

Оглавление

ГЛАВА 4. МИКРОЛИТОГРАФИЯ	1
4.1 Фотолитография	1
4.1.1 Схема фотолитографического процесса	2
4.1.2 Фоторезисты	4
4.1.3 Фотошаблоны	9
4.1.4 Технологические операции фотолитографии	10
4.2. Химико-механическая планаризация	15
4.3 Рентгенолитография	19
4.4 Электронолитография	22

ГЛАВА 4. МИКРОЛИТОГРАФИЯ

4.1 Фотолитография

Литография - технологический метод, предназначенный для формирования на подложке топологического рисунка микросхемы с помощью чувствительных к излучению покрытий. По типу излучения литографию делят на оптическую (фотолитографию), рентгеновскую и электронную. В фотолитографии используют ультрафиолетовое излучение с длиной волны от 200 до 450 нм, в рентгенолитографии - мягкое рентгеновское излучение с длиной волны 0,5 - 1,5 нм и в электронолитографии - электронное излучение с длиной волны 0,01 нм. Чем меньше длина волны излучения, тем меньшие размеры элементов рисунка, ограничиваемые эффектами дифракции, возможно получить. Фотолитография характеризуется минимальным размером элементов, равным 0,2 мкм, рентгенолитография обеспечивает размер 0,05 мкм, электронолитография - до 0,001 мкм. Эти цифры относятся к предельным показателям; реально достижимые технологические нормы для фотолитографии, например, намного отличаются от предельных; в настоящее время для фотолитографического процесса принимают минимальные размеры 0,5 - 0,8 мкм.

Материалы, чувствительные к излучению, называют соответственно фото-, рентгено- и электронорезистами. Это в основном полимерные

материалы, устойчивые к воздействию травителей, плазмы и другим. Резисты делят на два класса - негативные и позитивные. У негативного резиста в результате воздействия излучения (экспонирования) уменьшается растворимость полимера, его молекулы сшиваются поперечными цепочками. Если подложку, покрытую негативным резистом, опустить в растворитель, то неэкспонированные участки вымываются, а экспонированные образуют рельеф или резистивную маску заданной конфигурации. Позитивные резисты, напротив, после экспонирования приобретают повышенную растворимость; на подложке остается рельеф из неэкспонированных участков. В фото-, рентгено- и иногда электронолитографии применяют шаблон - стеклянную или кремниевую (в рентгенолитографии) пластину с нанесенным на ней топологическим рисунком, непрозрачным для используемого излучения. При экспонировании рисунок шаблона передается на слой резиста, чтобы после проявления воплотиться в виде защитного рельефа. В электронолитографии применяется и другой способ: "вычерчивание" требуемой конфигурации сфокусированным электронным лучом. Луч сканирует по подложке, экспонируя в нужных участках резист, шаблон при этом не нужен, информация о топологии поступает непосредственно из управляющей лучом ЭВМ. В фотолитографии передача рисунка с фотошаблона на слой фоторезиста осуществляется либо при непосредственном контакте (контактная фотолитография), либо проецированием его в различных (от 1:1 до 10:1) масштабах через высококачественный объектив (проекционная фотолитография).

4.1.1 Схема фотолитографического процесса

В технологии ИМС с помощью фотолитографии формируется рисунок топологического слоя. В контактной фотолитографии используются два метода: прямой и обратный. Они позволяют создать рисунок в пленках металла и диэлектрика или в объеме подложки, например, вытравливанием углублений в кремнии. Основные достоинства фотолитографии:

- гибкость, т.е. простой переход от одной конфигурации к другой путем смены фотошаблонов;
- точность и высокая разрешающая способность;
- высокая производительность, обусловленная групповым характером обработки, когда на пластине одновременно формируют от десятка до нескольких тысяч структур будущей ИМС;

- универсальность, т.е. совместимость с разнообразными технологическими процессами (маскированием при травлении, ионным легированием, электрохимическим осаждением и др.).

В технологический цикл прямой фотолитографии входят следующие операции:

1) обработка подложки - очистка от загрязнений и увеличение адгезии наносимого фоторезиста к поверхности;

2) нанесение слоя фоторезиста;

3) ИК сушка слоя фоторезиста;

4) экспонирование через шаблон с топологическим рисунком; если фотошаблонов несколько (комплект), то перед экспонированием выполняют совмещение рисунка очередного фотошаблона с рисунком, оставшимся на подложке от предыдущего фотошаблона;

5) проявление и образование рельефа из резиста (маски), повторяющего рисунок шаблона;

6) ИК сушка рельефа из резиста.

Дальнейшая последовательность операций зависит от поставленной цели и связи с другими технологическими процессами. Обычно следует:

7) травление окисной маски. Заключительной операцией прямой фотолитографии является удаление рельефа из резиста после того, как он выполнил свою роль.

Процесс обратной фотолитографии на примере формирования металлической разводки включает:

1) создание рельефа из фоторезиста; при этом используются первые пять операций прямой фотолитографии;

2) напыление на рельеф из фоторезиста слоя металла;

3) удаление рельефа с участками металла ("взрыв") в растворителе, не влияющем на металл.

Обратная фотолитография обычно применяется в двух случаях:

- материал подложки не травится вообще или травится в составах, которые не выдерживает резист (например, керамическая подложка, травление золота в царской водке);

- подложка представляет многослойную тонкопленочную структуру, а процесс травления неселективен, т.е. при травлении верхнего слоя процесс не прекращается на поверхности нижележащего слоя.

Прежде чем рассмотреть подробно технологический цикл фотолитографии необходимо ознакомиться с характеристиками фоторезистов и изготовлением фотошаблонов.

4.1.2 Фоторезисты

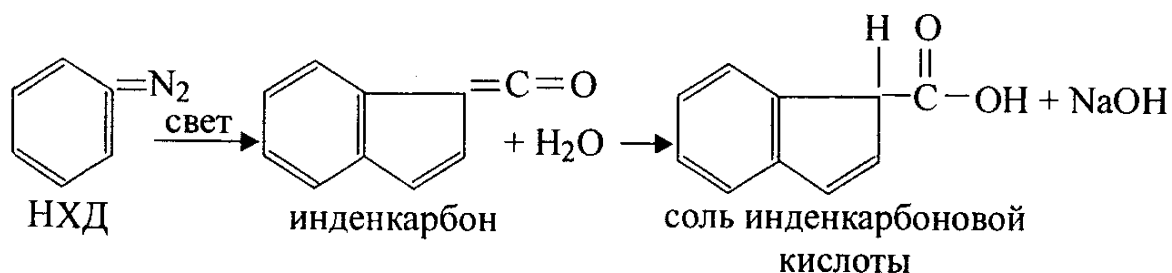
Фоторезисты - сложные полимерные композиции, в состав которых входят светочувствительные и пленкообразующие компоненты, растворители, некоторые добавки, улучшающие адгезию слоя резиста к подложке, повышающие светочувствительность и кислотостойкость или щелочестойкость.

