EVL лазере. Коротковолновое излучение с длиной волны менее 13 нм уже неперспективно из-за активной генерации рентгеновских фотоэлектронов. Для генерации излучения с длиной волны 13,5 нм сегодня используются двухкомпонентные лазер – плазменные источники, состоящие из мощного YAG лазера (0,1 – 1 ТВт, 1000 нм, 100 Гц) и мишени. Такой источник излучения должен обеспечить необходимые мощность, критерий отдачи, коэффициент «мусорообразования» (debris production DP) и длину волны (13,5 нм), которая является оптимальной для работы с размерами менее 100 нм. Проблема создания EUV лазера в настоящее время не решена. В качестве мишени можно использовать металлические мишени или мишени, представляющие собой сверхзвуковые струи инертных газов, например ксенона, замороженного ксенона и смесей на его основе, или водяных капель. Удар лазера по мишени вызывает в последней интенсивные процессы разрушения – абляции, с переходом вещества мишени в плазменное состояние, которая и является ярким источником EUV излучения (рис.1).

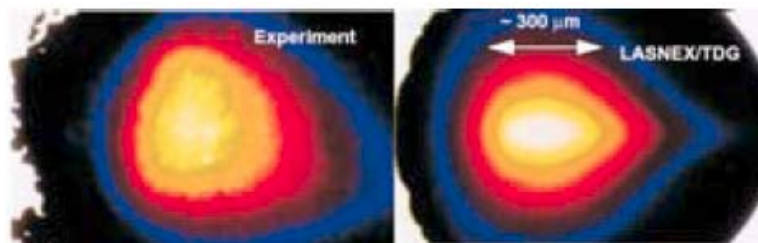


рис. 1. Плазменное облако – источник EUV

Металлические мишени характеризуются высоким коэффициентом отдачи, но и высоким коэффициентом «мусорообразования»: при воздействии лазера на мишени происходит локальное разрушение мишени с образованием кратера, который развивается со скоростью порядка 150 м/с (рис.2), в результате чего частицы мишени попадают на первое зеркало, загрязняя его.

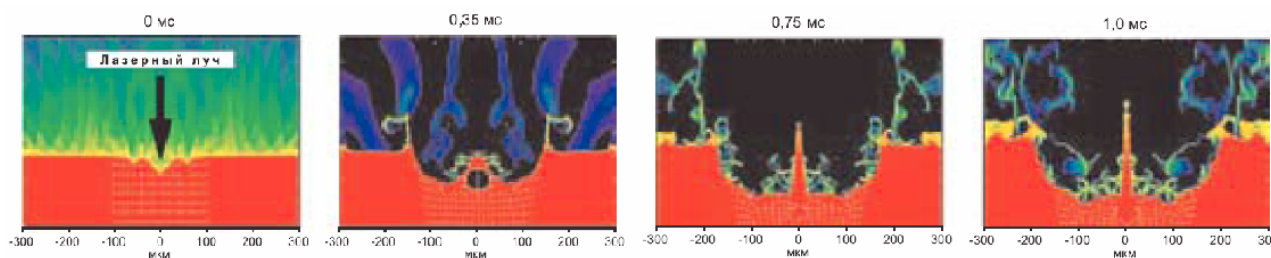


рис. 2. Динамика зарождения кратера на поверхности мишени

Сверхзвуковые струи инертных газов характеризуются практически нулевым DP коэффициентом, но обладают очень малым коэффициентом отдачи, что существенно сокращает область их возможного применения;

5. излучение с длиной волны порядка 13 нм активно поглощается практически всеми материалами и атмосферой в частности, следовательно, возникает проблема создания зеркал для проекционной фотолитографии;

6. вследствие активного поглощения атмосферой необходима организация вакуумированных технологических циклов, что сопряжено с массой трудностей реализации. Демпфирование и амортизация вибраций, создаваемых вакуумными насосами и приводами предметных столов, является очередной конструкторской задачей, при требуемых точностных параметрах совмещения ФШ и пластин;

7. существенно возрастает сложность технологической коррекции, учета эффектов «близости», рельефа подстилающей поверхности и неоднородном отражении от нее, вследствие оптических явлений и неоднородных коэффициентов отражения;

8. экспоненциально растет информационная емкость технологических файлов, их объем достигает сотен Гб.

