

Наноэлектроника

к.т.н., доц. Марончук И.И.

Тема 3.
ТЕХНИЧЕСКИЕ
СРЕДСТВА
НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Лекция 13.
Нанолитография, часть 2.

Целью лекции является: ознакомление с литографическими методами наноструктурирования материалов применяемых в наноэлектронике; рассмотрение подходов, объектов, механизмов литографических процессов; изучение принципов, основ, особенностей, аппаратного оформления, преимуществ и недостатков литографических методов применяемых в наноэлектронике.

СОДЕРЖАНИЕ

- Иммерсионная литография: увеличение числовой апертуры (NA)
- Литография в экстремальном ультрафиолете (EUV)
- Литография высоких энергий
- Электронно-лучевая литография
- Ионно-лучевая литография
- Рентгеновская литография
- Безмасочная литография (*direct writing*)
- Воздействие сфокусированным пучком заряженных частиц, FIB-литография
- Механическое воздействие типом СЗМ
- Нанооксидирование
- Выводы
- Контрольные вопросы

Иммерсионная литография: увеличение числовой апертуры (NA)

- $NA = n \sin\theta$,

где n - коэффициент преломления среды между линзой и фоторезистивной маской (для воздуха $n = 1$), θ - наибольший угол сбора лучей с поверхности резиста и определяется размером линзы.

- NA выросла за счёт разработки новых линз от 0.5 (1990 г.) до 0.8 (2004 г.) и предполагается её рост до 1 и более в будущем. На пути совершенствования линз есть большие сложности (вес проекционных линз, уменьшающих рисунок шаблона, составляет более 1000 кг).

- Более простой путь - это увеличение n за счёт замены воздуха на жидкую среду с большим n , например, на DI воду ($n = 1.43662$ на $\lambda = 193$ нм и 21.5°C , рост NA на 44%). Это **иммерсионная литография**, первые установки использованы в промышленности в 2007 году.

Что касается апертуры проекционного объектива, то в современном литографическом оборудовании она увеличена до 1.35 благодаря использованию иммерсионных жидкостей.

Идея иммерсионной литографии заключается в том, что между маской-шаблоном и кремниевой подложкой находится дополнительная среда — жидкость. Дело в том, что скорость распространения света в веществе всегда меньше скорости распространения света в вакууме и зависит от коэффициента преломления этого вещества. Фактически это равносильно тому, что свет, проходящий через материал с высоким коэффициентом преломления, имеет меньшую длину волны (эффективная длина волны уменьшается в n раз, где n — коэффициент преломления среды), поэтому может быть сфокусирован более точно.

Методика иммерсионной литографии подразумевает погружение кремниевых пластин в очищенную воду. Применение воды в этом процессе объясняется тем, что она имеет более высокий коэффициент преломления, чем воздух, что, в свою очередь, позволяет добиться увеличения разрешающей способности литографии без изменения длины волны источника излучения. Коэффициент преломления воды $n = 1,47$. Следовательно, для современных объективов с $NA=0,95$ и $k1 = 0,25$ разрешение системы будет равно

$$R = k1 (\lambda/n \cdot NA) = 0,25 [193 / (1,47 \cdot 0,95)] = 34,5 \text{ нм.}$$

В иммерсионной литографии есть свои технологические проблемы. Главная из них — это получение жидкости с высоким коэффициентом преломления. При этом жидкость не должна вступать в химическую реакцию с кремниевой подложкой и слоем фоторезиста.

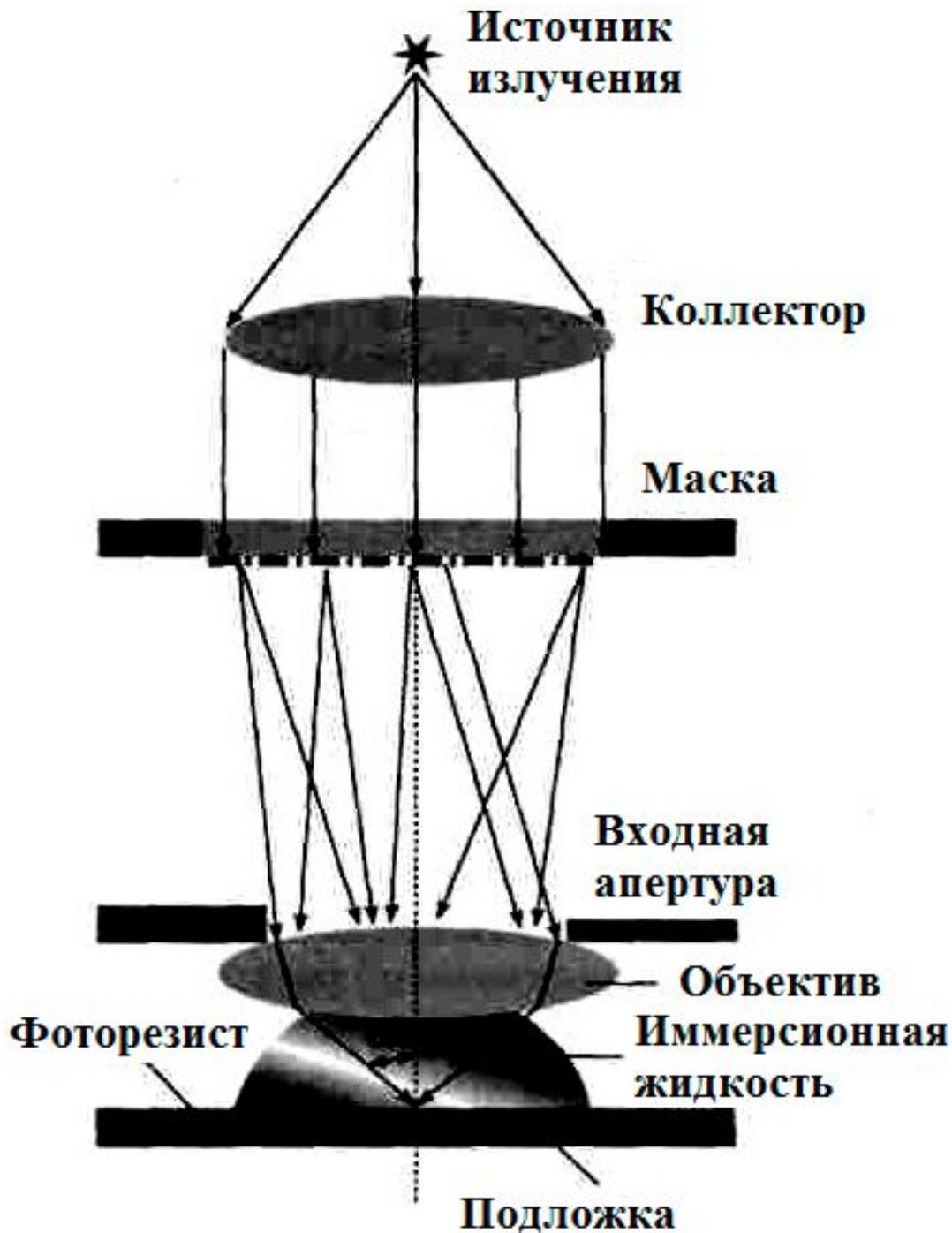
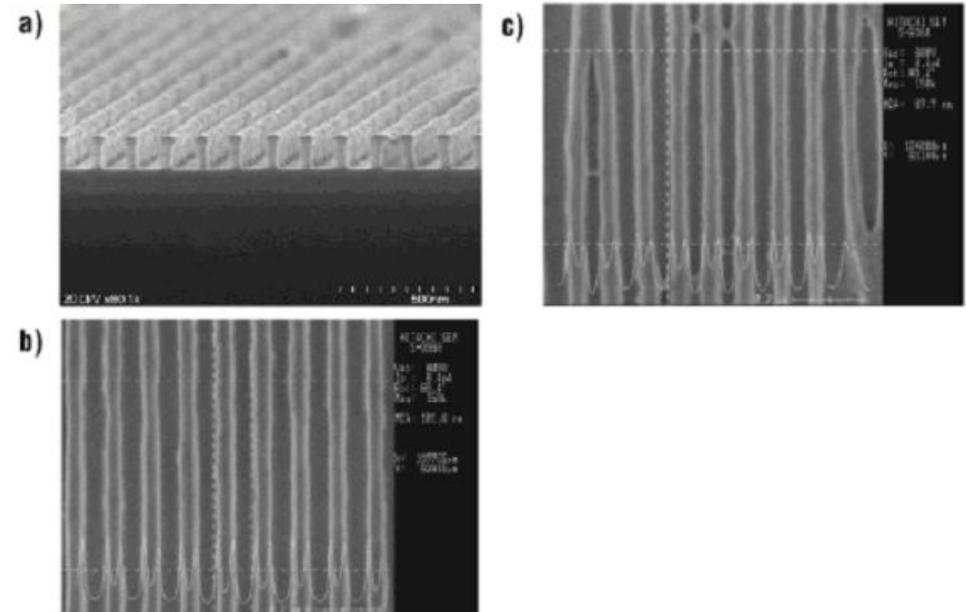
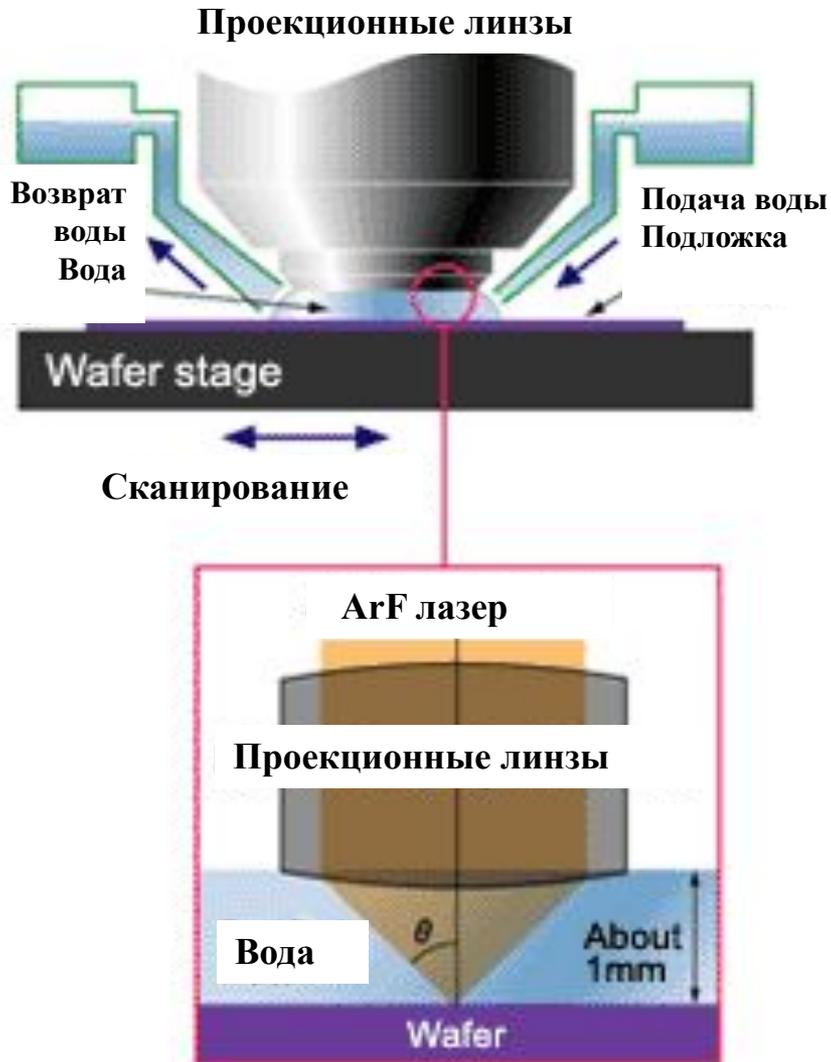


Схема иммерсионной литографии

Кроме того, при применении иммерсионной литографии приходится учитывать такие негативные явления, как температурные флуктуации жидкости, что приводит к ее неоднородности и к рассеиванию проходящего излучения. В 32-нм техпроцессе производства в качестве жидкости в иммерсионной литографии используется вода с коэффициентом преломления 1,47. Для того чтобы обеспечить нужный уровень фильтрации жидкости и освободить ее от микроскопических пузырьков (произвести дегазацию), применяется специальная установка. Проблема взаимодействия жидкости с фоторезистом решается за счет нанесения на слой фоторезиста специального покрытия, препятствующего проникновению образующейся при облучении фоторезиста кислоты в воду. Уже созданы жидкости с коэффициентом преломления 1,8. Естественно, что применение жидкости с коэффициентом преломления 1,8 требует использования других типов фоторезиста.

Установка иммерсионной литографии



Микроскопические изображения резистивных масок, полученных с помощью иммерсионной литографии с полушириной линия-промежуток равной 65 нм (a), 50 (b) и 45 нм (c)

Литография в экстремальном ультрафиолете (EUV).

Продвижение в сторону меньших масштабов и, соответственно, повышение уровня интеграции микросхем мировое научное и технологическое сообщество связывает с кардинальным уменьшением рабочей длины волны, то есть переходом в экстремальный ультрафиолетовый (ЭУФ) диапазон.

Относится к методам оптической литографии на длине волны 13,5 нм (экстремальный ультрафиолет, ЭУФ). В качестве источника ЭУФ-излучения используется плазма газового разряда.

Наличие коротковолновой границы (около 100 нм) пропускания света любыми материалами делает невозможным применение в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне ($\lambda < 100$ нм) привычной преломляющей оптики.