Светочувствительные компоненты, как правило, содержат ненасыщенные двойные связи, рвущиеся при поглощении энергии фотонов.

Позитивные фоторезисты

Образование рельефа при использовании позитивных резистов основано на процессе фотолитиза светочувствительных соединений с последующим образованием растворимых веществ. Большинство позитивных резистов получено на основе нафтохинондиазида (НХД) - мономера, образующего в результате фотолитиза соединения, растворимые в щелочи. НХД не дает пленок, поэтому он прививается на пленкообразующие смолы. Наилучшими из них считаются фенолформальдегидные смолы - новолачные или резольные (полимерная компонента), обладающие наибольшей кислотостойкостью.

Новолачные и резольные смолы растворяются в слабых щелочах. Молекулы НХД скрепляют их, препятствуя смачиванию резиста раствором щелочей. Однако после облучения ультрафиолетовым светом молекулы НХД перестраиваются, теряя азот (рвется связь C-N); в результате взаимодействия с водой и щелочью образуются растворимые соли инденкарбоновой кислоты.



Экспонированные участки фоторезиста вымываются щелочным проявителем. В местах, не подвергавшихся облучению, молекулы НХД защищают фоторезист от действия проявляющего раствора.

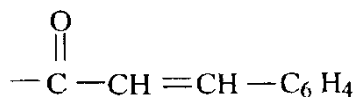
В промышленности используются позитивные фоторезисты AZ-1350, ФП-383 на основе бромированной фенолформальдегидной смолы и ФП-РМ-7 на основе резольной и новолачной смол. Последний обладает повышенной кислотостойкостью.

Негативные фоторезисты

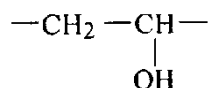
Свойства негативных фоторезистов определяют две группы фотохимических реакций:

- фотополимеризация с образованием нерастворимых участков (на основе коричной кислоты и поливинилового спирта);
- сшивка линейных полимеров радикалами, образующимися при фотолизе светочувствительных соединений (на основе каучука с добавлением светочувствительных веществ - бисазидов).

Большинство негативных резистов используют первую группу фотохимических реакций, это резисты на основе поливинилциннамата (ПВЦ). Циннамоильная группа (эфир коричной кислоты),

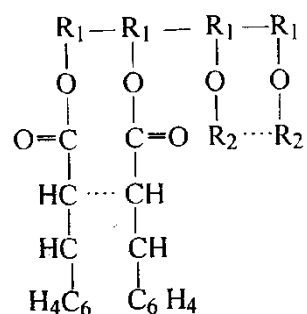


условно обозначаемая R_2 , замещает водород в гидроксильной группе, входящей в состав винилового спирта R_1 :



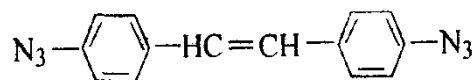
Поливинил - цепочка из нескольких R₁

Под действием света рвется двойная связь в циннамоильной группе и молекулы циннамата сшиваются, образуя длинные цепочки:



При этом число прореагировавших молекул пропорционально числу поглощенных фотонов. Однако энергии излучения часто бывает недостаточно для эффективной сшивки, поэтому добавляются сенсibilизаторы, поглощающие энергию излучения и передающие ее другим молекулам. ПВЦ обладает сравнительно невысокой кислотостойкостью из-за входящей в его состав гидроксильной группы.

Другая группа фоторезистов включает светочувствительные вещества на основе diaзосоединений, например diaзостильбена:



В результате облучения от diaзостильбена, играющего роль инициатора, отрывается азот. Две свободные связи - два электрона азота - разрывают двойную связь C=C в циклокаучуке и сшиваются с ним: инициатор проницает каучук, вступая с ним в химическую реакцию и образуя жесткую трехмерную сетку.

Проявление рельефа осуществляется в органических растворителях. Фоторезисты на основе циклоаучука имеют повышенную кислотостойкость, позволяющую травить кремний глубиной до 100 мкм.

Промышленность использует негативные резисты на основе ПВЦ марок ФН-3Т, ФН-5Т и на основе циклоаучука марок ФН-11, КМЕР (фирмы Kodak) и другие.

Основные свойства фоторезистов

Светочувствительность $S = 1/H$ - величина, обратная экспозиции H , требуемой для перевода фоторезиста в растворимое или нерастворимое состояние (в зависимости от того, позитивный резист или негативный). Светочувствительностью определяются производительность процесса фотолитографии и выбор оборудования. Например, необходимость использования ртутных ламп вызвана тем, что максимум спектральной чувствительности резистов лежит в области ближнего ультрафиолета. Светочувствительность измеряется в единицах эрг·л·см².

Разрешающая способность $R = N/2^l$ - уместяющееся на 1 мм число N полос фоторезиста, разделенных промежутками такой же ширины l . Часто используется термин "выделяющая способность", т.е. способность передавать отдельные малые размеры. Разрешающая или выделяющая способность зависит от многих технологических факторов; конечная задача сводится к получению резкодифференцированной границы между неэкспонированным и экспонированным участками слоя резиста, минимально изменяющейся при проявлении и термообработке.

Необходимо различать разрешающую способность фоторезиста и процесса фотолитографии в целом. Так, при разрешающей способности резиста до 1000 лин/мм разрешающая способность процесса не будет превышать 500 - 600 лин/мм из-за искажения рисунка вследствие различных физических эффектов, возникающих при экспонировании. В результате при контактной фотолитографии на границе рисунка образуется небольшой "ореол" сшитого (или, напротив, вытравленного) резиста (рис.4.1). После проявления он остается лишь на участке, непосредственно прилегающем к пластине. Это наиболее значительно уменьшает разрешающую способность негативных резистов. Позитивные резисты при проявлении размягчаются и "прилипают" к подложке в подтравленных местах, залечивая их.

