

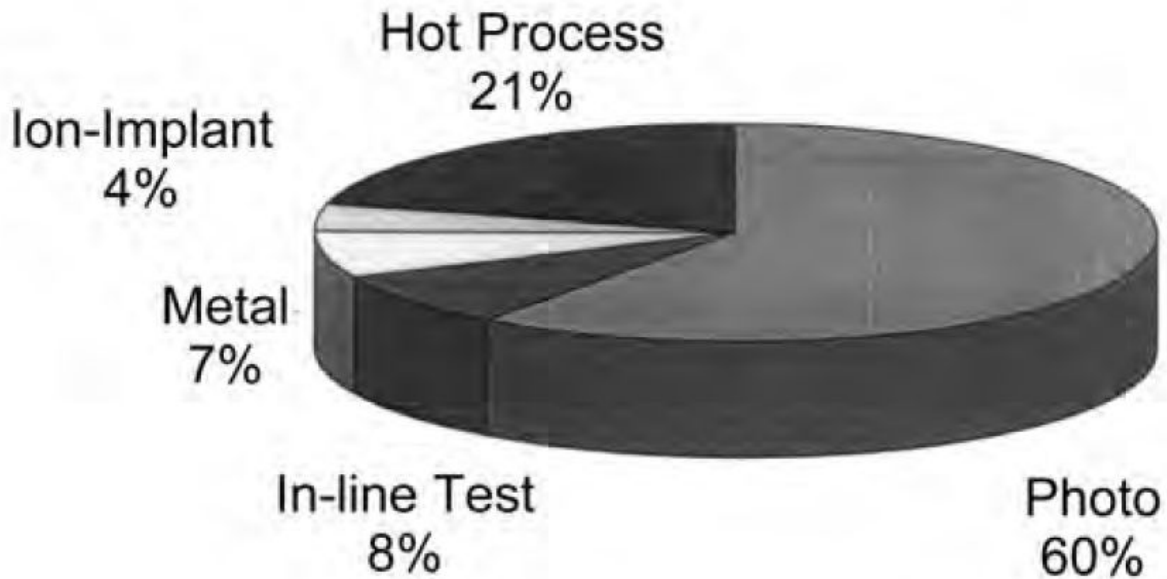
ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Литография (от греческих «lithos» — камень и «grapho» — пишу, рисую), способ печати, при котором оттиски получают переносом краски под давлением с плоской (нерельефной) печатной формы непосредственно на бумагу или ткань. Литография была изобретена в 1798 году А. Зенефельдером в Богемии.

В микроэлектронике при производстве ее основных изделий ИМС и интегральных микроэлектронных приборов (ИМП), в виде функционального набора ИМС на одной пластине, под литографией понимается создание топологических рисунков с различными минимальными размерами элементов (с различными топологическими нормами) указанных схем и приборов в различных функциональных слоях, образующих их структуру

Если минимальный размер элементов L_{\min} (топологическая норма) ИМС и ИМП лежит в микронной области $1,0 \text{ мкм} \leq L_{\min} < 10 \text{ мкм}$, то литография обычно называется микролитографией, если в субмикронной области $0,1 \text{ мкм} \leq L_{\min} < 1,0 \text{ мкм}$, то – субмикронной литографией, а если в субнанометровой области $L_{\min} < 100 \text{ нм}$, то – нанолитографией.

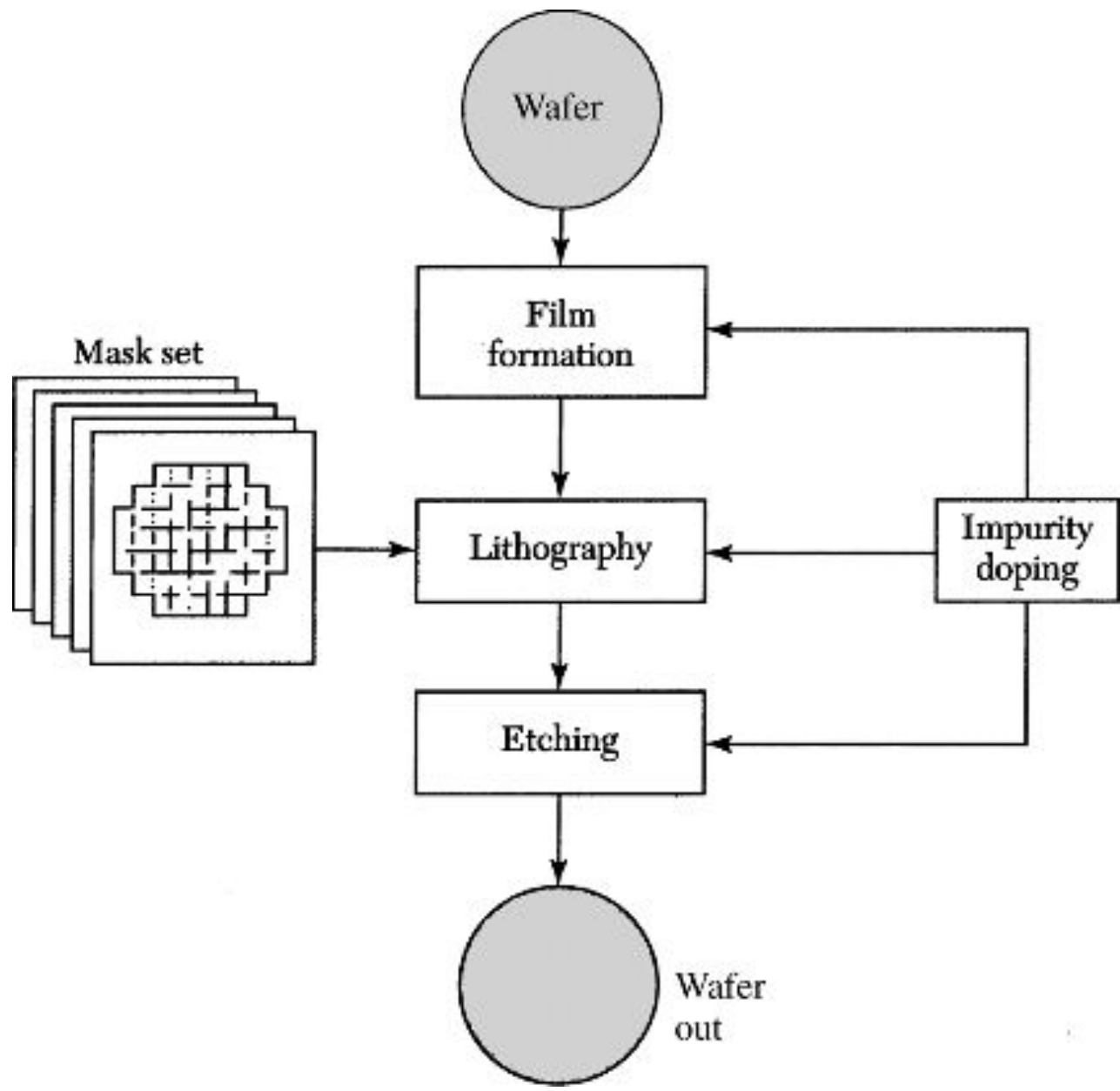
Wafer Processing Breakout

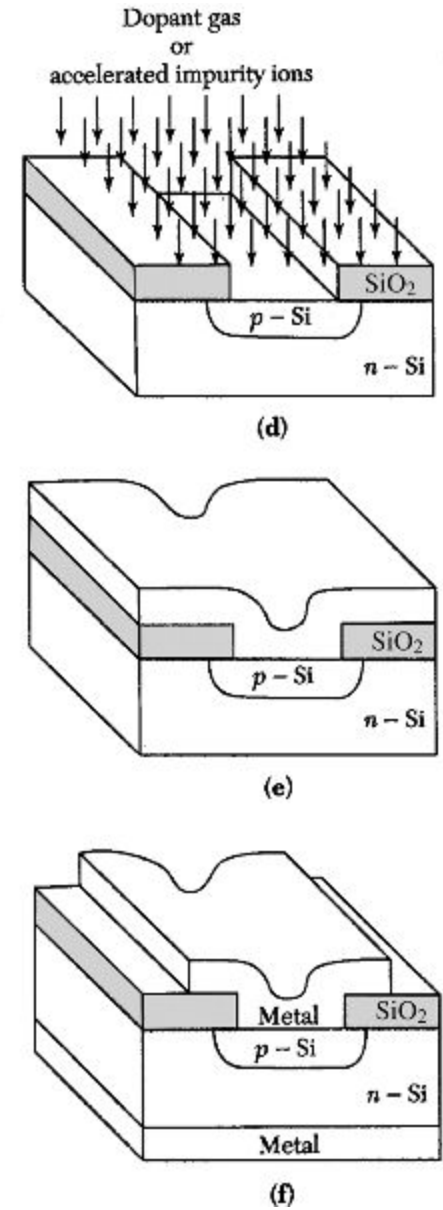
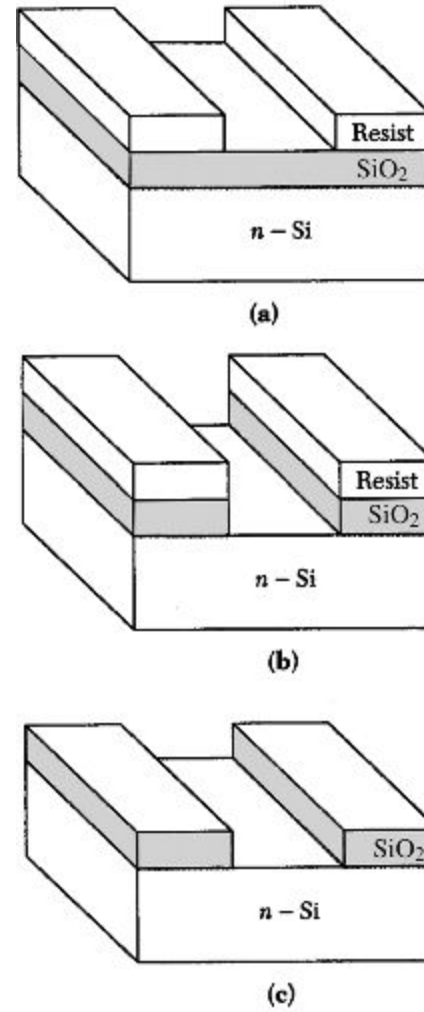
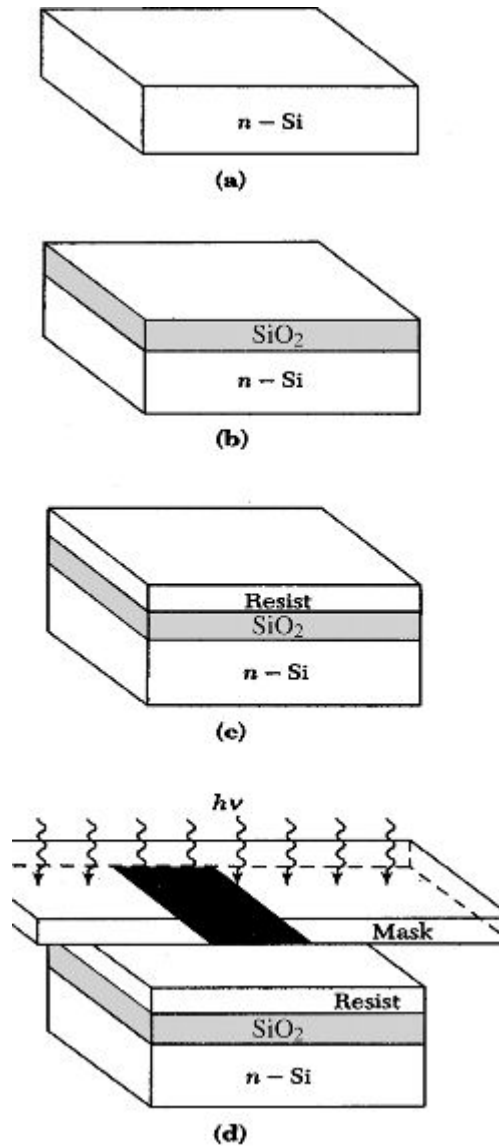


Lithography dominates in determining the total cycle time for IC processing.

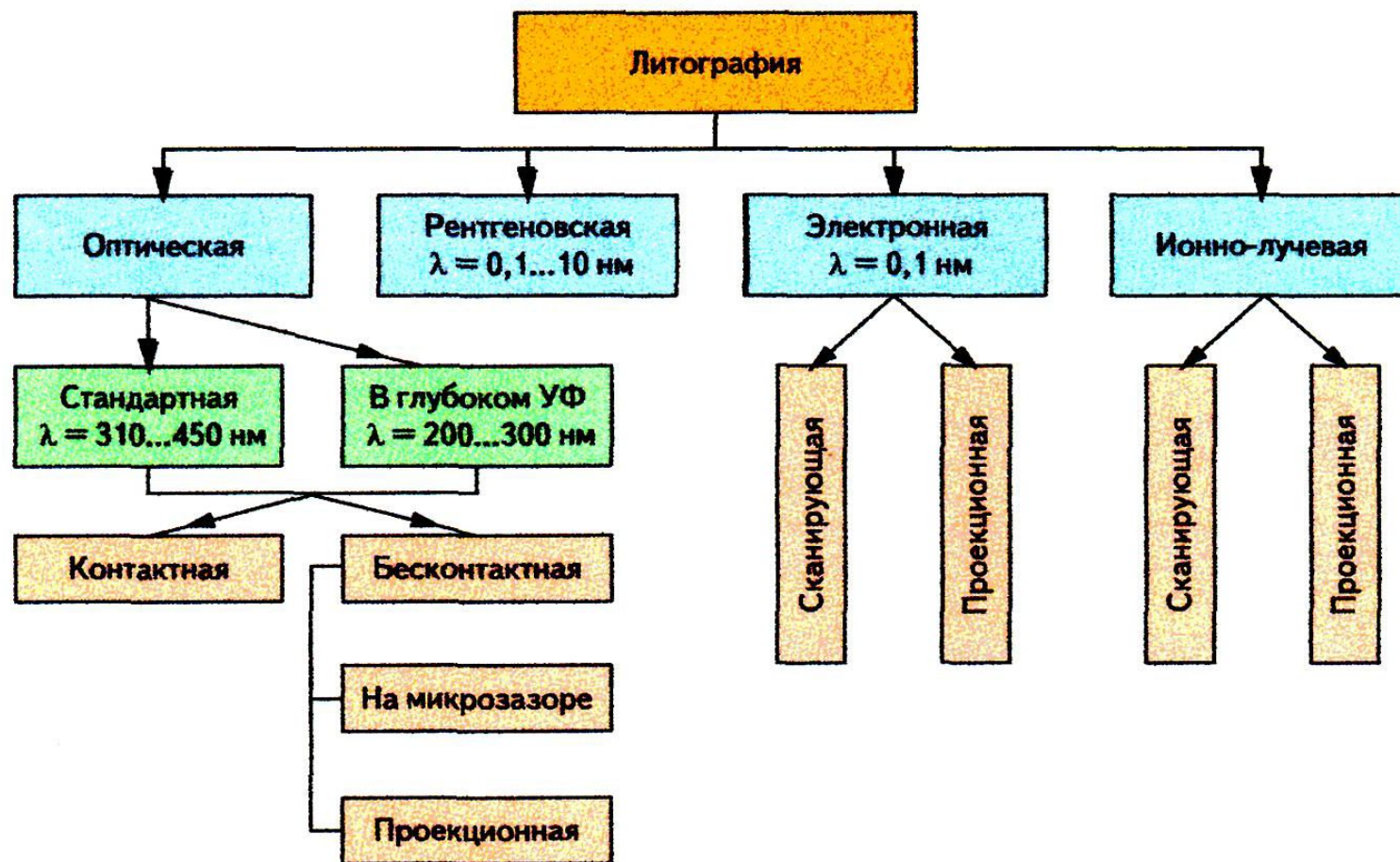
Задача фотолитографии —

обеспечить качественное формирование топологических решений на всем поле кремниевой пластины с соблюдением допустимых отклонений размеров элементов и их расположения относительно нижележащих структур, сформированных в предыдущем цикле.