Для ЭУФ-литографии проблемы уменьшения размеров создаваемых элементов связаны со сложностью фокусировки изображения УФ-излучения длиной волны 13,4 нм, так как в этом диапазоне длин волн прозрачных материалов практически нет, и фокусировка осуществляется с помощью полностью отражающей оптики, к которой предъявляются очень жесткие требования. Литограф в этом диапазоне может быть создан только на основе зеркальной (отражающей) оптики, причём зеркальная оптика должна быть многослойной для повышения коэффициента ее отражения. Источником излучения может быть лазер-плазменное излучение мощностью порядка 115 Вт. При такой мощности источника не допустимо разбрызгивание вещества из источника и других элементов системы, что может приводить к загрязнению зеркал и подложки. Имеет ряд проблем, связанных с точностью совмещения, разработкой новых материалов резистивных масок, созданием низкодефектных отражающих шаблонов, высокой сложностью и стоимостью литографического оборудования.

При этом имеет хорошее разрешение с характерными размерами 50 и 35 нм.

Выбор спектрального диапазона для ЭУФ-литографии определяется возможностью получения в перспективе пространственного разрешения до 10-15 нм и наличием высокоотражающих многослойных покрытий. В качестве рабочей была выбрана длина волны 13,5 нм, для которой многослойная интерференционная структура на основе молибдена и кремния обеспечивает в настоящее время коэффициенты отражения до 70%. В типичных схемах проекционной литографии на длине волны 13,5 нм применяется 10-11 многослойных зеркал, включая шестизеркальный объектив, систему освещения маски и саму многослойную зеркальную маску. Спектральная полоса пропускания схемы обычно составляет около 2% от длины волны ($\Delta\lambda \sim 0.27$ нм). Кроме того, вся система должна находиться в вакууме, так как световые волны диапазона EUV поглощаются воздухом.

Источниками излучения в ЭУФ-литографии на первом этапе развития подобных систем служило синхротронное излучение. Однако позже был разработан малогабаритный источник предельного ультрафиолета, принцип работы которого основан на использовании излучении из лазерной плазмы. Излучение стандартного Nd:YAG лазера (1063 нм длина волны, 40 Вт мощность, 100 Гц частота, 5 нс длительность) фокусируется на импульсной газовой струе ксенона.

Образующаяся лазерная плазма содержит широкую спектральную полосу предельного ультрафиолета с $\sim 10\text{-}25\text{ нм}$. Оптическая система (один из вариантов) содержит набор зеркал между источником света и маской. Набор зеркал между маской и подложкой обеспечивает уменьшение размера изображения в 4 раза. Схема установки приведена на рис. 42. Все отражательные оптические системы должны быть асферическими с размером неоднородностей $\sim 10 \text{ \AA}$.

Каждое зеркало содержит до 80 отдельных металлических слоев с толщиной каждого слоя (примерно в 12 атомов). Такое же сложное строение имеет маска для EUV литографии, которая схематично представлена на рис.

Переход к ЭУФ-литографии позволил пересечь 100 нм рубеж, оставаясь в рамках традиционной фотолитографии. Однако сложная зеркальная оптика и технология изготовления фотошаблонов делает такой подход исключительно дорогим, оставляя место для разработки литографических процессов, основанных на иных физических принципах.

Экстремальная ультрафиолетовая литография

- Длина волны излучения на уровне 10 нм обеспечивает прекрасное разрешение
- Оптика - отражательная
- Источник света - лазерная плазма

ИК лазер

Пучок Хе

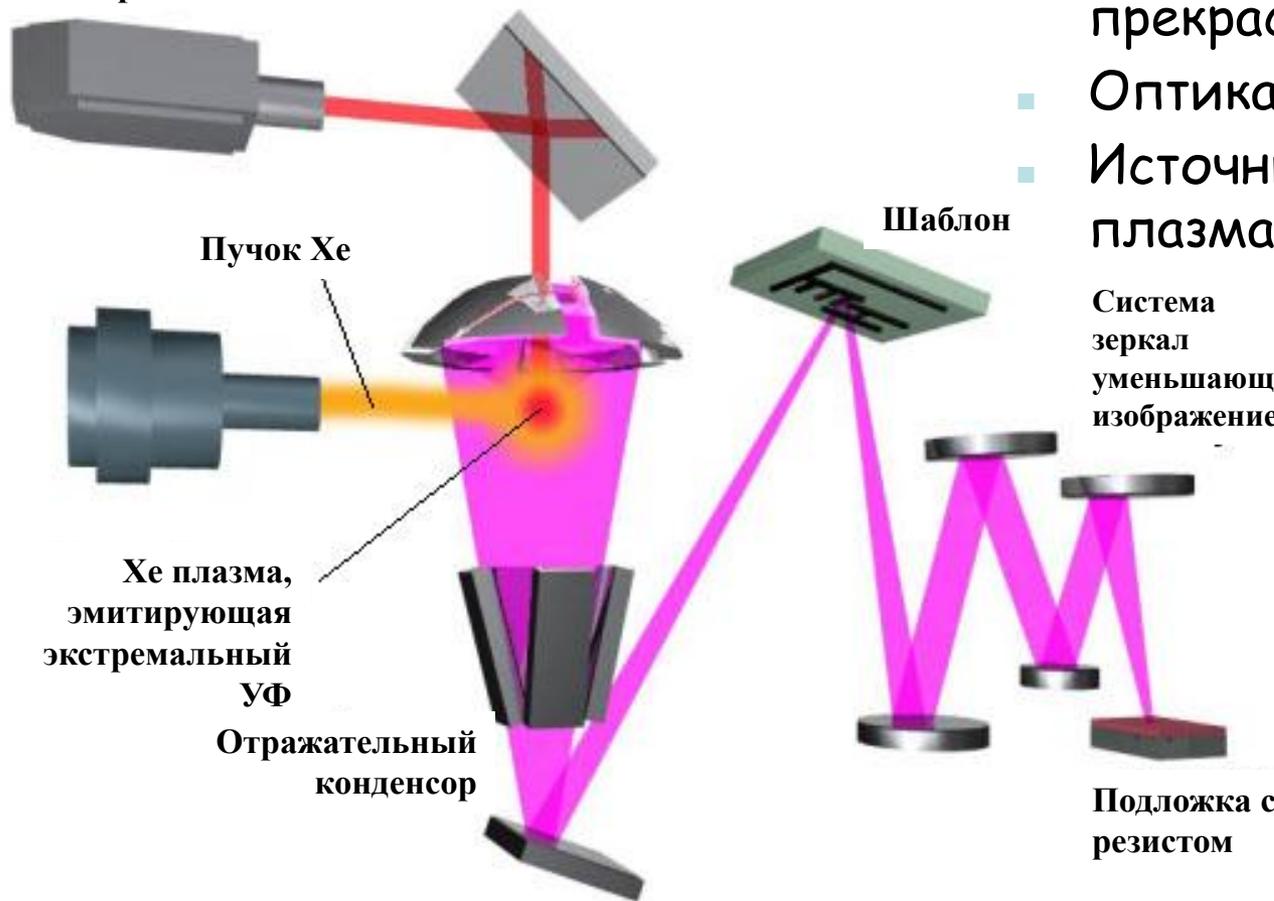
Хе плазма,
эмитирующая
экстремальный
УФ

Отражательный
конденсор

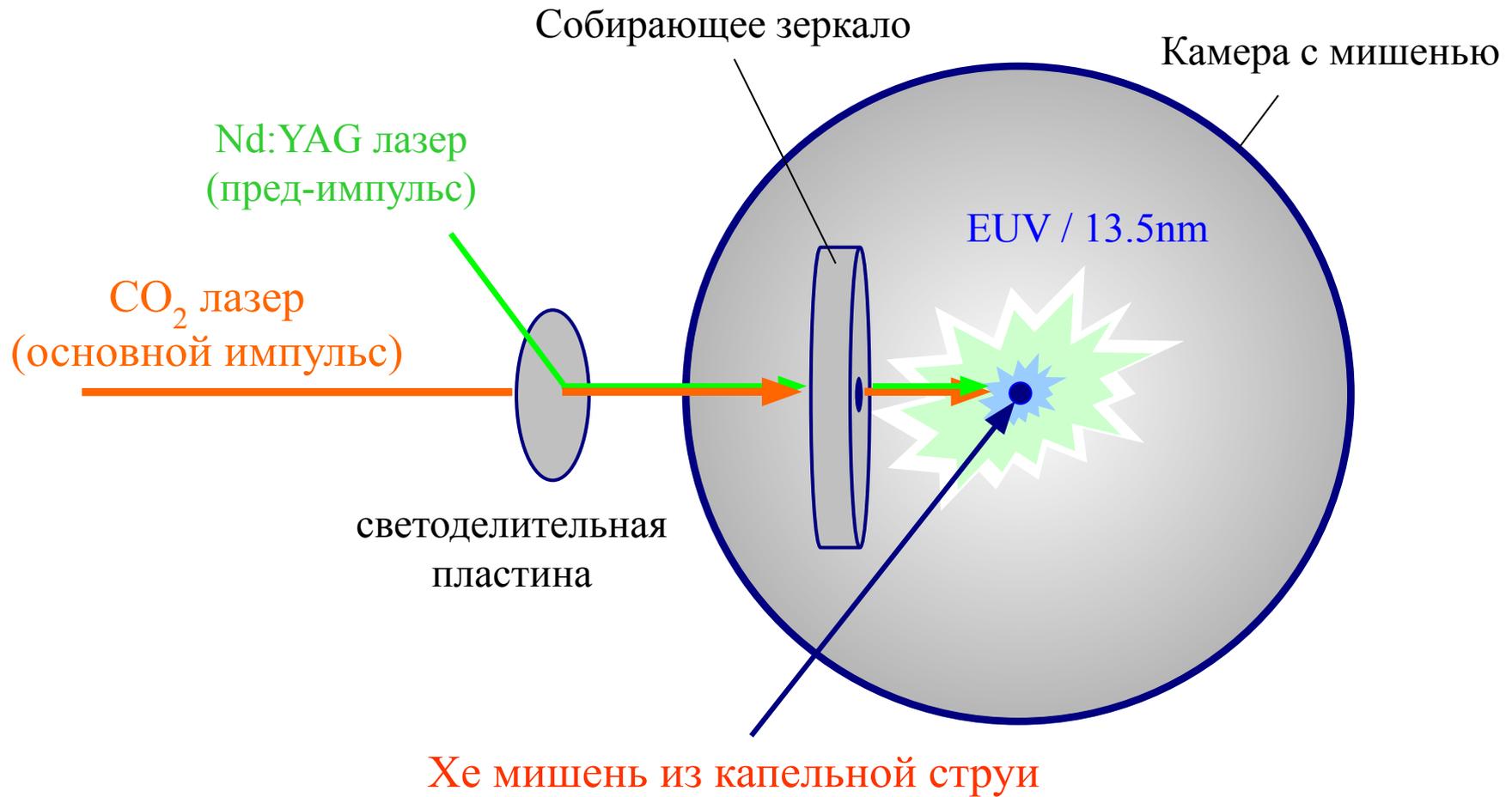
Шаблон

Система
зеркал
уменьшающая
изображение

Подложка с
резистом



Источник импульсной лазерной плазмы



Литография высоких энергий

Литография высоких энергий делится на проекционную (рентгеновская, ионная, электронная) и сканирующую (электронная, ионная).

Электронно-лучевая литография

Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) является уникальным способом структурирования поверхности подложек заданного рельефа или топологии с помощью электронного луча. ЭЛЛ может быть реализована двумя способами:

проекционным - с использованием шаблонов,

сканирующим - путем обработки электронного резиста сфокусированным электронным лучом (обычно используется наиболее чувствительный полимерный электронный резист полиметил-метакрилат - ПММА). Характерное разрешение ЭЛЛ составляет при этом порядка 20 и 2 нм соответственно.

В отличие от оптического и рентгеновского излучений поток электронов не является электромагнитным излучением. Электрон несет заряд, что позволяет формировать (фокусировать) и отклонять пучок электронов с помощью электрических и магнитных полей.

При попадании быстро движущихся электронов в слой электронорезиста они теряют часть своей кинетической энергии за счет электростатического взаимодействия с электронами, входящими в состав молекулы полимера. При этом происходит выбивание этих электронов из молекул:

$AB + \text{электрон} \rightarrow AB^+ + \text{электрон} + \text{освобожденный}$
либо переход электронов на более высокую орбиту (возбуждение молекул):

$AB + \text{электрон} \rightarrow AB^* + \text{электрон}$.

При этом возбужденные молекулы могут диссоциировать и образовывать свободные радикалы.

Проекционные системы, как правило, имеют высокую производительность и более просты, чем сканирующие системы. Носителем информации об изображении является маска (шаблон). Изображение с шаблона передается на пластину пучком электронов.

Сканирующие системы управляются вычислительной машиной, которая задает программу перемещения сфокусированного луча электронов по пластине с резистом, исправляет эффекты дисторсии и расширения пучка и определяет положение пластины. Информация об изображении хранится в памяти ЭВМ. Непосредственное нанесение рисунка с помощью ЭВМ позволяет обойтись без шаблона. Поэтому электронно-лучевые сканирующие системы могут быть использованы как для изготовления шаблонов, так и для непосредственной прорисовки на пластине. Эти установки имеют высокое пространственное разрешение и точность совмещения, приближающиеся к 0,1 мкм.