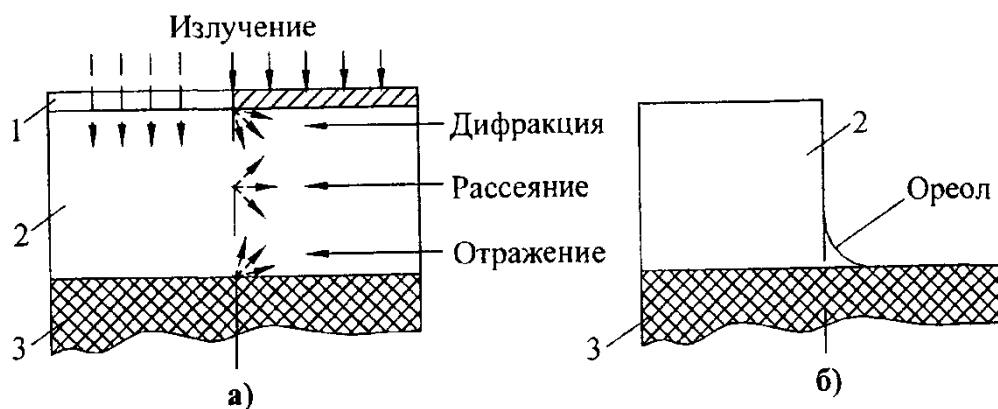


Рис.4.1. Влияние излучения на точность передачи размера

рисунка: а - рассеяние света на границе освещенного

и неосвещенного участков фоторезиста;

б - появление "ореола" при использовании

негативного фоторезиста. 1 - фотошаблон,

2 - фоторезист, 3 – подложка

Стойкость к воздействию агрессивных факторов - понятие, как правило, не поддающееся общим определениям; в частном случае может означать величину, пропорциональную времени отслаивания пленки фоторезиста в используемом травителе или времени проникновения травителя сквозь поры пленки фоторезиста к подложке. Измеряется в секундах или минутах. В последнее время стойкость пленки фоторезиста все чаще характеризуют плотностью дефектов, передающихся при травлении на подложку (дефект/мм²). Для позитивных фоторезистов указывают обычно важный параметр: устойчивость к воздействию стандартного проявителя, которая измеряется в минутах (до момента разрушения слоя) и должна быть, по крайней мере, на порядок выше времени проявления. Кислотостойкость k можно оценить также по величине бокового подтравливания x под фоторезист при глубине h травления подложки: $k = h/x$. Стойкость к агрессивным средам существенно зависит от адгезии фоторезиста к подложке. Очевидно, что величина подтравливания x при высокой адгезии минимальна.

Стабильность эксплуатационных свойств фоторезистов во времени выражается сроком службы при определенных условиях хранения и использования. Ее обеспечение - одна из важнейших проблем.

4.1.3 Фотошаблоны

Фотошаблоны - наиболее ответственная составляющая фотолитографического процесса. Заменяя один фотошаблон на другой, можно быстро найти оптимальный технологический режим, обеспечить получение весьма малых размеров, сменить один тип резиста на другой, более подходящий, ввести плазменную обработку вместо химического травления и т.д. Комплект фотошаблонов изготавливается в течение недель и месяцев, стоимость его (для сложных БИС) составляет несколько сотен тысяч рублей.

Для изготовления фотошаблонов может использоваться оптико-механический способ. Изготовление комплекта ИМС начинается с разработки чертежей топологических слоев будущей ИМС в масштабе, например 1:1000, и составления задания на комплект.

Задание содержит:

- указания о типе шаблонов; шаблоны делятся на два типа: с прозрачными элементами на темном поле и с темными элементами на светлом поле. Такое деление имеет значение для процессов уменьшения и мультиплицирования, поскольку от типа шаблона зависят условия экспонирования;
- информацию о мультипликации, в которой, помимо количества мультиплицированных структур, указываются пропуски структур для совмещения и контроля, а также другие непериодические изображения (тестовые структуры);
- контрольную информацию, состоящей из задающей и методической. Задающая информация указывает, каким образом выполняются отметки совмещения и обязательные для сложных приборов тестовые структуры, позволяющие проверять разрешающую способность процесса фотолитографии, технологические параметры (поверхностное сопротивление, дефекты окисла) и электрические параметры прибора. Методическая информация содержит указания о методике и критериях контроля характеристик изготовленных шаблонов: размеров, совмещаемости, критических областей, дефектов и т.д.

Сложная топология каждого уровня переводится в увеличенный оригинал. Оригиналы уменьшаются до размера, в десять раз превышающего размер стеклянной основы шаблона. Затем с использованием фотонаборного генератора изготавливают первичный фотооригинал (ПФО), который фотоповторителем уменьшается до масштаба 1:1 и проецируется на стеклянную пластинку со слоем хрома или окисла железа с нанесенной поверх него пленкой фоторезиста. Стол фотоповторителя перемещается на нужный шаг, обеспечивая многократный перенос изображения на фотошаблон. Точность перемещения координатного стола фотоповторителя $\pm 0,2$ мкм. Каждый элемент содержит полную топологию схемы, соответствующую данному уровню шаблона.

Проектирование шаблонов с помощью увеличенного оригинала просто, но для создания СБИС непрактично. В настоящее время разработаны интерактивные графические системы машинного проектирования. Эти системы выдают выходные результаты в виде цифровых данных, записанных на магнитном носителе. С помощью этих данных идет управление генератором изображений, формирующим топологический рисунок в масштабе 1:1 или 10:1. Рисунок на шаблоне выполняется с помощью электронного луча, позволяющего получить субмикронные размеры элементов топологии схемы.

Используются фотошаблоны трех типов: эмульсионные, металлизированные (обычно применяется хром) и полупрозрачные, в которых рисунок создается в слое окисла железа (иногда окиси хрома). Наиболее дешевы эмульсионные шаблоны, но они имеют низкое разрешение и быстро изнашиваются. Вследствие этого в промышленном производстве они практически не применяются.

4.1.4 Технологические операции фотолитографии

Процесс фотолитографии начинается с обработки поверхности подложек, т.е. того слоя интегральной структуры, по которому создается рисунок. Чаще всего это слои трех типов: двуокись кремния, примесносиликатные стекла (фосфоро- и боросиликатные), пленки металлов.

