

1.7. ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Цель лекции: ознакомление с основами фотолитографии.

1.7.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ЛИТОГРАФИИ

Литография — это процесс формирования рельефного рисунка в актиночувствительном слое, нанесенном на поверхность подложек, с целью последующего переноса этого рисунка на материал подложки.

Актиночувствительным называется слой, который изменяет свои свойства (растворимость) под действием актиничного излучения (например, ультрафиолетового света или потока электронов).

Экспонирование — процесс облучения материала актиночувствительного слоя. Для процесса применяется излучение от рентгеновского диапазона до видимого света.

Фоторезист - светочувствительный слой материала (полимерная пленка), который под воздействием света меняет свои физико-химические свойства (растворимость).

Фотошаблон — пластина, прозрачная для излучения определенной длины волны, с рисунком, выполненным непрозрачным красителем.

Оригинал – увеличенный рисунок слоя ИС.

Эталонный фотошаблон – первый, с которого изготавливают рабочие копии.

Рабочий шаблон – с которого изготавливают топологию структуры слоя ИС

Процесс литографии является самым дорогим и самым трудозатратным в технологическом процессе получения микросхем. Современные элементы микросхем имеют малые размеры и малые допуски, что требует минимизации ошибок при их получении.

Место литографии в общем цикле производства показано на рис. 1.7.1.

В современном производстве при литографии предъявляются следующие требования:

- высокая разрешающая способность;
- высокая чувствительность фоторезиста;
- точное совмещение;
- стабильное управление параметрами;
- малое количество дефектов.

В зависимости от длины волны (рис. 1.7.2) различают следующие виды оптической литографии:

- фотолитография;
- рентгенолитография;
- электронолитография;
- ионная литография.

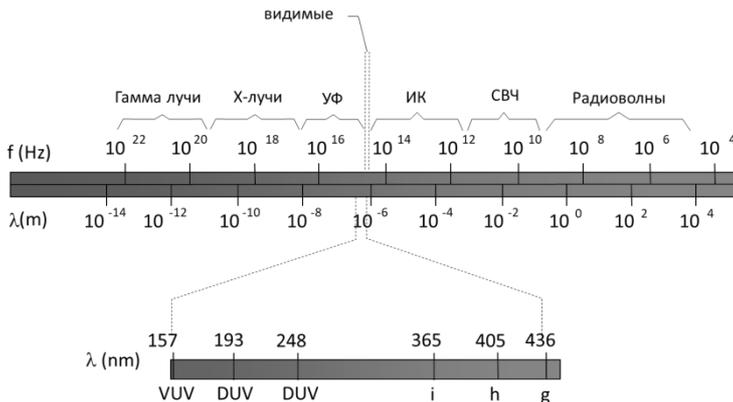


Рис. 1.7.2. Длины волн, используемые в оптической литографии

Последовательность типовых операций при фотолитографии приведена на рис. 1.7.3.

1.7.2. ФОТОРЕЗИСТЫ

Резист – это химически стойкий материал, чувствительный к актиничному излучению. Он временно наносится на подложку и на нем с помощью операции экспонирования формируется изображение, которое в дальнейшем переносится на подложку. Он похож на материал, который использовался для фотопленки, но устойчив к действию агрессивных химических веществ и плазме. Резист является основным материалом для формирования рисунка на кристаллах микросхем. Резисты, чувствительные

к видимому и ультрафиолетовому излучению, называются фоторезистами.

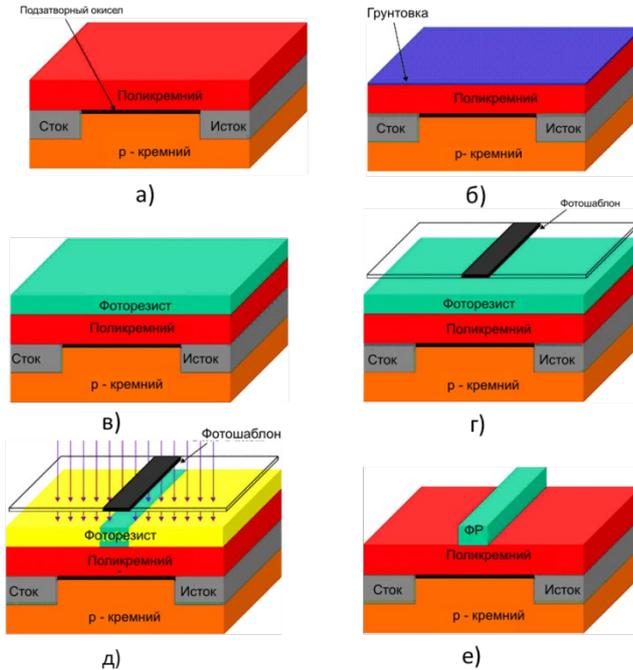


Рис. 1.7.3. Последовательность типовых операций при фотолитографии: а – заготовка; б – предварительная обработка и грунтовка; в – нанесение и сушка фоторезиста; г – совмещение фотошаблона с подложкой; д – экспонирование и дополнительная сушка; е – проявление, задубливание и контроль

Первоначально фоторезисты использовались для производства печатных плат, но в 1950 году были адаптированы для полупроводниковой промышленности. Основные этапы развития фоторезистов и способов литографии приведены на рис. 1.7.4.

Различают позитивные и негативные резисты. В зависимости от их типа методы литографии по характеру переноса изображений делятся на позитивные и негативные.

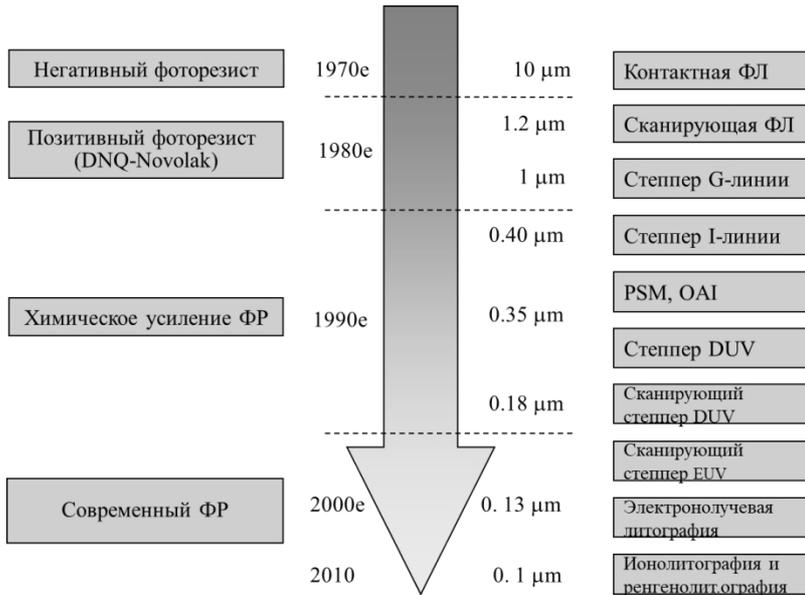


Рис. 1.7.4. Развитие фоторезистов и способов литографии

По спектральной чувствительности (диапазону длины волн актиничного излучения) различают следующие виды резистов:

- оптические фоторезисты (для ультрафиолетового излучения);
- фоторезисты для экстремального ультрафиолетового излучения (EUV);
- электронорезисты;
- рентгенорезисты.

Различают 2 вида фоторезистов:

- сухой пленочный, представляющий собой «сэндвич» из трех слоев полимеров, в середине которого находится актиночувствительный слой; используется для получения элементов с разрешением 125...250 мкм;
- жидкий, представляющий собой раствор полимера и актиночувствительного соединения в органическом растворителе; используется для получения элементов с разрешением 0,013...0,5 мкм.

Для производства современных микросхем используют жидкие фоторезисты.

Резисты состоят из нескольких составляющих:

- связующий состав;
- растворитель;
- актиночувствительный компонент.

Кроме того, в резисты могут добавляться дополнительные добавки, позволяющие управлять другими параметрами (например, краситель для уменьшения отражения от фоторезиста ультрафиолетового излучения).

Связующий состав представляет собой актиночувствительный полимер и занимает основной объем резиста. При облучении ультрафиолетовым излучением он меняет растворимость. Для позитивных фоторезистов засвеченный объем разлагается, в результате чего из нерастворимого состояния он переходит в растворимое. Для негативных фоторезистов засвеченный объем полимеризуется, в результате чего он из растворимого состояния переходит в нерастворимое.

Растворитель разбавляет полимер, чтобы добиться требуемой вязкости. Благодаря этому можно получать слои, толщину которых можно контролировать.

Актиночувствительный компонент позволяет управлять химической реакцией при экспонировании резиста и определяет спектральный диапазон, к которому чувствителен резист.

При производстве микросхем чаще всего используются положительные резисты, при использовании которых удаляется засвеченная область (рис. 1.7.5). Основой для получения изображения служат фотохимические превращения фотоактивных добавок или полимеров. Основными позитивными фоторезистами являются НХД и ПММА (полиметилметакрилат).

НХД – это полимер на основе новолачной смолы. Его основа – эфиры нафтохинондиазидов сульфокислоты (НХД), обеспечивающие светочувствительность, и формальдегидные смолы, обеспечивающие плёнкообразующий полимер. Между собой эфиры и смолы связаны кислородом. В данное вещество добавляются ацетатные растворители. Типичный состав НХД фоторезиста (DNQ/Novolak):

- основа – новолачная фенолоформальдегидная смола;
- фоточувствительный компонент – диазохиноновый эфир, который под действием ультрафиолетового излучения переходит из растворимого состояния в нерастворимое.

