

Лекция №16

Раздел 5. Микролитография

3.1. Фотолитография

3.1. Классификация процессов литографии

Литография - технологический метод, предназначенный для формирования на подложке топологического рисунка микросхемы с помощью чувствительных к излучению покрытий.

По типу используемого 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 удаляются, а экспонированные образуют рельеф или резистную 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 сканируют 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).

3.2. Схема фотолитографического процесса

В технологии ИМС с помощью фотолитографии формируется топологический рисунок 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.

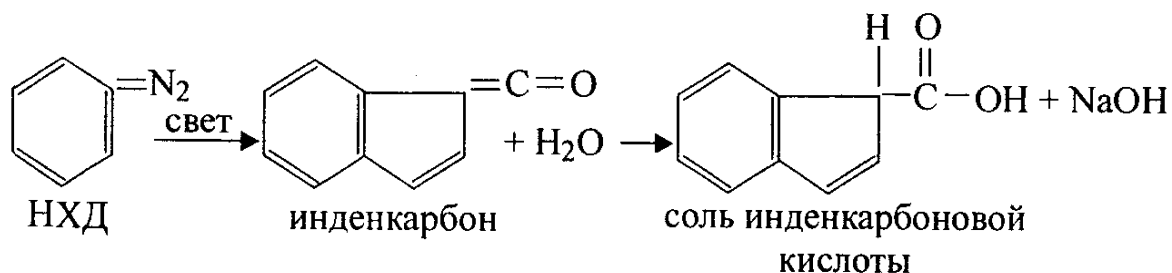
3.3. Фоторезисты

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 фотолиза светочувствительных соединений с последующим образованием растворимых веществ. Большинство позитивных резистов получено на основе нафтохинондиазида (НХД) - мономера, образующего в результате фотолиза 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.

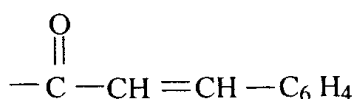
В промышленности используются позитивные фоторезисты AZ-1350, ФП-383 на основе бромированной фенолформальдегидной смолы и ФП-РМ-7 на основе резольной и новолачной смол. Последний обладает повышенной кислотостойкостью.

Негативные фоторезисты

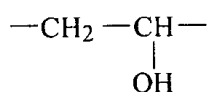
Свойства негативных фоторезистов определяют две группы фотохимических реакций:

- 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),

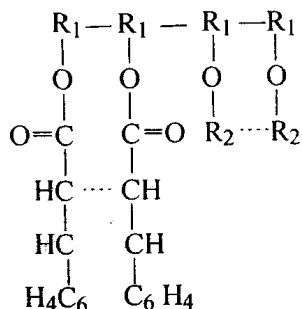


условно обозначаемая R_2 , замещает водород в гидроксильной группе, входящей в состав винилового спирта R_1 :



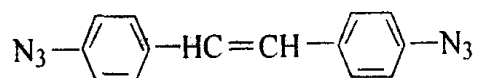
Поливинил - цепочка из нескольких R_1

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 диазосоединений, например диазостильбена:



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

Проявление рельефа осуществляется в органических растворителях. Фоторезисты на основе циклокаучука 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 циклокаучука марок ФН-11, КМЕР (фирмы Kodak) и другие.

Основные свойства фоторезистов

Светочувствительность

$$S = 1/(Et) = 1/H$$

E - световая облученность фоторезиста, $\text{Вт}/\text{м}^2$; t - время облучения, с;
 $H=Et$ - значение экспозиции, $\text{Вт}\cdot\text{с}/\text{м}^2$.

Светочувствительность - 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 $\text{эрг}^{-1}\cdot\text{см}^2$.

Критерием применимости в производстве п/п приборов и ИМС того или иного ФР является его способность создавать микрорельеф рисунка с минимальным размером элементов.

Разрешающая способность определяется числом линий равной толщины $R = N/2l$ - уместающееся на 1 мм число N полос фоторезиста, разделенных промежутками такой же ширины l . Если для изготовления п/п прибора или ИМС необходим рельеф рисунка с минимальным размером $l=1$ мкм, то разрешающая способность ФР должна быть не ниже, чем $R = 1/(2 \cdot 0,001) = 500$ линий/мм. 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. На разрешающую способность оказывает существенное влияние как процессы экспонирования и связанные с ним оптические явления в системе фотошаблон-ФР-подложка, так и процессы проявления и сушки.