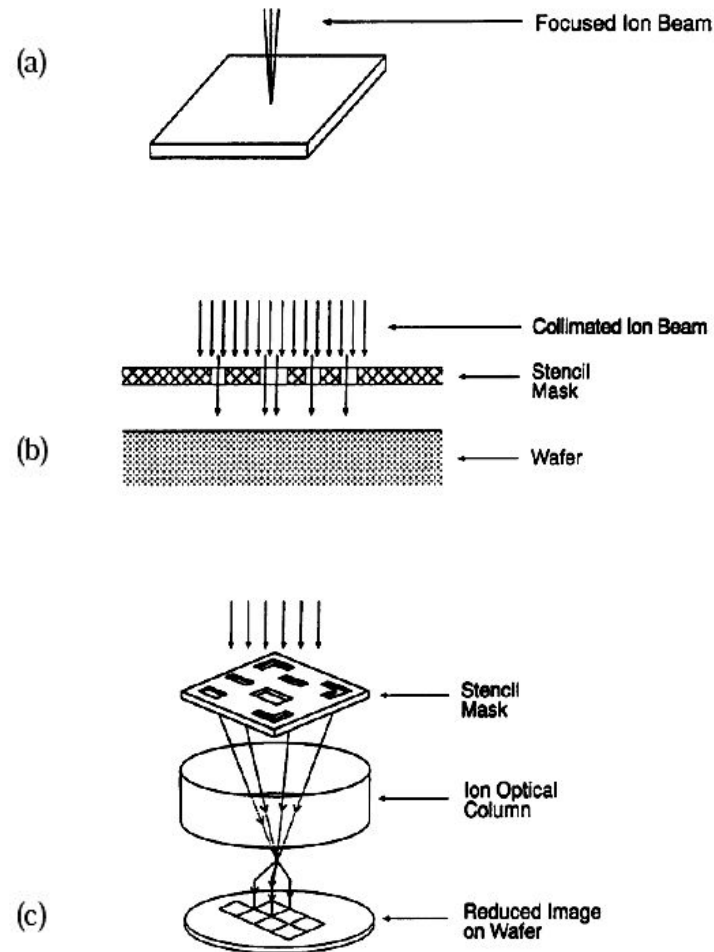


Технологический процесс (маршрут) изготовления кристаллов ИС характеризуется строго заданной последовательностью проведения операций (не допускается перестановка последовательности операций или пропуск одной из них) и заданными интервалами времени хранения (пролеживания) пластин со структурами кристаллов между операциями. Маршрут состоит из нескольких сотен отдельных операций, каждая из которых проводится при строгом соблюдении норм на параметры условий производства, технологических сред и обрабатываемых структур.



Классификация литографических процессов

С помощью любого вида радиационного воздействия можно реализовать три способа экспонирования пластин (подложек) с ФР маской, т.е. реализовать три типа литографии



Три способа ионного экспонирования поверхности подложки (**три типа ионной литографии**): а – ионно-лучевая литография сфокусированным программируемо перемещаемым ионным пучком (*ion direct write lithography*); б – теньевая ионная литография с зазором между ионошаблоном и пластиной (*1:1 proximity ion lithography*); в – проекционная ионная литография с уменьшением размера рисунка на ионошаблоне в N раз (*$N:1$ projection ion lithography*)

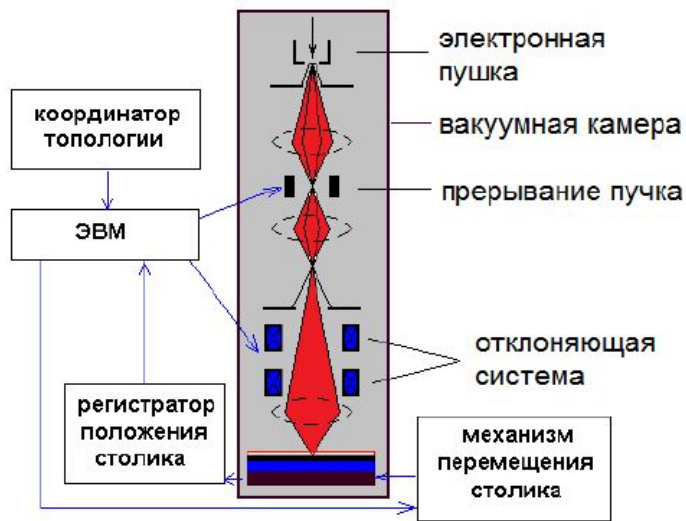


Схема проекционной электронной литографии

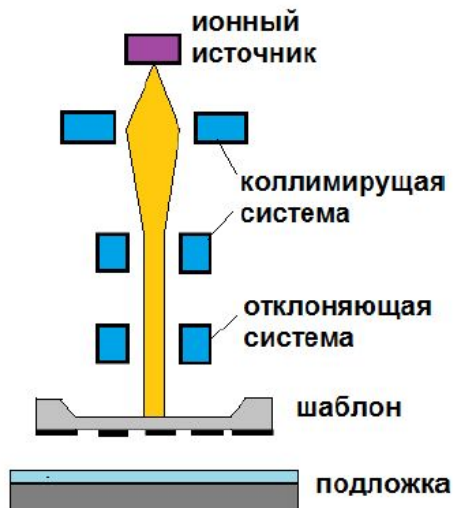


Схема экспонирования коллимированным ионным пучком

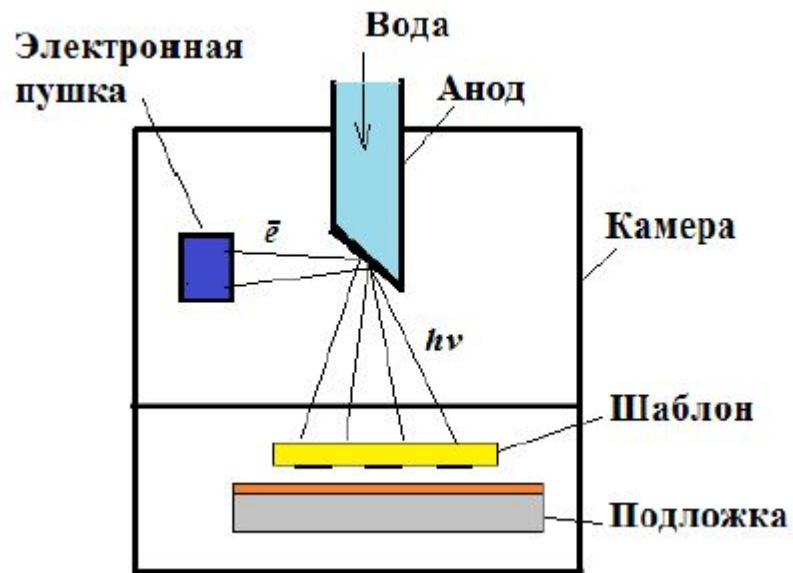
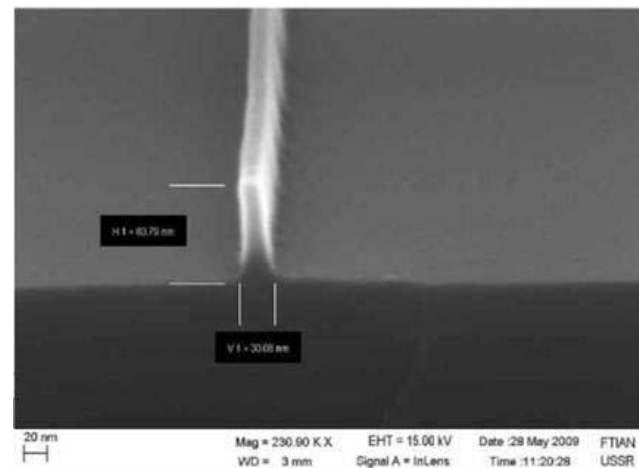


Схема установки рентгеновской литографии



Сформированная маска затворной структуры нанотранзистора в электронрезисте ширина линии резиста 30 нм, высота 81 нм

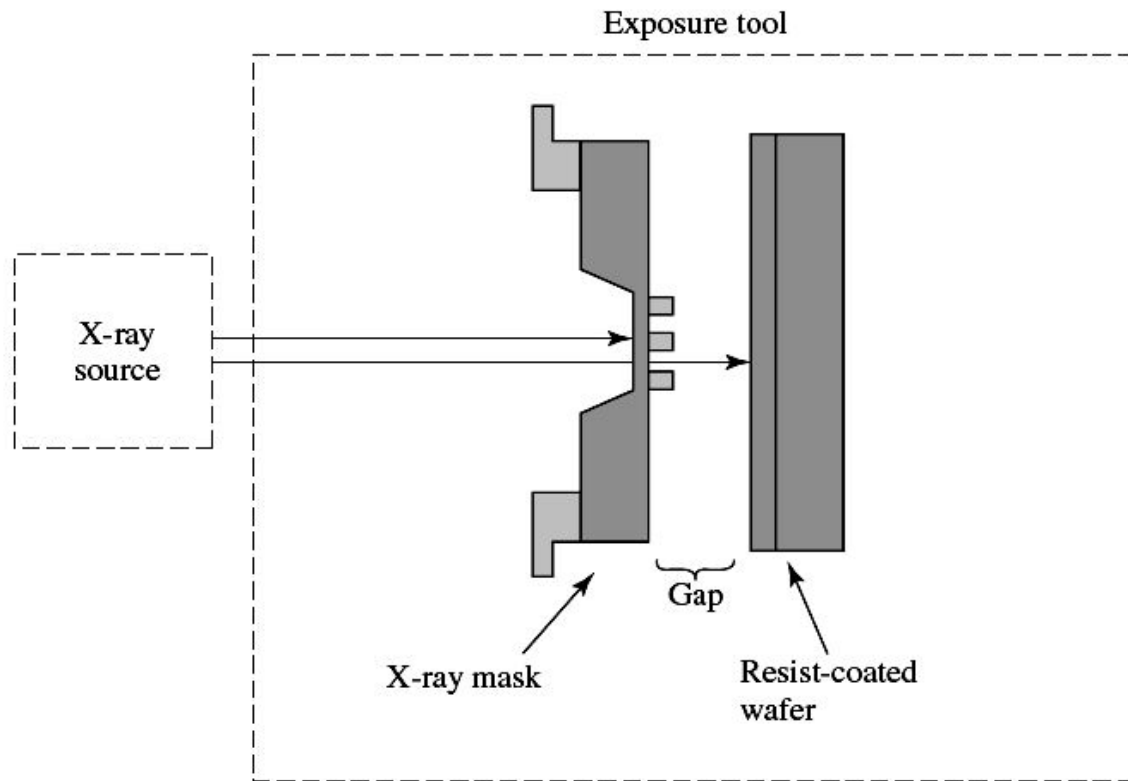


Схема системы теневой рентгеновской литографии с зазором между шаблоном и пластиной (*1:1 proximity X-ray lithography* или *1x X-ray lithography*)



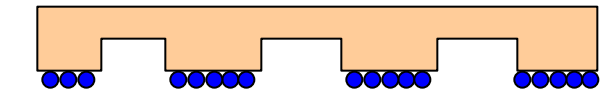
Виды наноимпринтной литографии

Примеры импринт литографии

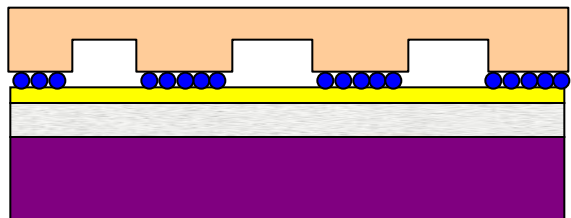
Мягкая литография*

Whitesides, Harvard,

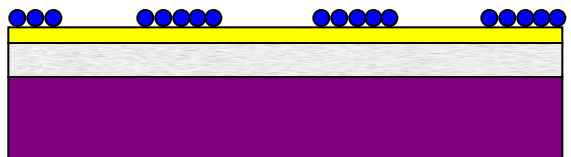
http://gmwgroup.harvard.edu/research_simpanotech.html



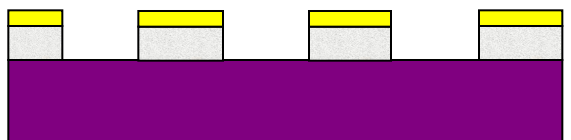
1. PDMS печать с тиолом



2. Привод в контакт



3. Молекулы переходят



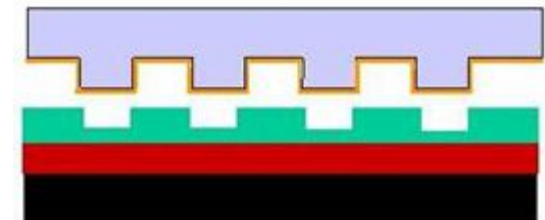
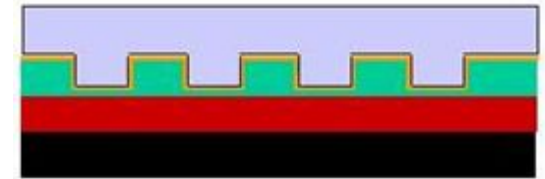
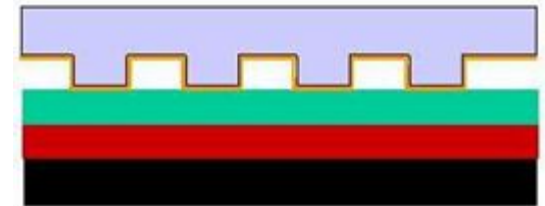
4. Перенос рисунка

- Поместить штамп на подложку с двумя слоями
- Приложить высокое давление при высокой температуре
- Отделить печать от подложки