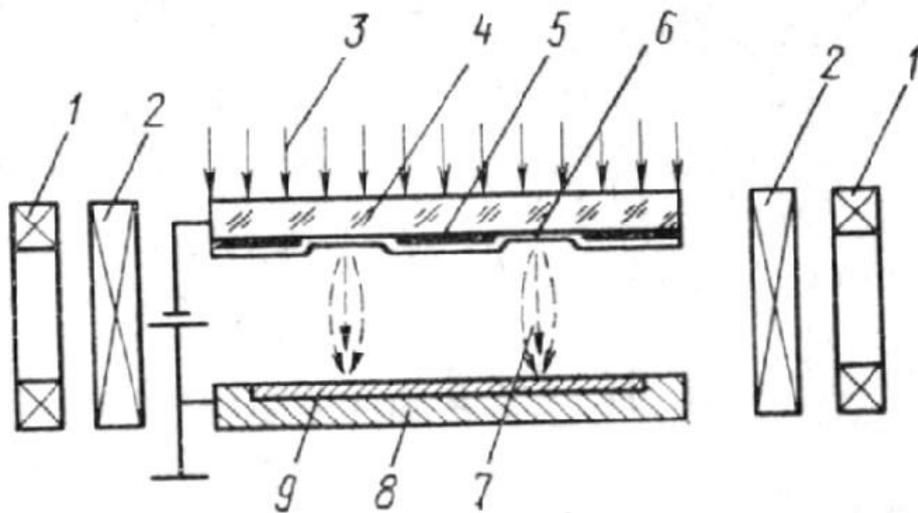
Проекционные системы

Электронно-лучевая проекционная литография основана на экспонировании одиночного изображения больших размеров для получения копий шаблона с линиями субмикронной толщины. Шаблон изготавливается заранее методом сканирующей электронной литографии.

Электронные проекторы, служащие для переноса изображения на пластину, занимают особое место в электролитографии. Существует два типа электронных проекторов: для переноса изображения с шаблона на пластину в масштабе 1 : 1 и для создания уменьшенного изображения перфорированной маски на пластине.

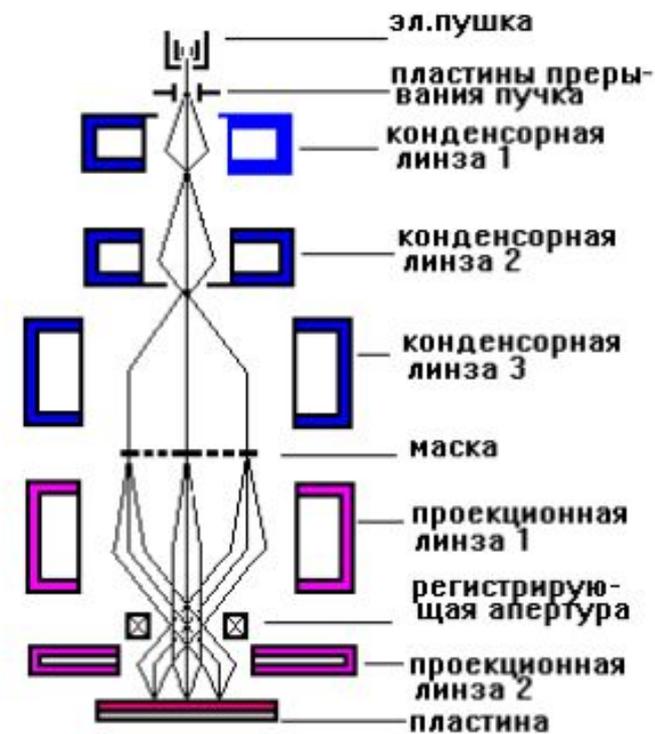
Работа электронного проектора, предназначенного для переноса изображения в масштабе 1:1, основана на фотоэффекте и переносе эмитируемых шаблоном электронов на пластину. Используемый шаблон аналогичен фотошаблону.

Его рисунок выполняется на слое хрома, нанесенного на кварцевую подложку. Удаленные участки слоя образуют рисунок заданной структуры. Поверх слоя (маски) наносят сплошное покрытие из материала, обладающего фотоэмиссионной способностью (например, из палладия или йодида цезия). При ультрафиолетовом облучении обратной стороны шаблона фотоэмиссионный слой эмитирует электроны только с тех участков, которые соответствуют просветам в хромовой маске. Таким образом, шаблон выполняет роль фотокатода.



Принципиальная схема электронного проектора:
1,2 - отклоняющая и фокусирующая катушки,
3 - УФ-излучение,
4 - фотокатод, 5 - пленка хрома,
6 - фотоэмиссионный слой,
7 - электроны,
8 - подложкодержатель,
9 - подложка

В системе с уменьшением изображения в качестве маски используется свободно подвешенная перфорированная металлическая фольга. Поток электронов, сфокусированный специальной электрооптической системой, проходит через маску и формирует на пластине ее четкое изображение меньших размеров. При десятикратном уменьшении маски могут быть сформированы поля диаметром 3 мм и получена ширина линий до 0,25 мкм. Схема установки приведена на рис. Эти системы обеспечивают очень малые искажения и высокое разрешение по сравнению с системой 1:1, где достижение соответствующих высоких параметров является проблемой.



Проекционная система с уменьшением изображения

Сканирующие системы

Сканирующая ЭЛ является методом непосредственного вычерчивания электронным лучом рисунка ИМС с высокой разрешающей способностью. Ходом луча управляет специальный микропроцессор или ЭВМ. Сканирующие системы менее производительны, чем проекционные. Выбор того или иного метода зависит от требований, предъявляемых к размерам ИМС и от экономических показателей процесса.

Установки сканирующей ЭЛ называют генераторами изображений. Существует несколько систем формирования пучка - с круглым сечением и с прямоугольным сечением. Общая схема сканирующей системы ЭЛ приведена на рис. С помощью двух или более линз электроны пучка, сформированного электронной пушкой, фокусируются на поверхность пластины так, что первоначальные размеры пучка, идущего от источника электронов, уменьшаются.

Система обладает достаточной гибкостью, поскольку размеры сформированного пучка могут варьироваться в широких пределах путем изменения фокусного расстояния электронных линз.

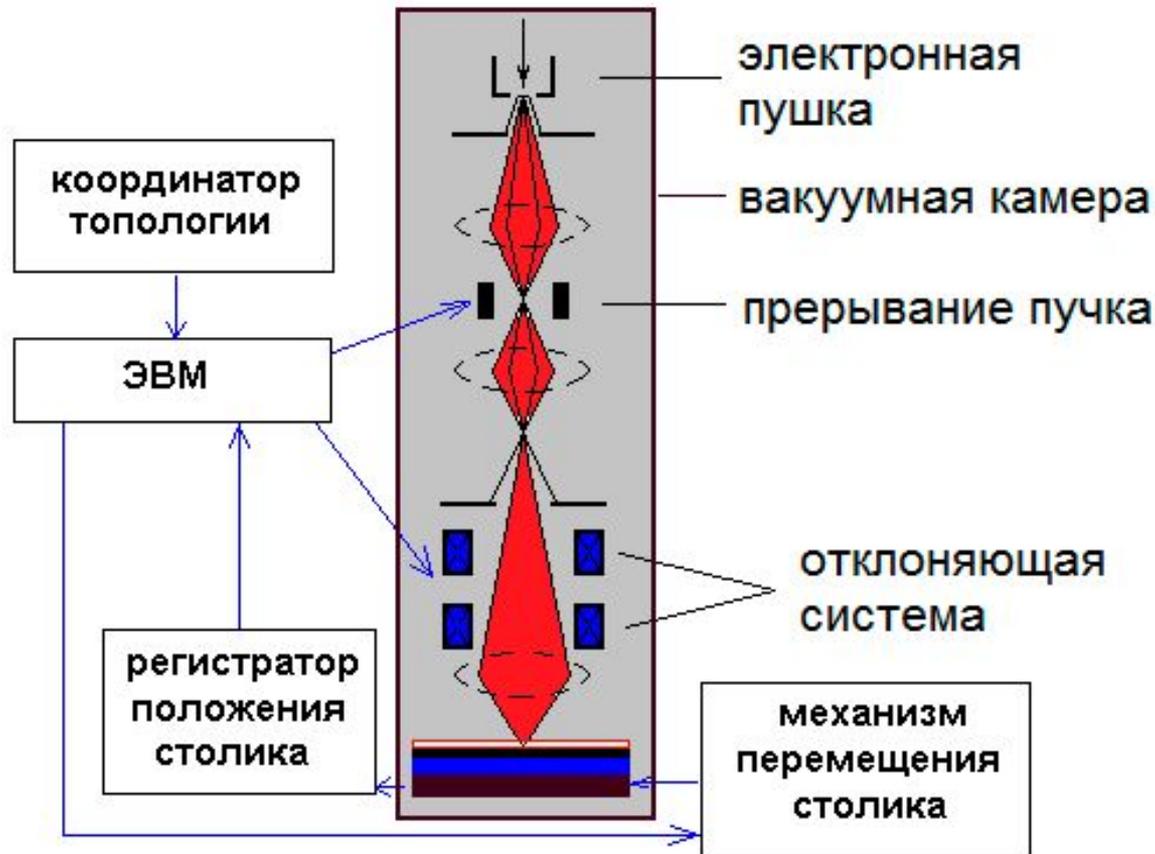


Схема установки сканирующей электронной литографии

Полностью реализовать потенциальные возможности ЭЛ можно лишь при использовании специальных электронных резистов. Эти резисты подобно фоторезистам представляют собой растворы электроночувствительных веществ в полимерах. Качество электронорезистов определяется их чувствительностью, разрешающей способностью, совместимостью с процессами изготовления рисунка. Чувствительность резиста ($\text{Кл}/\text{см}^2$) зависит от величины минимального электрического заряда, приходящегося на единицу площади, необходимого для полного проявления резиста. В качестве позитивных широко используют резисты на основе полиметилметакрилата (ПММА) и полибутенсульфона (ПБС), а в качестве негативных — на основе полиглицидилметакрилата (ПГМА).

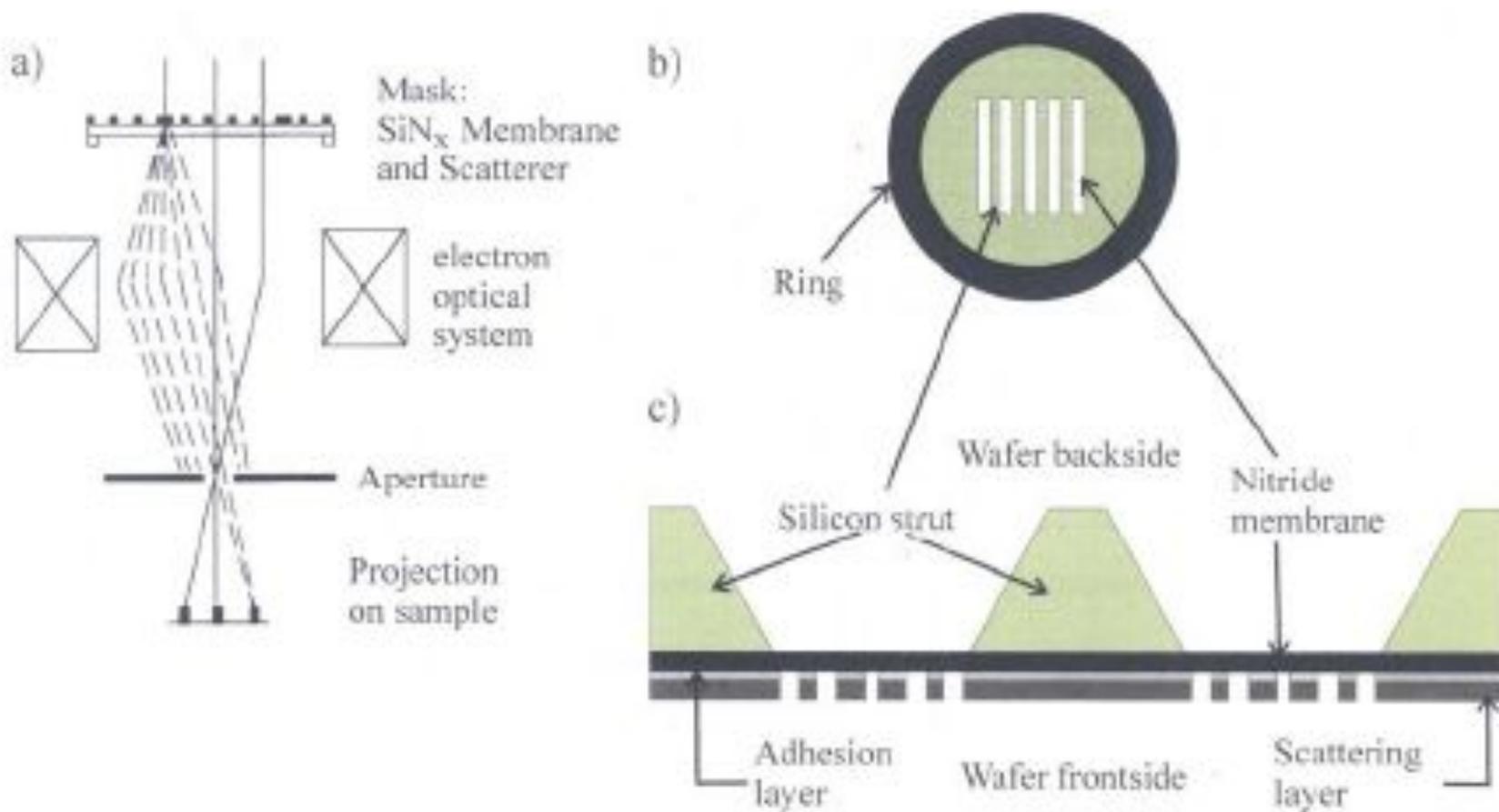
Возможности применения электронно-лучевой техники в производстве микросхем весьма широки. Ограничения на ширину линий и плотность упаковки определяются не столько работой электронного пучка, сколько разрешающей способностью резиста и возможной точностью совмещения шаблона с пластиной.

Изготовление шаблонов для фото- и рентгенолитографии с применением ЭЛ имеет явные преимущества перед другими методами.