К оптическим явлениям, оказывающим влияние на разрешающую способность ФР, следует отнести дифракцию света на границе ФШ-ФР, отражение света от поверхности подложки и рассеяние света в пленке ФР.

Стабильность геометрических размеров элементов рельефа рисунка в пленке ФР в сильной степени зависит от проведения процессов проявления и сушки. Процесс перепроявления приводит к увеличению размеров элементов (особенно для позитивных ФР), а процесс сушки может приводить к короблению пленки ФР.

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.

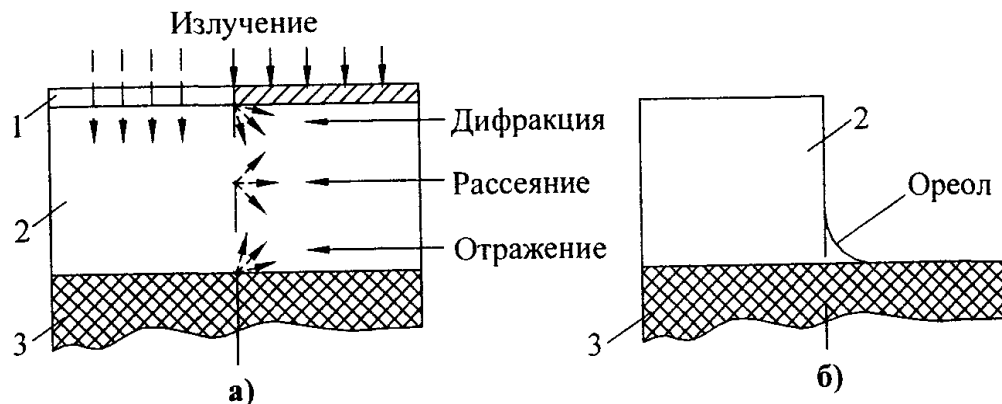


Рис.4.1. Влияние излучения на точность передачи размера рисунка: а - рассеяние света на границе освещенного и неосвещенного участков фоторезиста; б - появление "ореола" при использовании негативного фоторезиста. 1 - фотошаблон, 2 - фоторезист, 3 – подложка

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.

Процесс проявления оказывает прямое влияние на светочувствительность фоторезистов, так как при проявлении происходит химическое взаимодействие проявителя с экспонированными и неэкспонированными областями пленки ФР. Процесс проявления формирует в пленке ФР определенный рельеф рисунка, который в итоге и определяет качество полученной защитной пленки.

Адгезия ФР к подложке. В процессе ФЛ адгезия ФР к исходной подложке играет важную роль, так как она определяет стойкость пленки к внешним воздействиям. Адгезия пленки ФР зависит от химического состава и строения самого ФР, а также от состояния поверхности исходной подложки и режимов формирования пленки ФР на подложке.

Определяющей предпосылкой для получения высокой адгезионной способности является хорошая смачиваемость подложки ФР. Адгезия может быть значительно снижена за счет плохо обработанной поверхности подложки. Так, жировые пятна, адсорбированные газы, ионы чужеродных примесей могут создавать отдельные участки на подложке с малой адгезией ФР. Поэтому чистота поверхности является предпосылкой к хорошей адгезии ФР. Наличие на поверхности подложки микрорисок и микроуглублений приводит к снижению адгезии за счет трудно удаляемого воздуха из этих структурных дефектов поверхности подложки.

3.5. 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, примес-носиликатные стекла (фосфоро- и боросиликатные), пленки металлов.

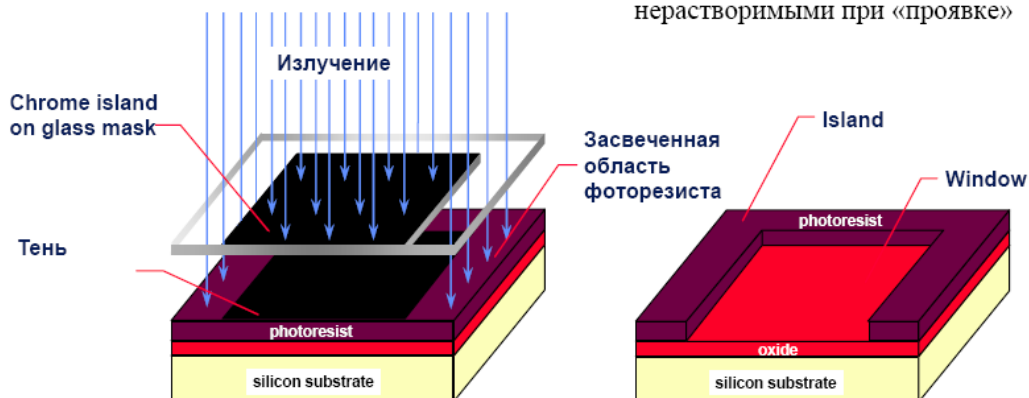
На окисленные подложки, полученные термическим окислением в сухом кислороде или парах воды, фоторезист лучше всего наносить сразу (в пределах часа) после окисления без каких-либо дополнительных обработок. Если подложки долго хранились или окисел с самого начала был гидрофильным, желательна термообработка.