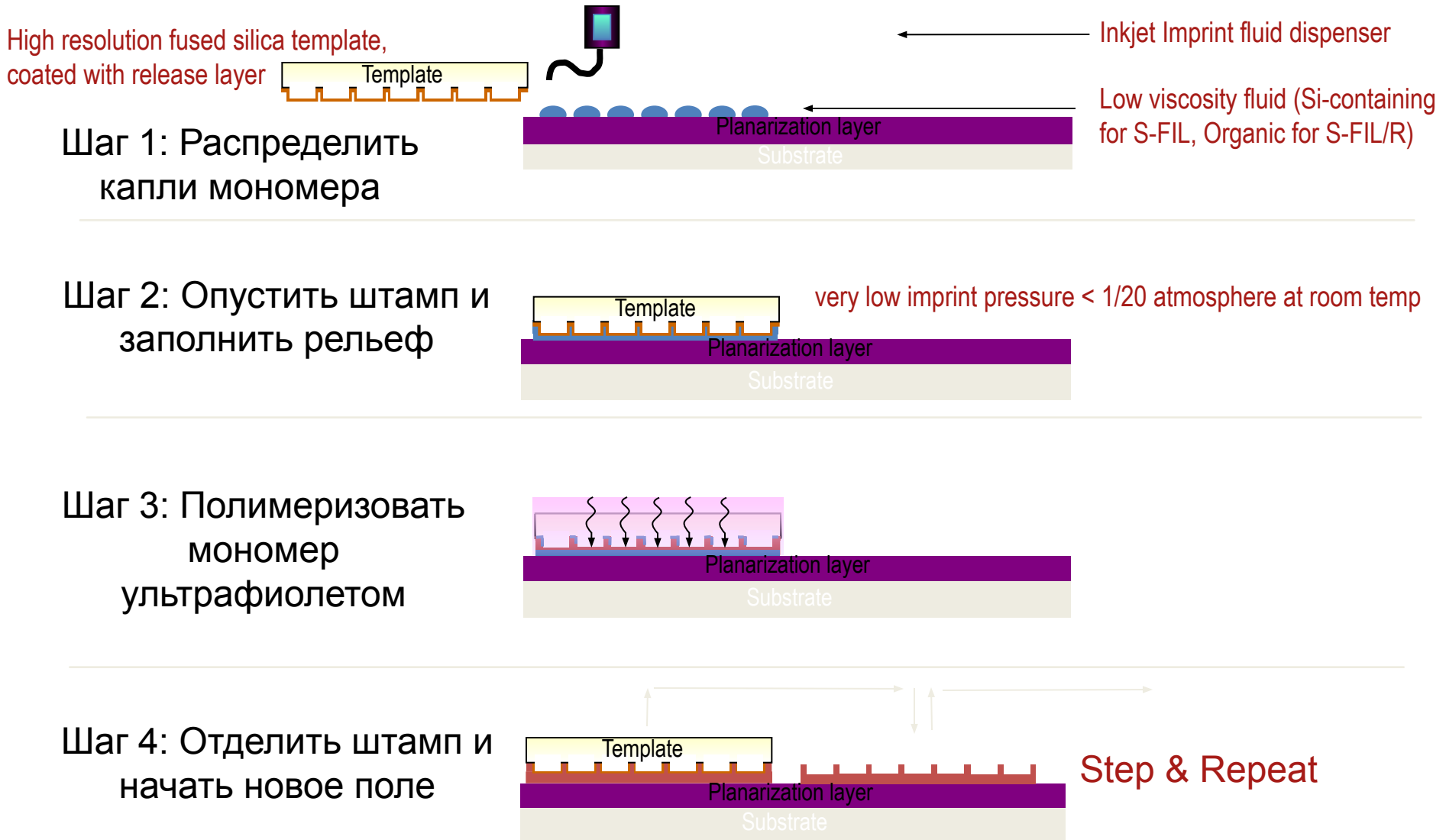
Термическая литография

Chou, Princeton University

<http://www.princeton.edu/~chouweb/>



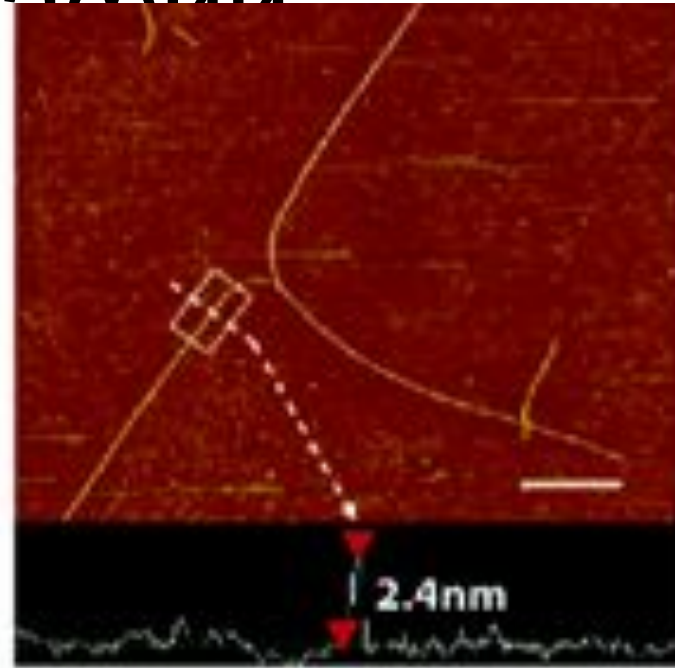
MII: Step & Flash™ Импринт Литография (S-FIL)

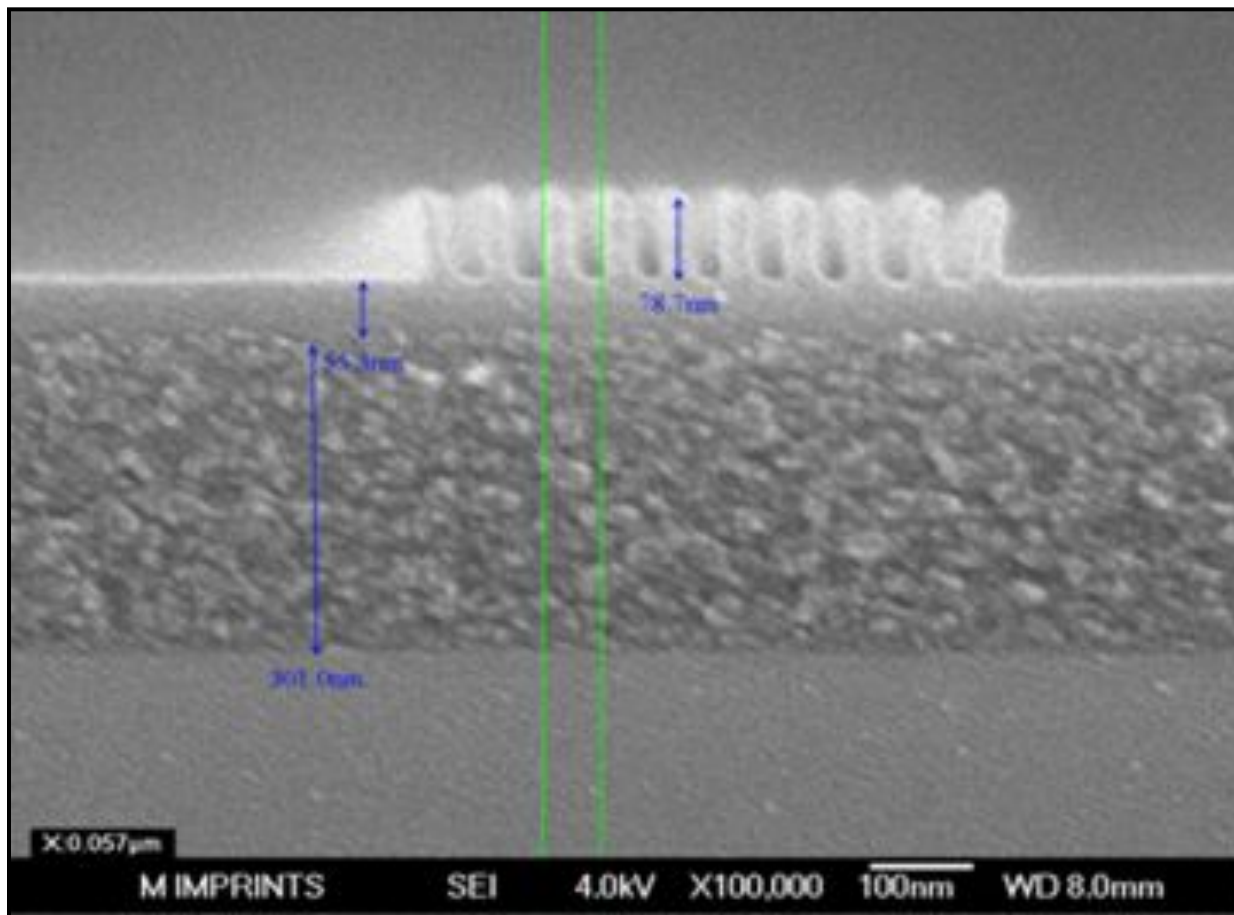


Примеры импринт литографии

- John A. Rogers, *University of Illinois, Urbana-Champaign*,
<http://rogers.mse.uiuc.edu/files%5C2006%5Cieeenano.pdf>

Печатание с помощью штампа сделанного из углеродной нанотрубки достигло разрешения 2.4 нм. При этом использовался полимер затвердевающий под воздействием ультрафиолета





Хаснатдинов Н. Обзор S-FIL nanoимпринт литографии и последние результаты для CMOS и других наноприложений. – Презентация компании Molecular Imprints на секции «нанотехнологий» ОНИТ РАН, М.: 2007.

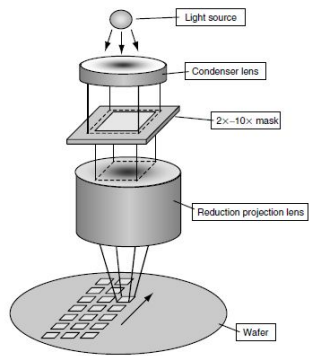
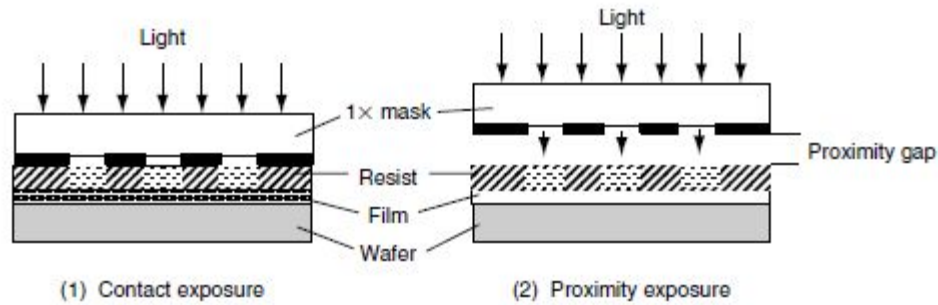


FIGURE 6.4 Reduction projection lithography.

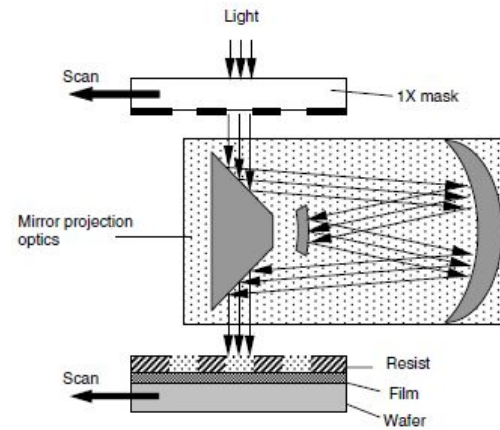
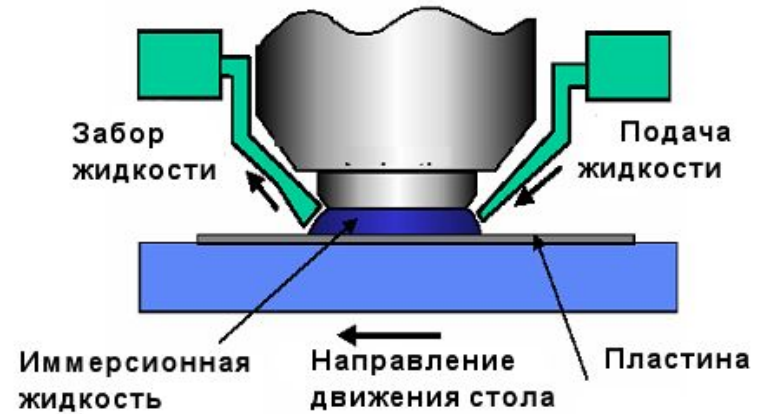
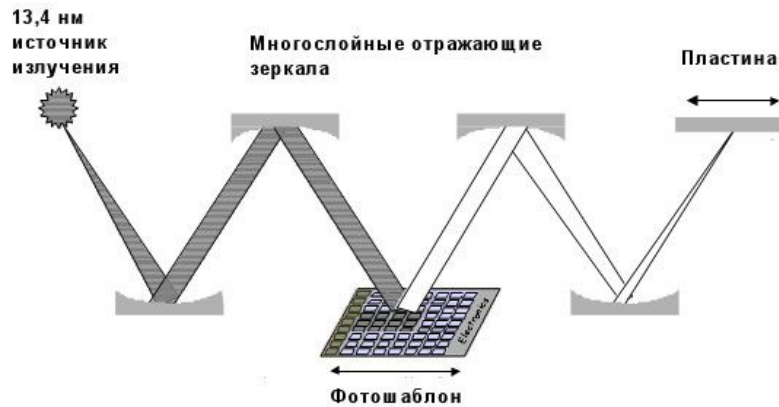


FIGURE 6.3 Optical lithography by projection method with 1x magnification mask.



Источник света	Спектральная линия	Длина волны	Расположение в спектре электромагнитной радиации
Ртутная дуговая лампа	g-line	436nm	видимый
	h-line	405nm	видимый
	i-line	365nm	ближний УФ (mUV)
	DUV	240-255nm	глубокий УФ (DUV)
Эксимерный лазер	KrF	248nm	глубокий УФ (DUV)
	ArF	193nm	глубокий УФ (DUV)
	F ₂	157nm	вакуумный УФ (VUV)

Используемые в литографии источники излучения и соответствующие длины волн

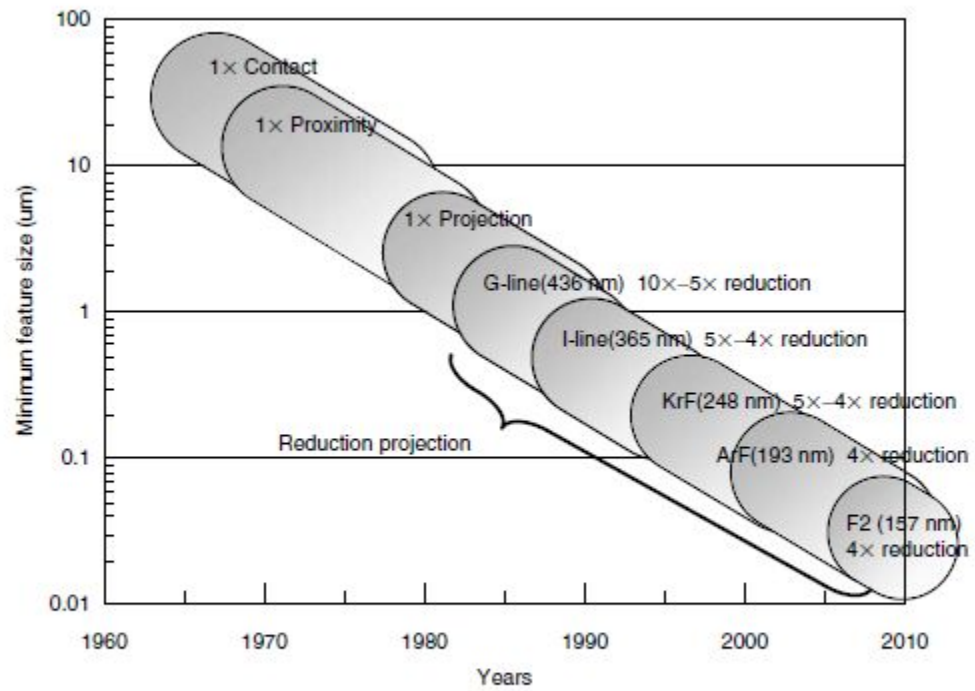


FIGURE 6.5
Trends of lithography technologies and exposure wavelength.

Материалы, чувствительные к излучению, называют соответственно фото-, рентгено- и электронорезистами. Это в основном полимерные материалы, устойчивые к воздействию жидкостных травителей, плазмы и другим. Резисты делят на два класса - негативные и позитивные

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

- Процесный модуль (микромаршрут) нанолитографии** (без контрольных операций) может состоять из следующих операций [1]:
- подготовка поверхности пластины с помощью осаждение гексаметилдисилазана (ГМДС) (*hexamethyldisilazane – HMDS*);
 - нанесение нижнего антиотражающего покрытия (АОП) (*bottom anti-reflective coating - BARC*);
 - сушка АОП;
 - нанесения слоя фоторезиста (ФР);
 - сушка слоя ФР;
 - экспонирование слоя ФР через фотошаблон с совмещением по меткам с топологией предыдущего слоя;
 - постэкспозиционная сушка ФР;
 - проявление ФР;
 - дублирование (сушка после проявления) ФР;
 - проявление АОП;
 - травление функционального слоя (ФС) через проявленные ФР и АОП;
 - удаление остатков ФР и АОП после травления ФС.