С момента появления литографии существовали параллельные технологии получения травостойкого покрытия на подложке кремния. Несмотря на столь высокие успехи, достигнутые в оптической литографии, она не является единственным развиваемым в настоящее время направлением. С целью получения экстремально малых размеров ведутся активные исследования в области использования других видов излучения и методов экспонирования.

Хотя за последние 20 лет неоднократно высказывались сомнения в возможности дальнейшего использования оптической проекционной литографии, развитие технологии позволяло расширить предсказанные ранее пределы по разрешению. Там не менее экстенсивный путь развития, связанный в основном с уменьшением длины волны используемого источника излучения, при достижении сегодняшнего значения 193 нм, становится трудно выполнимой задачей. Это заставляет искать принципиально иные методы получения топологического рисунка с размерами элементов менее 100 нм. Такими методами могут стать: рентгенолитография, электроннолучевая литография, SCALPEL, ионно-лучевая литография.

Во второй главе исследованы физические явления и оптические эффекты, сопровождающие процесс проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете. Рассмотрены ограничения процесса проекционной фотолитографии, которые накладывает оптика (дифракционный предел, дифракция, абберация). Проведен анализ операций технологического процесса получения защитного травостойкого покрытия на кремниевой подложке. Рассмотрены законы проекционной фотолитографии и методы коррекции рисунка топологии на ФШ. Представлены математические модели засвечивания ФР и изменения коэффициента отражения от структуры фоторезист-подложка при сложной структуре последней.

При появлении литографии предпочтение отдавалось контактной литографии, т.к. она давала лучшее разрешение. Модификацией этого метода была фотолитография с зазором (Proximity Printing). В этом варианте между шаблоном и пластиной оставался небольшой

зазор. Контактная фотолитография давала большее разрешение, т.к. разрешение фотолитографии с зазором напрямую зависело от размеров зазора:

$$D = k \sqrt{\lambda d_g}$$

где λ — длина волны источника излучения, d_g — зазор между шаблоном и пластиной, а $k=1..2$ — технологический параметр, зависящий от типа ФР и его обработки.

Разрешение фотолитографии с зазором зависит от длины волны излучения, глубины фокуса и т.п. Из оптики известно, что в стандартной проекционной системе, осуществляющей перенос изображения, фокус объектива (f) является функцией диаметра его входного зрачка (D). Числовая апертура объектива (NA) в среде с показателем преломления n определяется как:

$$NA = n \cdot \sin \theta = \frac{D}{2f}$$

Минимальная полоса (зазор), разрешаемая объективом, определяется по критерию Релея:

$$a_{\min} = \frac{K \cdot \lambda}{NA}$$

где λ — длина волны излучения, а коэффициент K определяется уровнем отработки технологии конкретного производства и используемыми материалами.

На практике принимается 3-кратное значение разрешения, определенное по Релею, на длине волны экспонирования. Таким образом, разрешение улучшается при использовании более коротковолнового экспонирующего излучения и объектива с большой числовой апертурой, что влечет интенсивное увеличение дефокусировки, которая обратно пропорциональна квадрату числовой апертуры:

$$D = \pm \frac{\lambda}{2 \cdot NA^2}$$

поэтому предпочтительно добиваться выигрыша в разрешении за счет уменьшения длины волны. Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что применение литографии с зазором дает наилучшие по сравнению с контактной литографией результаты. В общем случае последовательность операций фотолитографии представлена на рисунке 3.