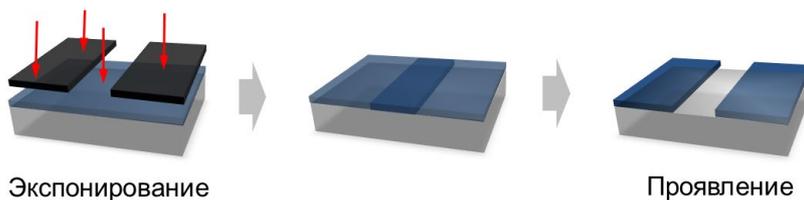


Рис. 1.7.5. Позитивная литография

При поглощении квантов света происходит фотолиз (распад) НХД на азот и неустойчивый радикал. Радикал превращается в инденкарбен. Инденкарбен принимает воду из фоторезиста - образуется инденкарбоновая кислота. Инденкарбоновая кислота становится гидрофильной и легко удаляется проявителем с щелочными свойствами. После экспонирования растворимость НХД фоторезистов возрастает в 1000 раз.

Средняя чувствительность НХД фоторезистов составляет 75 мДж/см^2 . Они обладают высокой плазмо- и термостойкостью. Спектральный диапазон НХД фоторезистов – ближний и средний ультрафиолет с длиной волны $350 \dots 450 \text{ нм}$. При этом данный вид фоторезистов не подходит для дальнего ультрафиолета, поскольку данное излучение сильно поглощается новолачной смолой, что приводит к малой чувствительности фоторезиста.

Чтобы повысить эффективность чувствительности фоторезистов для дальнего ультрафиолета проводят химическое усиление фоторезистов (сенсбилизацию). Сенсбилизаторы управляют или модифицируют фотохимическую реакцию, протекающую при экспозиции. Сенсбилизатор внедряется в фоторезист с поперечными связями структуры. При облучении дальним ультрафиолетовым излучением (эксимерным лазером) возникает эффект фотокатализа, в течение которого наведенная кислотность вызывает увеличение каталитической реакции. В результате кислота разрушает поперечные связи полимера и засвеченный фоторезист становится более растворимым.

ПММА резист создается на основе полиметилметакрилата. Он растворяется в таких органических растворителях как: ацетон, хлорбензол, анизол и т.п. и весьма устойчив к действию этилового и изопропилового спиртов. В качестве проявителя для ПММА используются смеси на основе изопропилового спирта с растворителями, способными вымывать молекулы, образующиеся при облучении ПММА. Чистый изопропиловый спирт используется для смывки проявителя и остановки процесса проявки.

В качестве растворителей для позитивных фоторезистов используют PGMEA (1-метокси-2-пропил-ацетат), этоксиэтилацетат, 2-метоксиэтил.

При использовании негативных фоторезистов удаляется засвеченная область (рис. 1.7.6).



Рис. 1.7.6. Негативная литография

Негативные фоторезисты имеют тенденцию к реакции с кислородом воздуха, что приводит к уменьшению толщины пленки. Для проявки используются органические растворители. Негативные фоторезисты имеют лучшую адгезию и выше скорость проявки, чем позитивные.

Основой негативных резистов является поливинилциннамат (эфир циннамольной кислоты), обеспечивающий актиночувствительность, и поливиниловый спирт, обеспечивающий пленкообразования. Обе части связываются кислородом. При поглощении квантов облучения наиболее слабые в молекулах связи $CN—CN$ разрываются. Освободившиеся связи обеспечивают фотоструктурирование (поперечное сшивание в химически стойкую трёхмерную сетку).

В настоящее время также часто используются негативные резисты на основе каучуков. Часто используемый полимер: полиизопрен (изопреновый синтетический каучук), фотоактивным компонентом выступает бисазидю. При освещении он превращается в нитрен, который способствует связыванию полимерных цепей.

В качестве растворителей для негативных фоторезистов используют ксилен и толуол.

Недостатком негативных фоторезистов является меньшая разрешающая способность, чем у позитивных, поскольку образующаяся после проявления пленка негативного фоторезиста имеет больший клин травления (рис. 1.7.7 а), чем пленка позитивного фоторезиста (рис. 1.7.7 б).

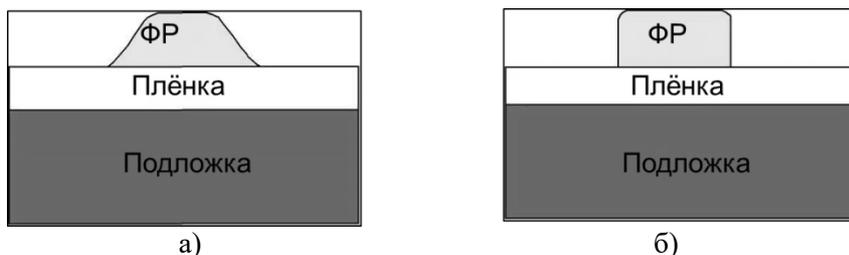


Рис. 1.7.7. Пленки негативного (а) и позитивного (б) фоторезистов после проявления

При выборе фоторезиста следует учитывать следующие параметры:

- степень разложения при облучении;
- адгезия к подложке;
- скорость экспонирования, чувствительность;
- возникновение точечных дефектов;
- уровень загрязнения;
- разрешающая способность;
- тепловое оплавление.

Разрешающая способность определяет самое малое размыкание или пространство, которое может быть создано в пленке фоторезиста (рис. 1.7.8). Она определяется технологическим оборудованием. Для лучшей разрешающей способности требуется более тонкая пленка фоторезиста. Однако операции травления и ионной имплантации требуют более толстой пленки фоторезиста. Численно разрешающая способность равна максимальному числу линий, воспроизводимых отдельно на 1 мм:

$$R = \frac{1000}{2a_{min}},$$

где a_{min} – расстояние между соседними линиями, мкм (рис. 1.7.9).

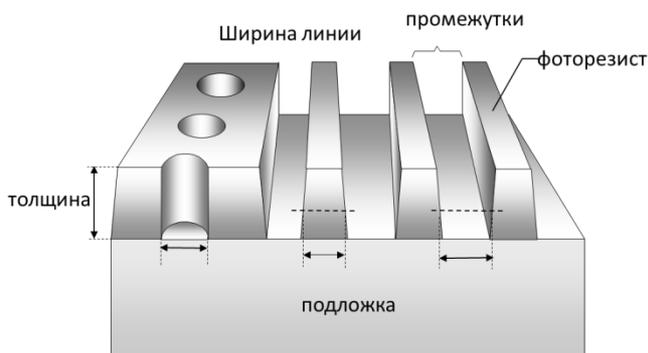


Рис. 1.7.8. Размеры, влияющие на разрешающую способность фоторезиста

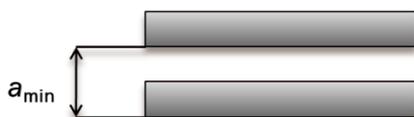


Рис. 1.7.9. Определение разрешающей способности фоторезиста

При выборе фоторезиста необходимо учитывать также его стойкость к термической обработке, нанесению тонких пленок, плазменной обработке и травлению, минимальную ширину линий, которую можно получить, оптимальную толщину, чувствительность, параметры термической обработки и проявки. Этот набор параметров является противоречивым, создать идеальный фоторезист невозможно. В результате состав фоторезистов подбирается для получения оптимального набора свойств для определенного применения.

Необходимо учитывать, что все резисты чувствительны к синей части видимого спектра, поэтому для производственных участков фотолитографии используется специальное освещение с красным и жёлтым светом, воздействие которых на фоторезист минимально.

1.7.3. НАНЕСЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА

Перед нанесением фоторезиста поверхность подложки необходимо очистить, поскольку наличие загрязнений снижает адгезию фоторезиста и увеличивает количество точечных дефектов. Очистка проводится в 3 этапа:

- химическая отмывка;
- промывка деионизированной водой;
- сушка.

Сушка проводится при температуре около 100 °С и позволяет удалить влагу с поверхности подложки, что улучшает адгезию фоторезиста с поверхностью. Обычно данная операция интегрируется с операцией нанесения грунтовки.

Операция грунтовки (рис. 1.7.10) повышает адгезию фоторезиста к подложке. Основной реагент: гексаметилдисилозан (HMDS). Покрытие наносится паром.

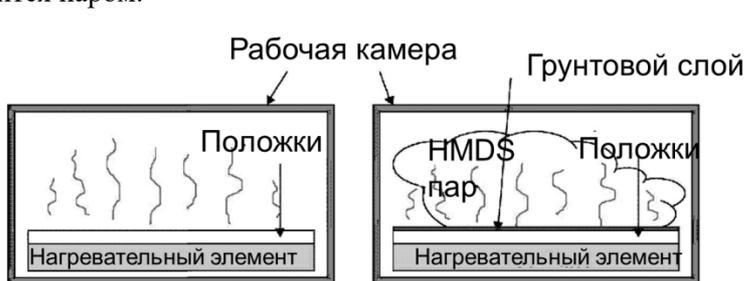


Рис. 1.7.10. Предварительная термообработка и нанесение грунтовки

Операция грунтовки проводится в камере дегидрационной сушки прокачкой газа (рис. 1.7.11). Температура операции составляет 200...250 °С, время операции – порядка 60 с.

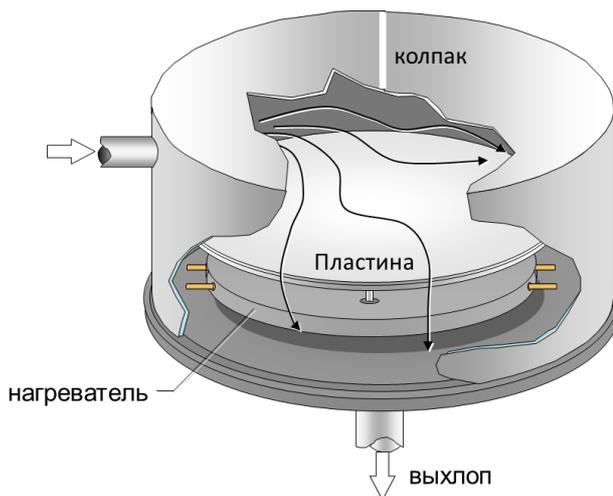


Рис. 1.7.11. Камера дегидрационной сушки с прокачкой газа

После нанесения грунтовки пластина медленно охлаждается водой.