Базовый технологический маршрут оптической нанолитографии

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ «ТЕХНОЛОГИЯ НАНОЛИТОГРАФИИ» ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ БЛОК БАЗОВЫХ ЗНАНИЙ. Лекции. д.т.н. Киреев В.Ю., М., МИЭТ

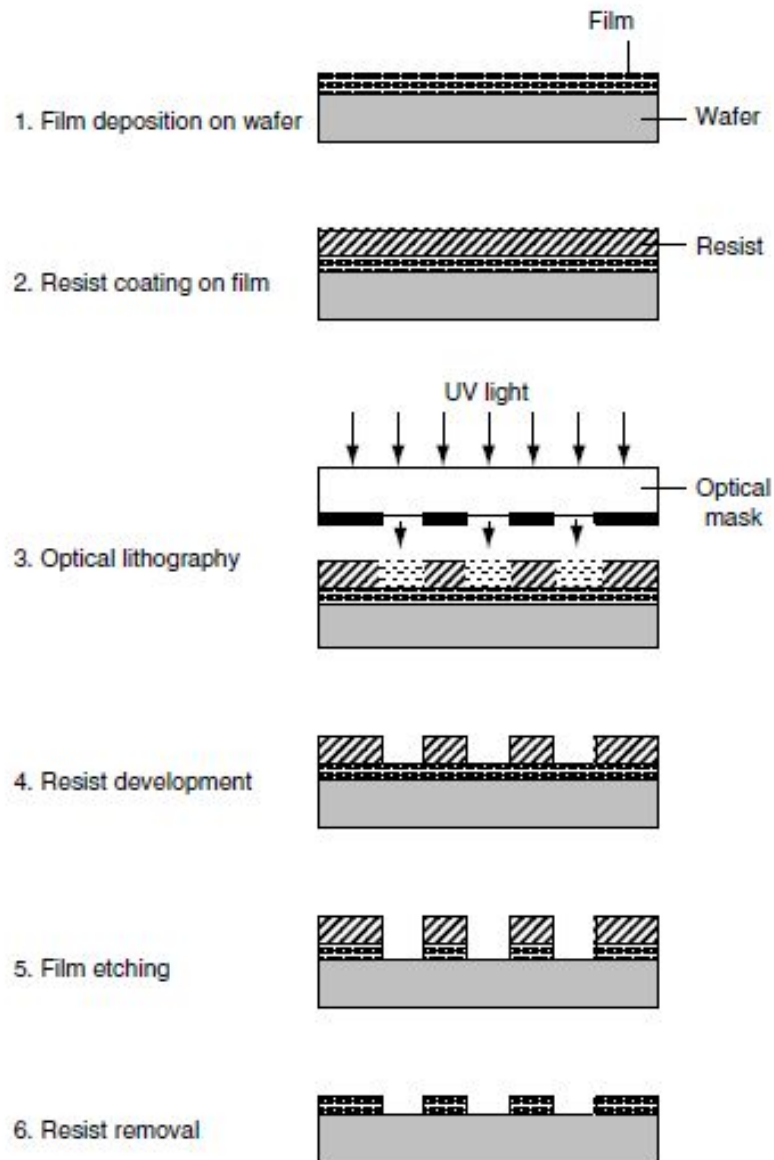
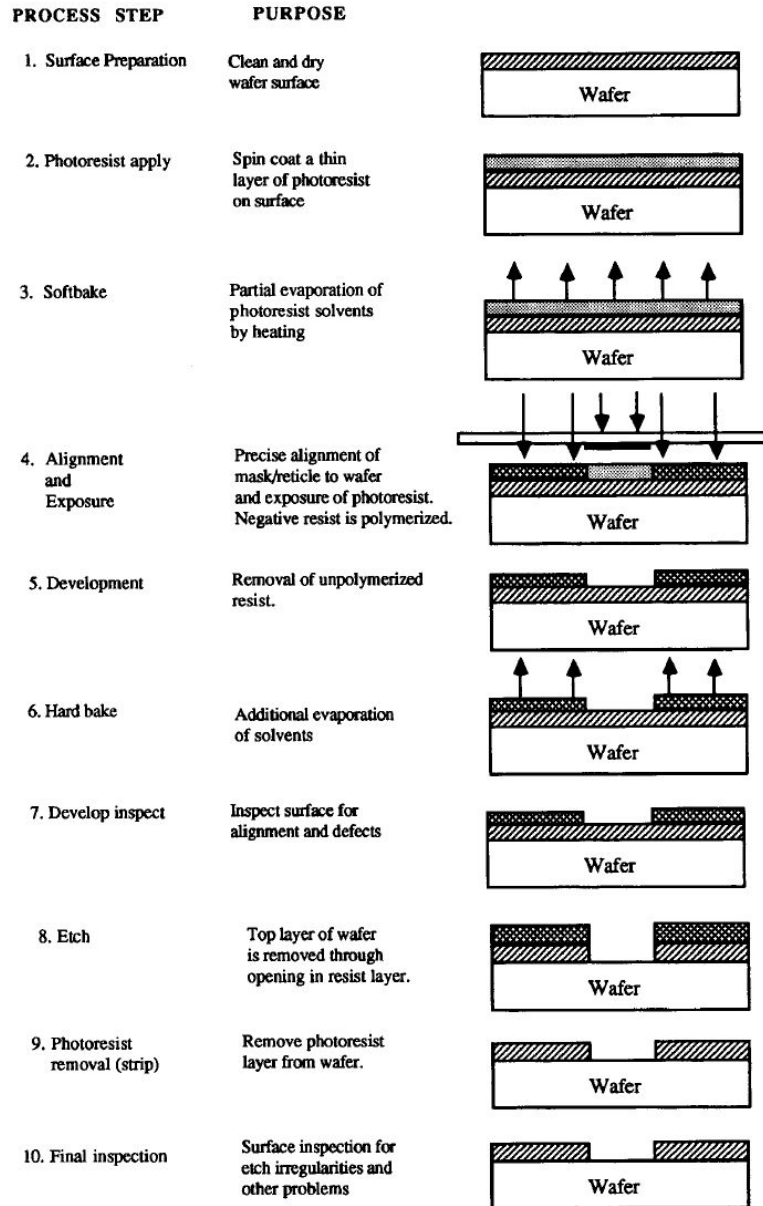


FIGURE 6.1
Semiconductor circuit pattern formation process using optical lithography.



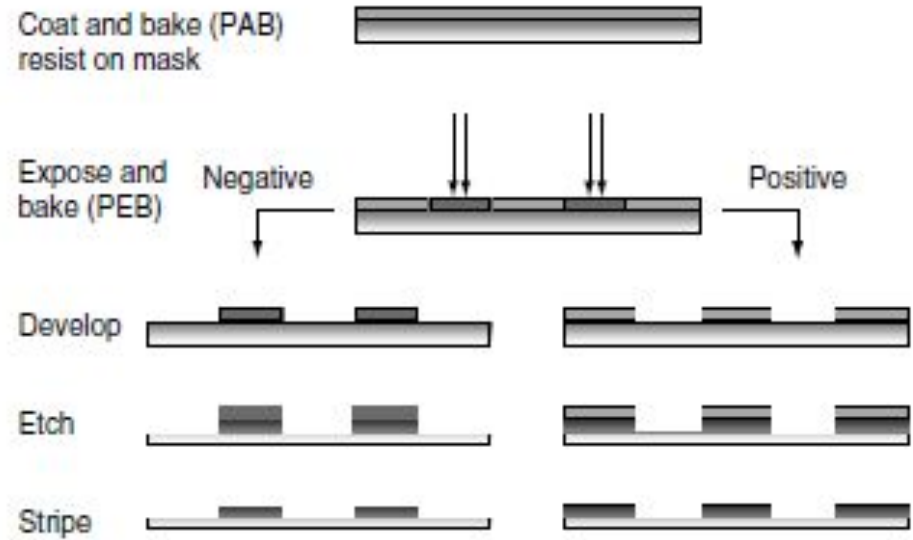
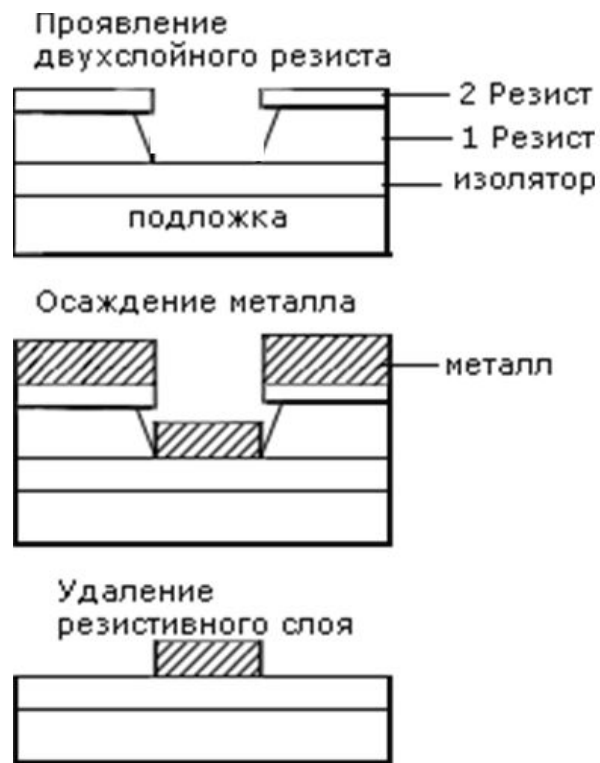


FIGURE 15.1
Positive and negative photoresist
processing for photomasks.



«Lift –off» процесс, основанный на применении двухслойного резиста.

используется для получения металлических линий нанометрового масштаба.

Основные свойства фоторезистов

Светочувствительность $S = 1/H$ - величина, обратная экспозиции (Выражается в лк величина, обратная экспозиции (Выражается в лк×с (люксах на секунды) 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 $\text{эрг}^{-1} \cdot \text{см}^2$.

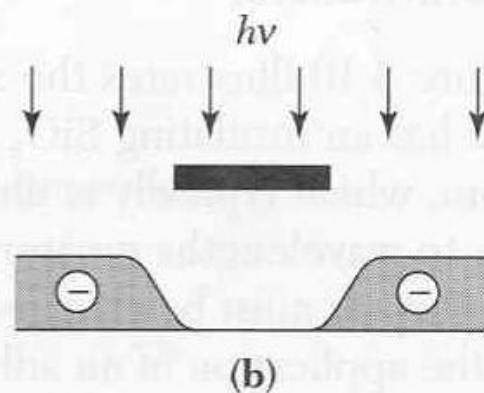
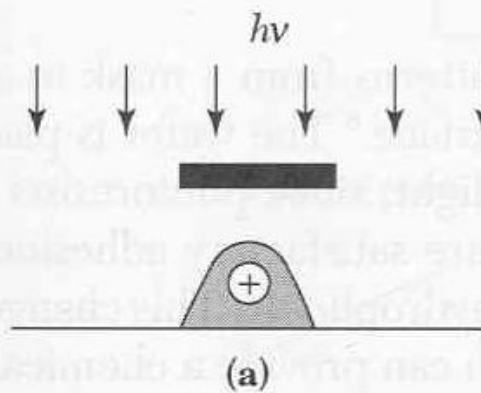
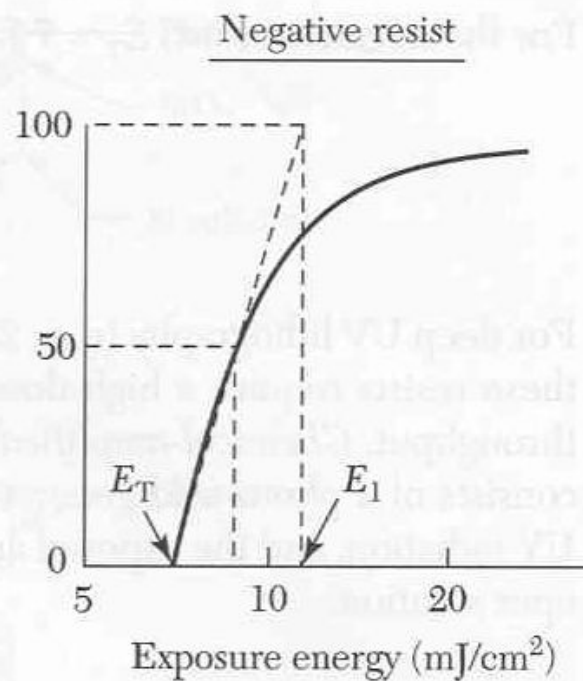
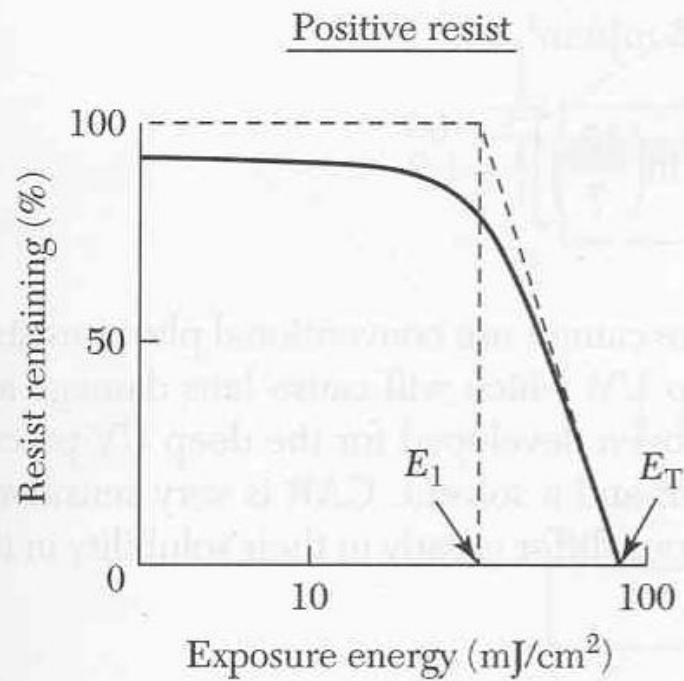
Разрешающая способность ФР - параметр R, характеризующий его способность формирования микроизображения элементов топологического рисунка с минимально возможными геометрическими размерами. Количественно разрешающая способность ФР определяется получаемым в нем минимальным размером линий L_{\min} в регулярной структуре с одинаковыми размерами линий и зазоров, при этом $R = 1/L_{\min}$, линий на миллиметр

Адгезия пленки ФР - это параметр, характеризующий способность пленки ФР препятствовать проникновению к подложке жидких или газообразных реагентов, используемых в процессах фотолитографии, по периметру формируемой фоторезистивной маски (ФРМ). Адгезию ФР определяется как время отрыва слоя фоторезиста заданных размеров от подложки в ламинарном потоке растворителя.

Адгезия считается удовлетворительной, если слой ФР $20 \times 20 \text{ мкм}^2$ отрывается за время не менее 20-ти минут.

Плазмостойкость ФР - стойкость ФР к процессам плазменного травления функционального слоя (ФС). характеризуется отношением скорости травления ФС к скорости травления ФР или селективностью травления ФС относительно ФР. Чем выше или селективность травления ФС относительно ФР, тем выше плазмостойкость 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.



Кривые на рисунке показывают сколько ф/р остается на подложке после экспонирования и проявления в зависимости от энергии экспонирования.

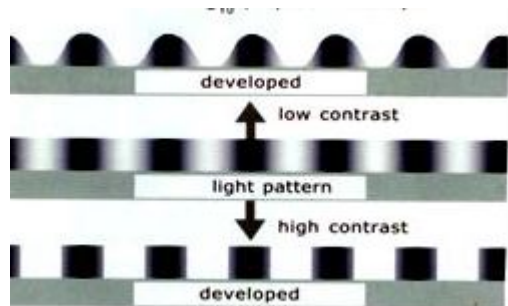
При этом следует отметить, что ф/р имеет некоторую ограниченную растворимость в проявителе даже в отсутствие экспонирования. При проведении экспонирования растворимость ф/р (позитивного) возрастает до момента его полной растворимости, наступающего при $E=E_T$ – пороговой энергии.