На окисленные подложки, полученные термическим окислением в сухом кислороде или парах воды, фоторезист лучше всего наносить сразу (в пределах часа) после окисления без каких-либо дополнительных обработок. Если подложки долго хранились или окисел с самого начала был гидрофильным, желательна термообработка.

Фосфоросиликатные стекла в отличие от двуокиси кремния имеют резковыраженную гидрофильную поверхность, поэтому качество фотолитографии на них намного хуже.

Хорошие результаты дает обработка фосфоросиликатных стекол в растворах органохлорсиланов - фенилтрихлорсилане или диметилдихлорсилане.

Контактная фотолитография

Нанесение слоя резиста. Наиболее распространенным методом нанесения фоторезиста на подложки является центрифугирование: при включении центрифуги жидкий фоторезист растекается под действием центробежных сил. При центрифугировании на краю подложки всегда возникает утолщение - "валик", ширина и высота которого зависят от вязкости резиста, скорости вращения центрифуги и формы подложки. В слое, нанесенном на центрифуге, всегда есть внутренние напряжения, плотность дефектов довольно высока, в частности, из-за того, что пыль из окружающей среды засасывается в центр вращающегося диска.

Первая сушка при температурах 80 - 90 °С заканчивает формирование слоя фоторезиста. При удалении растворителя объем полимера уменьшается, слой стремится сжаться, но жестко скрепленная с ним подложка препятствует этому. Величина и характер возникающих напряжений определяются свойствами фоторезиста и режимами сушки, в частности, приближением к температурному интервалу пластичности полимера. Обычно используют ИК сушку.

Экспонирование (совмещение) и проявление неразрывно связаны между собой. В силу этого для выбора режимов, обеспечивающих точную передачу размеров, необходимо одновременно изменять время проявления и время экспонирования. На практике, однако, часто пользуются методом подбора оптимального значения одного параметра при фиксации другого.

Для любого типа резистов снимают зависимости точности передачи размеров изображения от времени проявления при фиксированном времени экспонирования и от времени экспонирования при фиксированном времени проявления. В результате находят оптимальные времена, соответствующие точной передаче размеров.

Проявление. Для проявления позитивных резистов используют водные щелочные растворы: 0,3 - 0,5%-ный раствор едкого кали, 1 - 2%-ный раствор тринатрийфосфата, органические щелочи - этаноламины. При проявлении очень важно контролировать температуру и величину pH проявителя.

При изменении величины pH всего лишь на десятую долю размер элемента меняется примерно на 10 % от номинала. Для проявления негативных фоторезистов используются органические растворители.

Сушка проявленного слоя проводится при температурах 140 - 180 °С. От характера изменения температуры во время сушки зависит точность передачи размеров изображений. Резкий нагрев вызывает оплывание краев, поэтому для точной передачи малых (1 - 2 мкм) размеров следует применять плавное или ступенчатое повышение температуры. Примерный режим сушки позитивного резиста ФП-383: 10 - 15 минут при комнатной температуре, 20 - 25 минут в термостате при 120 °С, затем переключение термостата и нагревание до 150 - 160 °С.

Травление чистой и легированной двуокиси кремния, а также примесносиликатных стекол с защитой рельефом из резиста осуществляется в буферных травителях, состоящих из 1 - 2 частей плавиковой кислоты и 8 - 9 частей 40%-ного водного раствора фтористого аммония. Окисел, легированный бором, травится почти с той же скоростью, что и нелегированный, и только у самой границы с кремнием скорость возрастает. Наоборот, легированные фосфором окислы травятся сначала гораздо быстрее, затем скорость травления уменьшается. Соответственно будут отличаться профили на границе вытравленных в окисле рельефов. Эти соображения носят общий характер, а конкретный процесс травления зависит от степени легирования окисла примесями. Богатые бором и фосфором примесносиликатные стекла травятся очень быстро. Скорость травления фосфоросиликатных стекол достигает 30 нм/с, что в 25 - 40 раз выше скорости травления чистого окисла.

Удаление с подложки фоторезиста завершает фотолитографический процесс, для чего используются в основном химические и термические способы. В последнее время применяется обработка в ВЧ плазме кислорода.

Искажение рисунка при контактной фотолитографии

При экспонировании рисунка в процессе фотолитографии наблюдается ряд оптических эффектов, вызывающих искажение изображения. Фотошаблон с рисунком современной интегральной схемы является некоторым аналогом дифракционной решетки. В результате дифракции возникают нерезкость и неровности края рисунка. Изгиб подложки, ее неплотное прилегание к шаблону при экспонировании, т.е. существование зазора между поверхностями подложки и шаблона может приводить к значительным искажениям рисунка. При дифракции на краю рисунка световой поток расширяется и заходит в область геометрической тени. Огибающая этого потока образует с нормалью к поверхности фоторезиста угол дифракции φ , зависящий от величины зазора d и длины волны света λ :

$$\sin \varphi = \lambda / nd,$$

где n - коэффициент преломления света в воздушном зазоре.

Ширина освещенной зоны δ в области геометрической тени равна $d\lambda/a$, где a - размер окна рисунка шаблона. При этом если в области окна интенсивность света E_0 постоянна, то в области геометрической тени она неравномерна и имеет несколько убывающих по величине дифракционных максимумов с интенсивностью, меньшей E_0 . Когда размеры окна $a \gg \lambda$, увеличение размеров изображения даже при достаточно длительном экспонировании незначительно. Однако при малых значениях a интенсивность света на ширине δ может быть велика. Так, если $a = 10$ мкм, $\lambda = 0,4$ мкм, $d = 1$ мкм и толщина резиста $h = 1$ мкм, то увеличение изображения δ для неотражающей подложки составит 0,04 мкм. С уменьшением a до 1 мкм при тех же остальных размерах изображение увеличится до 2,4 мкм, причем только за счет зазора между шаблоном и подложкой увеличение составит 0,43 мкм.

Следовательно, для точной передачи размеров необходимо уменьшать зазор d и толщину слоя фоторезиста h .

Подбирая величину экспозиции и время экспонирования, можно достичь достаточно точной передачи размеров окна. Наиболее перспективно в этом направлении использование более коротковолнового излучения.