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.

Негативная фотолитография

Если после экспонирования становятся растворимыми **НЕ**засвеченные области фоторезиста, то процесс фотолитографии называется **негативным**

Засвеченные области полимеризуются и становятся нерастворимыми при «проявке»

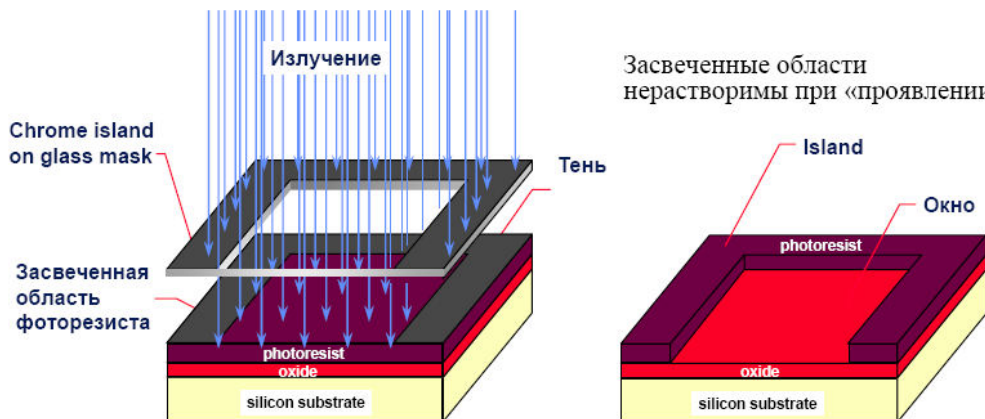


После «проявки»

Позитивная фотолитография

Если после экспонирования становятся растворимыми **засвеченные** области фоторезиста, то процесс фотолитографии называется **позитивным**

Засвеченные области нерастворимы при «проявлении»



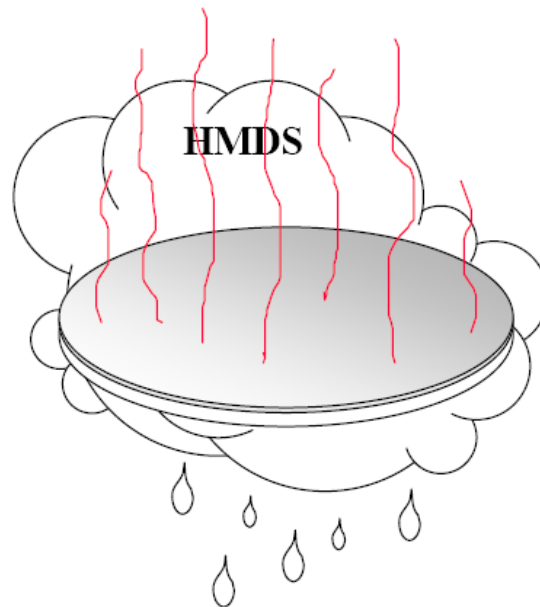
После «проявления»

1. Подготовка поверхности (промывка и сушка)
2. Нанесение резиста
3. Сушка

4. Совмещение фотошаблона и экспонирование
5. Проявление
6. Стабилизирующий отжиг
7. Контроль и исправление дефектов
8. Травление
9. Удаление фоторезиста
10. Заключительный контроль