Чувствительность фоторезиста определяется как энергия, необходимая для полного растворения экспонированной области ф/р. $T.E. - E_T$
Другим параметром характеризующим ф/р является параметр $\gamma = \left[\ln \frac{E_T}{E_1} \right]^{-1}$

Этот параметр называется **контрастом**. Здесь E_1 – значения энергии, получаемое пролонгацией касательной к E_T до достижения 100% толщины фоторезиста.

Контрастом (или контрастностью) ФР называется параметр, количественно характеризующий его способность получения резко дифференцированной границы между экспонированным и неэкспонированным участками.

Количественно контраст ФР определяется коэффициентом контрастности γ (гамма-контраст)



Системы проекционной фотолитографии характеризуются двумя основными параметрами: минимальным размером L_{\min} и глубиной фокуса D_f , определяемым по следующим формулам:

$$L_{\min} = k_1(\lambda/NA),$$

$$D_f = k_2[\lambda/(NA)^2]$$

где λ - длина волны экспонирующего излучения; $NA = n \cdot \sin\theta$ и $\alpha = 2\theta$ числовая апертура и апертурный угол выходной проекционной линзы; n – показатель преломления среды между выходной проекционной линзой и слоем фоторезиста (ФР) на пластине; k_1 и k_2 - характеристические постоянные, отражающие специфику всего фотолитографического процесса.

Глубина фокуса (deep of focus – Do_F) D_f - это область около фокальной плоскости выходной (последней) проекционной линзы фотолитографической системы, в которой уменьшенное (обычно в 4 или 5 раз) изображение топологического рисунка шаблона еще имеет адекватную (достаточную) для процесса переноса на фоторезистивный слой пластины четкость.

Definitions

Numerical aperture (NA) = $\sin \theta$

λ (g-line) = 436 nm

λ (i-line) = 365 nm

λ (KrF) = 248 nm

λ (ArF) = 193 nm

λ (F₂) = 157 nm

Resolution

Rayleigh resolution

Traditional $k_1 = 0.8$

Advanced $k_1 = 0.3 - 0.5$

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

Depth of focus

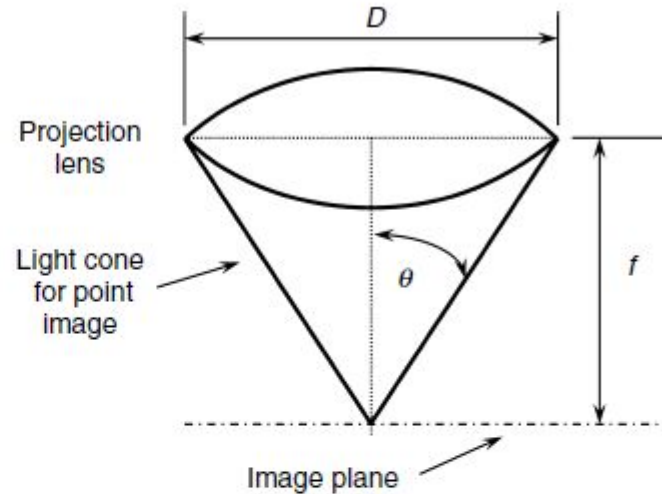
Rayleigh depth of focus

Traditional $k_2 = 1.0$

$$DoF = k_2 \frac{\lambda}{NA^2}$$

Alternate expression

$$DoF = \frac{k_2}{k_1^2} \cdot \frac{R^2}{\lambda}$$



Lens examples

Wavelength	NA	k_1	Resolution (μm)	DoF (μm)
i-line	0.62	0.48	0.28	0.95
KrF	0.82	0.36	0.11	0.37
ArF	0.92	0.31	0.065	0.23
F ₂	0.85	0.31	0.057	0.22

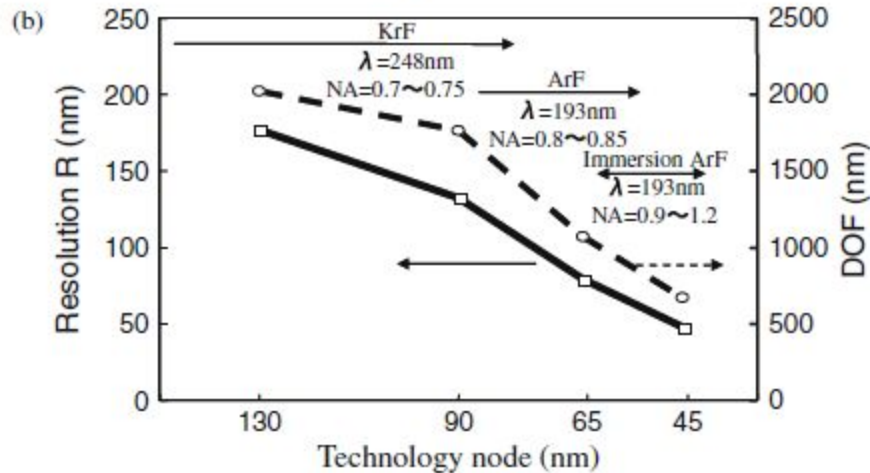
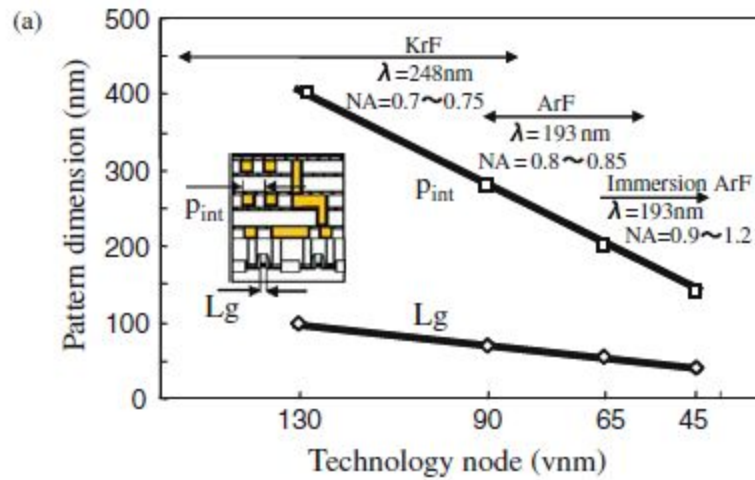
Для больших θ

$$R = k_1 \frac{\lambda}{\sin \theta}$$

$$DoF = k_3 \frac{\lambda}{\sin^2(\theta/2)}$$

$NA \equiv n \cdot \sin \theta$, где n — коэффициент преломления среды между объектом и объективом.

Так, при использовании 65-нм технологического процесса производства глубина резкости составляет порядка 0,2 мкм.



Тенденции в изменении длин затворов и шага металлизации (a) и (b) минимального разрешения и глубины фокуса с использованием KrF или ArF лазеров через оптические линзы с различной числовой апертурой (NA)

	λ nm	R_{\min} nm	DOF nm
g-line	436	311	850
h-line	405	290	790
i-line	365	260	730
KrF	248	175	500
ArF	193	140	400
F ₂	157	112	320
Ar ₂	126	90	257

Основные факторы, ограничивающие разрешение проекционной фотолитографии.

В современном оборудовании проекционной оптической фотолитографии (оптической ПФЛ) проецирование топологического рисунка фотошаблона (ФС) на слой фоторезиста (ФР), покрывающего поверхность пластины, производится с помощью оптической системы, для которой справедливы все законы и ограничения оптики.

Оптическая система (ОС) - это совокупность оптических сред, разделенных оптическими поверхностями, которые ограничиваются диафрагмами.

Основными **функциональными элементами ОС** являются: оптические среды, оптические поверхности, зеркала, диафрагмы и дифракционные оптические элементы (призмы, решетки и др.).

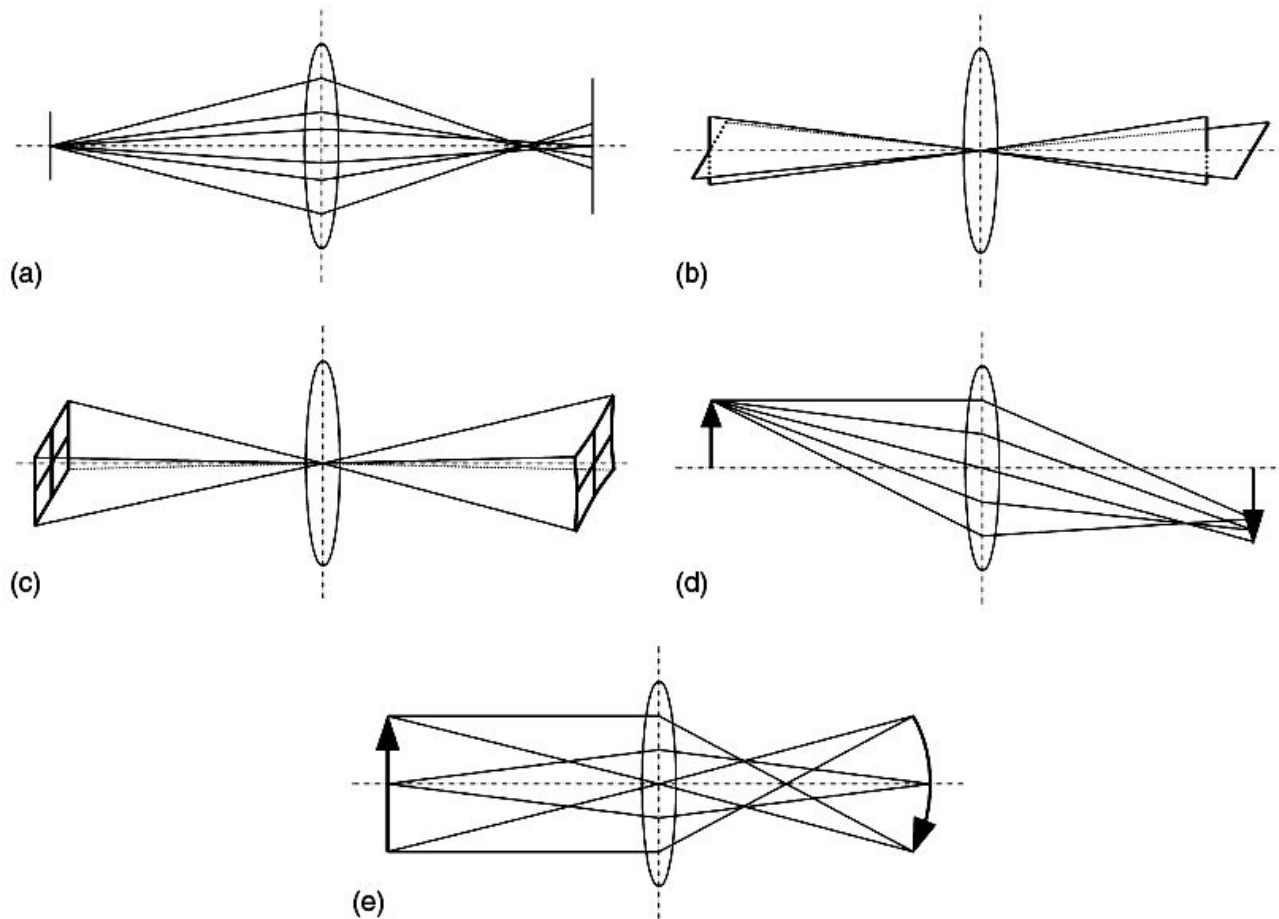
Существует два оптических явления, которые влияют на структуру и качество изображения в ОС - **дифракция и абберации**.

Эти явления действуют совместно. **Если абберации малы** и преобладает дифракция, то такие системы называются **дифракционно ограниченными ОС**.

Если абберации велики, и дифракция становится незаметной на фоне аббераций, то такие системы называются **геометрически ограниченными ОС** (формирование изображения вполне корректно описывается с позиций геометрической оптики, без привлечения теории дифракции).

Искажения изображений в ОС, вызываемые использованием широких и наклонных интенсивных пучков монохроматического света, а также применением немонохроматического света, называются абберациями.

Аберрации делятся на монохроматические (или геометрические) и хроматические. Монохроматические аберрации ОС наблюдаются при монохроматическом излучении (на одной длине волны λ). Хроматическими аберрациями называются искажения изображения, обусловленные явлением дисперсии света в линзах ОС при использовании немонахроматического белого света. Так как в ОС проекционной фотолитографии (ПФЛ) используется монохроматическое излучение, то ниже мы рассматриваем только монохроматические аберрации



Основные типы монохроматических aberrаций: а – сферическая aberrация; б – астигматизм; в – дисторсия; г – кома; д – кривизна изображения (поля)

Сферическая абберация – это дефект изображения, при котором фокальная позиция лучей, проходящих через центральную часть апертуры линзы, отличается от фокальной позиции лучей, проходящих у краев апертуры линзы. Результирующее изображение будет иметь более низкий контраст, чем идеальное (без абберационное), и позиция фокальной плоскости будет значительно перемещаться с изменением числовой апертуры проекционной линзы. Практическим следствием сферической абберации является отклонение в значениях критических размеров в зависимости от кривых доза – фокус (кривых Боссанга) (*Bossung curves*), которые обычно используются для анализа и оптимизации литографического процесса.

Астигматизм – это дефект изображения, в котором позиции фокальной плоскости для линий с различной ориентацией являются разделенными в пространстве.

Дисторсия – это дефект изображения, при котором масштаб уменьшение изображения объекта ФШ на пластине зависит от расстояния объекта от главной оси проекционной ОС. Если квадратный объект на ФШ изображается на пластине в виде подушки (вогнутые стороны) – это **положительная дисторсия**, а если в виде бочки (выпуклые стороны), то это **отрицательная дисторсия**. Наличие дисторсии приводит к ошибкам совмещения (overlay) последовательных слоев на пластине при изготовлении ИМС и к необходимости тщательного согласования двух или более установок экспонирования, если они используются для создания топологии различных слоев (уровней) ИМС на одной пластине.

Кома – это дефект изображения, при котором уменьшение (увеличение) изображения изменяется в зависимости от локализации световых лучей в апертуре проекционной линзы. Наличие комы в ОС проекционной ФЛ приводит к тому, что элементы топологии, формируемые в ФР становятся асимметричными и теряют правильную форму. Практический тест для проверки наличия комы в ОС проекционной ФЛ реализуется следующим образом: измеряется разность в ширине линий поперек изображения массива (набора) из плотно расположенных одинаковых на ФШ линий. При наличии комы ширина крайних линий с каждого бока массива будет различаться.

Кривизна поля (кривизна изображения) – это дефект изображения, при котором позиция фокальной плоскости изменяется в зависимости от расстояния объекта и его изображения от главной оси ОС. Наличие кривизны поля в ОС проекционной ФЛ приводит к уменьшению глубины фокуса (DoF) и ухудшению контроля ширины линий (критических размеров элементов).

Проверка ОС оборудования ПФЛ на наличие в них аберраций обычно проводится с помощью определения коэффициентов в полиномах Цернике (*Zernike*). Коэффициенты Цернике измеряются в ОС методом прецизионной интерферометрии, перед тем как она устанавливается в оборудование для ПФЛ. Для детального описания проекционной ОС используется среднеквадратическая величина (RMS) от 37 коэффициентов Цернике.