Литография в глубокой ультрафиолетовой области

Уменьшение размеров элементов ИМС от 1,5 - 1 мкм при стандартной фотолитографии до 0,5 мкм может быть достигнуто путем уменьшения длины волны экспонирующего излучения до 200 - 300 нм, называемого глубокой ультрафиолетовой областью (ГУФ). Можно использовать обычные оптические литографические установки, модернизированные для работы с более коротковолновым излучением.

Однако эта возможность ограничивается целым рядом факторов, связанных с созданием компактных источников излучения в диапазоне 200 - 300 нм, разработкой новых фоторезистов (известные фотолаци и фоторезисты чувствительны к длинам волн не более 300 нм), заменой стеклянной оптики (в этом диапазоне длин волн стекло очень сильно поглощает свет).

Для получения субмикронных размеров с помощью ГУФ в качестве источника можно использовать дуговые лампы с ксеноно-ртутным наполнителем ($\lambda = 200 - 260$ нм), а также дейтериевые лампы мощностью 1 кВт. Как фоторезист чаще других используется полиметилметакрилат (ПММК). Перспективно применение фоторезиста на основе полиметилизопропенилкетона, чувствительность которого к излучению с $\lambda \leq 300$ нм в несколько раз выше, чем чувствительность ПММК. Фотошаблонные заготовки для фотолитографии в области ГУФ изготавливаются не из стекла, а из кварца или сапфира, на поверхность которых наносится слой непрозрачного металла (Cr, Al).

Проекционная фотолитография

Современная микроэлектроника требует не только уменьшения размеров элементов микросхем до 0,35 мкм и менее, но и размещения элементов подобных размеров на все больших площадях вплоть до использования подложки диаметром 200 мм, 300 мм.

Одним из методов, обеспечивающих высокое разрешение на больших полях и исключаящих непосредственный контакт подложки и фотошаблона, является проекционная фотолитография.

Возможны следующие варианты оптической проекционной фотолитографии:

- 1) одновременная передача (проецирование) изображения всего фотошаблона на полупроводниковую пластину, покрытую фоторезистом;
- 2) последовательное поэлементное экспонирование изображения одного или разных типов модулей с уменьшением или без него;
- 3) последовательное вычерчивание изображения на фотослое сфокусированным световым лучом, например, лазерным, управляемым от ЭВМ.

Для успешного использования проекционной литографии необходима автоматическая система совмещения. Поэтому наиболее широкое распространение получил первый вариант проекционной фотолитографии; второй вариант применяется при монтаже модулей, третий вариант пока используется главным образом для изготовления фотошаблонов.

Возможны несколько способов проведения проекционной фотолитографии по первому варианту (рис.4.2):

- совмещение и экспонирование посредством одного источника;
- совмещение фотошаблона с подложкой в пространстве изображения с помощью зеркала и микроскопа;
- проекция изображения поверхности полупроводниковой пластины в плоскость фотошаблона.

4.2. Химико-механическая планаризация

Химико-механическая планаризация (ХМП, англ. *Chemical mechanical planarization, CMP*;) —. Представляет собой комбинацию химических и механических способов планаризации (удаления неровностей с поверхности изготавливаемой кремниевой пластины).

Изобретен в IBM в 1983 году. В конце 1980х IBM передала описания некоторых вариантов ХМП в Intel (для производства микропроцессоров для IBM PC) и в Micron Technology (производство чипов DRAM памяти). В результате сокращений в IBM в 1990—1994 годах, много инженеров, имевших опыт работы с ХМП перешло в другие компании, изготавливавшие СБИС.

В 1990х года технология ХМП была одной из самых быстроразвивающихся на рынке оборудования для производства микроэлектроники. Так, с 1995 года продажи ХМП-установок утроились, достигнув 520 млн долларов в 1997 году.

ХМП применяется практически после каждого литографического этапа.

Интегрированный технологический процесс глобальной планаризации диэлектрика методом ХМП, выполняемый на оборудовании модульной конструкции, состоит из двух операций: химико-механической полировки и двухсторонней химической обработки пластин.

Диапазон значений толщины диэлектрика, удаляемого в процессе ХМП 500-2000нм. Типовое значение скорости удаления диэлектрика в процессе ХМП: для термического SiO₂ -100-120нм/мин., для плазмохимического SiO₂ (PE-TEOS) - 150-250 нм/мин.

Неравномерность скорости удаления диэлектрика в процессе ХМП не хуже - $\pm 15,0\%$ (измерение в 49 точках, за исключением области шириной 6 мм у края пластины).

Воспроизводимость скорости удаления диэлектрика в процессе ХМП от пластины к пластине в партии из 25 пластин не хуже - $\pm 10,0\%$.(измерение в центральной точке).

Высота остаточного рельефа диэлектрика в областях с близким расположением линий разводки (расстояние между соседними линиями 0,5-2,0 мкм) не более – 300 нм. Общая высота остаточного рельефа диэлектрика на пластине не более - 700нм.

Операции, выполняемые в ХМП модуле жидкостной обработки пластин, интегрированном в единую установку:

- удаление механически нарушенного слоя диэлектрика жидкостным травлением;
- двухсторонняя химическая и гидромеханическая обработка пластин для удаления остатков полировочной суспензии и следов поверхностных загрязнений;
- сушка обработанных пластин.

Уровень загрязнения поверхности диэлектрика примесями тяжелых металлов после операций ХМП и химической обработки, см⁻², не более 5×10^{10} .

Производительность обработки пластин кремния диаметром 150-200 мм, не менее 30 шт./час (для установки ХМП с тремя позициями обработки с последующей химической обработкой).

Уровень привносимой дефектности не более $0,05 \text{ см}^{-2}$ (для частиц размером $> 0,20 \text{ мкм}$ после химической обработки пластин, прошедших операцию ХМП).

В качестве примера на рис. 1. показано поперечное сечение фрагмента чипа, при изготовлении которого не применялась СМР (а), и срез этого же участка(б)при химико–механической планаризации перед каждым циклом.



Рис. 1. Срез фрагмента ИС, изготовленной без СМР(а) и с многократной планаризацией (б).



Рис. 2 Схема химико-механической планаризации

Вращающийся подвес прижимает пластину лицевой стороной к вращающемуся диску с наносимой на него пастой, которая выравнивается специальным диском–восстановителем, не показанным на рисунке. И восстановитель, и подвес, как правило, могут перемещаться в радиальном направлении.