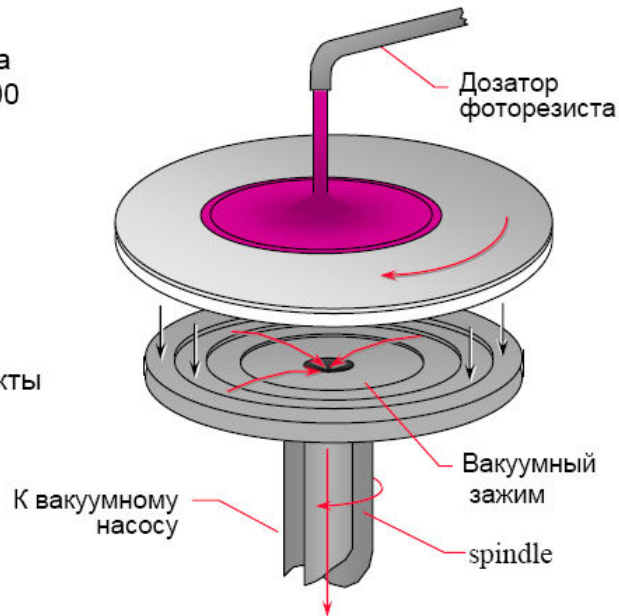
1. Подготовка поверхности

- ◆ Дегидратационная сушка в закрытой камере с откачкой
- ◆ Результат: чистая обезвоженная поверхность
- ◆ Повышение адгезии (гексаметил дисилазан в паровой фазе)
- ◆ Temp ~ 200 - 250°C
- ◆ Time ~ 60 sec.



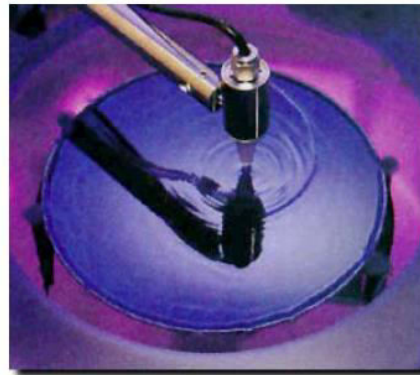
2. Нанесение фоторезиста

- ◆ Подложка фиксируется вакуумным зажимом
- ◆ Дозатор ~5мл фоторезиста
- ◆ Медленное вращение ~ 500 об/мин
- ◆ Ускорение ~ 3000 - 5000 об/мин
- ◆ Параметры качества:
 - время
 - скорость
 - толщина
 - однородность
 - Включения и др. дефекты



2. Нанесение фоторезиста

- ◆ Resist spinning thickness T depends on:
 - Spin speed
 - Solution concentration
 - Molecular weight (measured by intrinsic viscosity)
- ◆ In the equation for T , K is a calibration constant, C the polymer concentration in grams per 100 ml solution, η the intrinsic viscosity, and ω the number of rotations per minute (rpm)
- ◆ Once the various exponential factors (α , β and γ) have been determined the equation can be used to predict the thickness of the film that can be spun for various molecular weights and solution concentrations of a given polymer and solvent system

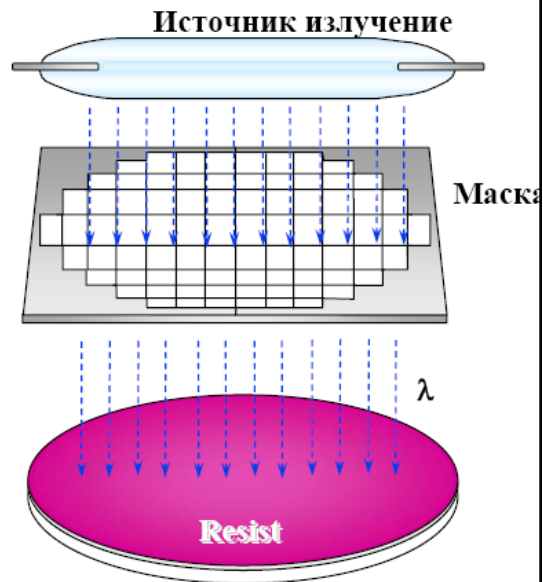


Photoresist Application
(Ontrak)

$$T = \frac{KC^{\beta} \eta^{\gamma}}{\omega^{\alpha}}$$

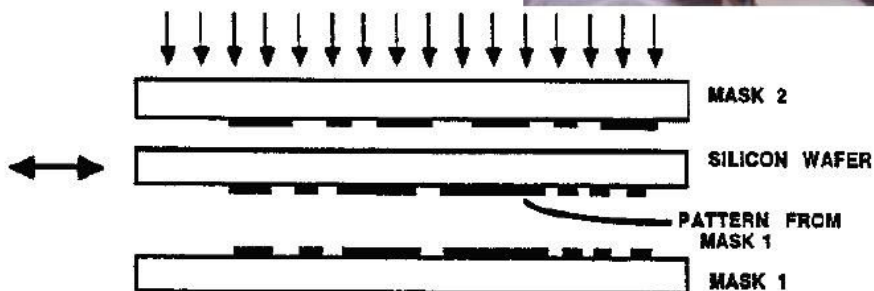
4. Совмещение фотошаблона и экспонирование