При малых уровнях аберраций для характеристики ОС проекционной ФЛ применяется критерий (отношение) Штреля (*Strehl*) *St*, который может быть определен через среднеквадратическую величину RMS коэффициентов Цернике следующим образом:

$$St = [1 - (2\pi RMS)^2/2]^2,$$

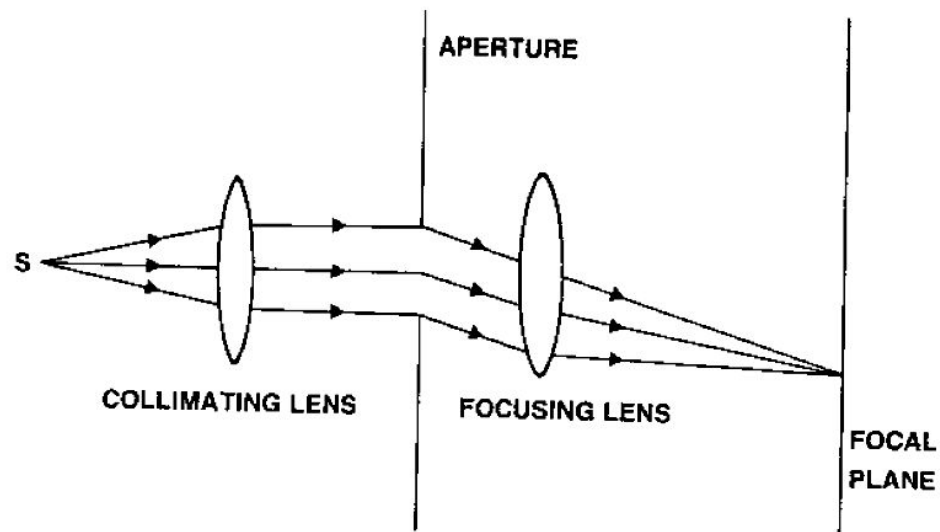
где среднеквадратическая величина коэффициентов Цернике (аббераций волнового фронта) RMS выражается в единицах длины волны λ .

Для современных систем ПФЛ RMS коэффициентов Цернике составляет менее $0,005\lambda$ или ошибку в 1 нм при воспроизведении волнового фронта для оборудования 193 нм литографии. Соответствующий критерий Штреля превышает значение 0,99

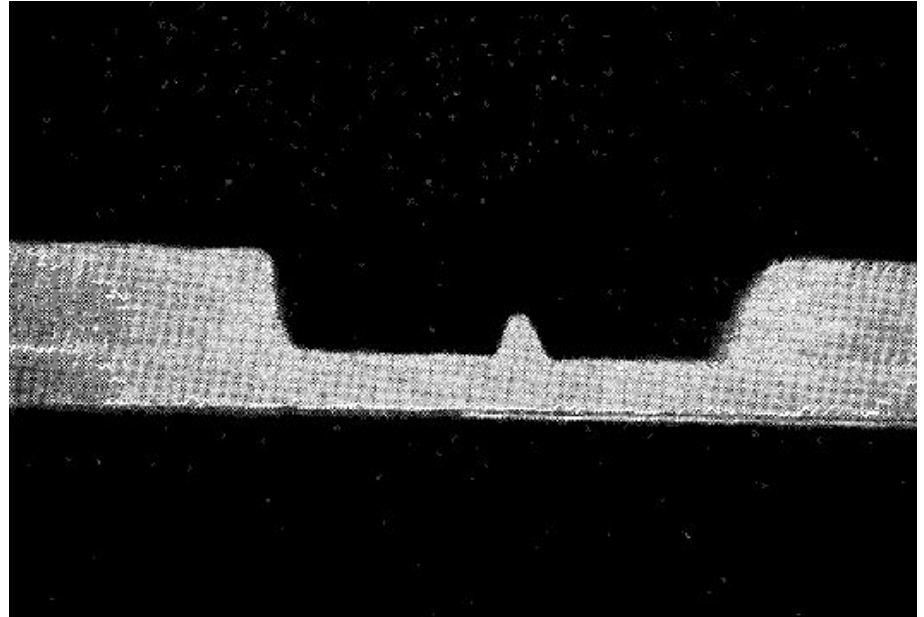
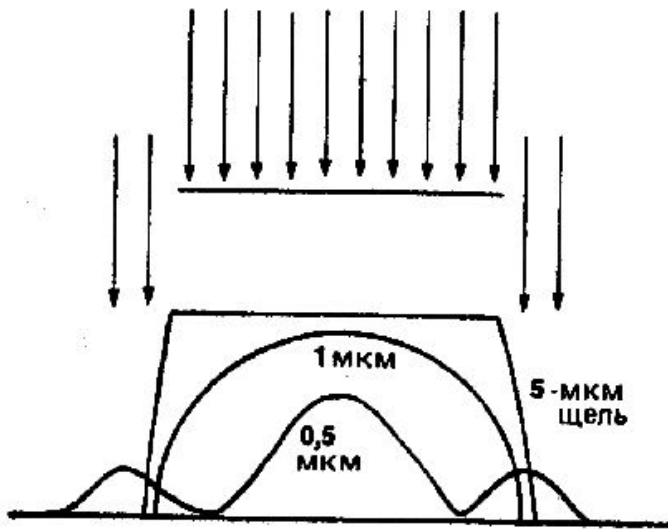
Поэтому **оптические системы проекционной ФЛ относятся к дифракционно-ограниченными оптическим системам, в которых основную роль в искажении изображения топологического рисунка фотошаблона (ФС) при его переносе в слой фоторезиста (ФР) на пластине играет дифракция экспонирующего излучения, а не аберрации оптических элементов.**

Дифракция света - это перераспределение интенсивности световых волн в результате присутствия в среде распространения объекта с резко выраженными неоднородностями (например, прозрачных и непрозрачных элементов ФШ, апертурных диафрагм, оправок линз и т.п.), которые вызывают изменения либо амплитуды, либо фазы волн.

В более узком смысле под дифракцией понимаются явления огибания светом малых препятствий, т.е. отклонение от законов геометрической оптики. **Световой луч, проходя через узкую щель или малое отверстие с размерами, сравнимыми с длиной волны света, расширяется больше, чем это допускает геометрическая оптика, и попадает в области, закрытые непрозрачными элементами**



Система наблюдения явления дифракции на апертурной диафрагме от точечного источника излучения s



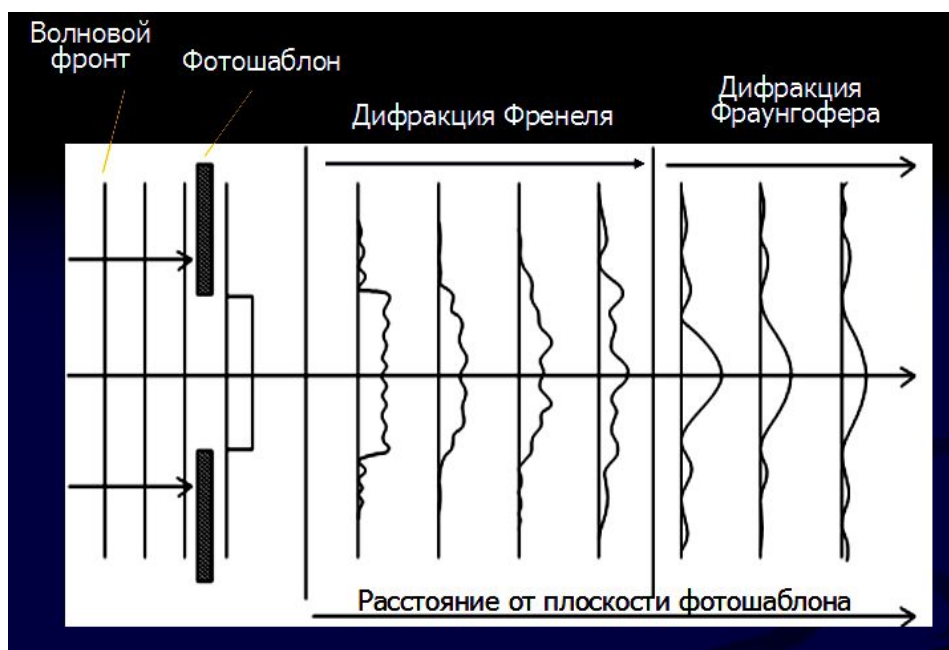
Проявление эффекта близости в проекционной оптической фотолитографии: не экспонируемый промежуток засвечивается дифрагировавшим светом, если его ширина сравнима с длиной волны света

Исчезновение не экспонируемого промежутка между двумя линиями в проявленном позитивном фоторезисте в процессе проекционной оптической фотолитографии.

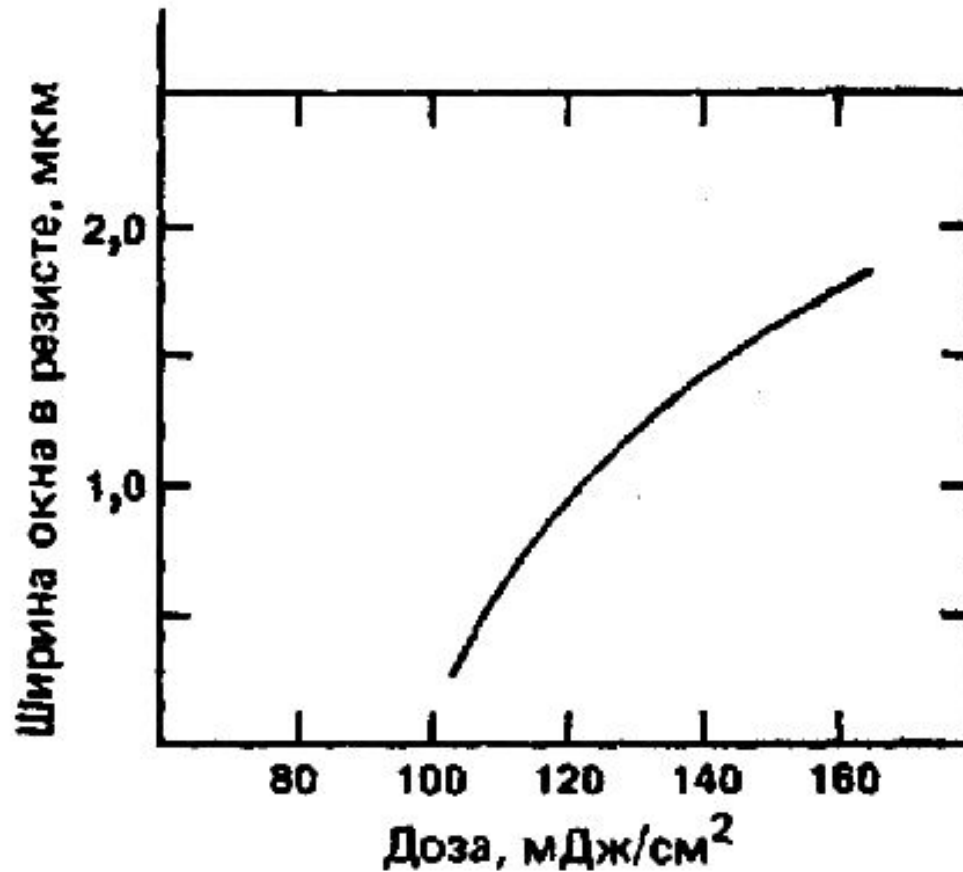
Дифракцией Фраунгофера или дифракцией в параллельных лучах называется дифракция плоских волн, когда источник света и точка наблюдения значительно удалены от препятствия, на котором происходит дифракция.

Дифракция Френеля наблюдается, когда источник света и точка наблюдения находятся на близких расстояниях от препятствия, на котором происходит дифракция, и требует учета кривизны волновых поверхностей падающей и/или дифрагировавшей волн.

Дифракция Френеля наблюдается на малых расстояниях от отверстий или щелей фотошаблона (ФС) и характерна для теневой контактной фотолитографии, а **дифракция Фраунгофера наблюдается на больших расстояниях и характерна для систем оптической проекционной фотолитографии (ПФЛ)**



Изменение интенсивности экспонирующего излучения с длиной волны 436 нм, проходящего через отверстие в фотошаблоне, в зависимости от расстояния до плоскости фотошаблона (расстояние от плоскости фотошаблона до плоскости первой дифракционной картины 2,5 мкм, расстояние между плоскостями дифракционных картин 1,5 мкм)



Зависимость ширины окна (линии), полученной в проявленном позитивном ФР толщиной 1 мкм, от дозы экспонирования окна (линии) шириной 1 мкм, сформированного на ФШ через ОС проекционной ФЛ с числовой апертурой $NA = 0,28$ и длиной волны $\lambda = 436$ нм. Видно, что 10% флуктуации дозы экспонирования будут вызывать изменения ширины окна (линии) в проявленном ФР на $\pm 0,2$ мкм

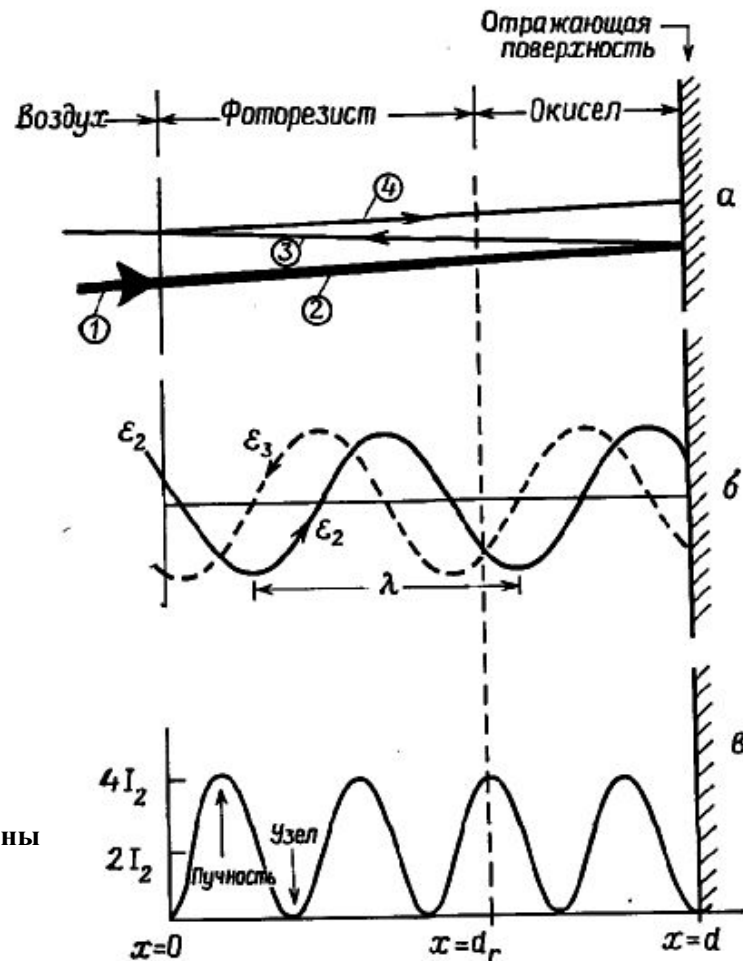
Стоячая волна - волна, возникающая в результате наложения (суперпозиции) двух волн, распространяющихся во взаимно противоположных направлениях и удовлетворяющих следующим условиям: частоты волн одинаковы, амплитуды являются одинаковыми функциями координат. В случае поперечных волн необходима также одинаковая поляризация обеих волн.

Возникновение стоячих волн является частным случаем явления интерференции и влияет на формирование изображения в пленке фоторезиста

Монохроматическое излучение с длиной волны λ проникает в пленку ФР (луч 1), проходит через ФР и лежащую под ним пленку SiO₂ (луч 2) и отражается от поверхности кремниевой подложки (луч 3). Отраженный луч (луч 3) опять проходит через ФР и выходит наружу (луч 4). Небольшая часть излучения (луч 4) отражается от границы раздела ФР - воздух, и процесс повторяется.