Далее центрифугированием наносится фоторезист (рис. 1.7.12). Подложка крепится на установке с помощью вакуумной присоски. Жидкий фоторезист подается на центр подложки, его дозировка составляет порядка 5мл. Далее диск начинает вращаться с высокой скоростью (порядка 3000 - 5000 об/мин). Центробежная сила расплющивает фоторезист, который равномерно распределяется на поверхности подложки. Для равномерности покрытия скорость должна быть постоянной. Толщина покрытия определяется вязкостью фоторезиста и скоростью вращения диска определяется по формуле:

$$h = A \sqrt[3]{\frac{\eta}{\omega}},$$

где A – коэффициент пропорциональности; η – вязкость фоторезиста; ω – угловая скорость вращения диска.

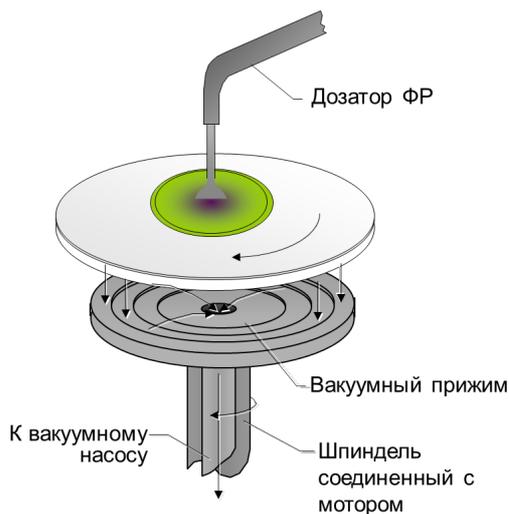


Рис. 1.7.12. Нанесение фоторезиста центрифугированием

В конце операции проводится обрамление края кромки подложки с помощью растворителя.

1.7.4. СУШКА И ЗАДУБЛИВАНИЕ ФОТОРЕЗИСТА

После нанесения жидкого фоторезиста его необходимо высушить. Процесс преобразования жидкой пленки в твердую заключается в физическом удалении растворителя из пленки без деградации резистных компонентов. Типичное значение концентрации растворителя – от 20 до 40% (в зависимости от толщины пленки).

Удаление растворителя:

- предотвращает загрязнение и прилипание маски;
- предотвращает вздутие резиста за счет N_2 после экспозиции;
- улучшает адгезию резиста;
- минимизирует скорость травления неэкспонированного резиста;
- позволяет наносить несколько слоев резистов;
- предотвращает образование пузырьков при последующих термических процессах (нанесение следующего слоя, сухое травление).

Необходим подбор оптимальных режимов параметров сушки. Так для ПММА резиста: необходима сушка при температурах выше 160°C , для НХД резиста: – при 100°C . Длительность сушки: 1 мин на 1 мкм толщины резиста. В качестве оборудования чаще всего используются конвекционные печи.

В процессе сушки концентрация воды в резисте уменьшается, что может привести к увеличению скорости травления и контрастности фоторезиста. Поэтому перед экспонированием необходимо провести регидрацию. Она проводится при комнатной температуре, влажность составляет 45...50%, длительность – от 10 с до 10 ч в зависимости от толщины пленки.

После экспонирования фоторезиста перед проявлением может проводиться послеекспозиционная сушка фоторезиста (soft-baking). Она применяется в одном из следующих случаев:

- для завершения фотореакции, инициированной экспозиционированием (при использовании химически усиленных резисты);
- при поперечном сшивании резиста;
- для снятия механических напряжений, что улучшает адгезию и снижает подтравливание под резистом;
- для компенсации стоячих волн при экспонировании, которые могут возникнуть в случае сильно отражающей подложки или иермоактивированной диффузии инденовой кислоты.

Обычно послеекспозиционная сушка проводится при температуре порядка 110°C в течение 1...2 минут.

После проявления фоторезиста необходимо провести задубливание (hard-baking). Это делается для:

- повышения термической, химической и физической стойкости резиста;
- восстановления адгезии;
- устранения дефектов (заплывание проколов);
- ограничение температуры задубливания;
- искажение изображения, обусловленное плавлением (типичное значение – 110 – 130 °C);
- химическая деструкция резиста;

Выбор параметров задубливания – компромисс между стабилизацией резиста и его плавлением.

Существует два основных режима термообработки. Для жидкостного травления через маску – мягкий режим при температуре 100...140 °C. При этом происходит удаление растворителя с границы раздела резист – подложка и улучшается адгезия. Для сухого травления используется более жесткий режим: более высокие температуры, задубливание сочетается с процессом отверждения.

1.7.5. ВЗРЫВНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Прямая литография имеет существенный недостаток:

необходимо использовать химическое или плазменное травление. Это может привести к несовместимости с технологией и/или материалами. Кроме того, она имеет ограничения точности нанесения элементов при травлении. В случаях, когда требуется получить рисунок из материала, плохо поддающегося травлению, используется обращенная (взрывная) литография, при которой на нанесенный и проявленный фоторезист напыляется тонкий слой материала (обычно металла), из которого требуется сформировать рисунок.

Нанесение металла на пленку стандартного позитивного фоторезиста показано на рис. 1.7.13. При этом пленка фоторезиста имеет положительный угол наклона, на ее боковых стенках осаждается металл и ее трудно удалить. При взрывной литографии используются специальные резисты, у которых экспонированная область сшивается при термической обработке и становится нерастворимой в проявителе

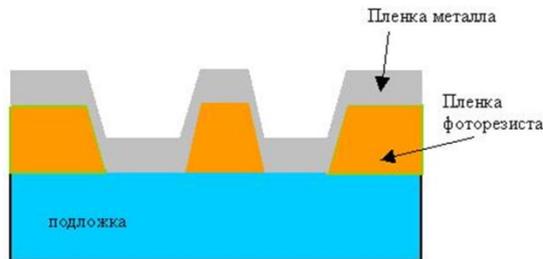


Рис. 1.7.13. Нанесение металла на пленку стандартного позитивного фоторезиста

Типовые операции, используемые при взрывной литографии, показаны на рис. 1.7.14.

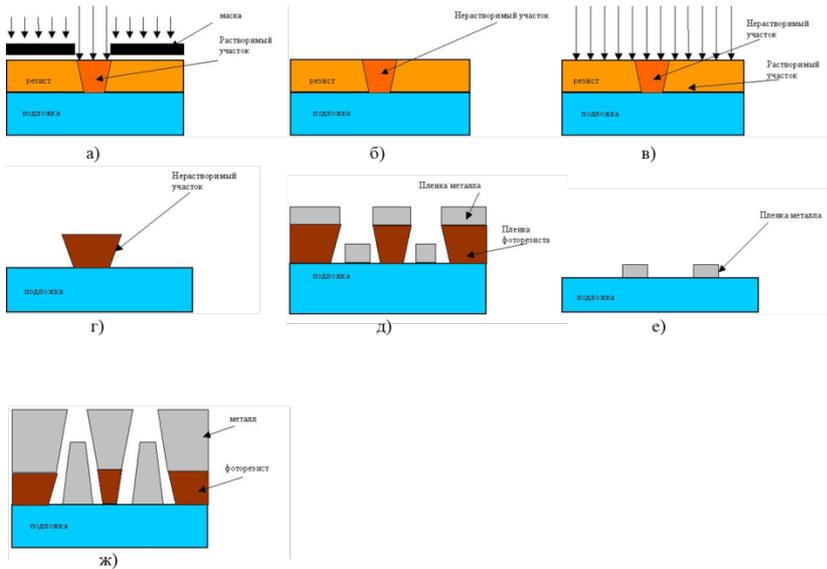


Рис. 1.7.14. Типовые операции при взрывной литографии: а – экспонирование резиста через маску; б – термическая обработка резиста; в – сплошное экспонирование резиста без маски; г – проявление резиста; д – осаждение металла (малая толщина); е – удаление фоторезиста; д – осаждение металла (большая толщина)

Сначала проводится экспонирование резиста через маску (рис. 1.7.14 а). Далее проводится термообработка, в результате которой засвеченный участок становится нерастворимым (рис. 1.7.14 б). Далее проводится сплошное экспонирование фоторезиста без маски, в результате которого он кроме ранее обработанного участка становится растворимым (рис. 1.7.14 в). Затем фоторезист удаляется (рис. 1.7.14 г) и остается пленка с фоторезистом с отрицательным углом наклона. В результате при нанесении металла он не осаждается на боковые стенки резиста (рис. 1.7.14 д), поэтому фоторезист можно легко удалить (рис. 1.7.14 е). При этом удаление фоторезиста происходит как при небольшой толщине металла (рис. 1.7.14 д), так и при большой (рис. 1.7.14 ж).

При взрывной литографии необходимо проводить дополнительную термообработку (reversal bake). При этом перед термообработкой необходимо выдержать определенное время в N_2 , который скапливается в местах с пониженной адгезией.

Форма маски для проведения взрывной литографии определяется дозой экспонирования, температурой термообработки, временем термообработки и временем проявки.

1.7.6. ЭКСПОНИРОВАНИЕ

Экспонирование – освещение фотоактивным светом слоя фоторезиста на поверхности пластины для формирования в нем рисунка, соответствующего рисунку маски (рис. 1.7.15). Основная цель операции – воспроизвести рисунок фотошаблона, обеспечив при этом совмещение последовательных слоев с заданной точностью. Для экспонирования применяется актиничное излучение с длиной волны в области спектральной чувствительности резиста. После экспонирования необходима проявка резиста.

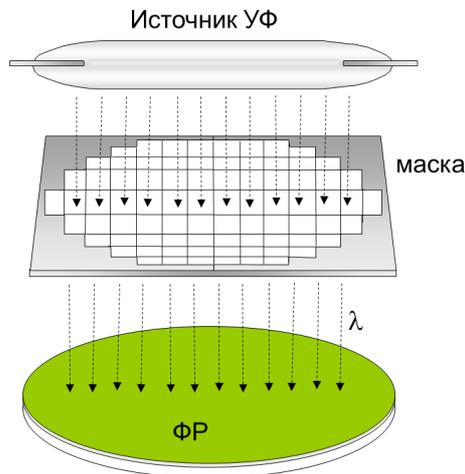


Рис. 1.7.15. Экспонирование

Экспонирование – это ключевая и самая сложная операция в фотолитографии. При ней необходимо учитывать:

- предельное пространственное разрешение (зависит от резиста);
- точность совмещения слоев;
- производительность (количество пластин в час).