- ◆ Нанесение изображения на подложку с нанесенным резистом
- ◆ Активация фоточувствительных компонент фоторезиста
- ◆ Параметры качества:
 - разрешение
 - дефектность

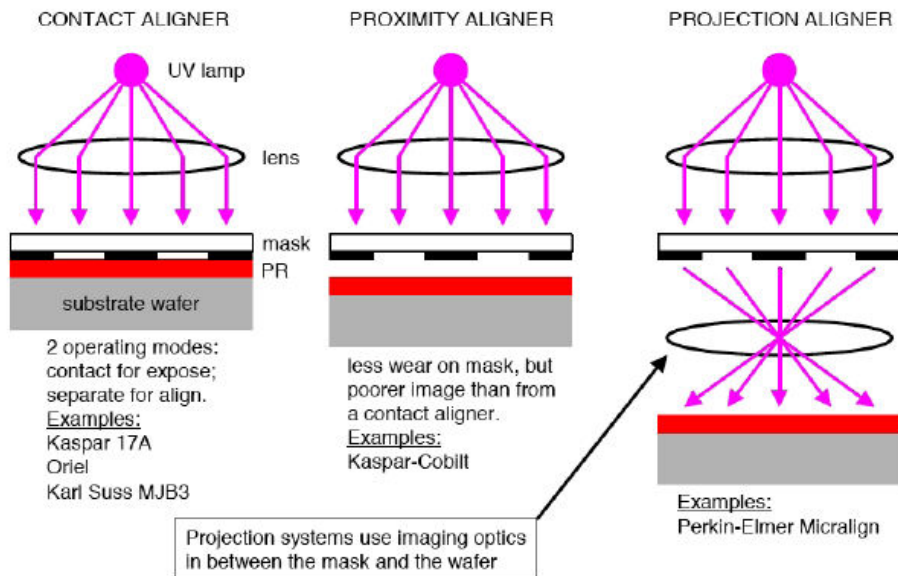


4. Совмещение фотошаблона и экспонирование

- ◆ Погрешности совмещения
- ◆ Высокоточное оборудование совмещения
- ◆ Многоуровневое совмещение



4. Типы проекций



Фотолитография

- ◆ Разрешение фотолитографии определяется дифракционным пределом
- ◆ 3 способа увеличить разрешение

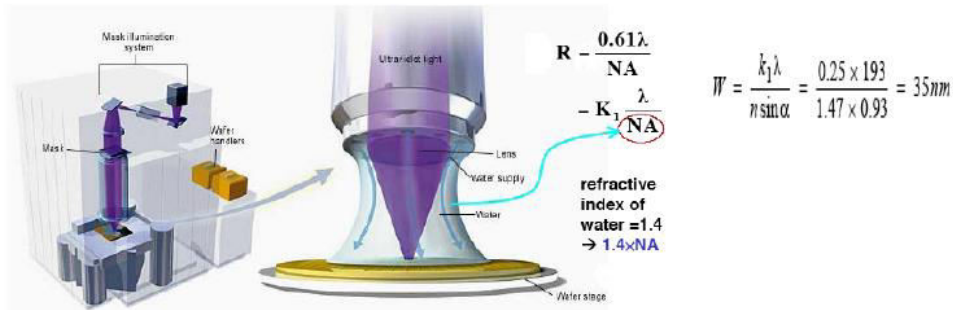
Разрешение

$$R = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

Annotations for the equation:

- Reduce λ (pointing to the wavelength λ)
- Reduce k_1 (pointing to the coefficient k_1)
- Increase NA (pointing to the numerical aperture NA)

Photolithography-Immersion Litho



- ◆ The medium between the lens and the wafer being exposed needs to have an index of refraction >1 , have low optical absorption at 193nm, be compatible with photoresist and the lens material, be uniform and non-contaminating. Surprisingly, ultrapure water may meet all of these requirements. Water has an index of refraction $n = 1.47$, absorption of $<5\%$ at working distances of up to 6mm, is compatible with photoresist and lens and in it's ultrapure form is non-contaminating.