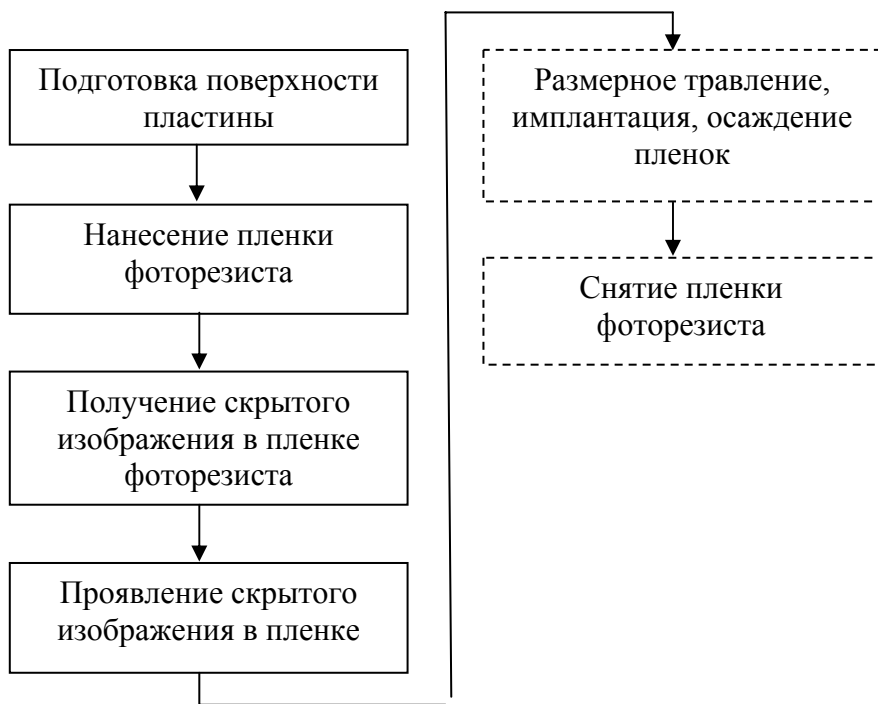


Рис. 3. Общая структурная схема процесса проекционной фотолитографии в технологическом маршруте

Последовательность технологических операций на участке фотолитографии можно описать следующим образом:

- 1) Подготовка поверхности пластины:
 - a) Дегидратация (Prebake)
 - b) Гидрофобизация (Prime)
 - c) Охлаждение пластины (Chill)
- 2) Нанесение фоторезистивной пленки:
 - a) Нанесение пленки фоторезиста (Coat)
 - b) Первая (мягкая) сушка (Softbake)
 - c) Охлаждение пластины (Chill)
- 3) Получение скрытого изображения в пленке:
 - a) Экспонирование (Exposure)
- 4) Проявление скрытого изображения в пленке:
 - a) Постэкспозиционная термообработка, ПЭТ (Post Exposure Bake, PEB)
 - b) Охлаждение пластины (Chill)
 - c) Проявление (Develop)
 - d) Окончательная сушка, задубливание (Hardbake)
 - e) Охлаждение пластины (Chill)

В третьей главе описание установки пошаговой мультипликации ASML PAS 5500/250C (Голландия). Проведен анализ структурной схемы оптической системы и приведены технические характеристики установки пошаговой мультипликации ASML PAS 5500/250C. Проведен анализ системы совмещения установки пошаговой мультипликации ASML PAS 5500/250C.

Установка пошаговой мультипликации ASML PAS 5500/250C - это высокопроизводительная проекционная установка обладающая высоким разрешением. Среди аналогичных установок использующих i-линию излучения ртути эта модель отличается гибкостью настройки большого числа процессных параметров. Высокая производительность обеспечивается мощной ртутной лампой сверхвысокого давления используемой на мощности 2500 Вт, а также оптимизацией алгоритмов работы и устройства всех подсистем позволяющей снизить задержки времени прохождения пластины через установку. Высокое разрешение достигается в первую очередь за счет высококачественной оптики производства Карл Цейс и других важнейших узлов установки (системы совмещения, перемещения координатного стола).

Конструктивно установка выполнена в виде нескольких модулей. Основой главного модуля является массивная стальная рама, непосредственно на которой смонтирована оптическая система. Рама установлена на плиту, имеющую свой фундамент, развязанный от фундамента здания.

Подсистема осветителя включает в себя саму лампу, параболическое зеркало, набор фильтров, а также специальную оптику. Набор линз, называемый *zoom-axicon*, служит для управления конфигурацией луча падающего на шаблон. Используя сервопривод, можно устанавливать в определенных пределах желаемую степень когерентности излучения, а также использовать возможности внеосевого освещения.

Установка позволяет выбирать заданную область фотошаблона для ее последующего экспонирования с помощью специальных шторок. Сам фотошаблон автоматически загружается в установку из специального SMIF-контейнера. Каждый шаблон снабжен штрихкодированной маркировкой, обеспечивающей его автоматическую идентификацию.