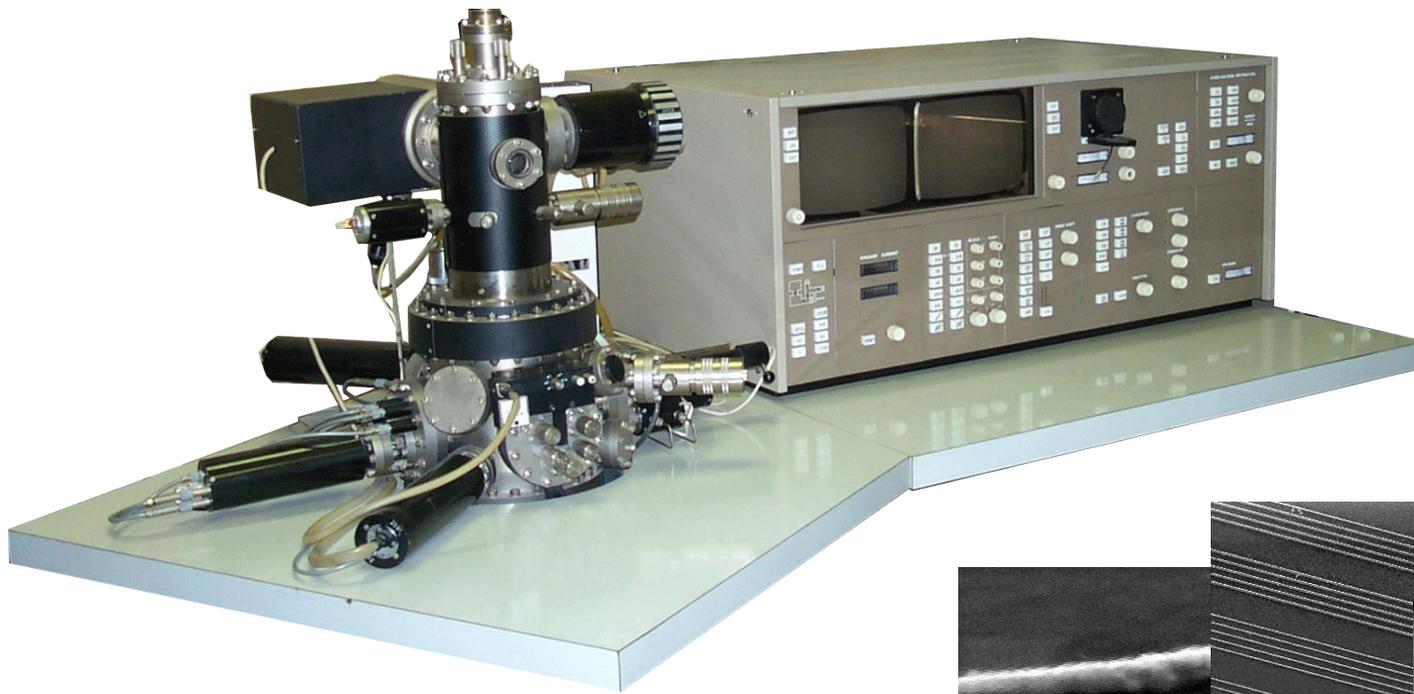
ЭЛ обеспечивает превосходное разрешение линий оригинала, давая возможность улучшить качество шаблона. Время, которое уходит на кодирование чертежа шаблона в цифровой вид и последующее его изготовление под управлением ЭВМ, значительно меньше времени, которое требуется для процесса изготовления шаблонов методом фотоуменьшения. Дополнительным преимуществом является то, что при изменении чертежа достаточно просто модифицировать программу ЭВМ.

SCALPEL

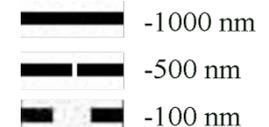
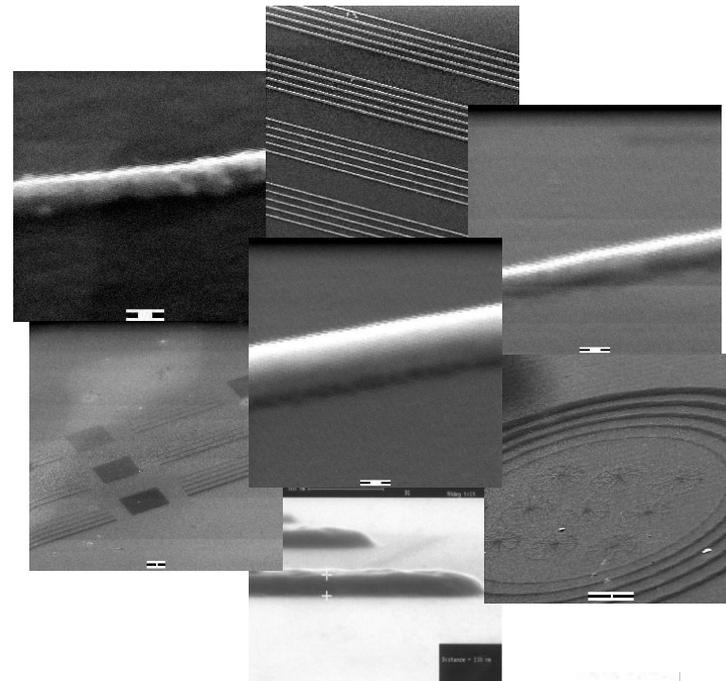
Возможностью избежать подобных недостатков является применение специальных рассеивающих масок. В этом случае, области маски с высокой рассеивающей способностью соответствуют затененным участкам поверхности, а области не рассеивающие электронный пучок - освещенным участкам. Избыточный фон, образованный рассеянными электронами можно исключить расположив диафрагму в фокальной плоскости собирающей линзы (рис. а). Данная методика получила название SCALPEL - сокращение от электронной литографии с ограничением угла проекции (Scattering with Angular Limitation Projection Electron Lithography). Принципиальная структура масок для технологии SCALPEL представлена на рис. б и с.



Технология SCALPEL. Схема оптической системы (а) и структура масок (б), (в).



Линии субмикронного масштаба,
выполненные на Si методами
электронно-лучевой литографии и
плазмохимического травления с
применением оксидно-ванадиевого
резиста.



«Нанолитограф» Raith 150-Two



Установка электронно-лучевой нанолитографии на основе автоэмиссионного растрового электронного микроскопа Raith 150 TWO предназначена как для электронной растровой микроскопии высокого разрешения (не хуже 2 - 5 нм), так и для проведения нанолитографии с размерами получаемых элементов не хуже 15 - 20 нм.

Основными недостатками ЭЛЛ является:

- снижение разрешающей способности вследствие рассеяния электронов в обратном направлении,
- нагрев резиста падающими на него электронами,
- низкая производительность.

Ионно-лучевая литография

Ионная литография является способом формирования заданного рельефа или топологии с помощью ионного пучка. В ионно-лучевой литографии применяются ионы водорода (H^+) и ионы гелия (He^+). Источником ионов в проекционных системах обычно служит дуоплазматрон на легких ионах.

Для создания рисунка в резисте используются три метода использующие: **коллимерованные ионные пучки**, **остросфокусированные ионные пучки**, **ионные проекционные системы**. Топология формируется непосредственно на резисте и позволяет исключить использование дорогостоящих шаблонов.

Способ проекционной печати требует двух комплементарных масок на каждый рисунок, которые должны позиционироваться с очень высокой точностью относительно друг друга. Сфокусированный ионный пучок создает радиационные дефекты в подложке.

Эти недостатки делают ионную литографию менее развитой, по сравнению с методом электронно-лучевой литографии.

Разрешающая способность ионной литографии (ИЛ) выше, чем электронной. Разрешающая способность метода находится на уровне десятка нанометров и менее, а разрешение в микроскопическом режиме наблюдения во вторичных электронах составляет 5 - 7 нм.

Вследствие большой массы иона дифракционные ограничения практически отсутствуют, так как длина волны де-Бройля для ионов при сравнимых энергиях значительно меньше, чем для электронов. Для ИЛ не существует эффектов близости. Боковое рассеяние ионов при их проникновении в вещество незначительно, вторичные электроны имеют малую энергию и тормозятся на расстояниях, меньше сотой доли микрометра.

Резисты обладают значительно большей чувствительностью к ионам, чем к электронам, так как удельные потери энергии ионов в десятки раз больше. ИЛ развивается в следующих направлениях: сканирование остросфокусированного ионного пучка по поверхности подложки с резистом и обработка резиста коллимированным управляемым ионным пучком. При экспонировании коллимированным ионным пучком (рис.) используют широкие пучки протонов H^+ . Шаблон изготавливается на сплошной тонкой основе ($\sim 0,5$ мкм) аморфного материала с нанесенной на него пленкой ($0,5 - 1,0$ мкм) тяжелого металла, поглощающего протонное излучение, или в виде маски с отверстиями, конфигурация которых соответствует создаваемой топологии на подложке.

Подложка, покрытая слоем резиста, экспонируется через шаблон, помещенный в непосредственной близости от нее, путем сканирования коллимированным протонным пучком, сечением около 1 см^2 . Энергия протонов в пучке составляет 150 - 250 кэВ, ток пучка $\sim 1 \text{ мкА}$. Вследствие большого тока пучка протонов и высокой чувствительности ряда резистов к протонам, превышающей в 100 - 1000 раз чувствительность к электронам, экспонирование происходит за доли секунды, что говорит о потенциально высокой производительности таких систем. Такие системы находят применение при создании элементов с размерами $\sim 0,5 \text{ мкм}$. Недостатком метода является сложность изготовления шаблонов и создания систем их совмещения с подложками.

При формировании на поверхности резиста рисунка с размерами порядка $0,1 \text{ мкм}$ требуется остросфокусированный ионный луч, диаметр которого был бы меньше $0,1 \text{ мкм}$.

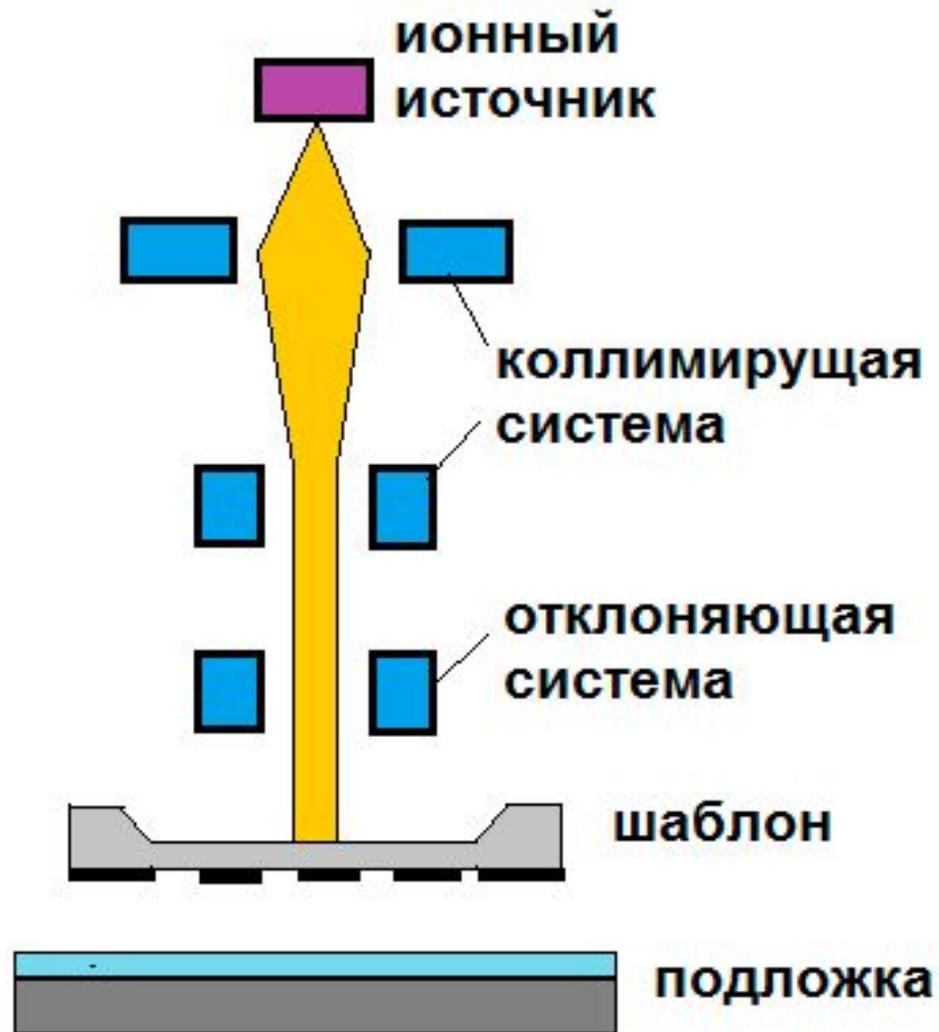
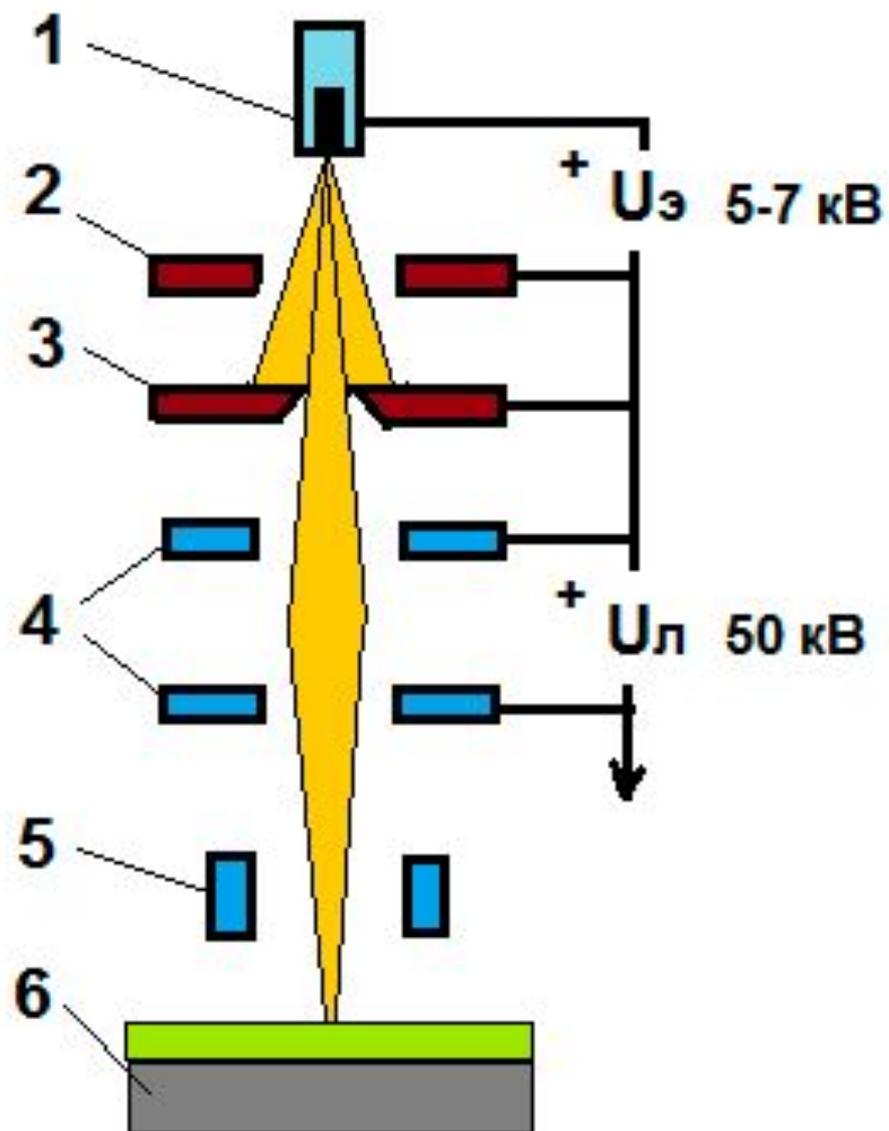