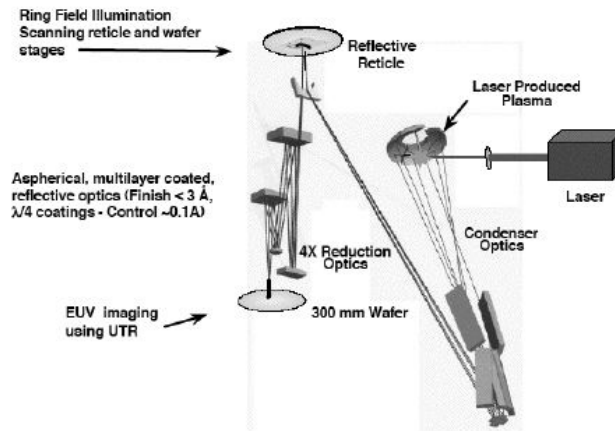
Next Generation Lithography (NGL)

1. Extreme UV lithography (EUV)
2. E-beam projection lithography (EPL)
3. Ion projection lithography
4. X-ray lithography

1. Экстремальная УФ литография
2. Электронно-лучевая литография
3. Ионная проекционная литография
4. Рентгеновская литография
5. Совершенно новые виды

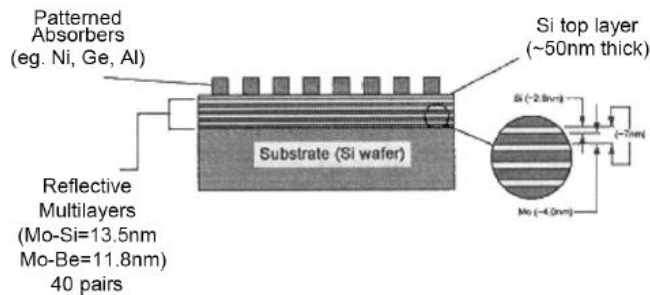
Экстремальный УФ

- ◆ Источник 13.4 nm
- ◆ Только отражающая оптика
- ◆ Проекционное уменьшение (до 4 раз)
- ◆ Step and scan printing
- ◆ Используются стандартные оптические возможности: облучение не по оси, фазосдвигающие маски, OPC
- ◆ Функционирует в вакууме
- ◆ Laser plasma source
- ◆ Very expensive system