Установка обеспечивает 5-и кратное уменьшение изображения находящегося на фотошаблоне. Линзы объектива объединены корпусом, имеющим жесткую герметичную конструкцию. Внутри этого корпуса поддерживается постоянная температура с точностью до 0.01°C . Объектив заполнен газовой смесью гелия и кислорода. Этим обеспечивается точное значение оптического показателя преломления среды и благоприятная для

просветляющего покрытия атмосфера. Используемая оптика объектива позволяет в некоторых пределах менять его числовую апертуру. Изменения числовой апертуры производятся сервоприводом и управляются программно.

Пластина загружается из кассеты, размещаемой во входном порту транспортной подсистемы. Перед ее установкой на стол экспонируемая пластина проходит процедуру предварительного совмещения на дополнительном вращающемся столике. При этом осуществляется ее базирование и определение центра.

После предварительного совмещения пластина переносится на стол экспонирования с ошибкой по координате и развороту не более нескольких десятков микрон. Такая точность необходима для последующей работы основной системы совмещения. Стол экспонирования перемещается по полированной плите на воздушной подушке. Перемещение осуществляется за счет трех ленточных шаговых двигателей. Два двигателя одной из координат позволяют производить разворот стола на небольшие углы путем одновременного перемещения противоположных сторон стола в различных направлениях. Контроль положения стола осуществляется с помощью шести лазерных интерферометров.

Совмещение фотошаблона с пластиной осуществляется с помощью подсистемы совмещения. Описываемая установка использует TTL принцип, т.е. информация о рассовмещении передается в детектор через оптику объектива. Поскольку хроматические aberrации объектива компенсированы на 365 нм, а лазер системы совмещения работает в ИК области, то приходится решать задачу ошибки совмещения вызванной хроматической aberrацией. Более подробно работа системы совмещения описана ниже.

Фокусировка оптики производится с помощью специальной подсистемы датчика уровня. Фокусировка производится в два этапа. На первом этапе используются два луча. Один луч опорный, отраженный под малым углом от поверхности нижней линзы объектива, второй — измерительный, отраженный под тем же углом от поверхности фоторезиста. Два датчика, представляющие собой сдвоенные фотоприемники, контролируют положение отраженных лучей в вертикальной плоскости. Для этой фазы фокусировки используется излучение ИК лазера. Вторая фаза служит для более точной фокусировки и проводится по нескольким точкам поля одновременно. Для этого используется по два луча и счетверенные фотоприемники. В этой фазе применяется ИК излучение широкого спектра. Фокусировка производится перед экспонированием каждого кадра.

Экспонирование ведется по оптимальному алгоритму обхода пластины с учетом доступности в текущий момент информации от датчика уровня. На крайних кадрах один из лучей датчика уровня может выйти за пределы пластины, тогда этот кадр будет проэкспонирован лишь после того, как будут проэкспонированы соседние кадры. Во время их экспонирования система собирает статистическую информацию по профилю поверхности пластины и делает прогноз для введения поправки на работу системы фокусировки при отработке крайнего кадра с неполной информацией от датчика уровня. Во время экспонирования одной пластины, следующая проходит процедуру предварительного совмещения. Это значительно повышает производительность установки.

Основной модуль установки, содержащий всю оптику и механику по управлению пластинами и шаблонами, а также часть электроники, полностью закрыт лицевыми панелями. Это служит для защиты установки от случайных повреждений и частиц, содержащихся в воздухе. Кроме того, открытое мощное УФ излучение могло бы принести к существенным повреждениям зрения. Поскольку под панелями находится большое количество источников тепла, а также по соображениям обеспечения стабильной работы интерферометров и механики и недопущению термического расширения кремниевых пластин, воздух внутри установки кондиционируется. Для этой цели используется отдельная стойка с водяным теплообменником, мощным вентилятором и термоконтроллером. Температура внутри установки поддерживается с точностью 0.1°C. Ртутная лампа выделяет очень большое количество тепла, поэтому ее параболическое зеркало снабжено трубками водяного охлаждения, а сама лампа постоянно обдувается сильным воздушным потоком.