После окончания CMP максимальная высота микровыступов не превышает 1 нм, а средняя шероховатость — 0,1 нм.

ХМП использует сочетание абразивных и агрессивных химических суспензий (например, коллоидных) и полировочной площадки, большей по площади, чем обрабатываемая пластина. Могут использоваться как круглые полировочные площадки, так и ленты. Пластина устанавливается в специальный держатель и вращается вместе с ним. Держатель прижимает пластину к полировочной площадке. Точность обработки на современных установках ХМП составляет порядка нескольких ангстрем.

4.3 Рентгенолитография

Рентгенолитография, как и электронолитография, устраняет дифракционные ограничения излучения. Для экспонирования используют "мягкие" рентгеновские лучи длиной волны 0,4 - 50 нм, возбуждаемые с помощью интенсивных электронных пучков. Рассеяние рентгеновских квантов в подложке намного меньше, чем рассеяние электронов, которое ограничивает возможную разрешающую способность электронолитографии. Такие достоинства, как высокая разрешающая способность (менее 0,01 мкм), большая глубина резкости (до десятков микрометров), обеспечивающая экспонирование с большим зазором и, следовательно, долговечность шаблонов, малая чувствительность к частицам пыли и другим загрязнениям, нечувствительность к внешним магнитным и электрическим полям, делают рентгенолитографию одним из самых интересных методов создания ИМС с высокой плотностью упаковки.

Рентгеновское излучение получают путем воздействия на мишень сфокусированным пучком электронов. В качестве мишени используют различные металлы: медь, алюминий, палладий и др.

Пучок электронов, направляемый электронной пушкой, фокусируется на мишени. Для того чтобы обеспечить достаточно мощный поток рентгеновского излучения, необходимо охлаждать мишень водой и вращать с большой скоростью (иначе она расплавится); это является "слабым местом" рентгенолитографических установок. Типичные системы имеют диаметр мишени около 10 см, мощность электронного пучка 10-25 кВт, диаметр пучка в несколько миллиметров, расстояние от мишени до резиста изменяется от 15 до 50 см. Рентгеновский пучок проходит отражатель рассеянных электронов и выводится из вакуумной камеры через тонкое бериллиевое окно. В наполненном гелием (ослабление рентгеновского излучения в гелии намного больше, чем в воздухе) боксе находятся шаблон и пластина с резистом, укрепленные на столике совмещения. Совмещение осуществляется несколькими способами, простейший из которых - оптический: с помощью микроскопа с большим увеличением.

Теоретический предел разрешающей способности рентгенолитографии составляет менее 0,1 мкм. На практике достичь его пока не удастся. Это связано, во-первых, с появлением фотоэлектронов, рождаемых рентгеновским излучением, которые вызывают расширение линии примерно на 100 нм, и, во-вторых, с двумя формами искажений, возникающих при экспонировании. Причины этих искажений следующие:

1) если источник рентгеновского излучения не точечный, то возникает полутеневая дисторсия;

2) при точечном источнике возникает геометрическая дисторсия;

3) ввиду малой механической прочности рентгеношаблона зазор между пластиной и шаблоном является необходимой мерой, но выдержать постоянной его величину очень сложно.

Выбор длины волны рентгеновского излучения и выбор вещества маски шаблона, через который проводится экспонирование рентгенорезиста, взаимосвязаны.

Выбор материала мишени, а следовательно, длины волны рентгеновского излучения осуществляется с учетом того, что к рентгеновским лучам низкой энергии (большая длина волны) фоторезисты очень чувствительны, однако такое излучение сильно поглощается материалом шаблона. Жесткое рентгеновское излучение неэффективно поглощается фоторезистом (менее 5 %) и, кроме того, требуются более толстые слои поглощающего покрытия шаблона, что в свою очередь снижает возможность получения малых изображений.

Создание рентгеношаблона является серьезной проблемой данного метода литографии. Поглощающая пленка должна иметь резкие края, быть тонкой и значительно ослаблять рентгеновское излучение. Для этой цели используют тонкие пленки золота, платины, рения, европия. Подложка для шаблона (мембрана) должна быть механически прочной и пропускать как можно большую долю падающего излучения. В качестве мембраны используют пленки различных неорганических материалов, включая Si, Be, Al_2O_3 , SiO_2 , Si_3N_4 , а также полимеры майлар и полицимид. Толщина мембраны зависит от длины волны излучения и составляет обычно несколько микрометров. При использовании источников длиной волны менее 1,33 нм мембрана интенсивно поглощает излучение и поэтому ее толщину необходимо уменьшить до 1 - 2 мкм.

Шаблон из кремния (рис.4.4) представляет собой пластину с уто-ненными окнами-мембранами. Мембрана и подложка, на которой они формируются, состоят из одного материала и, следовательно, имеют один коэффициент термического расширения. Изготовление начинается с эпитаксиального выращивания слаболегированного слоя n-типа на сильнолегированной n^+ -подложке, на которую наносится тонкий слой Al_2O_3 . Поглощающая маска создается на поверхности этого слоя методом

электронолитографии. Затем идет наиболее ответственная операция - медленное травление окон в n^+ -кремниевой подложке (площадь окон около 1 см^2).

Некоторым преимуществом перед кремниевыми масками обладают маски из тонкой полимерной пленки, натянутой на поддерживающем кольце из стали или алюминия.

Одной из серьезных проблем в рентгенолитографии является деформация шаблона при изготовлении и эксплуатации. Причиной деформации могут быть механические напряжения в мембране или разные температурные коэффициенты расширения мембраны и основания шаблона.