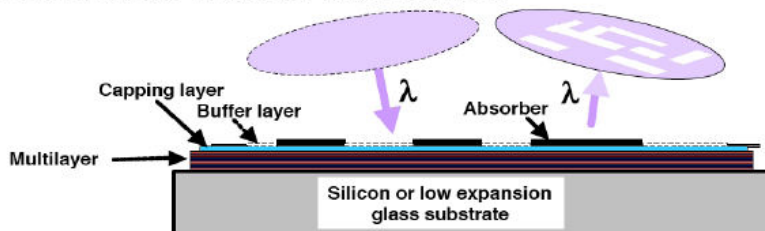


Экстремальный УФ

Изготовление маск (на отражение) – наиболее сложная задача



EUVL reflective masks fabricated

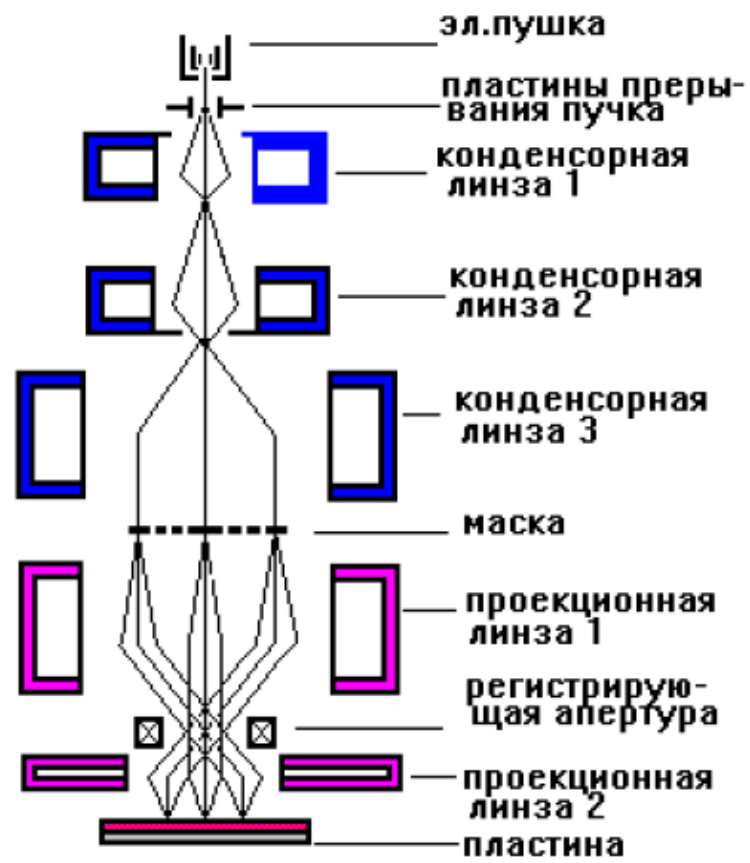


Mask Structure with incident and reflected EUV

Электронно-лучевая литография

- Дифракционный предел не влияет на разрешение ($\lambda < 1 \text{ \AA}$ for 10-50 keV electrons)
- Разрешение определяется рассеянием электронов и размерами пучка (can reach $\sim 5 \text{ nm}$)
- Две операционные моды:
 - Прямое «рисование» сфокусированным пучком
 - Электронная проекционная литография :EPL
- Проблемы:
 - Прямая: маленькая скорость, только для НИР
 - Проекционные сканеры (under development)
 - Изготовление масок (under development)
 - Обратное рассеяние электронов – уменьшение разрешения
 - Ультравысокий вакуум ($10^{-6} - 10^{-10} \text{ torr}$) –медленно и дорого

- Electrons extracted, collimated or focused and accelerated to 20 kV
- Spot diameters of $\approx 500 \text{ \AA}$ can be achieved
- Similar to ion-implantation



Проекционная система с уменьшением изображения

Рентгеновская литография

Рентгеновская литография является разновидностью оптической бесконтактной печати, в которой длина волны экспонирующего облучения лежит в диапазоне 0.4 - 5 нм. Несмотря на то, что при рентгеновской литографии используется бесконтактная экспонирующая система, проявление дифракционных эффектов уменьшено за счет малой длины волны рентгеновского излучения.

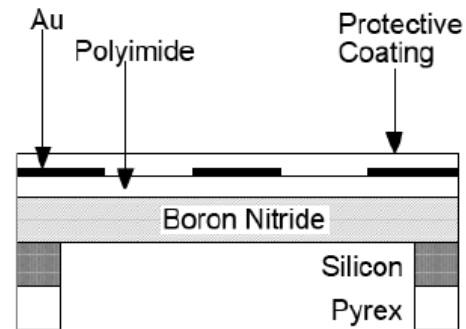
Основная цель разработки метода рентгеновской литографии заключалась в возможности получения высокого разрешения и в то же время высокой производительности оборудования. Кроме того, за счет малой величины энергии мягкого рентгеновского излучения уменьшается проявление эффектов рассеяния в резистах и подложке, следовательно, нет необходимости в коррекции эффектов близости.

Поскольку рентгеновские лучи практически не поглощаются загрязнениями, состоящими из компонентов с малым атомным номером, то наличие загрязнений на шаблоне не приводит к возникновению дефектов рисунка на резисте. Кроме того, вследствие низкого поглощения рентгеновского излучения рентгеновский резист большой толщины может быть однородно экспонирован на всю толщину, в результате чего в его объеме у окон формируются вертикальные стенки, точно повторяющие рисунок шаблона.

Так как изготовление рентгеновских оптических элементов связано с определенными трудностями, применение рентгеновской литографии ограничено теневой (**негативной**) печатью. Разрешение, получаемое при использовании метода рентгеновской литографии, ограничено геометрическими эффектами.