Схема экспонирования коллимированным ионным пучком

Для формирования такого луча, требуется ионный источник с высокой яркостью. Источники протонов H^+ и ионов гелия He^+ , которые используются в установках с коллимированным ионным пучком, не обеспечивают требуемую яркость ионного пучка. Значительно лучшие результаты получены для «жидкостных» источников тяжелых ионов Sn^+ и Ga^+ , у которых яркость достигает значения $B \geq 10^{10} \text{ A}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$ (источники протонов имеют яркость порядка $10^6 - 2 \cdot 10^6 \text{ A}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$). С помощью жидкостных источников удастся сформировать ионный луч диаметром менее $0,1 \text{ мкм}$. В ионной литографии необходимо выбирать такую энергию ионов E_0 , чтобы толщина пленки резиста была близка к проецированному пробегу ионов в материале резиста. При энергиях ионов меньше E_0 резист не будет проэкспонирован на всю глубину, а при энергиях больше E_0 произойдет внедрение ионов луча в подложку и появление в ее поверхностном слое радиационных дефектов.

Схема сканирующего
ионного зонда с $U=57$
кВ:

- 1 - ионный источник
(жидкий галлий),
- 2 - вытягивающий
электрод
(экстрактор),
- 3 - диафрагма,
- 4 - ускоряющая
электростатическая
линза,
- 5 - электростатическая
отклоняющая система,
- 6 - подложка



Как и в электронной литографии, ширина экспонируемой области в резисте будет больше диаметра ионного пучка. Основными причинами уширения экспонируемых линий являются боковое рассеяние ионов при торможении в материале резиста, выбивание ионами пучка атомов материала резиста, которые, обладая значительной энергией, сталкиваются с молекулами резиста, и воздействие на резист вторичных частиц, электронов и рентгеновских квантов, возникающих при торможении ионов в материале резиста.

При получении элементов с размерами 0,1 - 0,2 мкм энергия тяжелых ионов $E_0 \approx 100$ кэВ. Для галлиевых пучков ток эмиссии может достигать 1 - 10 мкА. При этом полное время обработки поверхности с размерами 0,5x0,5 мм составляет $5 \cdot 10^{-2}$ с.

Остросфокусированные ионные пучки используют для: локальной засветки резиста; создания локальных зон нарушения кристаллической структуры материала (металл, SiO_2) с последующим его травлением (без применения резиста); локального удаления пленки физическим распылением ионами аргона; локального нанесения металлических пленок осаждением ионов металлов.

Рентгеновская литография

Рентгеновская литография является способом формирования заданной топологии с помощью рентгеновского излучения с энергией фотонов 0,5 - 10 кэВ, при поглощении которого в слое резиста происходит образование или разрыв межмолекулярных связей. Резисты для рентгеновской литографии могут быть как позитивными, так и негативными. Структура шаблона должна иметь тонкую основу, прозрачную для рентгеновского излучения. Для этих целей используют органические и неорганические мембраны.

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.

Рентгеновская литография является разновидностью оптической бесконтактной печати, в которой для экспонирования используют «мягкие» рентгеновские лучи длиной волны 0,4 - 12 нм, возбуждаемые с помощью интенсивных электронных лучей. Несмотря на то, что при рентгеновской литографии используется бесконтактная экспонирующая система, проявление дифракционных эффектов уменьшено за счет малой длины волны рентгеновского излучения.

Основная причина 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.

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 (фокусирующих систем) связано с определенными трудностями, применение рентгеновской литографии ограничено теневой печатью.

Разрешение, получаемое при использовании метода рентгеновской литографии, ограничено геометрическими эффектами.

Источником рентгеновского излучения являются рентгеновские трубки, в которых металлический анод подвергается бомбардировке интенсивным электронным пучком. В результате взаимодействия электронов пучка с материалом анода генерируется два типа рентгеновского излучения - тормозное и характеристическое.

На рис. 45 показана схема рентгеновской установки экспонирования. Электронная пушка генерирует электронный пучок, фокусируемый на охлаждаемой водой мишени (часто используется палладиевая мишень).

Напряжение на аноде составляет 25 кВ, потребляемая мощность 4-6 кВт. В результате анод испускает рентгеновские лучи с длиной волны 0.437 нм, которые через бериллиевое окно попадают в камеру экспонирования.

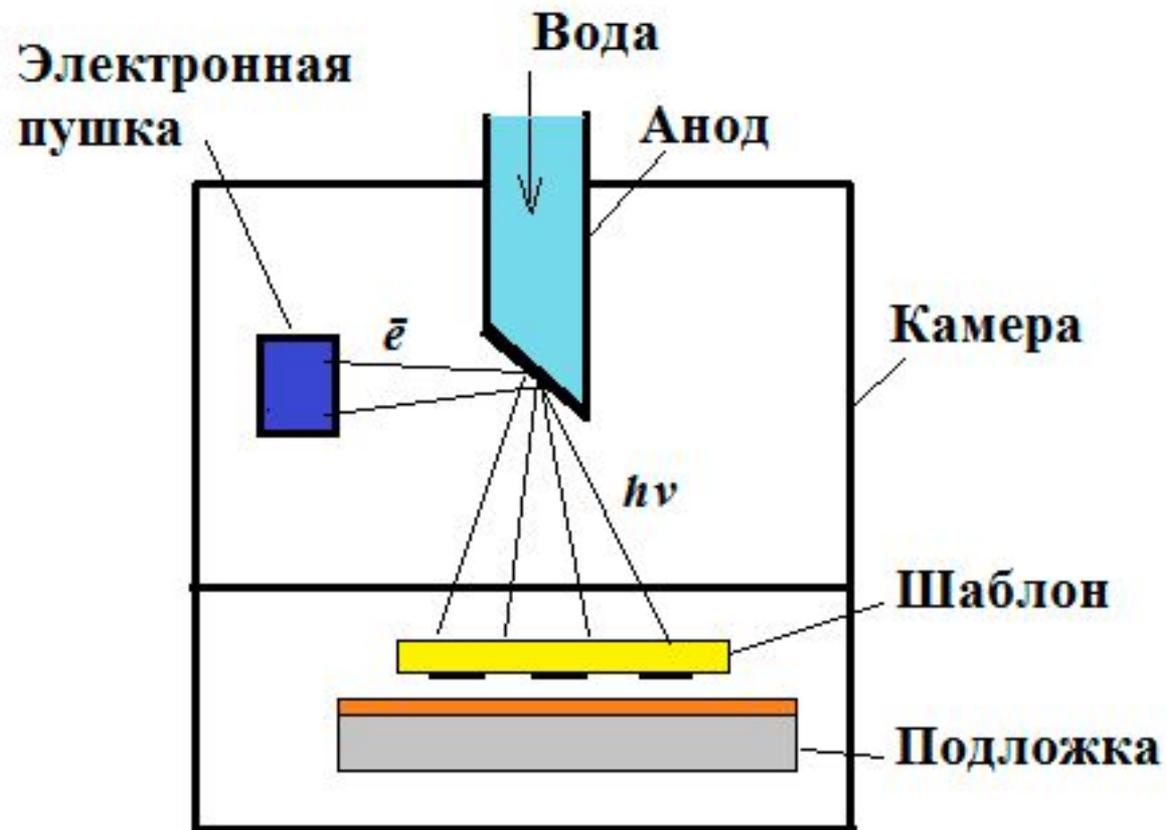
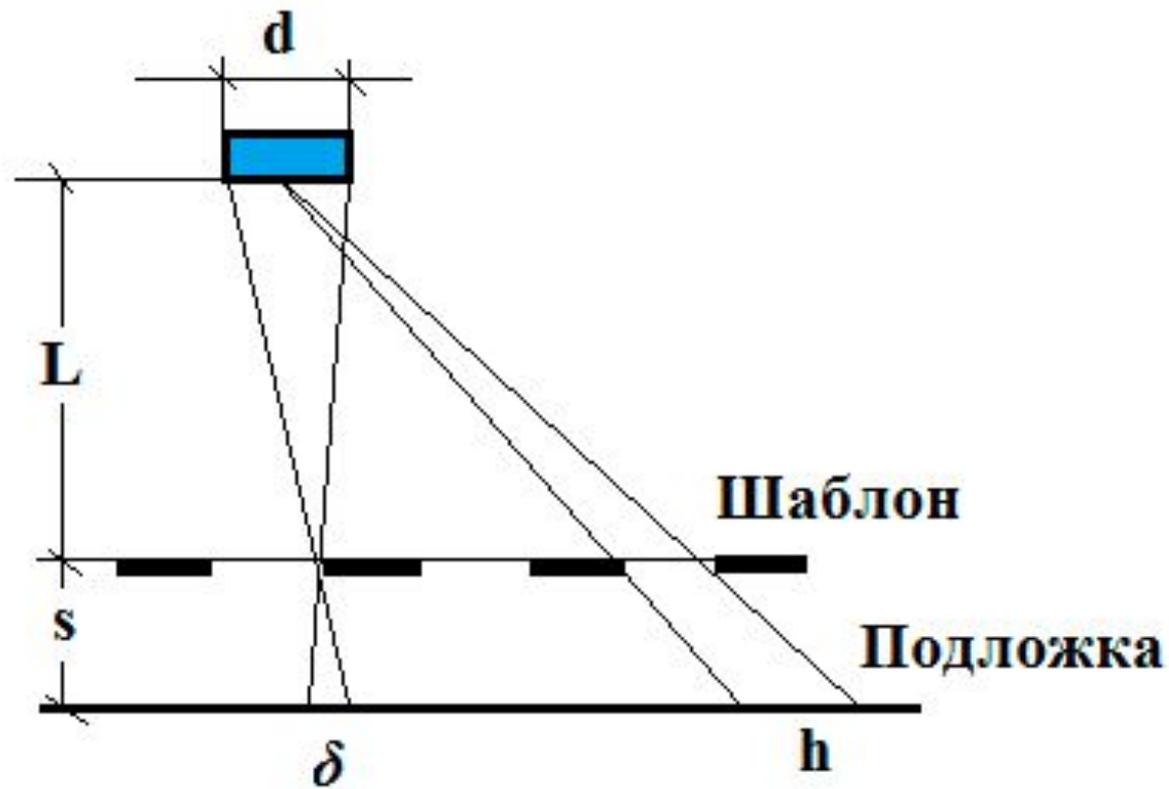


Схема установки рентгеновской литографии

Подложка вместе с шаблоном загружаются в камеру экспонирования (шлюзовую камеру), заполненную гелием, имеющим малое значение коэффициента поглощения рентгеновского излучения.

По мере необходимости образец извлекается из камеры для проведения процессов совмещения с шаблоном. Между шаблоном и подложкой устанавливается зазор около 40 мкм. Создать достаточно равномерное облучение всей пластины не просто, так как для коллимирования рентгеновских лучей нет ни зеркал, ни линз. Поэтому, чтобы обеспечить параллельность лучей, необходимо иметь большое расстояние от источника до подложки. Обычно оно составляет 20 - 50 см. Т.к. интенсивность облучения подложки обратно пропорциональна квадрату этого расстояния, то находят оптимум между расхождением лучей и интенсивностью облучения. Описанная выше схема не позволяет достичь максимально возможного разрешения ввиду геометрических ограничений (рис.).



Геометрические искажения в системе рентгеновского экспонирования

Рассмотрим ситуацию, когда источник рентгеновских лучей диаметром d расположен на расстоянии L от рентгеновского шаблона, который в свою очередь отстоит на расстояние s от покрытой резистом пластины.

Протяженность источника приводит к размытию края изображения на резисте на величину $\delta = d (s/L)$. Для типичных величин $d = 3$ мм, $s = 40$ мкм и $L = 50$ см размытие изображения составляет величину порядка 0,2 мкм.

Другим геометрическим эффектом, проиллюстрированным на рис., является погрешность, связанная с увеличением размеров элемента в боковом направлении, которая вызвана расходимостью рентгеновского луча от точечного источника и существованием зазора конечной величины между шаблоном и пластиной.

Изображение шаблона сдвигается в боковом направлении на величину h , определяемую из соотношения $h = r (s/L)$, где r - расстояние, измеренное в радиальном направлении от центра пластины.

Погрешность равна нулю в центре пластины и линейно возрастает к краям пластины. Эта погрешность ухода изображения может достигать величины 5 мкм на краю пластины диаметром 125 мм при величинах $s = 40$ мкм и $L = 50$ см.