Основные параметры процесса экспонирования:

- время;
- доза (плотность энергии);
- спектр излучения.

Время экспонирования зависит от:

- толщины резиста;
- длины волны излучения лампового источника;
- коэффициента поглощения резиста;
- толщины остаточного резиста;
- коэффициента отражения подложки;
- наличия усиливающего контраст слоя;

- интенсивности источника актиничного излучения.

В зависимости от способа переноса изображения различают следующие виды фотолитографии:

- контактная фотолитография (рис. 1.7.16 а);
- фотолитография с зазором (рис. 1.7.16 б);
- проекционная фотолитография с преломляющей оптикой (рис. 1.7.16 в).
- проекционная фотолитография с отражающей оптикой (рис. 1.7.16 г).

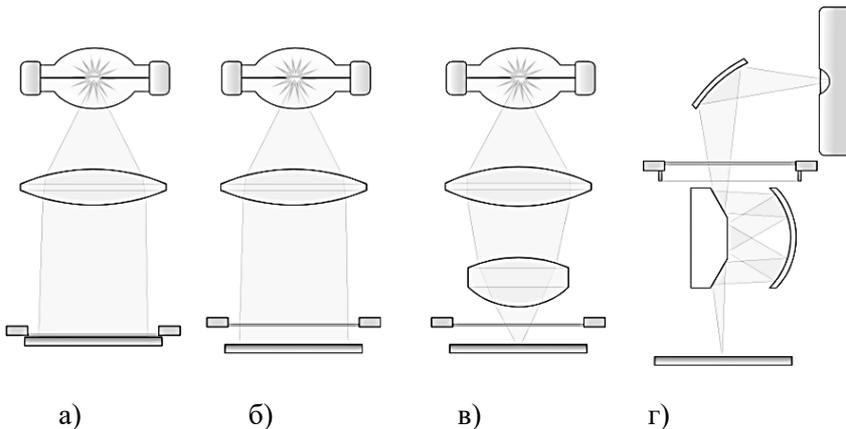


Рис. 1.7.16. Виды фотолитографии в зависимости от способа переноса изображений: а – контактная; б – с зазором; в – проекционная с преломляющей оптикой; г – проекционная с отражательной оптикой

При контактной литографии шаблон накладывается на пластину фиксируется с помощью мягкого, жесткого или вакуумного контакта. Изображение переносится в масштабе 1:1.

Достоинства:

- низкая стоимость системы – нет необходимости в сложной проекционной оптической системе;
- хорошо подходит для исследовательских применений.

Недостатки:

- ограничение по максимальному размеру пластин;
- разрешение значительно хуже, чем у современной проекционной фотолитографии;
- проблемы с неудовлетворительным контактом из-за загрязнений и неровности пластины;
- трудоемкое совмещение;
- повреждение шаблона.

Часть этих недостатков отсутствует у фотолитографии с зазором, в которой шаблон фиксируется на расстоянии порядка 10 мкм от пластины.

При проекционной литографии изображение с фотошаблона проецируется на подложку с помощью оптической системы. При этом возможно масштабирование изображения. Схемы проекционной литографии показаны на рис. 1.7.17.

Для совмещения и экспонирования в настоящее время используется 2 вида установок:

- литографический степпер
- литографический сканер

Степпер – это установка для фотолитографии, управляемая компьютером. Является самым сложным и дорогостоящим оборудованием во всем цикле изготовления СБИС. Упрощенная оптическая система степпера показана на рис. 1.7.18.

Основные характеристики оптической системы:

- числовая апертура NA ;
- когерентность σ ;
- пространственное разрешение CD ;
- глубина фокуса DOF .

Числовая апертура определяется по формуле:

$$NA = n \sin \theta_0 ,$$

где n – кратность поляризации света.

- увеличение значения NA ;
- увеличивает разрешение;
- уменьшает величину глубины резкости;
- значительно повышает требования к рельефу пластин и дополнительно усложняет технологию;
- требует увеличения диаметра линз объектива, соответственно, увеличивает массу объектива.

Современные объективы степперов чтобы получить большую апертуру и устранить aberrации и искажения имеют массу более 500 кг, сложны в изготовлении, поскольку в них более 20 оптических элементов (рис. 1.7.19) и очень дорогие. При этом они оптимизированы только на узкую часть спектра. Оптическая система позволяет уменьшать изображение, перенося его в масштабах 5:1 или 10:1.

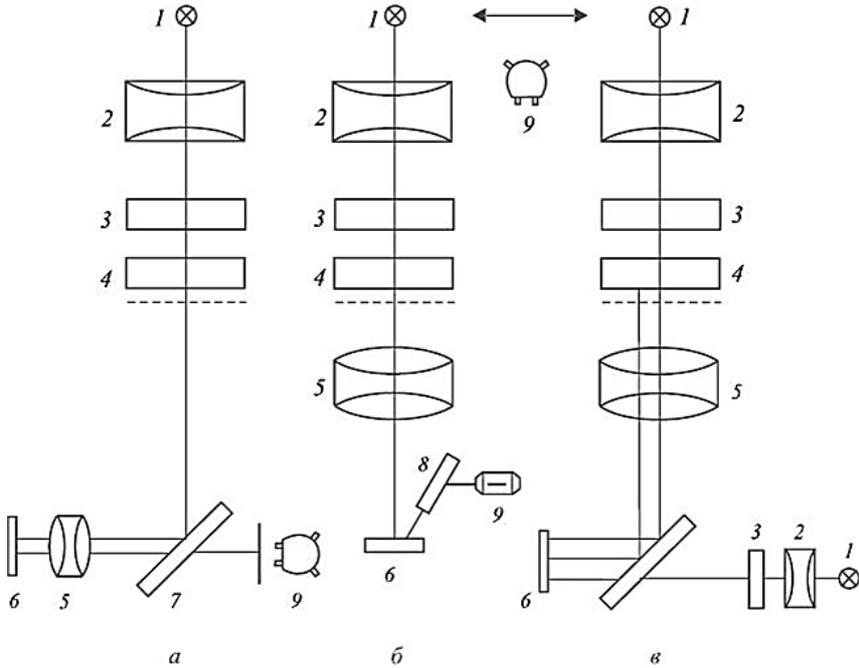


Рис. 1.7.17. Схемы проекционной фотолитографии:
 а – одновременное проецирование и совмещение; б – совмещение в пространстве изображения; в – обратное изображение
 1 – источник света, 2 – конденсор, 3 – фильтр, 4 – фотошаблон, 5 – объектив, 6 – подложка, 7 – полупрозрачное зеркало, 8 – зеркало, 9 – микроскоп

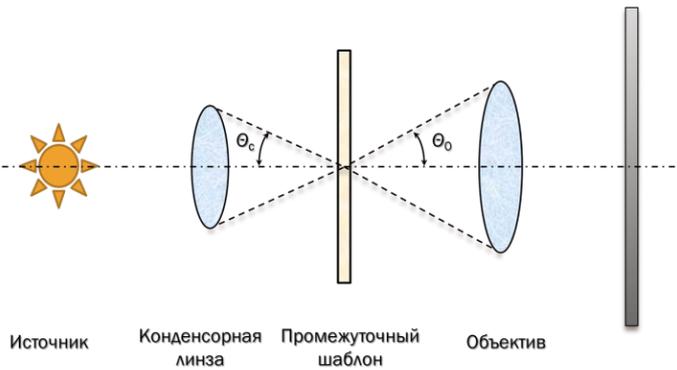


Рис. 1.7.18. Упрощенная оптическая система степпера

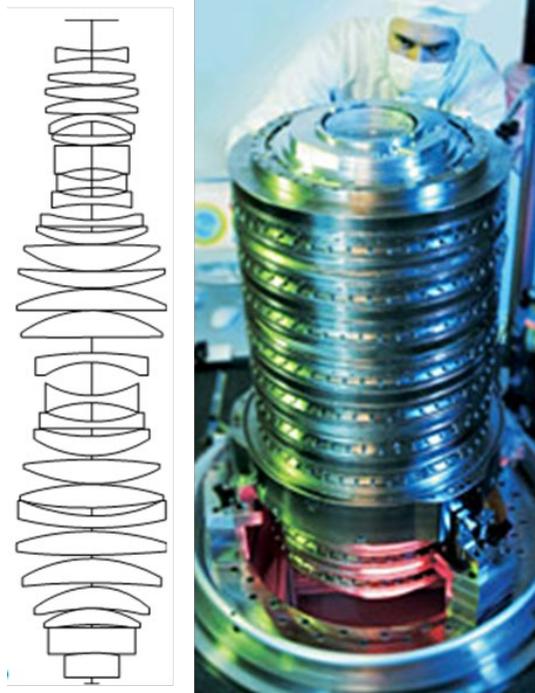


Рис. 1.7.19. Проекционные линзы объектива степпера

Когерентность определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{\sin \theta_c}{\sin \theta_0}.$$

Оптимальное значение когерентности для изображения линий составляет 0,6 ... 0,8, для контактных окон – 0,3 ... 0,5.

Пространственное разрешение определяется по формуле:

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA},$$

где λ – длина волны актиничного излучения, k_1 – константа оптической системы.

Глубина фокуса определяется по формуле:

$$DOF = \pm k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2},$$

где k_2 – константа оптической системы.

Есть несколько факторов, которые ограничивают разрешение литографических процессов. Среди них:

- искажения в проекционной системе;
- астигматизм, кома, искажения, хроматические и сферические aberrации;

- контраст резиста;
- соотношение глубины фокуса и толщины резиста;
- эффект близости;
- стоячие волны в пленке резиста.

Следует иметь в виду, что экспозиция всей пластины за один раз затруднительна, поскольку:

- требуется высокая однородность излучения;
- требуется плоскостность пластины и точная настройка фокуса;
- совмещение только один раз сразу всей пластины невозможно при размерах пластин 200-300 мм и субмикронном разрешении.