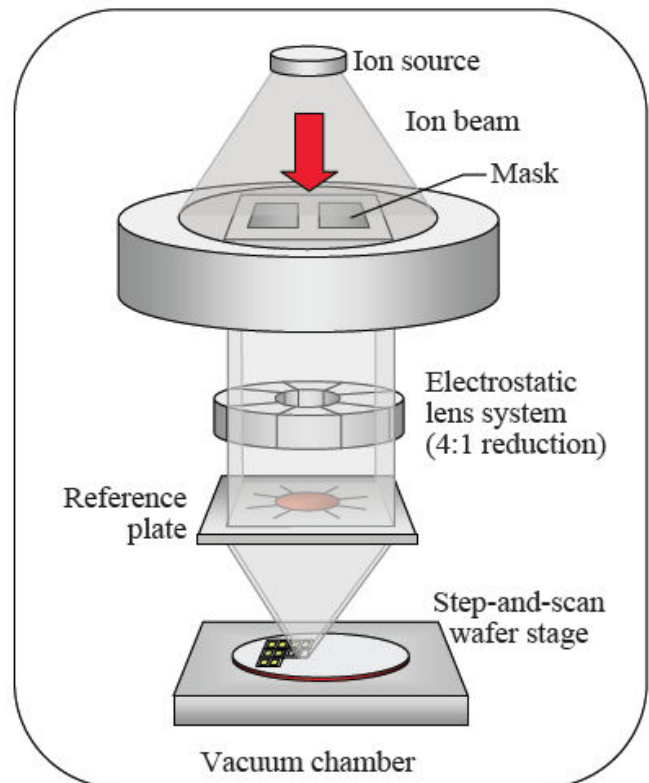
Next Generation Lithography: x-Rays

- ◆ Mask: Needs a combination of materials that are opaque (heavy element, e.g. Au) and transparent (low atomic mass membrane, e.g. BN or S_3N_4) to x-rays
- ◆ Mask written by e-beam
- ◆ Diffraction is not an issue (shadowing is, see next viewgraph)
- ◆ Masks difficult to make due to need to manage stress
- ◆ Dust less of a problem because they are transparent to x-rays



Next Generation: Ионная литография

- ◆ Рассеяние ионов гораздо меньше, чем электронов, поэтому достижимо большее разрешение
- ◆ Проблемы:
 - Источники ионов (e.g. Gallium)
 - Маски
 - Фокусировка
 - На сегодня менее развиты, большая стоимость



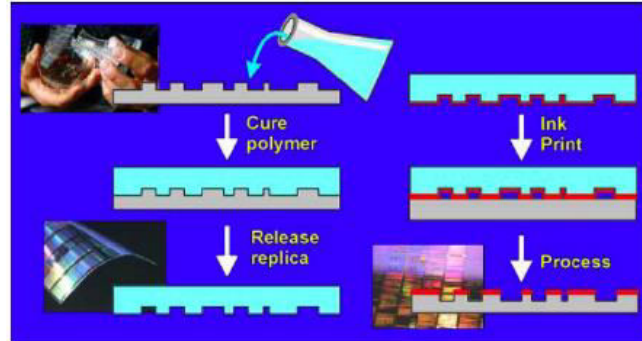
Новые типы литографии

- Нано-пресс-литография
- Dip-pen
- зондовые

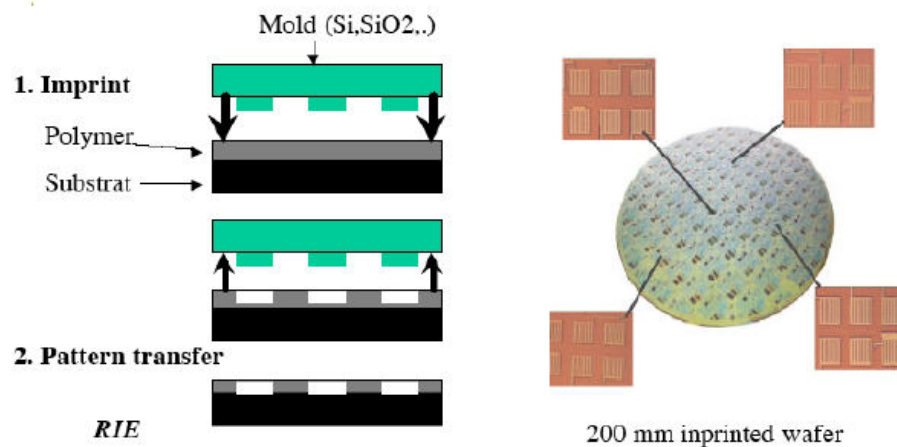
Нано-Пресс-литография

◆ Soft lithography:

- Replication of a “master-pattern” using PDMS (stamp)
- Inking the stamp with molecules (thiols, thioethers, alkoxy silanes, chlorosilanes, etc.)
- Contact the stamp with the substrate surface
- Monolayer formation at regions of contact



Нано-Пресс-литография



Interest of this technology : low cost transfert of nano structures (10-20 nm) on large area (200 mm)