В четвертой главе приведены результаты разработки фигур оперативного контроля ТП и методики их применения. Исследовано влияние процессных параметров на получаемый CD. Приведены результаты построения процессных окон в пространстве «фокус — доза экспозиции» и сформулированы рекомендации по использованию режимов экспонирования.

В работе использовался позитивный среднеконтрастный фоторезист ультравысокого разрешения фирмы ТОК, Япония THMR-iP3650 HP. Этот слабвязкий резист предназначен для формирования масок толщиной порядка 0.8 мкм и предельными размерами элементов < 300 нм при экспонировании излучением i-линии ртутной лампы сверхвысокого давления. Исходные данные для проведения эксперимента приведены в таблице 1.

Сушка ФР была проведена при 90оС с выдержкой 60 секунд, задубливание – при 110оС с выдержкой 60 секунд. Для операций подготовки поверхности пластин, нанесения и проявления фоторезиста использовались треки Millennium 2000 фирмы SITE Service Inc..

Засветка ФР была проведена на установке пошаговой мультипликации ASML 5500/250 (Голландия) с числовой апертурой, изменяемой в пределах 0.48 – 0.6.

Для проведения эксперимента были подготовлены две пластины с толщинами фоторезиста соответствующими минимуму (пластины №1 и №2) и максимуму (пластины №3 и №4) колебательной кривой. На каждой из пластин был дважды выполнен стандартный тест для экспонирования матрицы «фокус — доза экспозиции» (FEM).

Первый тест выполнялся с использованием осевого освещения (степень когерентности, $\sigma=0.70$), второй раз — с использованием параметров внеосевого освещения, рекомендованных в статье [10] (внеосевое освещение, $\sigma_{in}=0.35$ и $\sigma_{out}=0.70$). С целью получения минимально достижимых на установке размеров, значение числовой апертуры было выбрано максимально возможным для данного степпера ($NA=0.60$).

Таблица 1. Исходные данные эксперимента по нахождению процессных окон «фокус — доза экспозиции»

№	Толщина, А	СКО, А	Диапазон, А	Плоскост-ность, мкм	σ_{in}	σ_{out}
1	7151	31,3	97	0,44	0	0,7
2				0,44	0,35	0,7
3	7615	32,1	100	0,21	0	0,7
4				0,23	0,35	0,7

Пластины были проявлены по стандартному режиму проявления. Измерение размеров элементов матриц на проявленных пластинах проводилось по контрольной мере 300 нм с помощью сканирующего электронного микроскопа (рис. 4). В результате были получены четыре процессных окна.

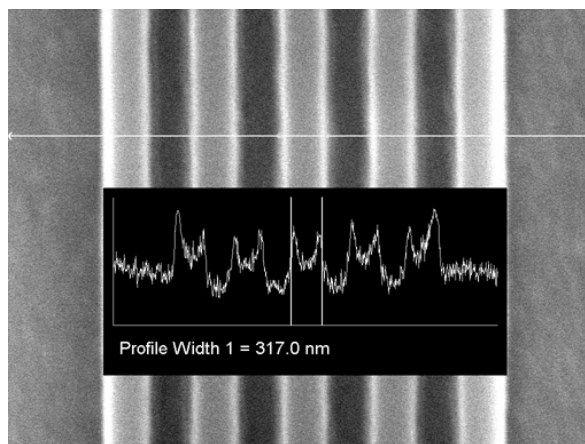


Рис. 4. Измерение контрольной меры 300 нм с помощью сканирующего электронного микроскопа (LEO 1455VP, 30kx)

В таблице 12 приведены процессные характеристики найденные, по процессным окнам. E_S — доза необходимая для проработки номинального размера, E_1 — диапазон дозы удовлетворяющий 10% отклонению размера от номинала. Абсолютное значение фокуса f

привязано к настройкам конкретной установки, величина дефокусировки определяется диапазоном, удовлетворяющим 10% отклонению размера от номинала и качественной проработкой элементов микроструктуры.