В связи с этим на современном литографическом оборудовании (степперах и сканерах) применяются методики последовательного экспонирования.

При экспонировании степпером происходит последовательная засветка модуля, содержащего один или несколько кристаллов (рис. 1.7.20). В современных степперах размер сетки поля составляет 5...20 мм, в результате чего в модуль попадает максимум 4 чипа. Обход пластины осуществляется по змейке. Изображение с фотошаблона переносится в масштабе 5:1.

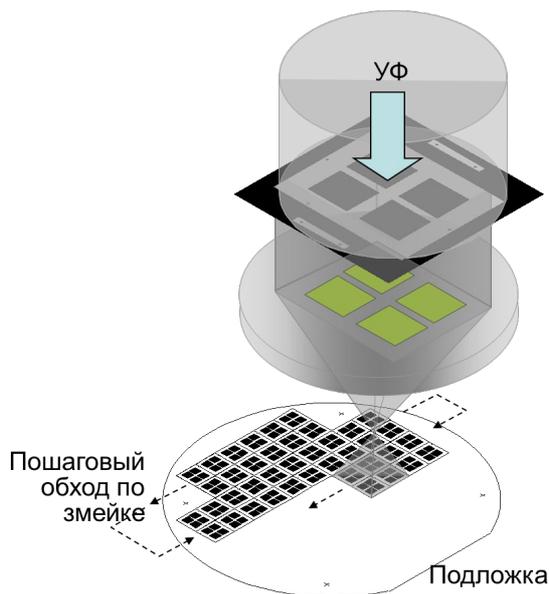


Рис. 1.7.20. Экспонирование на степпере

Литографические сканеры обеспечивают перенос изображения засветкой через щелевую апертурную диафрагму при одновременном

синхронизированном движении шаблона и пластины относительно проекционной системы (рис. 1.7.21). Скорость пластины больше скорости шаблона в число раз масштаба объектива.

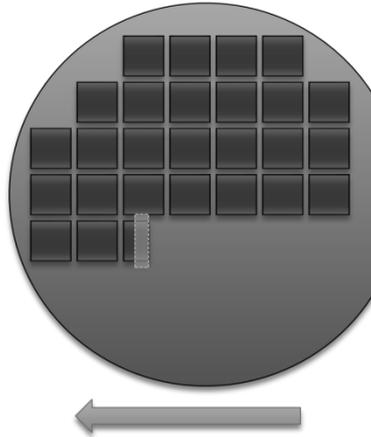


Рис. 1.7.21. Перенос изображения на сканере

Современные пластины имеют диаметр 200...300 мм, каждая пластина содержит сотни отдельных чипов. Последовательное экспонирование требует наличия прецизионной системы перемещения подложки или линзы (рис. 1.7.22). При этом необходимо обеспечить нанометрическую точность. Контроль положения осуществляется лазерной интерферометрией.

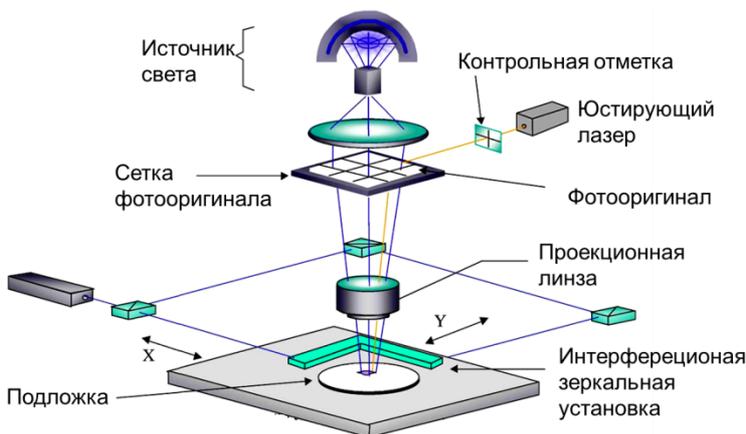


Рис. 1.7.22. Система совмещения

Рентабельность литографической установки определяется ее производительностью. Современные установки позволяют проводить экспонирование от 30 до 200 пластин/час.

1.7.7. Источники актиночного излучения для ФОТОЛИТОГРАФИИ

Выделяют 4 вида актиночного излучения, используемого для фотолитографии (рис. 1.7.23)

- дальний УФ менее 10...180 нм;
- средний УФ 180...300 нм;
- ближний УФ 300...360 нм;
- видимый 360...450 нм.

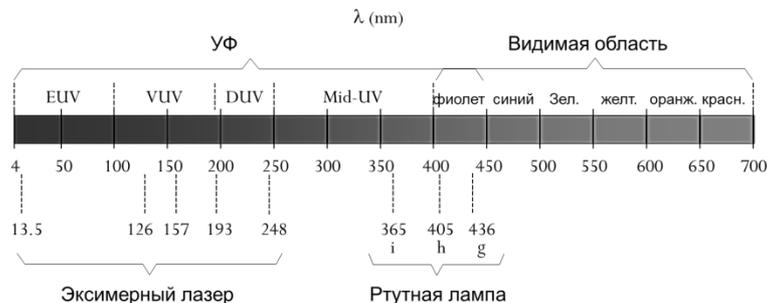


Рис. 1.7.23. Источники актиночного излучения для фотолитографии в зависимости от длины волны

Основным источником актиночного излучения для ближнего (длина волны 350...450 нм) и среднего ультрафиолета (300...350 нм) являются ртутные дуговые лампы высокого давления, для дальнего ультрафиолета (240...250 нм) — ртутно-дуговые лампы. Они являются мощным источником света, который излучает из малого объема светящегося тела (несколько мм в диаметре). Их общая мощность 100...2000 Вт, но большая часть — тепловое излучение и видимый свет, которые отфильтровываются. При этом энергия, необходимая для засветки одного кадра, составляет более 1,5 Вт.

Обычно используется только одна из полос линейчатого спектра лампы: g-линия 435,83 нм, h-линия 404,65 нм или i-линия 365,48 нм. Каждая из этих линий несет не более 2% от общей энергии излучения дуговой лампы.

Для среднего и дальнего ультрафиолета используются эксимерные лазеры. «Эксимер» (*excimer*) — сокращение понятия возбужденный димер (*excited dimer*) и означает комплекс из двух атомов инертного газа и галогена, который может существовать только в возбужденном состоянии. Неустойчивая молекула образуется в результате газового разряда. Эксимерные лазеры выдают импульсы длительностью 5...20 нс с частотой повторения до 4000 Гц и энергией до 20 Ватт. Их достоинством является большая эффективность в осветительных системах литографических степперов и сканеров. Но при этом они обладают высокой стоимостью.

Характеристики используемых в микроэлектронике эксимерных лазеров

приведены в табл. 1.7.1.

Таблица 1.7.1.

Используемые эксимерных лазеров в микроэлектронике и их характеристики

Тип эксимерного лазера	Тип ультрафиолета	Длина волны, нм
XeF	Средний УФ	351
$XeCl$		308
$XeBr$		282
KrF	Дальний УФ	248
ArF		193
F_2		157

1.7.8. ФОТОШАБЛОНЫ ДЛЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Фотошаблон для полупроводниковых структур - это стеклянная пластина с нанесенным на ее поверхности маскирующим слоем – покрытием, образующим трафарет с прозрачными и непрозрачными для оптического излучения участками (рис. 1.7.23). Для изготовления микросхемы одного типа требуется несколько разных фотошаблонов.

К фотошаблонам для производства полупроводниковых структур предъявляется комплекс требований, к которым в первую очередь следует отнести следующие:

- оптическая плотность маскирующего материала должна быть не менее 2,0;
- толщина маскирующего материала – не более 100 нм;
- его отражательная способность не выше 15%;
- неплоскостность от нескольких мкм до десятков мкм (для разных классов фотошаблонов);
- микродефектность порядка 0,1 см⁻²;
- краевая четкость рисунка не ниже 0,1 мкм для элементов изображения с размером менее 1 мкм.
- большое количество идентичных изображений до 20000;

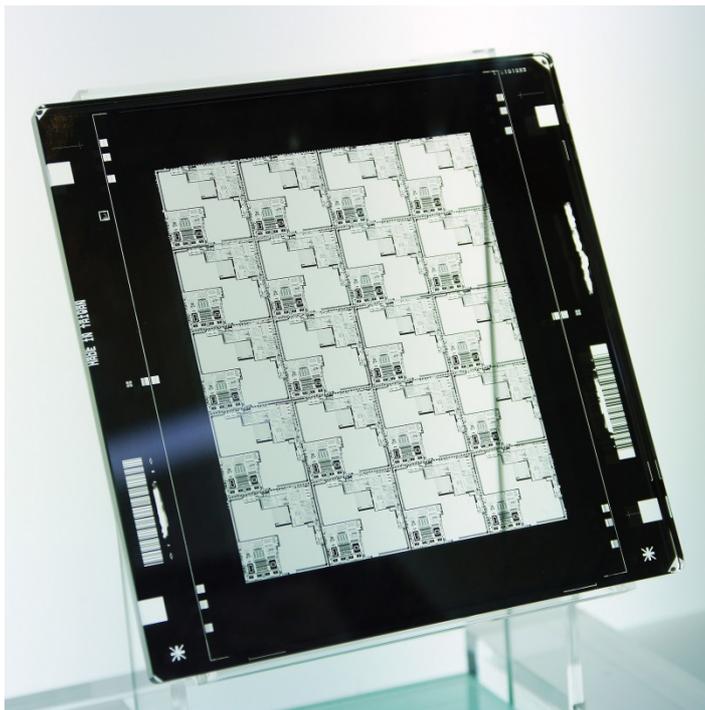


Рис. 1.7.23. Пример фотошаблона полупроводниковой структуры

Высокая точность соблюдения размеров элементов и шага между элементами, точность по размерам и точность по шагу определяются необходимостью последовательного совмещения фотошаблонов комплекта.