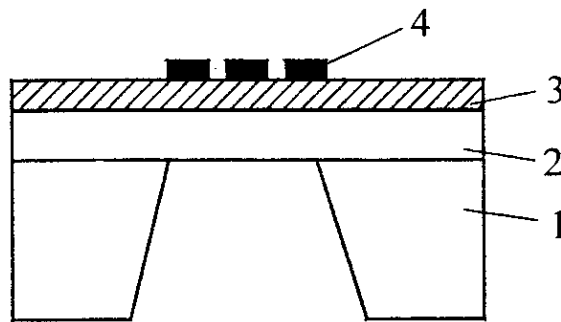


Рис.4.4. Шаблон для рентгенолитографии:

- 1 - пластина кремния n^+ ; 2 - эпитаксиальная пленка n -типа (3 мкм); 3 - пленка окисла алюминия (0,1 мкм); 4 - золото (0,3 мкм) с подслоем хрома

Для устранения искажений рисунка, связанных с дисторсией и большим временем экспонирования в процессе рентгенолитографии, предлагается использование синхротронного излучения. Оно генерируется релятивистскими электронами при их движении по криволинейным траекториям в магнитных полях. По касательной к траектории движения электронов, ускоренных до 1 ГэВ, можно получить мощный плоскопараллельный пучок рентгеновского излучения широкого спектра. Этим методом получены линии шириной 0,05 мкм. Недостатком процесса является использование дорогостоящего оборудования и сложность его эксплуатации.

Электронорезисты

Так как для проведения электроно-, рентгенолитографии в качестве резиста используются одни и те же составы полимеров, их обычно в литературе называют электронорезистами.

Чувствительность электронорезистов (Кл/см^2) зависит от величины минимального электрического заряда, приходящегося на единицу площади, необходимого для полного проявления резиста. Чувствительность негативных резистов выше, чем позитивных, но проявленный в нем рисунок имеет наклонные боковые стенки, что уменьшает его разрешающую способность. В качестве негативных резистов используют полиглицидилметакрилаткоэтилакрилат (ПГМАКЭА). При облучении в негативном резисте образуются стимулированные радиацией поперечные связи в молекулах полимера, происходит соединение соседних цепочек молекул. В результате возникает сложная трехмерная структура с молекулярным весом, превышающим вес полимера в необлученных местах.

В позитивных электронорезистах, напротив, уменьшается молекулярный вес в экспонированной области из-за разрыва химических связей или расщепления цепочек под действием радиации. Полимер становится растворимым в растворителе, который не действует на высокомолекулярный материал. Позитивными резистами являются полиметилметакрилат (ПММА), полибутен-1 сульфона (ПБС). Растворителем для позитивного резиста служит смесь метилизобутилового кетона (МИБК) и изопропилового спирта в соотношении 1:1. Позитивные электронорезисты имеют разрешающую способность менее 0,1 мкм, тогда как разрешающая способность негативных резистов, ограниченная их разбуханием, не превышает 1 мкм.

4.4 Электронолитография

Электронно-лучевая или электронолитография - это комплекс технологических процессов для получения прецизионных рисунков на поверхности. Она является наиболее перспективным методом формирования элементов субмикронных размеров.

Известны две различные системы электронно-лучевой литографии - проекционная и сканирующая. Последняя получила сейчас наибольшее распространение.

Длина волны электронов, например с энергией 15 кэВ, равна 10^{-2} нм или в 50000 раз меньше длины волны средней части видимого спектра.

Собственная разрешающая способность электронного пучка примерно на четыре порядка выше светового.

Отметим еще одно важное преимущество электронолитографии - большую глубину фокуса, ограничивающуюся главным образом явлением сферической аберрации. В настоящее время технически возможно получить диаметр пучка электронов менее 0,1 мкм при токе более 10^{-9} А с глубиной фокуса ± 25 мкм, что невозможно в световых оптических системах.

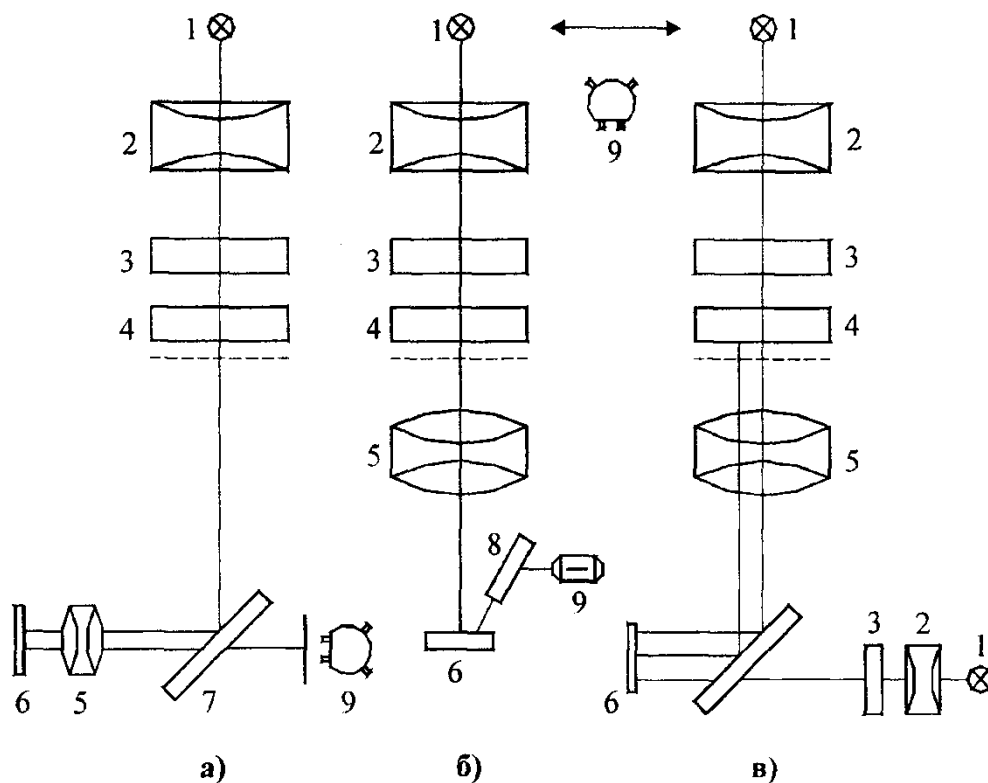


Рис.4.2. Схемы проекционной фотолитографии:

а - одновременное проецирование и совмещение;

б - совмещение в пространстве изображения;

в - обратное изображение. 1 - источник света, 2 - конденсор,

3 - фильтр, 4 - фотошаблон, 5 - объектив, 6 - подложка,

7 - полупрозрачное зеркало, 8 - зеркало, 9 – микроскоп

Управление перемещением и включением-выключением луча осуществляется с помощью ЭВМ. Обычно луч отклоняется на небольшое

расстояние, а увеличение площади обработки достигается механическим перемещением подложки (сканирующая электронолитография).