В принципе ошибка может быть скомпенсирована во время процесса изготовления шаблона. Однако отклонения величины зазора между шаблоном и пластиной вносят значительные погрешности ухода изображения. В связи с этим может возникнуть необходимость регулировки зазора перед каждым экспонированием.

К достоинствам рентгенолитографии относятся:

- высокая разрешающая способность,
- минимальный размер может составлять порядка 50 нм,
- отсутствие контакта шаблона с резистом.

К недостаткам:

- трудность изготовления шаблонов высокого качества,
- применение мощного и громоздкого источника рентгеновского излучения,
- высокая стоимость,
- трудности фокусировки рентгеновского излучения с помощью зеркал или линз.

Нанопечатная литография (наноимпринтная, импринтинг)

Наноимпринт-литография (НИЛ) предлагает необычную

альтернативу для производства наноструктур. Этот метод был разработан около 15 лет назад и сегодня широко используется как академическими учёными, так и в исследовательских центрах компаний. В 2003 году

Массачусетский технологический институт включил НИЛ в список десяти недавно появившихся технологий, которые в будущем способны изменить мир. Уже сегодня целый ряд компаний использует НИЛ в промышленном производстве.

Ключевые преимущества НИЛ-технологии - минимальный размер получаемых структур, высокие точность и воспроизводимость при переходе от пластины

- Метод не предполагает использования света для передачи изображения в резист.

- Запатентованное название: Step and Flash Imprint Lithography (S-FIL™)



Метод нанопечатной литографии (НПЛ) заключается в формировании топологии путем физической деформации резиста пресс-формой (шаблоном), несущей изображение наноструктуры. Трафарет с изображением наноструктуры вдавливается в тонкий слой резиста, покрывающего подложку, создавая контрастное изображение на слое. Резистом является термопластичный полимер, который затем, используя анизотропное реактивное ионное травление (РИТ), удаляют на участках малой толщины. Трафаретом может быть штамп, изготовленный из металла, диэлектрика или полупроводника методом электронно-лучевой литографии. Методом нанопечатной литографии можно получать структуры размером менее 10 нм на больших областях подложки с высокой точностью и воспроизводимостью.

Наиболее широко распространены три метода НИЛ - термоконтактная литография, УФ-наноимпринтная фотолитография и микроконтактная печать (рис.). Все эти три метода могут быть использованы для получения элемента размером менее 100 нм.



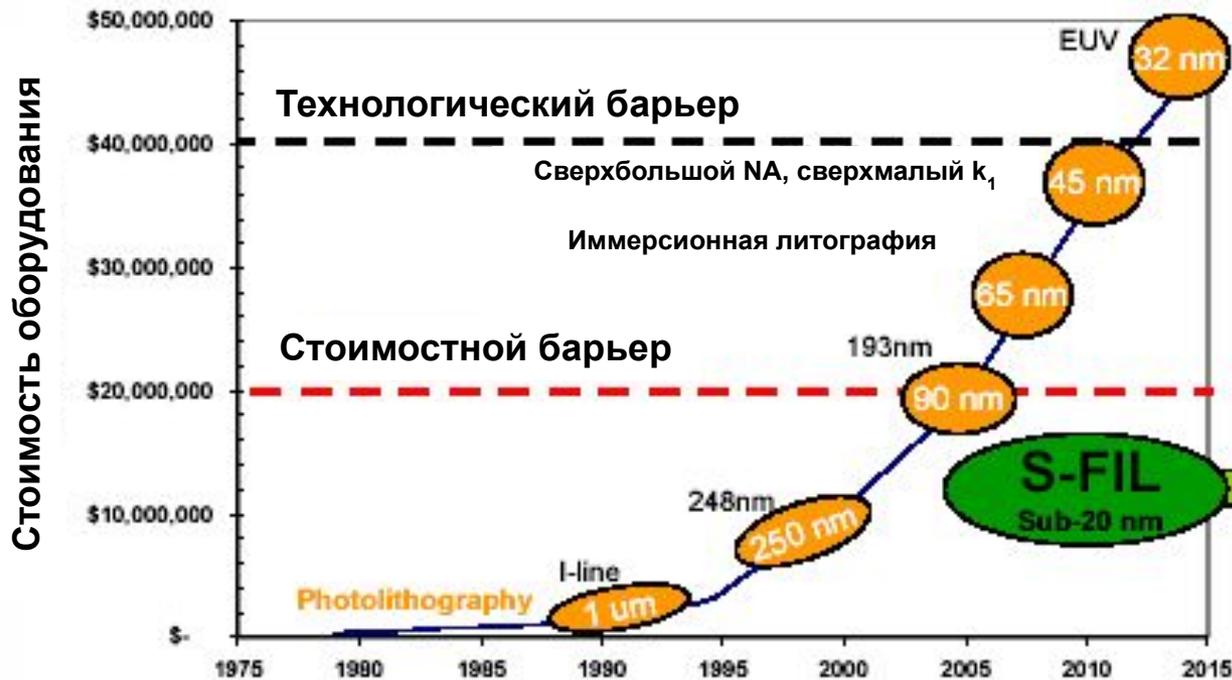
Виды наноимпринтной литографии

Концепция наноимпринтинга очень проста и во многом напоминает классическую технику горячего тиснения полимеров. При термоконтактной литографии резист из термопластичного полимера наносится на плоскую поверхность подложки и нагревается выше его температуры стеклования (T_c). Затем сверху под давлением опускается жёсткий штамп (шаблон) с микро- или наноразмерным рельефным рисунком. Образец охлаждается ниже T_c полимера, после чего давление снимается. Подвергшаяся такому воздействию полимерная плёнка запечатлеват полную реплику печати (рис.).



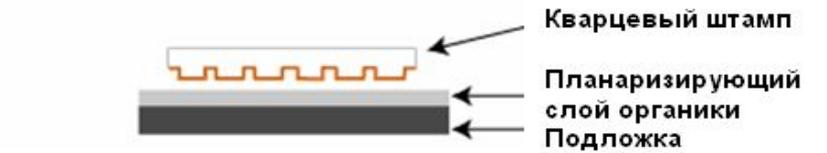
Импринтинг может прийти на замену фотолитографии

- ❑ Оптическая литография столкнётся с техническими ограничениями, когда топологическая норма станет меньше 45 нм.
- ❑ Экстремальная фотолитография (длина волны 13 нм) сложна технически и дорога.
- ❑ Растущая стоимость фотолитографического оборудования может сделать производство кристаллов убыточным.



- Импринтинг
- ❑ Низкая стоимость
- ❑ Высокое качество
- ❑ Перекрывает несколько топологических норм и работает вплоть до 20 нм

S-FIL технология



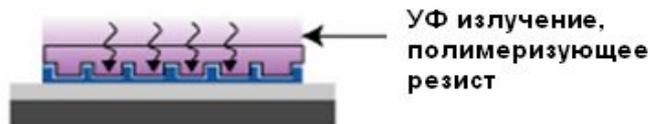
1. Ориентация штампа и положки



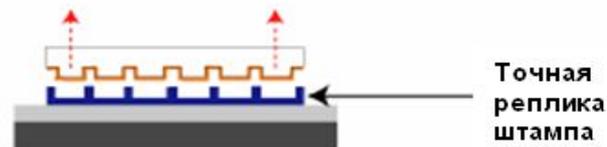
2. Нанесение капель жидкого спец. резиста



3. Опускание штампа и выдавливание рисунка



4. Полимеризация спец. резиста УФ излучением

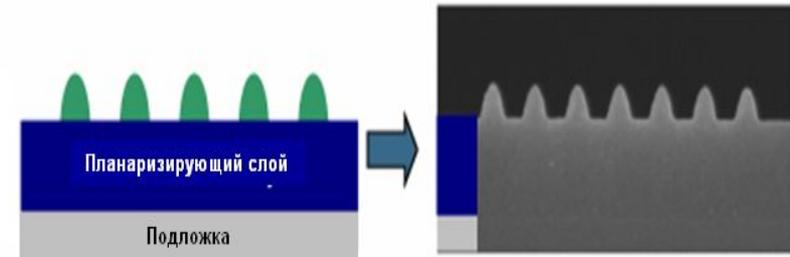


5. Отделение штампа от подложки

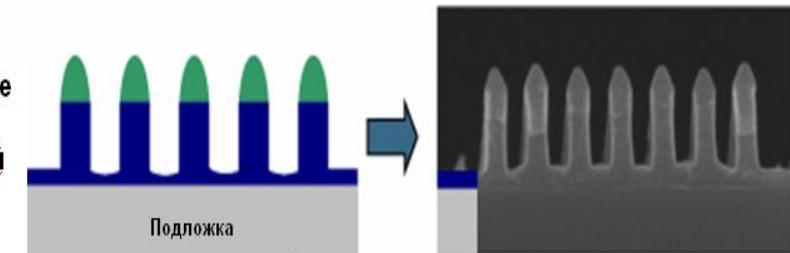
Стартовая позиция: 5 операция на предыдущем рисунке



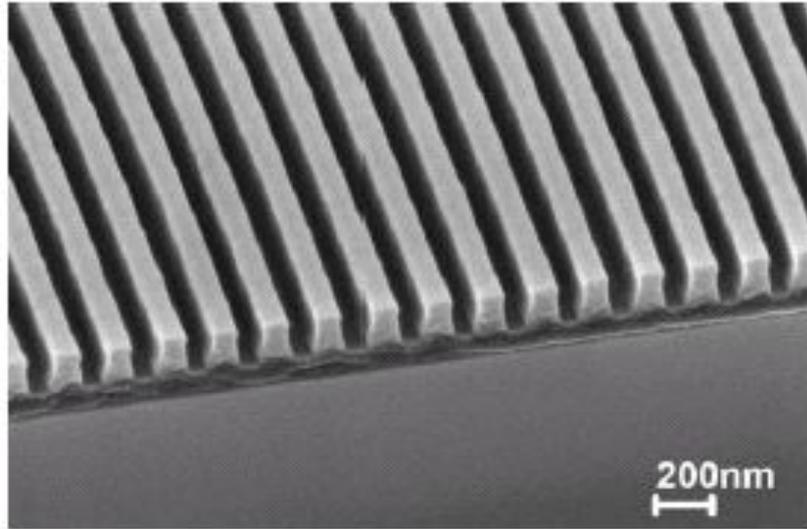
6. Травление в галогене слоя спец. резиста.



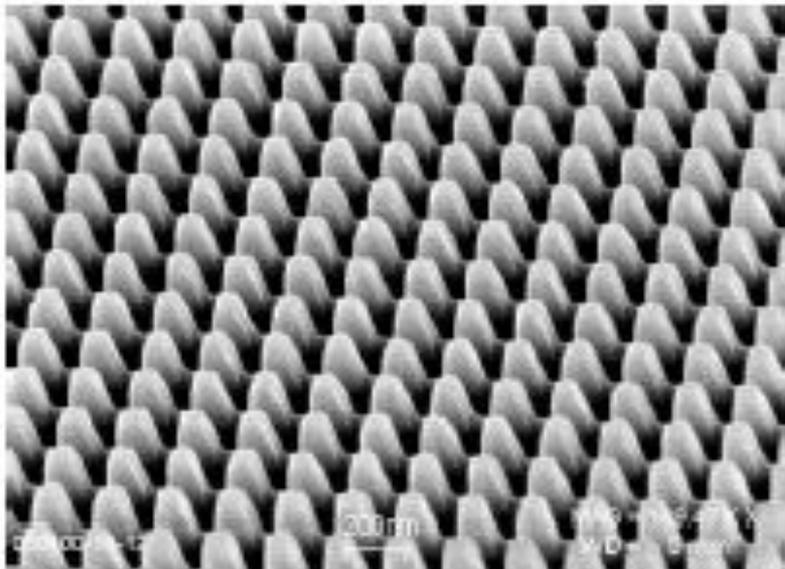
7. РИТ в кислороде слоя планаризирующей органики.