В полупроводниковой технологии в 90% случаев используется не отдельный фотошаблон, а комплект из многих (до 20) фотошаблонов, степень совмещаемости которых целиком зависит от указанных точностей.

Эмульсионный фотошаблон теряет качества после 20 операций контактной печати, металлизированные, в частности хромовые, фотошаблоны обладают гораздо большей (по некоторым данным в 3000 раз) износоустойчивостью, нежели эмульсионные.

В любом фотолитографическом методе - контактном, проекционном, и в методе сканирующего луча - необходимым отправным пунктом является некоторый шаблон, образец, содержащий информацию о размерах, расположении, конфигурации и т.д. получаемых изображений.

Перед тем, как произвести экспонирование, необходимо осуществить совмещение, то есть выполнить точную ориентацию фотошаблона относительно подложки, в которой элементы очередного топологического слоя (на фотошаблоне) занимают положение относительно элементов предыдущего слоя (в пластине), предписанное разработчиком топологии.

Например, фотошаблон, несущий рисунок эмиттерных областей, должен быть точно ориентирован относительно пластины, в которой уже сформированы области базы будущего транзистора. Процесс совмещения включает три этапа:

- предварительная ориентация подложки по базовому срезу, обеспечивающая на границах модулей групповой пластины наиболее выгодную кристаллографическую плоскость с точки зрения качества разделения подложки на отдельные кристаллы.
- предварительное грубое совмещение по границам крайних модулей, имеющее целью исключить разворот пластины и фотошаблона относительно вертикальной оси z.
- точное совмещение, исключающее смещение рисунков фотошаблона и пластины по осям x и y.

Для точного совмещения используют специальные знаки совмещения с контролируемым зазором, которые входят в состав топологических рисунков соответствующих слоев (рис. 1.7.24). Совмещение считается выполненным, если при введении одного знака внутрь другого по всему контуру просматривается зазор.

Минимальный зазор между знаками (рис. 1.7.25) определяется по формуле:

$$\delta_{\text{ном}} = \delta_{\text{min}} + \Delta_{\text{и}} + \frac{\Delta_{\text{ш}} + \Delta_{\text{п}}}{2},$$

где $\delta_{\text{min}} = 200/\Gamma$, Γ – кратность микроскопа; $\Delta_{\text{и}}$ – абсолютная предельная погрешность фиксации изображения на установке совмещения и экспонирования; $\Delta_{\text{ш}}$ – абсолютная предельная погрешность знака на шаблоне; $\Delta_{\text{п}}$ – абсолютная предельная погрешность знака на пластине.

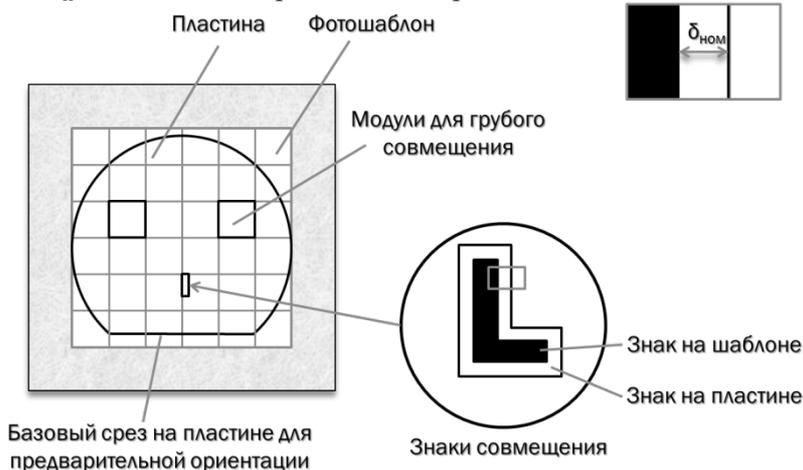


Рис. 1.7.24. Расположение знака совмещения

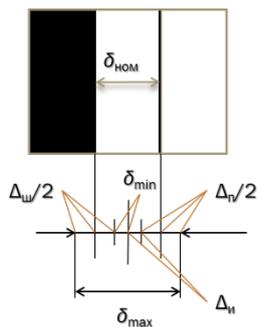


Рис. 1.7.25. Определение номинального зазора между знаками

Абсолютная предельная погрешность совмещения определяется по формуле:

$$\Delta_c = \delta_{max} - \delta_{min} = \Delta_{и} + \Delta_{ш} + \Delta_{п}.$$

Одним из важных критериев при разработке реперных знаков является их уникальность — рисунок реперного знака должен быть уникальным в некоторой области фотошаблона и подложки. Могут использоваться различные варианты реперных знаков (знаков совмещения).

Поскольку в настоящее время используются установки автоматического совмещения, основанные на системах технического зрения, то на качество и повторяемость процесса совмещения наибольшее влияние оказывают следующие факторы:

- конфигурация реперных знаков;
- контрастность и фокусировка изображения фотошаблона и подложки;
- повторяемость рисунка;
- свободный обзор подложки через фотошаблон.

От сочетания этих факторов зависит сама возможность выполнения автоматического совмещения, а также его скорость и точность. Система автоматического совмещения может находить заданные области изображения фотошаблона и подложки только в том случае, если эти изображения имеют достаточную контрастность. С наименьшей погрешностью совмещение выполняется только при наиболее точной передаче оттенков серого и границ изображения. Конечно же, система технического зрения сможет распознать и не очень точные и контрастные реперные знаки, но при этом сам процесс совмещения будет выполняться дольше и менее точно, что приведет к снижению производительности и выхода годных.

Ограничением получения минимальных размеров с помощью фотолитографии служит дифракция света. Минимальный размер

определяется длиной волны используемого света.

Длина волны видимого света 0,35 – 0,7 мкм; ультрафиолетового излучения (УФ) – 0,1 – 0,3 мкм.

Таким образом, использование УФ позволяет получить с помощью фотолитографии минимальный размер $D = 0,1$ мкм.

Для этого нужна проекционная фотолитография и тщательно спроектированная и изготовленная УФ оптика.

Получить $D < 1$ мкм с помощью контактной фотолитографии практически невозможно из-за размывания границы тени от фотошаблона.

Проблемы, возникающие при проекционной ФЛ:

- абберации оптической системы;
- обеспечение жесткости конструкции;
- необходимость устранения вибраций;
- тепловое расширение маски и ИС.

Для обеспечения высокой точности необходима стабилизация температуры до 0.01°C в пределах фотошаблона (маски) и обрабатываемого объекта.

1.7.9. ПРОБЛЕМЫ ФОТОЛИТОГРАФИИ

У литографических процессов, которые используют актиничное излучение, существует физическое ограничение: минимальный размер элемента определяется длиной волны используемого света. В результате формирование рисунка на поверхности приобретает большие сложности, когда его размер оказывается меньше длины волны экспонирующего света. Хотя законы волновой оптики не запрещают формирование деталей с таким разрешением, начиная с этих размеров линейная оптика заменяется на куда более сложную дифракционную, требующую большую точность при всех операциях – с соответствующим влиянием на цены установок.

В результате приходится использовать маски, рисунок которых вычислен с учётом волновых свойств света, чтобы добиться большего разрешения или меньших искажений при данной длине волны. Первые подобные программы, позволяющие проводить такие вычисления, были написаны в начале 1980-х годов и использовались лишь для оптимизации рисунка маски. Однако 1998 году, когда замыкал переход на первый техпроцесс с технологической нормой меньше длины волны (180 нм), мощность компьютеров уже сильно возросла, что позволило использовать более точные алгоритмы и модели. Для современных технологических норм требуются уже тысячи процессоров и недели расчётов, чтобы вычислить рисунки для десятков масок, необходимых самым сложным ИС.

В первую очередь к искажениям топологии приводит эффект оптической

близости – *ОПС* (рис. 1.7.26), в результате которого из-за дифракции форма элементов при переносе изображений искажается. Топологический рисунок шаблона заранее модифицируется таким образом, чтобы дифракционные искажения модифицированного элемента приводили к реальному переносу на маску резиста слоя максимально приближенного к требуемому топологическому рисунку. При дифракционных ограничениях проекционной системы топология (рис. 1.7.26 а) переносится на слой резиста с искажениями (рис. 1.7.26 в). При введении специальных дополнительных элементов топологии (*serif*) (рис. 1.7.26 б), форма (рис. 1.7.26 г) приближается к исходной. Коррекция топологии осуществляется в САПР по специальной программе.

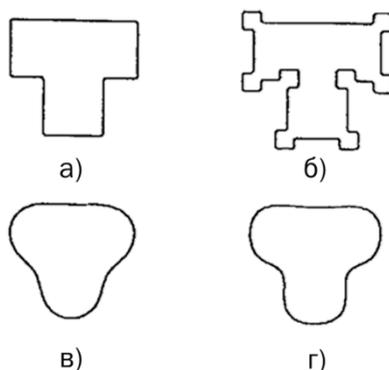


Рис. 1.7.26. Коррекция эффекта оптической близости (*ОПС*): а – исходная топология; б – модифицированная топология; в – искаженная из-за эффекта близости топология; г – итоговая топология после коррекции

Дифракция при литографии (рис. 1.7.27) возникает из-за волновой природы света. Кроме того, волна преломляется (рассеивается), что приводит к неравномерной плотности освещения, что, в свою очередь, ведет к неравномерности засветки фоторезиста (рис. 1.7.28). Итогом может стать «размытость» проявленного рисунка.