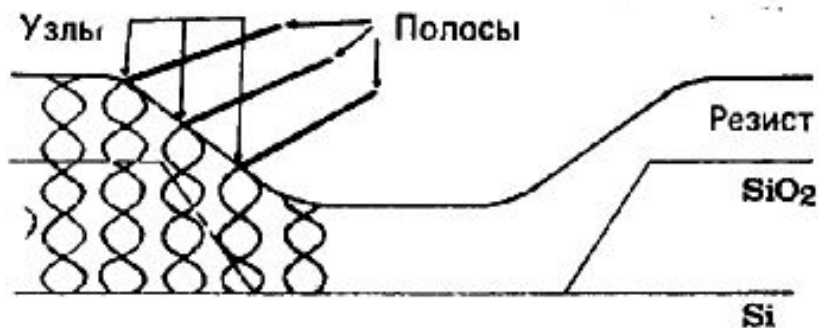
Показаны падающая ϵ_2 и отраженная ϵ_3 волны экспонирующего излучения. При отражении от поверхности кремниевой пластины между волнами возникает разность фаз π . Наложение волн ϵ_2 и ϵ_3 приводит к образованию стоячей волны экспонирующего излучения

Наложение волн ϵ_2 и ϵ_3 приводит к образованию стоячей волны экспонирующего излучения

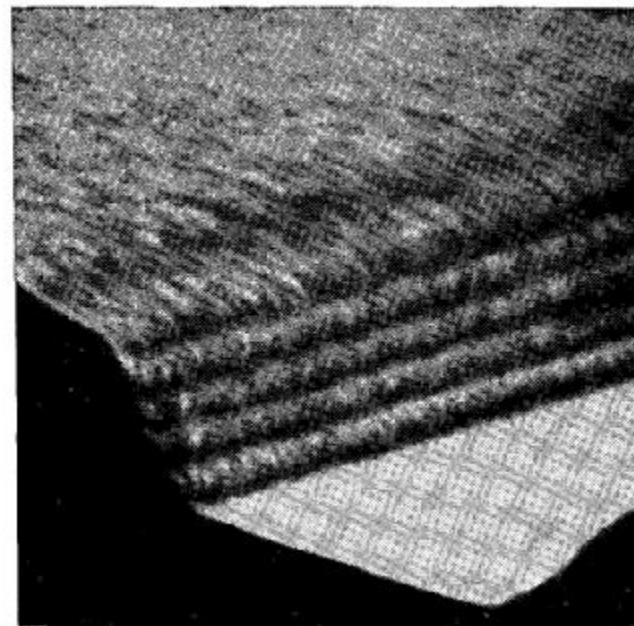


Возникновение стоячей волны в пленке фоторезиста в результате интерференции между падающим и отраженным светом

Стоячая волна содержит пучности максимума интенсивности и узлы минимальной интенсивности которые имеют периодический характер и проходят по всей пленке ФР. Растворимость позитивного ФР в проявителе зависит от скорости разрушения сенсбилизатора, которая пропорциональна распределению локальной интенсивности экспонирующего излучения в ФР. Поэтому стоячие волны приводят к переэкспонированию ФР, уменьшают разрешение и вызывают появление ступенек на краях профиля проявленных ФР.

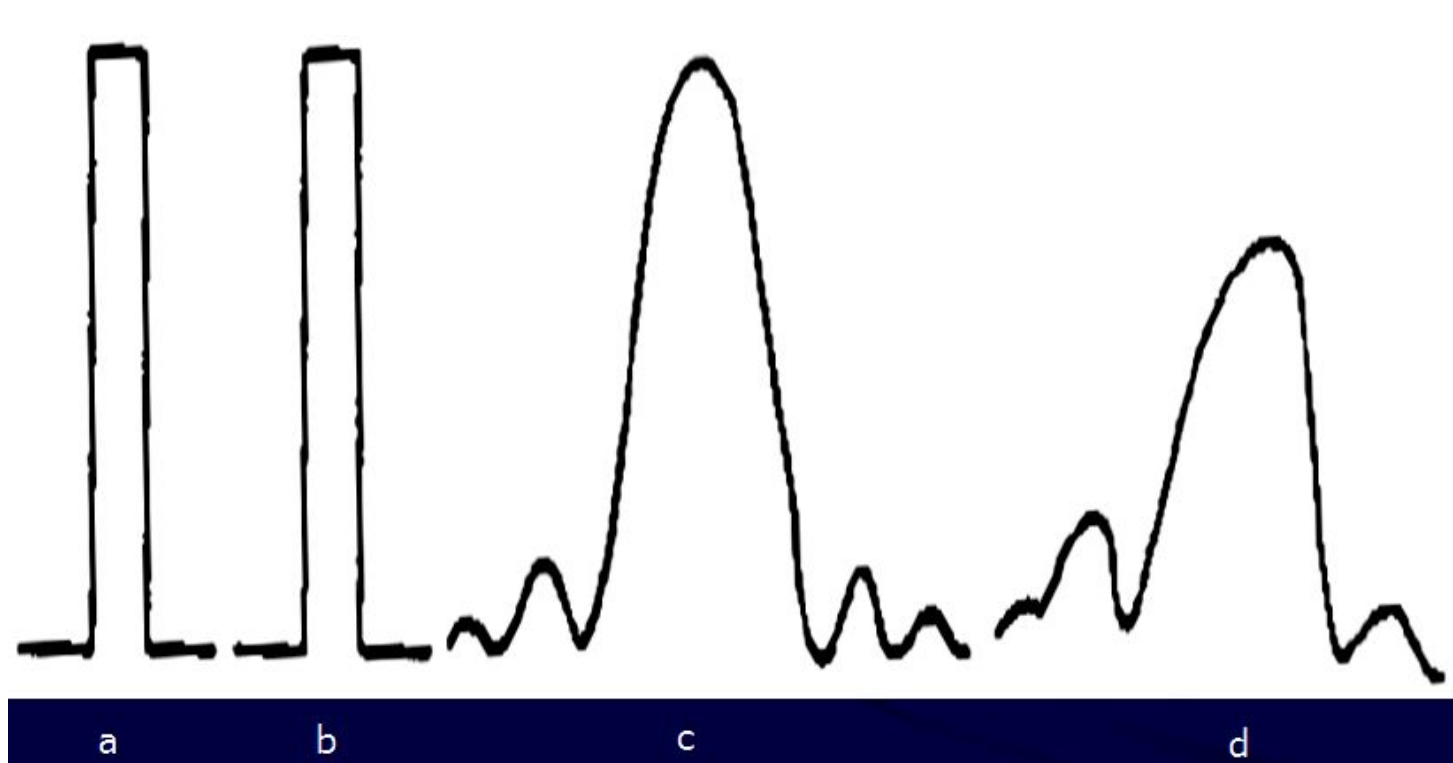


Стоячие волны в фоторезисте
вызывают появление
интерференционных полос



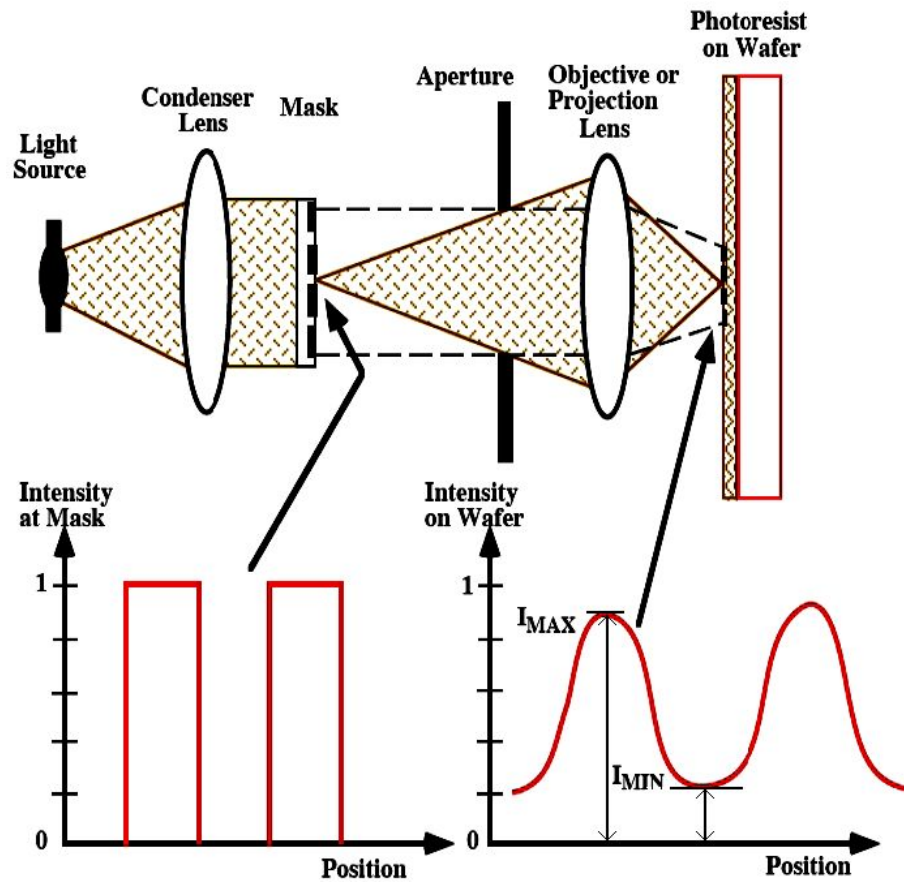
Эффект стоячих волн на
краю проявленного
позитивного фоторезиста

Кроме оптики, на процесс формирования топологического рисунка в слое ФР оказывают влияние параметры механических систем перемещения ФШ и пластины, свойства экспонирующего излучения, законы фотохимического взаимодействия излучения и фоторезистивного материала, а также характеристики химической и термической обработки ФР после экспонирования



Изображение узкой щели в фотошаблоне на поверхности фоторезиста с помощью оптической системы проекционной фотолитографии (ОС ПФЛ): a – щель в фотошаблоне; b – идеальное изображение щели; c – изображение щели в без абберационной ОС ПФЛ в присутствии дифракции; d – изображение щели в ОС ПФЛ в присутствии дифракции и монохроматической абберации – комы.

Handbook of VLSI Microlithography. /Edited by J.N. Helbert. – 2-nd edition. - New Jersey: Noyes Publication. 2001. – 1001 pp.



Дифракционные искажения изображения топологического рисунка фотошаблона на поверхности фоторезиста, передаваемого с помощью оптической системы проекционной фотолитографии.

Искаженное синусоидальное изображение характеризуется величиной M , **глубиной модуляции интенсивности излучения** (I) или контрастом, которая определяется по формуле:

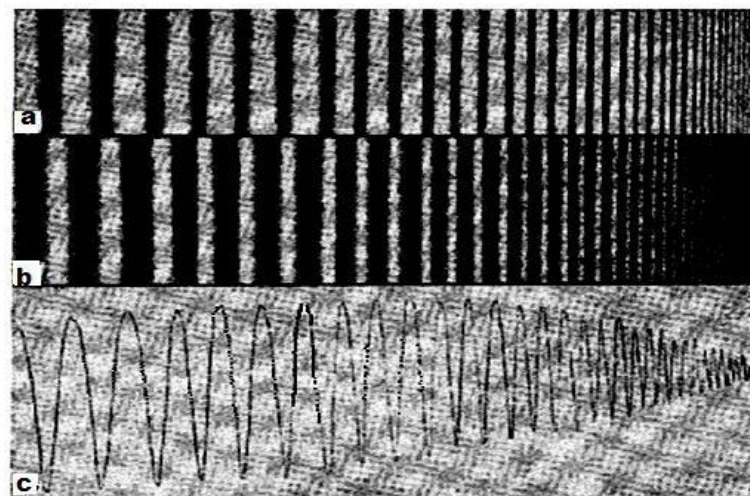
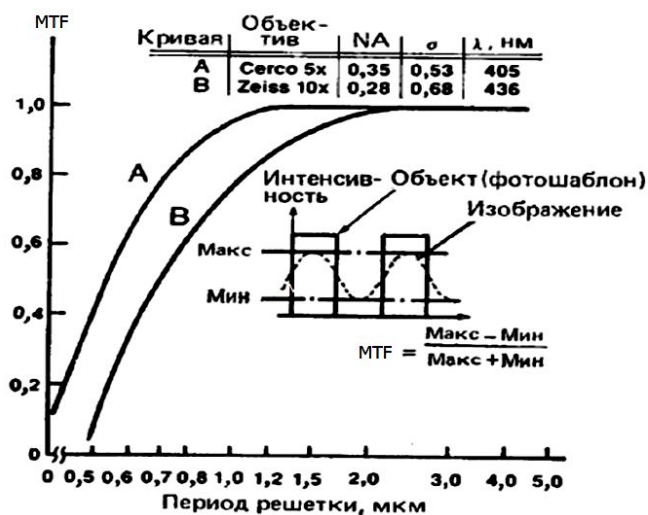
$$M = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}).$$

Величина модуляции интенсивности присуща как объекту M_{ob} , так и его изображению M_{im} , которые связаны **фактором передачи модуляции (modulation transfer factor) TF**:

$$TF = M_{im} / M_{ob}.$$

Если распределение интенсивности в синусоидальном излучении представить в виде ряда (интеграла) Фурье, то можно определить **функцию передачи модуляции (ФПМ) (*modulation transfer function – MTF*) системы формирования изображения, как зависимость глубины модуляции выходного излучения от ее пространственной частоты ν (или периода решетки)** – количества линий или штрихов на 1 мм

$$MTF = TF(\nu)$$



Функция передачи модуляции (MTF) промышленных объективов

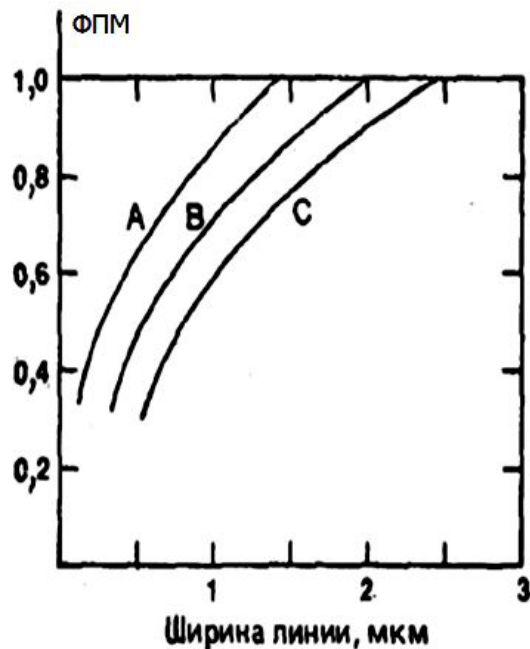
Влияние пространственной частоты линий на контраст изображения: **а** – тестовая структура фотошаблона; **б** – изображение тестового фотошаблона в фотоэмульсии; **с** – глубина профиля в фотоэмульсионном слое

Моро У. Микролитография: В 2-х ч. Ч. 1: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. - 605 с.

Высококачественный объектив будет разрешать светлые и темные полосы одинаково по всей толщине ФР. Однако, за счет дифракционного расплывания при формировании изображения, чем выше пространственная частота ν (меньше период дифракционной решетки), тем ниже контраст изображения

Модуляция в 60% соответствует $I_{\max}=80\%$ и $I_{\min}=20\%$ интенсивности света, пропущенного дифракционными элементами объектива. При $MTF = 0,60$ допускается 20% недоэкспонирование ФР

Значение MTF (ФПМ) уменьшается с увеличением толщины ФР и ростом значения расфокусировки оптической системы, особенно на высоких пространственных частотах



Зависимость значения функции передачи модуляции (ФПМ) от толщины фоторезиста: **A** – толщина 0,4 мкм; **B** – толщина 0,8 мкм; **C** – толщина 1,2 мкм

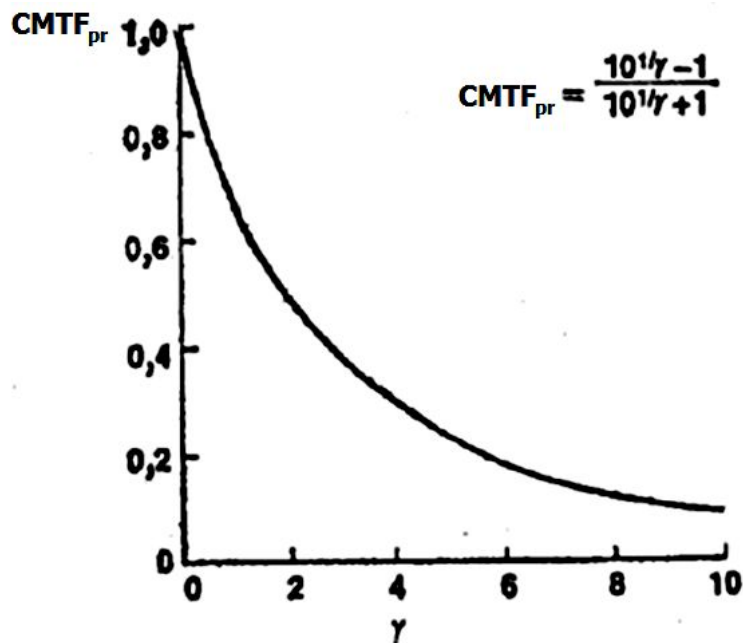


Зависимость значения функции передачи модуляции (ФПМ) от величины расфокусировки оптической системы: 0,1 период/мкм соответствует ширине линии в 2,5 мкм

Изображение рисунка произвольной формы не может быть получено на основании только функции передачи модуляции объектива (MTF_{ob}), необходимо учитывать неравномерность распределения интенсивности по краю светового пучка и **критическую функцию передачи модуляции ФР ($CMTF_{pr}$)**, которая определяется выражением:

$$CMTF_{pr} = (10^{1/\gamma} - 1)/(10^{1/\gamma} + 1),$$

где γ – контраст ФР.