Таблица 12. Характеристики найденные по процессным окнам

№	E_s , мДж/см ²	E_l , мДж/см ²	E_l , %	f , мкм	Δf , мкм
1	170	25	14,7	-0,6	1,1
2	165	20	12,1	-0,4	1,3
3	220	90	40,9	-0,5	1,2
4	220	40	18,2	-0,5	1,4

Использование внеосевого освещения показало более высокий потенциал для получения размеров < 300 нм, чем осевое освещение. При использовании внеосевого освещения глубина фокуса возросла на 15%. Однако 15%-ное увеличение глубины фокуса повлекло 50%-ное сокращение ширины процессного окна, для случая максимального поглощения излучения (пластины №1 и №2).

Тем не менее, 18% ширина процессного окна (пластина №4, внеосевое освещение, максимум коэффициента отражения, максимум значения глубины фокуса) может считаться вполне достаточной и, в случае работы по рельефной подложке. Внеосевое освещение может использоваться для обеспечения максимально высокой глубины фокуса без уменьшения апертуры оптической системы.

В результате эксперимента была подтверждена возможность получения структур с критическими размерами 300 нм путем настройки процессных параметров (без введения ОРС). Для получения меньших критических размеров при равномерной проработке изолированных и плотно упакованных структур по всей поверхности кремниевой пластины, необходимо введение ОРС элементов.

Полученные результаты справедливы для конкретного ТП, так как процессные параметры оригинальны и изменяются даже для двух установок пошаговой мультипликации одной модели. Процессные параметры могут быть изменены инженером-технологом при помощи модуля управления установкой пошаговой мультипликации, тогда как процесс реинжиниринга ФШ, т.е. введение правил проектирования ФШ с использованием ОРС коррекции и их применение – это долгий итерационный процесс. Поэтому актуальность и экономическая целесообразность проведенных исследований очевидны.

Результаты работы. В результате проведенных исследований был отработан базовый технологический процесс получения поликремниевых затворов шириной 350 нм на оборудовании, использующем i-линию ртути ($\lambda=365$ нм). Введение ОРС коррекции для данного ТП не потребовалось. Поэтому мы считаем, что при введении фигур коррекции оптических эффектов близости, возможно получение меньших размеров (275 нм, 250 нм, 180 нм) с использованием имеющегося оборудования

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. По результатам исследований была произведена отработка технологических режимов процесса получения изображения на фоторезистивной маске с минимальными критическими размерами 500 и 350 нм с использованием установки пошаговой мультипликации ASML PAS 5500/250C;
2. Разработаны фигуры оперативного контроля технологического процесса фотолитографии при производстве СБИС с проектными нормами 500 и 350 нм;
3. Разработаны методика применения фигур оперативного контроля технологического процесса фотолитографии при производстве СБИС с проектными нормами 500 и 350 нм;
4. Исследованы параметры ТП проекционной фотолитографии путем построения процессных окон в пространстве «фокус — доза экспозиции»;

5. Проведен анализ результатов построения процессных окон в пространстве «фокус — доза экспозиции» и разработаны рекомендации по использованию в ТП производства СБИС фигур контроля качества литографии и оптимальных технологических режимов;
6. Проведен анализ возможности получения значений критических размеров элементов ≤ 300 нм с использованием установки пошаговой мультипликации ASML PAS 5500/250C;
7. Исследованы основные закономерности и математические модели засвечивания ФР и изменения коэффициента отражения от структуры фоторезист-подложка при сложной структуре последней;
8. Исследована вероятность достижения предела возможностей проекционной фотолитографии с учетом достигнутого уровня развития оптики, лазерной техники и возможных методов усовершенствования процесса;
9. Проведен сравнительный анализ конкурирующих перспективных методов литографии.

Результатами бакалаврской работы является внедрение разработанных методов контроля ТП фотолитографии на фабрике НИИСИ РАН. Полученные экспериментальные образцы получили высокую оценку Министерства Обороны РФ.

Полученные в работе результаты наглядно демонстрируют эффективность использования разработанных фигур оперативного контроля ТП и технологических режимов экспонирования для решения задач получения элементов с субмикронными размерами (350 нм) на кремниевых пластинах.

Основные положения квалификационной работы изложены в следующих работах:

1. Родионов И.А. Фотолитография в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. // 8-ая Молодежная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2006». 19-20 апреля 2006 г. – М.: издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006, с. 127-135.