Для воспроизведения элементов с малыми размерами требуется несколько перемещений электронного луча. Если интенсивность в луче имеет гауссово распределение, то число перемещений должно быть не менее четырех, причем положения между максимумами интенсивности должны быть равны половине ширины линии луча.

Используется два способа сканирования: векторное и растровое. При векторном сканировании луч направляется в заданное место топологического рисунка и передвигается в пределах очертания данного элемента (возвратно-поступательные движения). Затем луч выключается, направляется на следующий элемент и вновь движется лишь в пределах этого элемента топологии. По окончании сканирования определенного участка передвижением столика устанавливается новое поле сканирования. Этот способ удобен при формировании изображений небольшого числа элементов с одинаковыми размерами (например, при создании контактных окон). Иначе обработка кремниевой пластины диаметром 150 мм занимает много часов.

При растровом сканировании луч непрерывно движется вперед и назад по полю не очень большого размера (256 мкм), а столик с пластиной перемещается в плоскости x у под прямым углом к направлению сканирующего луча. Включение и выключение луча происходит автоматически. В системах растрового сканирования используется менее сложная оптика, чем в системах векторного сканирования. Такие системы применяются наиболее широко при изготовлении фотошаблонов. Их производительность - один шаблон со стороной 125 мкм за 60 мин.

Для совмещения при электронно-лучевой литографии требуется создание на подложке реперных знаков. Реперный знак может быть получен напылением пленки металла, например молибдена. Когда электронный пучок попадает на край знака, сигнал на детекторе отраженных электронов меняется. Информация о несовмещении вводится в ЭВМ, управляющую перемещением луча, и создаваемое изображение совмещается с имеющимися в подложке.

Реальная разрешающая способность электронно-лучевой литографии во многом определяется рассеянием и диффузией электронов в резисте и подложке. Большую роль играет толщина слоя резиста. Для того чтобы получить размеры линии примерно 0,5 мкм, приходится снижать толщину

слоя резиста до 0,1 - 0,2 мкм. Защитные свойства тонких слоев резко ухудшаются.

Повысить производительность метода позволяет проекционная электронолитография, в которой миллионы элементов рисунка проецируются на пластину одновременно. Проекционные электронно-лучевые системы и конструктивно проще, так как данные о рисунке хранятся не в ЭВМ (а значит, связаны с преобразованием и подачей их в управляющее устройство при каждой экспозиции), а заложены в маске.

Принципиальными трудностями при создании эффективной проекционной системы электронолитографии остаются изготовление электроношаблона и уменьшение искажения проецируемого изображения. Сложность изготовления электроношаблона связана с тем, что для его подложки не найдено материала, достаточно прозрачного для электронов.

Рис.4.3 поясняет принцип проекционной электронолитографии с маскированным фотокатодом. Для изготовления фотокатода применяется кварцевая пластина, покрытая тонким слоем титана. В слое титана вытравливается требуемое изображение; свободные от титана области служат в дальнейшем источником фотоэлектронов. Титан окисляется до окиси титана, поглощающей ультрафиолетовое излучение, и затем на всю поверхность напыляется слой палладия толщиной 4 нм. При освещении обратной стороны кварцевой пластины ультрафиолетовым излучением палладий эмитирует фотоэлектроны с энергией 0,1 эВ. Плотность потока электронов составляет 100 мкА/см^2 . Ускоряющее электрическое поле и коаксиальное магнитное поле переносят в масштабе 1:1 электронное изображение на кремниевую подложку.

Подобные системы позволяют получать рисунок с размерами элементов менее 1 мкм на рабочем поле около 25 мм. При этом время экспонирования не превышает 4 с (однако общее время обработки определяется скоростью откачки системы до давления $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па и составляет примерно 20 мин).

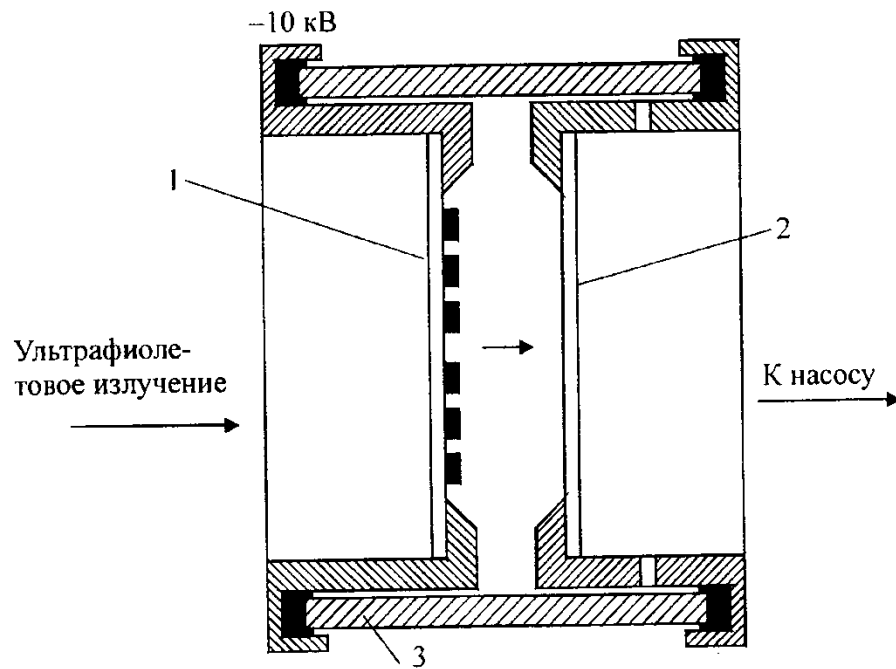


Рис.4.3. Схема устройства для
электронно-лучевой литографии:

1 - фотокатод; 2 - пластина кремния;

3 - стеклянный корпус

Методу проекционной электронолитографии свойственны два существенных недостатка:

- сложность изготовления реперных знаков;
- сложность получения фотокатодов с высоким разрешением.

Эти недостатки серьезно ограничивают практическое использование метода.

Сканирующая электронолитография применяется в настоящее время значительно чаще, несмотря на высокую стоимость оборудования и низкую производительность. Ее использование связано главным образом с изготовлением фотошаблонов для контактной или оптической проекционной литографии с высоким разрешением.