Импринтинг: технология

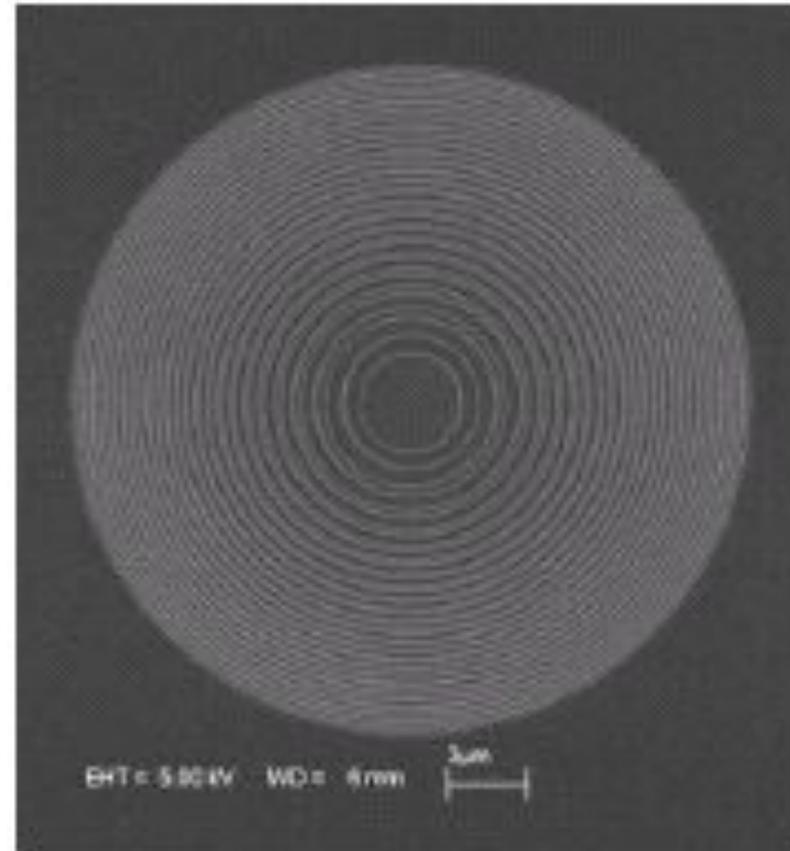


1-D рисунок

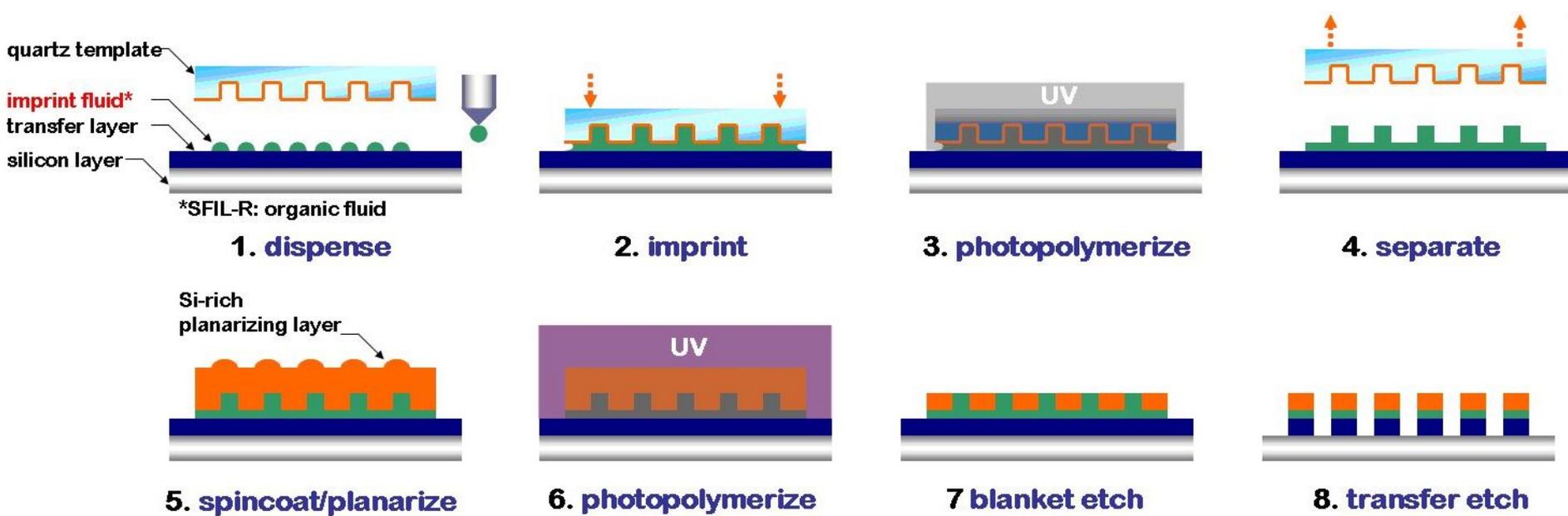


2-D рисунок

Дифракционная микролинза



Обращенный импринтинг (S-FIL/R process)

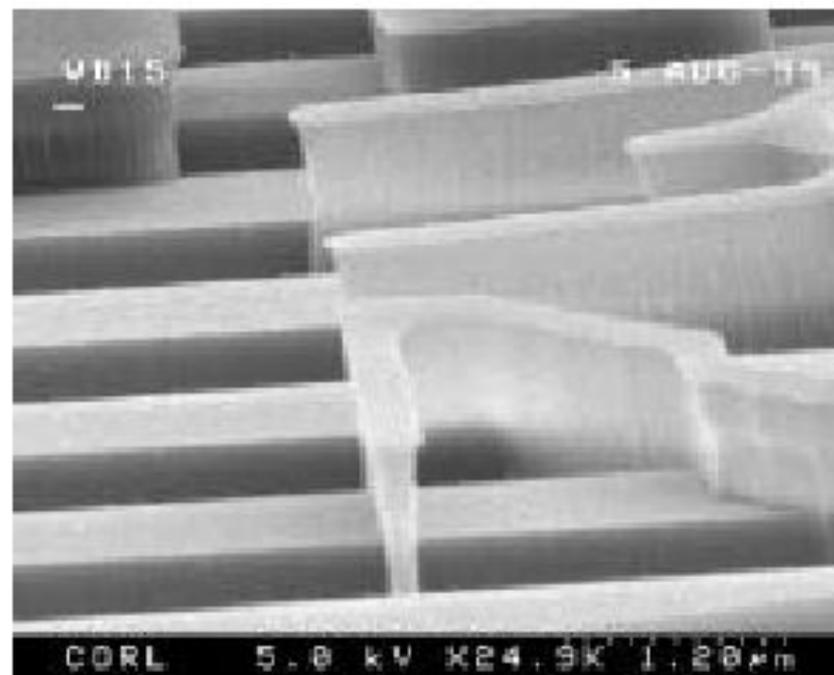
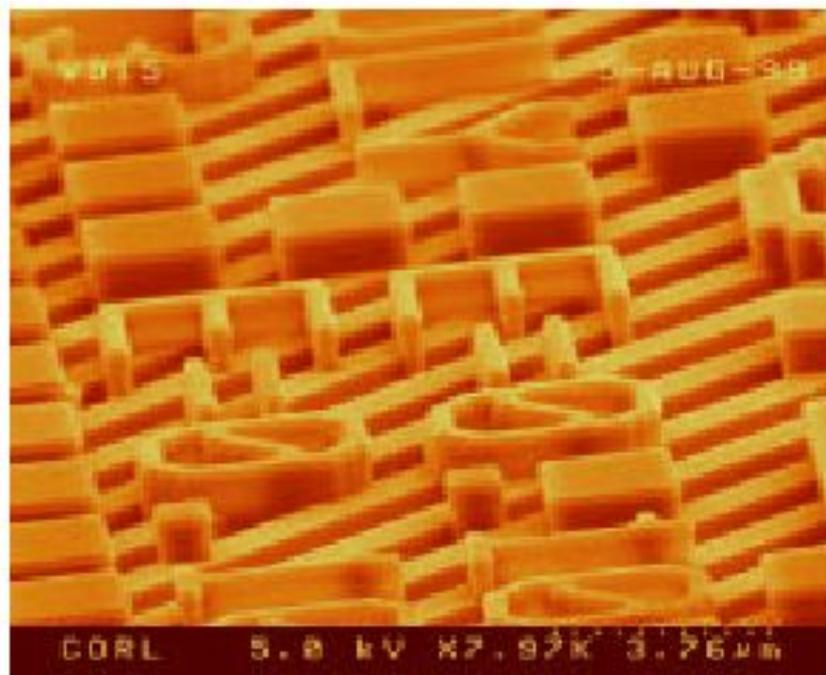


S-FIL/R процесс: после формирования отпечатка, поверхность покрывается планаризирующим слоем (6), который травится до вскрытия слоя, по которому делался импринтинг (7), и затем, используя селективную маску планаризирующего материала, делается РИТ, формирующее обращённую маску с большим аспектным отношением (8).

Преимущества импринтинга

- Низкая стоимость оборудования и технологии, так как не используется дорогая оптика, источники излучения и фотошаблоны;
- Широкий спектр размеров, которые можно реализовать данным методом;
- Не чувствительность к изменению плотности рисунка;
- Нет сложностей характерных для оптической литографии, например, не нужна коррекция эффекта близости;
- Гладкие края формируемых линий, высокий рельеф маски;
- Возможность реализации позитивного и негативного процессов.

Импринтинг по планаризированному рельефу



Безмасочная литография (direct writing)

Методы безмасочной литографии представляют особый интерес для создания прототипов микро- и наноустройств и, главное, масок для классических методов литографии. Эти методы не требуют заранее подготовленного "шаблона", а структура поверхности подложки полностью определяется программой, управляющей процессом модификации поверхности. Спецификой данного метода является последовательное "прорисовывание" каждого элемента, аналогично письму пером по бумаге (отсюда и англ. название метода - "direct writing"). В качестве подобного нанометрового "пера" выступают направленные пучки заряженных частиц (электроны или ионы) или типы атомно-силового микроскопа. Заряженный пучок или тип АСМ скользит по поверхности образца, оставляя след на резисте, после чего материал подвергается обработке, позволяющей растворить модифицированный резист и получить заданный рельеф поверхности.

Сам принцип метода безмасочной литографии предполагает больших затрат времени и использования сложных установок, как для нанесения рисунка на поверхность, так и для управления "пером", поэтому данная методика не получает широкого распространения для изготовления планарных схем в промышленных масштабах. Тем не менее, подобная схема находит широкое применение для решения научно-исследовательских задач.

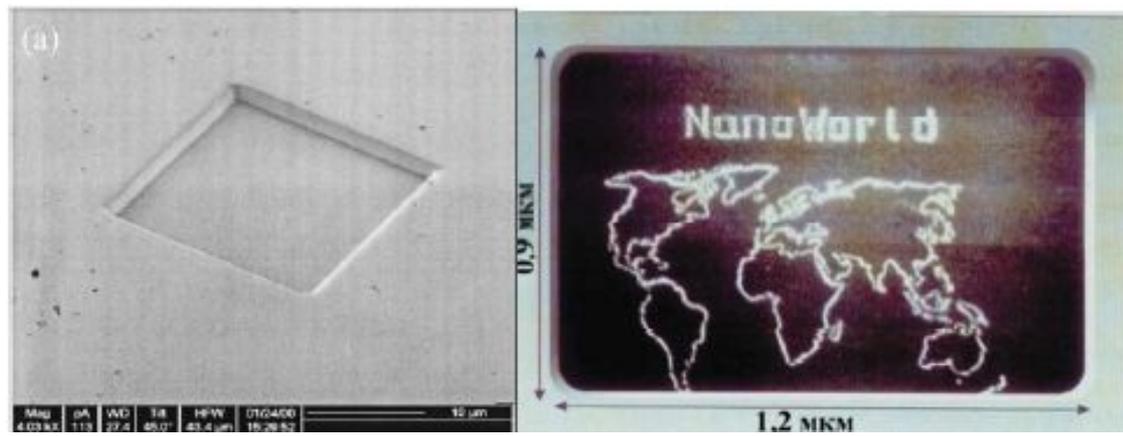
Безмасочные литографические методы можно условно разделить по типу воздействия на резист:

- воздействие потоком заряженных частиц (электронов или ионов);
- механическое воздействие (тип АСМ);
- пространственно ограниченное химическое воздействие (окисление подложек с помощью типа СТМ).

Воздействие сфокусированным пучком заряженных частиц, FIB-литография

В целом схема литографической установки с применением фокусированных потоков заряженных частиц схожа с устройством просвечивающего электронного микроскопа. Заряженные частицы проходят систему фокусирующих линз и попадают на образец. В целях упрощения установки обычно перемещается не пучок, а подложка под ним. Положение образца и его перемещения задаются с предельно возможной точностью (часто с помощью пьезодвигателей). Во избежание влияния внешнего воздействия систему оснащают защитой от вибраций. Для независимого контроля поверхности систему часто оснащают сканирующим микроскопом. На рис. показаны примеры структур, получаемые литографией с применением сфокусированного электронного (разложение пленки AlF_3) и ионного пучка (вытравливание ионами Ga^+ подложки из GaN).

Примеры структур, получаемых с помощью фокусированного ионного (а - вытравливание подложки ионами) и электронного (б - разложение хлорида алюминия) пучка.



Ионно-лучевая литография оказывается более предпочтительным методом по сравнению с ЭЛЛ ввиду меньшего размытия границ освещенной области и возможности непосредственного использования ионного пучка для направленного переноса вещества от источника к подложке. Литографические установки с использованием сфокусированного ионного пучка позволяют достигать разрешения до 10 нм и работать в нескольких режимах (нанесение вещества, "допирование" подложки, воздействие на резист, вытравливание подложки быстрыми ионами), которые переключаются путем изменения ускоряющего напряжения.

Одной из сфер применения литографии с использованием направленного ионного пучка является изготовление и исправление дефектов масок для классических литографических процессов. Так как производство масок сопряжено с технологическими трудностями, а так же большими временными и финансовыми затратами, незначительные дефекты маски, полученные в ходе ее использования, выгодно исправлять с помощью FIB-литографии (Focused Ion Beam), нежели менять маску полностью. В отличие от других типов воздействия на наноуровне, литография с применением сфокусированного ионного пучка позволяет использовать несколько модифицирующих поверхность методов, кроме того, установка подобного рода обычно оснащается уникальной системой контроля поверхности, что позволяет направленно и локально изменять свойства образца.

Механическое воздействие типом СЗМ

Локальное воздействие на поверхность подложки типом атомно-силового микроскопа можно производить в нескольких режимах: механическая модификация поверхности, перенос материала зонда на образец и перенос материала образца на зонд.

Механическое воздействие в свою очередь также подразделяется на 2 группы: статическое (наногравировка) и динамическое (наночеканка). При осуществлении наногравировки с использованием методики обычной контактной силовой микроскопии зонд микроскопа перемещается по поверхности подложки с достаточно большой силой прижима, так что на подложке (резисте) формируется рисунок в виде царапин.

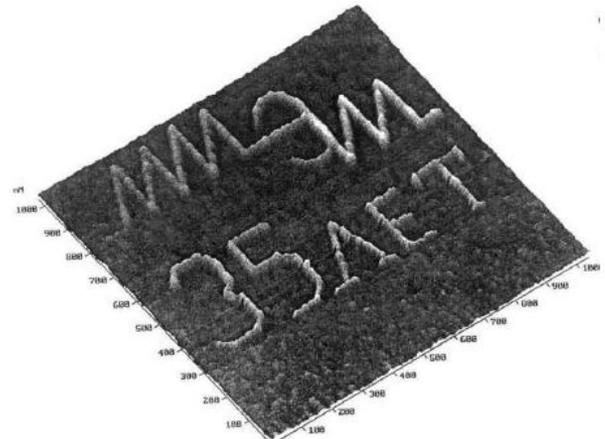
Преимуществом метода наногравировки по сравнению с электронно- и ионно-лучевой литографией является простота и дешевизна реализации, а также отсутствие глубокого воздействия на подложку. К недостаткам метода следует отнести возможность случайных торсионных изгибов кантилевера, приводящим к краевым неоднородностям рисунка.