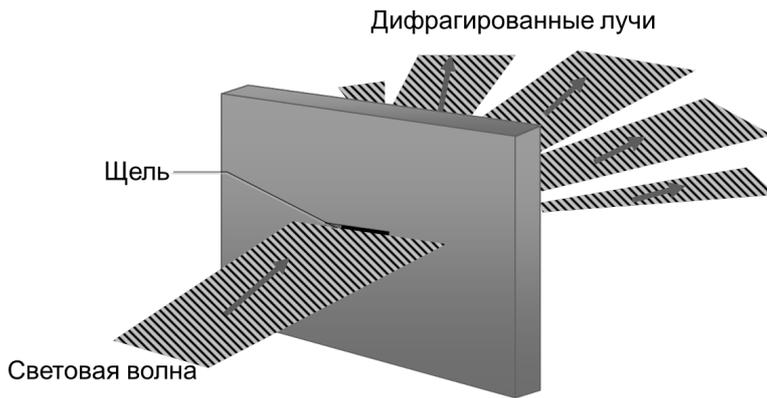


Рис. 1.7.27. Дифракция световой волны при прохождении через щель

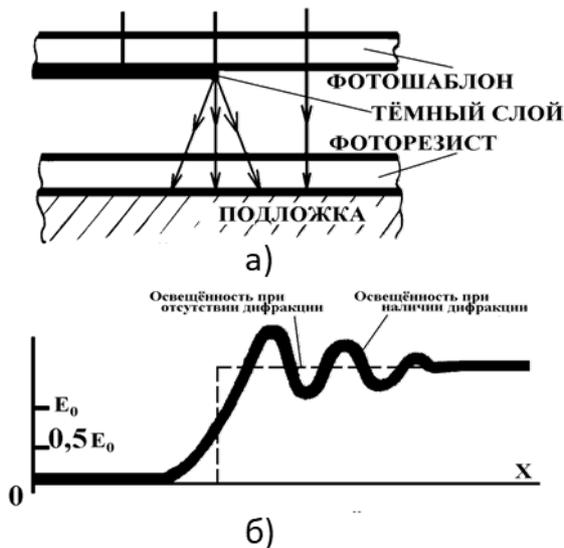


Рис. 1.7.28. Неравномерность засветки резиста из-за преломления (рассеивания) света: а – ход лучей света; б – распределение освещенности в резисте

Кроме того, искажения топологии могут возникать в результате дифракции на углах и переотражения от обратной стороны маски, что приводит к дополнительной (неправильной) засветке фоторезиста (рис. 1.7.29).

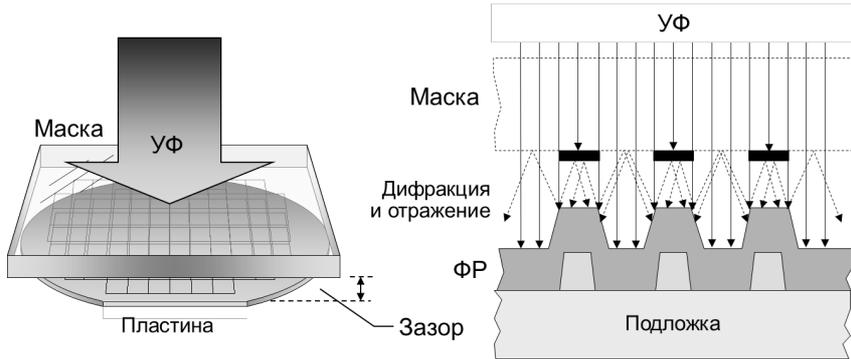


Рис. 1.7.29. Дифракция на границе и переотражение поверхности при фотолитографии на микрозазоре

Решением указанной проблемы является сбор дифрагированного света линзой (рис. 1.7.30). Кроме того, дифракцию можно уменьшить, уменьшая длину волны. Но все это приводит к удорожанию оборудования.

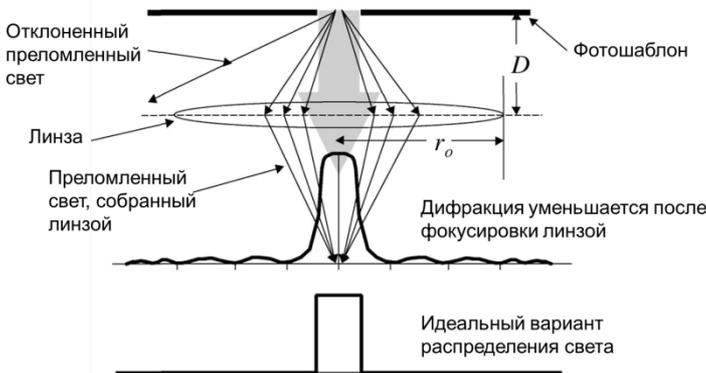


Рис. 1.7.30. Сбор дифрагированного света линзой

Повысить качество дифрагирования света можно, используя линзы с большей числовой апертурой (рис. 1.7.31). Значение NA линзы можно определить по формуле:

$$NA = \frac{2r_0}{D},$$

где r_0 – радиус линзы, D – расстояние от предмета до линзы.

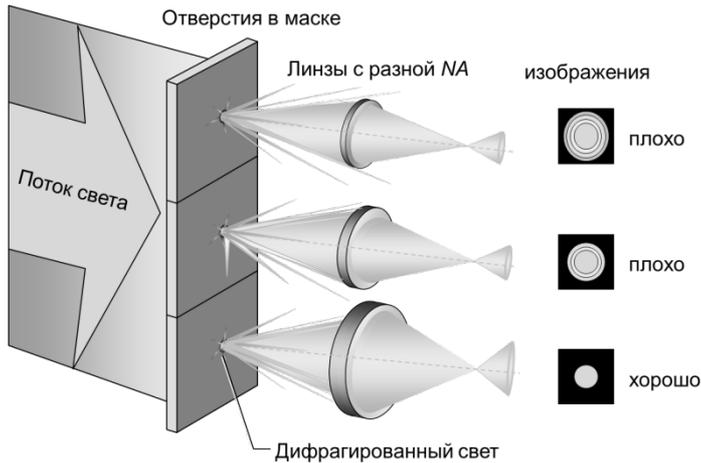


Рис. 1.7.31. Влияние числовой апертуры (NA) на дифракцию света

Кроме того, к искажениям при литографии приводит интерференция, которая может вызвать отражение или поглощение света. В результате возникает эффект стоячей волны (рис. 1.7.32), приводящий к переоблучению или недооблучению фоторезиста и, соответственно, к уменьшению разрешения фотолитографии.

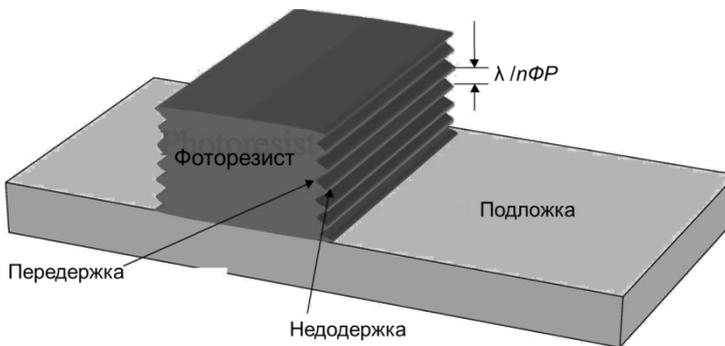


Рис. 1.7.32. Эффект стоячей волны на фоторезисте

Важным параметром является глубина фокуса (DOF). Для наибольшего разрешения центр фокуса должен располагаться в середине пленки резиста, а глубина фокуса – превышать толщину фоторезиста (рис. 1.7.33). Чтобы увеличить глубину фокуса, нужно уменьшать числовую апертуру, но это приводит к уменьшению резкости. Практичнее уменьшить длину волн.

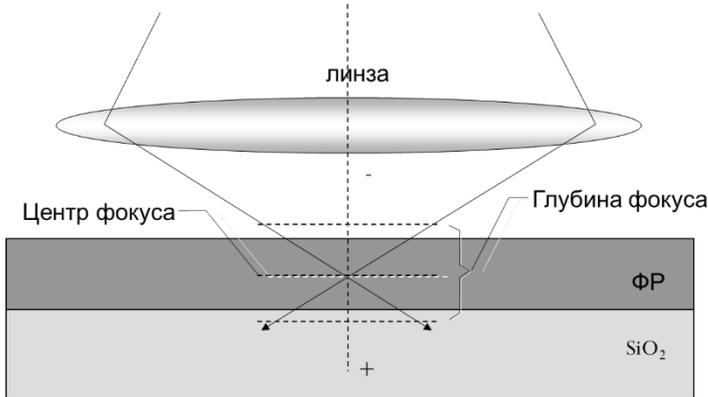


Рис. 1.7.33. Оптимальная глубина фокуса для наибольшего разрешения

Минимально достижимый стабильно воспроизводимый размер элемента при литографии определяется разрешающей способностью. Есть несколько возможностей ее повысить.

1. Увеличить NA линз. Однако использовать большие линзы слишком дорого и непрактично. Кроме того, увеличение NA приводит к снижению DOF и ведет к трудностям настройки оптики. Для неиммерсионных систем максимальное значение NA составляет 0,93. Хотя теоретически его можно довести до 0,95, но это непрактично.

2. Уменьшить длину волны актиничного излучения. Но это ведет к необходимости разработать новые источники света, фоторезист и оборудование, что слишком дорого.

3. Понизить k_1 (константу оптической системы). Этого добиваются использованием внеосевого излучения, фазосдвигающих масок или иммерсионной литографии.

4. Использовать множественное шаблонирование.

5. Перейти к фотолитографии экстремального ультрафиолета, рентгенолитографии, электролитографии или ионолитографии.

1.7.10. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕОСЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ФАЗОСДВИГАЮЩИХ МАСОК

Одним из способов повышения разрешения литографического процесса является использование внеосевого излучения (OAI). Его суть заключается в том, что путем вырезания с помощью диафрагм из осевого цилиндрического пучка излучения внеосевых трубчатых (кольцевых в сечении), дипольных (два полюса в сечении) или квадрупольных (четыре полюса в сечении) пучков освещения. В зависимости от угла наклона и длины волны при прохождении света через соседние элементы возникает разность фаз (рис.

1.7.34), которая обеспечит большую четкость изображения на пластине и приведет к меньшей чувствительности от вариации технологических параметров (например, вариации профиля пластины). Величина этой разницы фаз будет зависеть от угла наклона оси и длины волны актиночного излучения, а также определяться спецификой технологии, прежде всего шагом и размерами минимальных элементов.

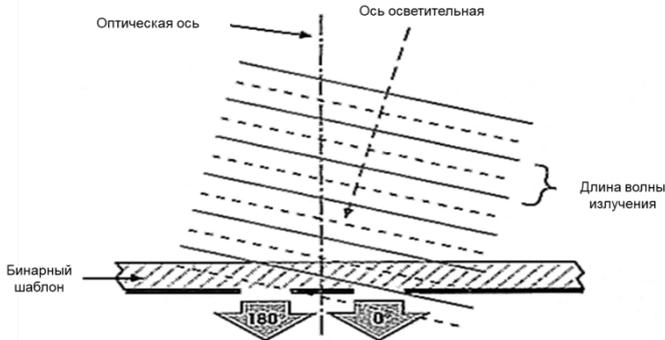


Рис. 1.7.34. Использование внеосевого излучения

Используемая с 90-нанометрового процесса (2006 год) технология фазосдвигающих масок (*PSM*) — это коррекция толщины отдельных «пикселей» маски для изменения их прозрачности, что меняет фазу проходящего сквозь них света. Учитывая волновые свойства, это позволяет (не считаясь с длиной волны) экспонировать на фоторезисте рисунок, отдельные элементы которого либо усилены синфазным наложением волновых пиков, либо удалены противофазным — это увеличивает разрешение, приближая тот самый параметр k_1 к идеалу.

Суть этого метода заключается в том, что в конструкцию шаблона вводятся фазосдвигающие элементы, которые локально изменяют фазу проходящего через шаблон актиночного света на заданную величину (обычно на π). В результате интерференционного взаимодействия дифрагированных на соседних элементах (краях) пучков актиночного света и взаимного гашения рассеянного излучения обеспечивается увеличение контраста формируемого изображения. В обычной бинарной маске (рис. 1.7.35 а) все прозрачные элементы имеют одинаковую толщину и выполняются из одного материала. В результате световая волна приходит на подложку в одной фазе. Если линии на шаблоне расположены слишком близко, из-за интерференции световые волны взаимно усиливаются, в результате чего происходит засветка резиста в том числе и там, где его должна закрывать маска. Чтобы избежать этого, определенные области делаются толще (рис. 1.7.35 б) или тоньше (рис. 1.7.35 в). Сильный сдвиг фазы в такой чередующейся структуре приводит к перекрытию областей

рассеяния от элементов изображения и их взаимному гашению, что в свою очередь увеличивает контраст изображения на пластине.

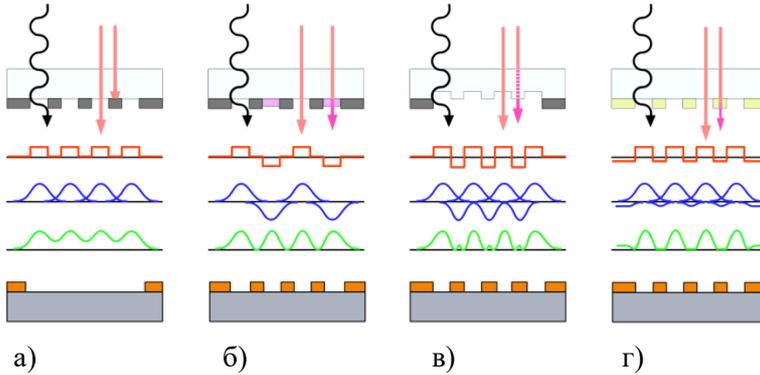


Рис. 1.7.35. Использование фазосдвигающих масок:

- а – обычная бинарная маска; б – фазосдвигающая маска с нанесенным слоем; в – фазосдвигающая маска с протравленным слоем (маска Левенсона); г – маска с ослабленным фазовым сдвигом

Кроме того, можно использовать маски с ослабленным фазовым сдвигом (рис. 1.7.35 г), в которых используется иной подход: некоторые светоблокирующие части маски модифицируются таким образом, чтобы пропускать некоторое количество света (обычно несколько процентов). Его интенсивность недостаточна для того, чтобы засветить резист, прошедшая через них световая волна накладывается на волну, проходящую через прозрачные элементы, делая изображение более контрастным. Хотя такие маски сложнее в производстве, чем другие фазосдвигающие маски, их более простая конструкция и удобство в эксплуатации стали широко использоваться в литографии. Например, фирма *Intel* использует шаблоны с такими масками, начиная с технологической нормы 65 нм.

1.7.11. МНОЖЕСТВЕННОЕ ШАБЛОНИРОВАНИЕ

В 2006 г. только что внедрённый техпроцесс 65 нм уже не мог основываться лишь на вычислительной литографии, так как с длиной волны 193 нм её уже не хватало. Решение, основательно обновившее мировое чипостроение — множественное шаблонирование, более известное по своей простейшей реализации — двойное шаблонирование (рис. 1.7.36). Это семейство технологий снижает минимальный экспонируемый размер увеличением числа экспонирований. Как правило, в самых современных техпроцессах применяются несколько приёмов из этого арсенала.

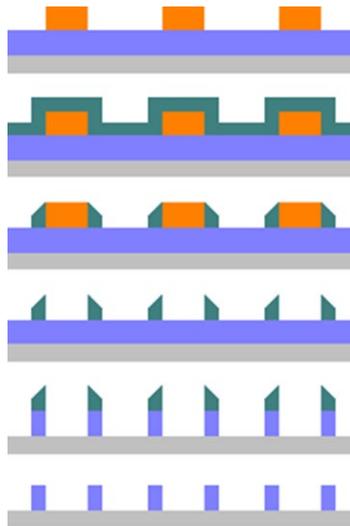


Рис. 1.7.36. Двойное шаблонирование

Последовательность данного метода следующая. Сначала формируется первичный шаблон фоторезистом. Далее осаждается химическая маска. После ее травления формируются распорки, после чего первоначальный фоторезист удаляется. Затем травится низлежащий слой, после чего распорки удаляются.

Самосовмещённые распорки позволяют получить вдвое большее разрешение формируемого рисунка при той же технорме: вначале на боковые стенки фоторезиста налипает специальная химическая маска, используемая далее как финальный шаблон травления после удаления резиста. Этот приём можно повторять и далее, используя вторичный шаблон для изготовления третичного с ещё вдвое большим разрешением — насколько это позволит химическая устойчивость материалов и повторяемость процессов.

Кроме того, можно использовать технологию двойного фотошаблона, которая заключается в декомпозиции фотошаблона. Суть этого метода заключается в том, что элементы, которые расположены слишком близко друг к другу, разносятся на 2 разных фотошаблона (рис. 1.7.37). В результате расстояние между соседними линиями на каждом шаблоне становится больше критического, что позволяет получить их на кристалле.

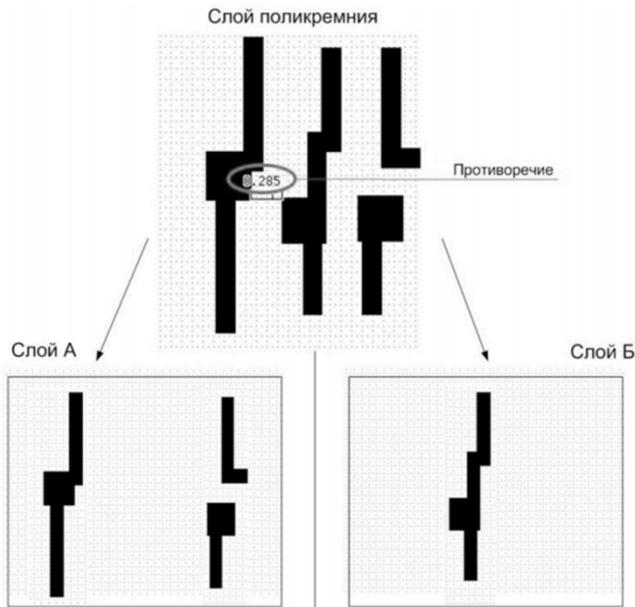


Рис. 1.7.37. Декомпозиция фотошаблона (технология двойного фотошаблона)

Кратное увеличение числа масок приводит к увеличению технологических операций для формирования каждого критического слоя, а также накладывает очень высокие требования по точности совмещения масок. Даже небольшое смещение между двумя экспозициями слоя может привести, например, к асимметрии истока и стока (относительно затвора) у всех транзисторов пластины.

1.7.12. ИММЕРСИОННАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Еще одним способом увеличения k_1 является иммерсионная (погруженная) литография (рис. 1.7.38). Она основана на том, что пространство между последней линзой и экспонируемой пластиной заполняется не воздухом, а жидкостью (на данный момент — водой). Это улучшает разрешение на 30–40% ввиду большего преломления жидкости, которое влияет на вышеуказанный параметр NA, равный 1 для воздуха и 1,33 для воды.

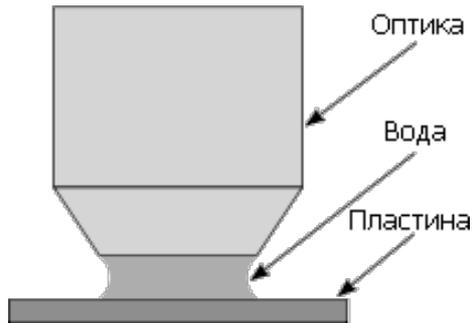


Рис. 1.7.38. Иммерсионная литография

Первые «водные» сканеры появились ещё в 2005 г., но техпроцессы с ними пришлось дорабатывать около года после внедрения на фабриках до применения в массовом производстве. *Intel* внедрила иммерсионную литографию вместо «сухой» с техпроцесса 32 нм, а *AMD* — ещё с 45 нм.

Предел разрешения степперов для иммерсионной литографии, работающих на длине волны 193 нм с числовой апертурой 1,35 составляет 36 нм.

ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ 7

Вопрос 1	Что приводит к увеличению разрешения литографического процесса?
Ответы:	
1	Уменьшение длины волны актиничного излучения
2	Уменьшение числовой апертуры
3	Увеличение длины волны актиничного излучения
Вопрос 2	Какое актиничное излучение используется в современной фотолитографии СБИС?
Ответы:	
1	Ультрафиолет
2	СВЧ
3	Гамма-излучение