В случае динамической нанолитографии (наночеканки) модификация поверхности происходит за счет формирования углублений на поверхности образца колеблющимся зондом (прерывисто-контактный метод сканирования). Такой метод нанолитографии свободен от сдвиговых и торсионных искажений, и позволяет производить визуализацию сформированного рисунка без серьезного воздействия на поверхность подложки или резиста.

Наноокислирование

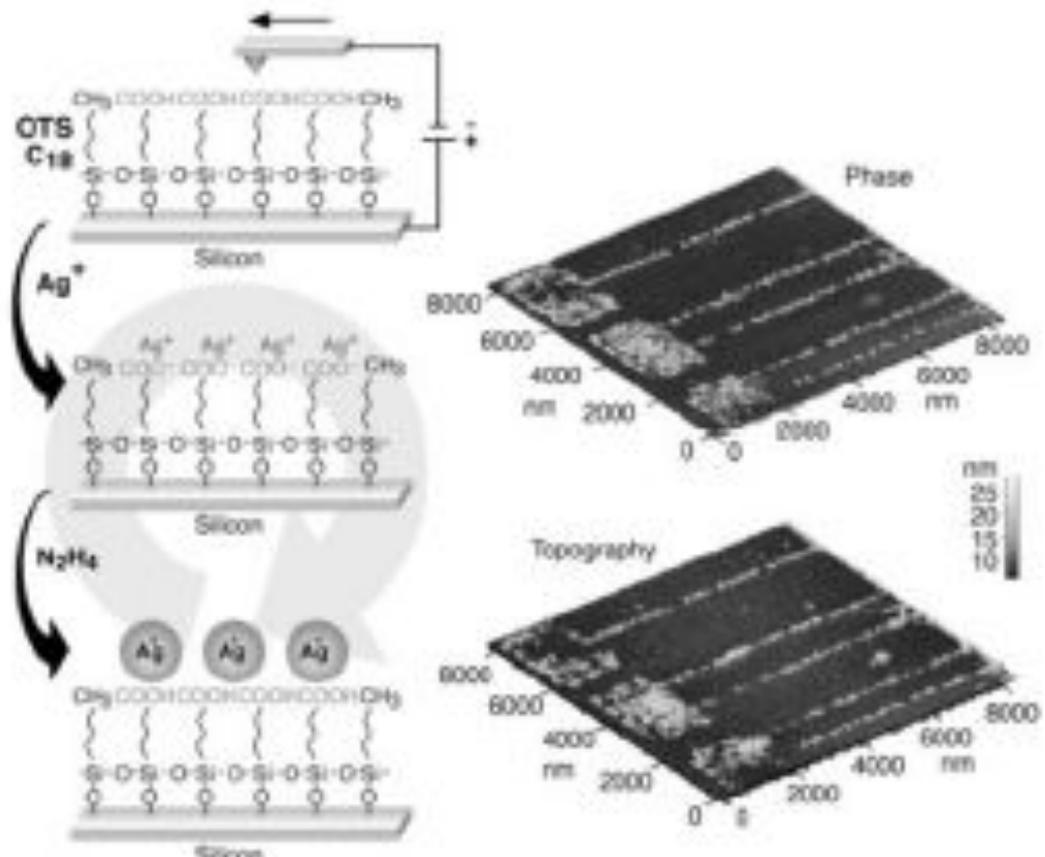
Альтернативной непосредственному механическому воздействию типом АСМ на подложку или нанесенный резист является модификация поверхности с помощью электрических импульсов. Это становится возможным благодаря приложению разности потенциалов на типе и проводящей подложке. В результате такого воздействия изменяя потенциал можно направленно менять структуру и химический состав поверхности. Примером подобного воздействия на подложку может служить "рисунок" полученный анодным окислением пленки аморфного титана с помощью АСМ (рис.). На подложке были сформированы полосы оксида титана шириной ~ 8 нм.

Топография дорожек оксида титана на титановой подложке полученных окислением с помощью типа АСМ (МИЭТ, 2000 г.)



Помимо непосредственного изменения химического состава проводящей подложки возможно электрохимическое воздействие кантилевером на материал резиста. Как и в случае классических литографических методов после модификации резист может быть удален дополнительной химической обработкой (вытравливанием).

Возможность контролируемой химической модификации поверхностных адсорбционных слоев позволяет несколько модифицировать методику эксперимента и получать более сложные и разнообразные наноструктуры. Так если молекулярную пленку углеводорода химически связанного с поверхностью кремниевой подложки, окислить до образования (COOH)-групп, заменить катионы водорода на катионы металла и провести восстановление, то образующийся металлический слой будет в точности повторять траекторию движения кантилевера (рис.).



Использование модифицированного резиста для формирования частиц серебра на подложке

Выводы.

Исходя из соотношения о разрешающей способности всю ФЛ можно разделить на системы с $R_{min} > \lambda$ и с $R_{min} < \lambda$, переход между которыми произошел в 1993—1994 гг. Воспроизведение в ФР маске элементов ФШ с размерами, меньше длины волны экспонирующего облучения, требует применения техники (приемов и способов) повышения разрешения, которая позволяет значительно уменьшить величину $k1$ в формуле определения разрешающей способности по сравнению с дифракционным критерием ($k1 = 0,61$). К технике повышения разрешения относятся:

- использование внеосевого освещения (off-axis illumination — OAI) ФШ путем вырезания с помощью диафрагм из осевого цилиндрического пучка излучения внеосевых трубчатых (кольцевых в сечении) пучков освещения;

- проведение коррекции эффектов оптической близости (optical proximity correction — OPC) элементов топологического рисунка на ФШ путем добавления к этим элементам дополнительных служебных элементов, повышающих точность передачи рисунка на ФР маску;
- использование фазосдвигающих ФШ (phase shift mask — PSM), позволяющих так изменять фазу и коэффициент пропускания проходящего через топологический рисунок ФШ излучения, чтобы повысить его разрешение на ФР слое пластины;
- использование пленок антиотражающих покрытий (АОП) под слоем ФР для уменьшения влияния отраженного от функционального слоя (подложки) излучения на точность передачи топологического рисунка в слой ФР.

Применение этих и других способов позволяет достичь значений $k_1 = 0,3$ (при теоретическом пределе $k_1 = 0,25$). При использовании наиболее совершенных проекционных систем с $NA = 0,93$ можно получить $R_{min} = 0,32\lambda$, из чего следует, что при $\lambda = 365$ нм можно достичь максимального разрешения $R_{min} = 130$ нм, при $\lambda = 248$ нм - $R_{min} = 90$ нм и при $\lambda = 193$ нм - $R_{min} = 65$ нм.

Выпуск промышленных систем иммерсионной проекционной ФЛ с $\lambda = 193$ нм и числовой апертурой (NA) больше единицы (hyper-NA immersion systems) на основе воды с показателем преломления $n = 1,44$, подающейся в пространство между выходной линзой и экспонируемой поверхностью пластины, позволяет при $\lambda = 193$ нм иметь числовую апертуру $NA = 1,3$ (теоретический предел NA с водой составляет 1,35).

Тогда при $k_1 = 0,3$ и $NA = 0,93$ можно получить $R_{min} = 0,23\lambda$, из чего следует, что при $\lambda = 193$ нм достижимо максимальное разрешение $R_{min} = 45$ нм.

Использование органической иммерсионной жидкости с показателем преломления $n = 1,64$ и выходной линзы объектива из кристаллического кварца высокой плотности с показателем преломления $n = 1,67$ позволяет увеличить значение числовой апертуры (NA) систем иммерсионной ФЛ до 1,55. С учетом этого значения становится $R_{min} = 0,12\lambda$, из чего следует, что при $\lambda = 193$ нм при высокой производительности реализуется технологический процесс (ТП) 45 нм, а при использовании двойного экспонирования - ТП 32 нм, и есть возможность для реализации ТП 22 нм. Среди следующих поколений систем литографии специалистами подтверждены перспективность развития только для проекционной литографии экстремального ультрафиолета (EUV lithography) на основе зеркальной оптики и УФ - НИЛ.

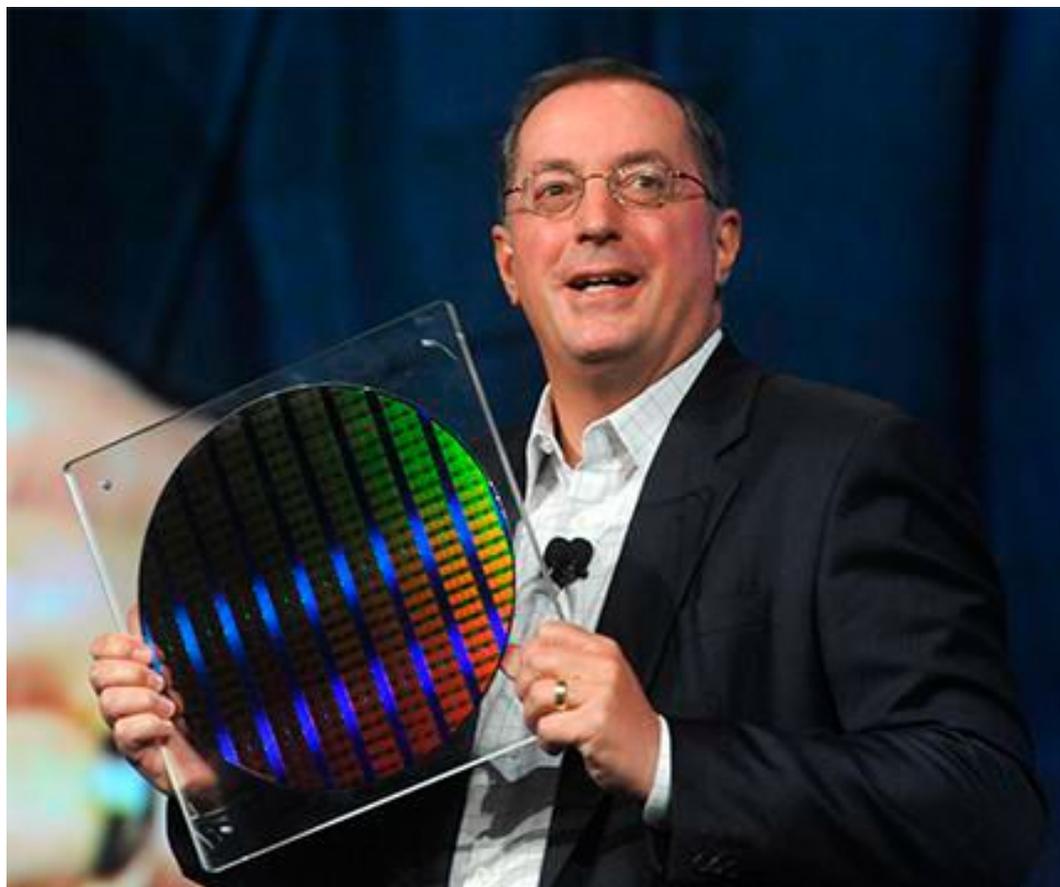
Каждое уменьшение минимального размера элементов (переход на следующий технологический уровень - ТУ), достигаемое проекционной литографией, сопровождается усложнением как самих литографических систем, так и комплектом используемых фотошаблонов и их стоимостью, которая может достигать миллионы долларов. Кроме того, с каждым ТУ повышается степень интеграции микросхем, а следовательно, растет число функциональных слоев, особенно слоев металлизации и изоляции, что увеличивает число ФШ в комплекте. В связи с этими факторами стоимость комплекта ФШ с каждым ТУ непрерывно растет и особенно быстро, когда минимальный размер элементов ИМС становится меньше длины волны экспонирующего излучения ($R_{min} < \lambda$).

В таблице приведены стоимость систем проекционной ФЛ и других перспективных систем литографии и их возможности по реализации ТУ микросхем.

Анализ данных табл. подтверждает, что неиммерсионные системы литографии могут обеспечивать получение минимальных размеров (R_{min}) на уровне $1/3$ от длины волны λ используемого экспонирующего излучения.

Однако для $R_{min} \leq 0,5 \lambda$ резко увеличивается сложность и стоимость комплекта ФШ. Поэтому необходимо использовать системы ФЛ с длиной волны экспонирующего излучения, наиболее близкой к требуемому минимальному размеру, чтобы сэкономить на стоимости комплекта ФШ.

По этой причине в настоящее время системы ФЛ с $\lambda=365$ нм практически не используются для производства микросхем с ТУ 180 нм и 130 нм, а системы ФЛ с $\lambda=248$ нм очень ограниченно используются для изготовления ИМС с ТУ 90 нм.



Исполнительный директор Intel Пол Отеллини демонстрирует микросхемы, выполненные по 22-нанометровой технологии (2009 год)

Контрольные вопросы.

1. Что Вы знаете об иммерсионной литографии?
2. Расскажите о литографии в экстремальном ультрафиолете.
3. Какие виды литографии относятся к литографии высоких энергий? Дайте их определения.
4. Какие способы электронно-лучевой литографии Вы знаете?
5. Ионно-лучевая литография, ее особенности и аппаратное оформление.
6. Что Вы можете рассказать о рентгеновской литографии?
7. Расскажите о наноимпринтной литографии. Какие способы наноимпринтной литографии Вы знаете?
8. Охарактеризуйте виды безмасочной литографии.
9. Воздействие сфокусированным пучком заряженных частиц, FIB-литография, что Вы о ней знаете?
10. Расскажите о литографиях, основанных на методах зондовой микроскопии.