При формировании субмикронных изображений объектив с любой MTF_{ob} не позволит выйти за пределы того технологического минимума, который определяется критической функцией передачи модуляции фоторезиста $CMTF_{pr}$. Минимально воспроизводимый размер произвольной комбинации объектива и ФР определяется следующим условием:

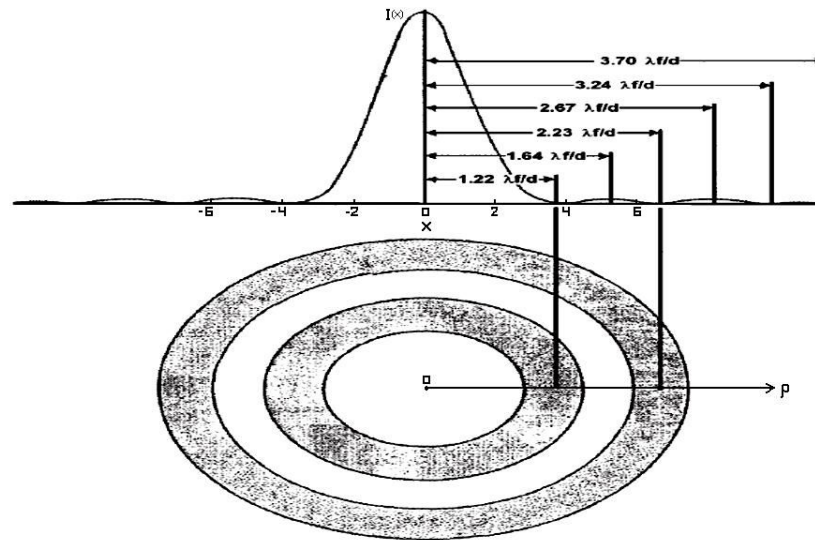
$$MTF_{ob} > CMTF_{pr}$$

В идеальном линейном литографическом процессе любое изменение параметров маски должно приводить к идентичным изменениям размеров на пластине (с учетом, конечно коэффициента уменьшения размеров). С другой стороны в нелинейном процессе небольшие колебания размеров элементов в маске приводят к существенному увеличению колебаний размеров на подложке. Этот эффект оказывает негативное влияние на процесс производства поскольку любая ошибка в маске приводит к значительному увеличению величины ошибки размеров на пластине. Фактор описывающий такое увеличение известен, как **Mask error enhancement factor (MEEF) (фактор увеличения ошибки)** и определяется следующим отношением:

$$\text{MEEF} = \Delta(\text{wafer linewidth}) / (\Delta\text{mask linewidth}), \text{ где}$$

Δ Означает изменение ширины линии на маске или на пластине. В идеальном случае $\text{MEEF} = 1.0$. Очевидно, что при значении этого фактора больше 1, серьезно влияет на требования спецификации фотомаски. С другой стороны, если фактор меньше 1, то это смягчает требования спецификации.

В системе формирования изображения на основе линз с круговой апертурой радиусом r на дистанции z от плоскости последней линзы распределение интенсивности изображения I от точечного источника света в плоскости изображения имеет вид:



Распределение интенсивности света $I(x)$ в плоскости изображения от точечного источника с длиной волны λ , проходящего через линзу с круговой апертурой d ($d=2r$) и фокусным расстоянием f ($d/2f=r/f \approx NA$), и формируемая дифракционная картина в виде светлых и темных полей с кружком (диском) Эйри в центре

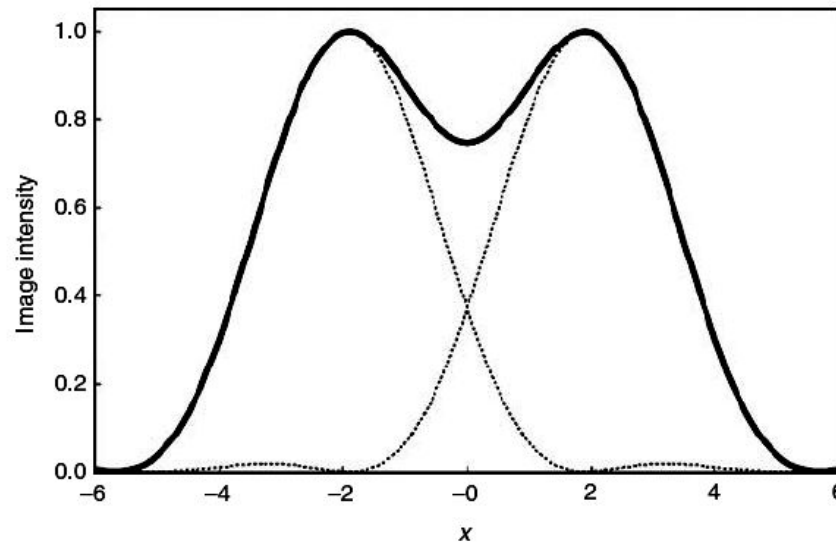
Распределение интенсивности света, показанное на рис известно, как дифракционная картина Эйри (G.V. Airy), который впервые получил ее в 1835 году. Дифракционная картина представляет собой чередование светлых и темных колец со светлым кружком в центре (кружок или диск Эйри).

Для анализа разрешающей способности оптических проекционных систем большое значение имеют координаты первого минимума и первого максимума (нулевой максимум имеет координату $x_{0\max}=0$), которые соответствуют значениям:

$$\rho_{1\min} = 1,22 \cdot \lambda \cdot f / d = 0,61 \cdot \lambda \cdot f / r = 0,61 \cdot \lambda / NA$$

$$\rho_{1\max} = 1,64 \cdot \lambda \cdot f / d = 0,82 \cdot \lambda \cdot f / r = 0,82 \cdot \lambda / NA$$

Разрешение в оптике определяется, как способность достигать отдельного изображения (отдельного выделения, видения) компонентов объекта или группы объектов. Разрешающая способность астрономических телескопов изучалась в 19-м веке английским ученом лордом Рэлеем (*Lord Rayleigh*), который определил предел разрешения телескопа, как угловое разнесение между двумя звездами, когда пик (нулевой максимум) интенсивности света в дифракционной картине Эйри от первой звезды совпадает с первым минимумом дифракционной картине Эйри от второй звезды



Это приводит к известной формуле Рэля для углового разрешения:

$$\sin\alpha = 0,61 \cdot \lambda / R, \quad R = L_{\min} = 0,61 \cdot \lambda / \sin\theta = 0,61 \cdot \lambda / NA$$

где $R = L_{\min}$ – линейное разрешение или минимальное расстояние между двумя объектами; $NA = n \cdot \sin\theta$ и $\alpha = 2\theta$ – числовая апертура и апертурный угол выходной проекционной линзы; n – показатель преломления среды между выходной проекционной линзой и слоем фоторезиста (ФР) на пластине

Аналогия между разрешением ОС и оптической ПФЛ является неполной, т.к. предел разрешения для любой оптической проекционной системы ФЛ определяется в способности разрешить произвольные малые или близко расположенные элементы (features) в проявленной ФР маске. Следовательно, разрешение систем оптической ПФЛ зависит еще от коэффициента отражения функциональных слоев под ФР, от плоскостности пластины и величины топологического рельефа на ней, от глубины фокуса, от чувствительности и контраста используемого ФР, степени пространственной когерентности экспонирующего излучения и др. Поэтому выражение для разрешения системы оптической ПФЛ обычно записывается в виде:

$$R = L_{\min} = k_1 \cdot \lambda / NA,$$

где k_1 - характеристический постоянный коэффициент, отражающий специфику всего конкретного фотолитографического процесса.

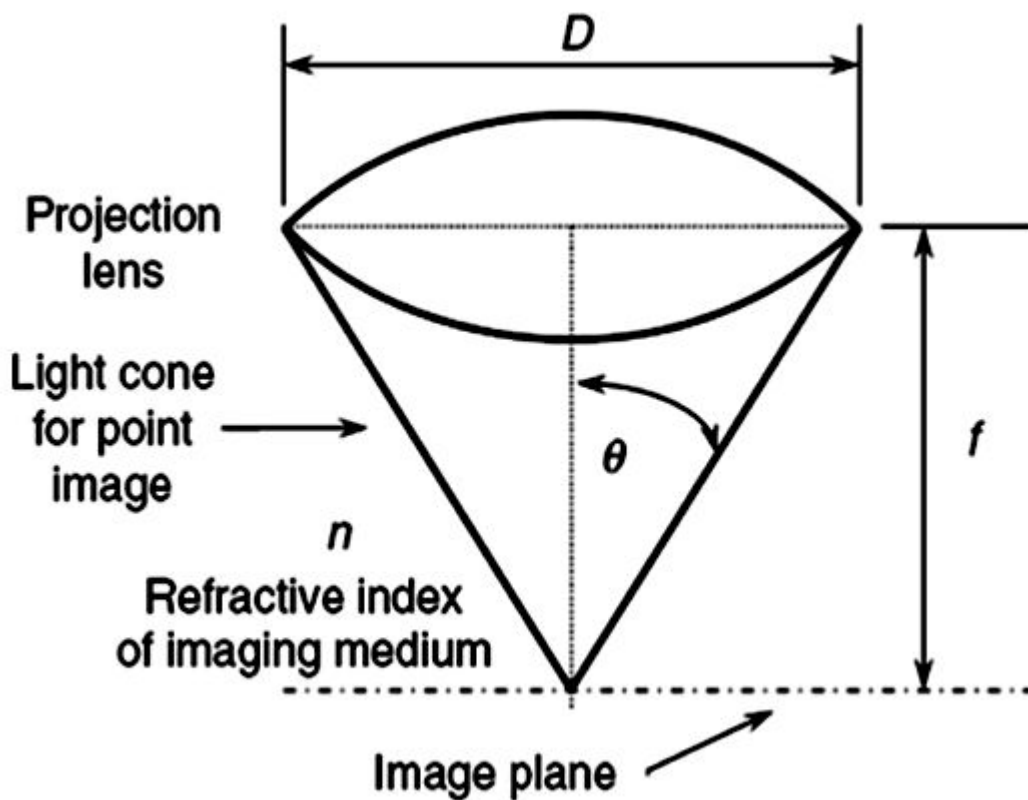


Схема выходного узла системы проекционной фотолитографии (ПФЛ): D - диаметр выходной проекционной линзы; f - фокусное расстояние проекционной линзы; image plane - плоскость изображения, в которой находится слой экспонируемого фоторезиста; n - показатель преломления среды между выходной проекционной линзой и слоем фоторезиста на пластине; $\alpha = 2\theta$ - апертурный угол выходной проекционной линзы

Вторым важным параметром оптической ПФЛ является глубина фокуса D_f (*deep of focus* или *DoF*) (рис. 3.28), т.е. расстояние на перпендикуляре к фокальной плоскости выходной (последней) проекционной линзы литографической системы, на котором уменьшенное (обычно в 4 или 5 раз) изображение топологического рисунка фотошаблона (ФС) еще имеет адекватную (достаточную) для процесса переноса на слой фоторезиста (ФР), покрывающий пластину, четкость (глубину резкости)
Глубина фокуса D_f рассчитывается по формуле:

$$D_f = k_2 \cdot [\lambda / (NA)^2].$$

λ - длина волны экспонирующего излучения; $NA = n \cdot \sin\theta$ и $\alpha = 2\theta$ - числовая апертура и апертурный угол выходной проекционной линзы; n – показатель преломления среды между выходной проекционной линзой и слоем ФР на пластине; k_1 и k_2 - характеристические постоянные, отражающие специфику всего литографического процесса

Третьим важным параметром является площадь (размер) рабочего поля изображения или литографического поля. Площадь F_L вокруг оптической оси в плоскости изображения, в пределах которой сохраняется резкость изображения, зависящая от значения D_f , называется рабочим литографическим полем

связь между глубиной фокуса и получаемым минимальным размером элемента (разрешением):

$$D_f = (k_2/k_1^2) \cdot (L_{\min}^2/\lambda),$$

т.е. чем выше разрешение (меньше L_{\min}), тем меньше значения глубины фокуса и площади литографического поля и тем более жесткие требования предъявляются к планарности рельефа на поверхности пластины.

Требования к технологии оптической микро- и нанолитографии для производства ИМС и ИНС.

Уровень технологии, нм	250	180	130	90	65	45	32/28	22/20	16/14	11/10
Характеристика										
Год введения УТ в массовое производство	1997	1999	2001	2004	2007	2009	2012	2015	2018	2021
Минимальный размер элемента изделия, нм: ДОЗУ (размер линий 1-ого уровня разводки)	250	180	130	90	65	45	32	22	16	11
МП (длина затворов в резисте)	180	130	90	60	52	40	31	21	15	11
МП (физическая длина затворов)	150	100	65	37	35	28	22	17	13	10
Минимальный размер элемента изделия, нм: ДОЗУ (размер контакта в резисте)	275	200	165	110	72	50	35	25	19	14
ДОЗУ (размер контакта после травления)	250	180	150	100	65	45	32	22	16	11
МП (размер контакта в резисте)	300	220	165	100	84	56	39	28	22	17
МП (размер контакта после травления)	275	200	150	90	77	51	36	25	19	14
Допуск на минимальный размер элемента после травления (3σ), нм	20	18	16	11	5,60	3,70	2,65	2,02	1,53	1,17
Точность совмещения слоев (3σ), нм	85	65	45	18	13	9,0	6,4	4,5	3,4	2,3
Максимальный размер литографического поля: Площадь, см ² Длина × ширина, мм	4,84 22×22	8,00 32×25	8,00 32×25	8,58 33×26	8,58 33×26	8,58 33×26	8,58 33×26	8,58 33×26	8,58 33×26	8,58 33×26
Среднее количество литографий (шаблонов) в маршруте изготовления изделия, шт. ДОЗУ МП	19 22	20 23	21 25	24 31	25 33	26 35	28 38	30 41	32 44	34 47
Максимальный диаметр пластины, на которой формируются кристаллы изделия, мм	200	200	300	300	300	300	300	450	450	450
Размер губительного (критического) дефекта изделия d_{cr} , нм	125	90	65	45	33	23	16	11	8,0	5,5

Направления повышения ее разрешающей способности

Анализ формулы для разрешающей способности оптической нанолитографии (оптической ПФЛ) показывает, что существуют три направления повышения ее разрешающей способности:

1. Уменьшение длины волны экспонирующего излучения.
2. Увеличение числовой апертуры оптической системы (ОС) ПФЛ.
3. Уменьшение значения коэффициента фотолитографического процесса k_1 .

Уменьшение длины волны λ экспонирующего излучения до 193 нм подошло к пределу пропускания имеющихся оптических материалов (кварца), и требует перехода на системы с отражающей (зеркальной) оптикой.

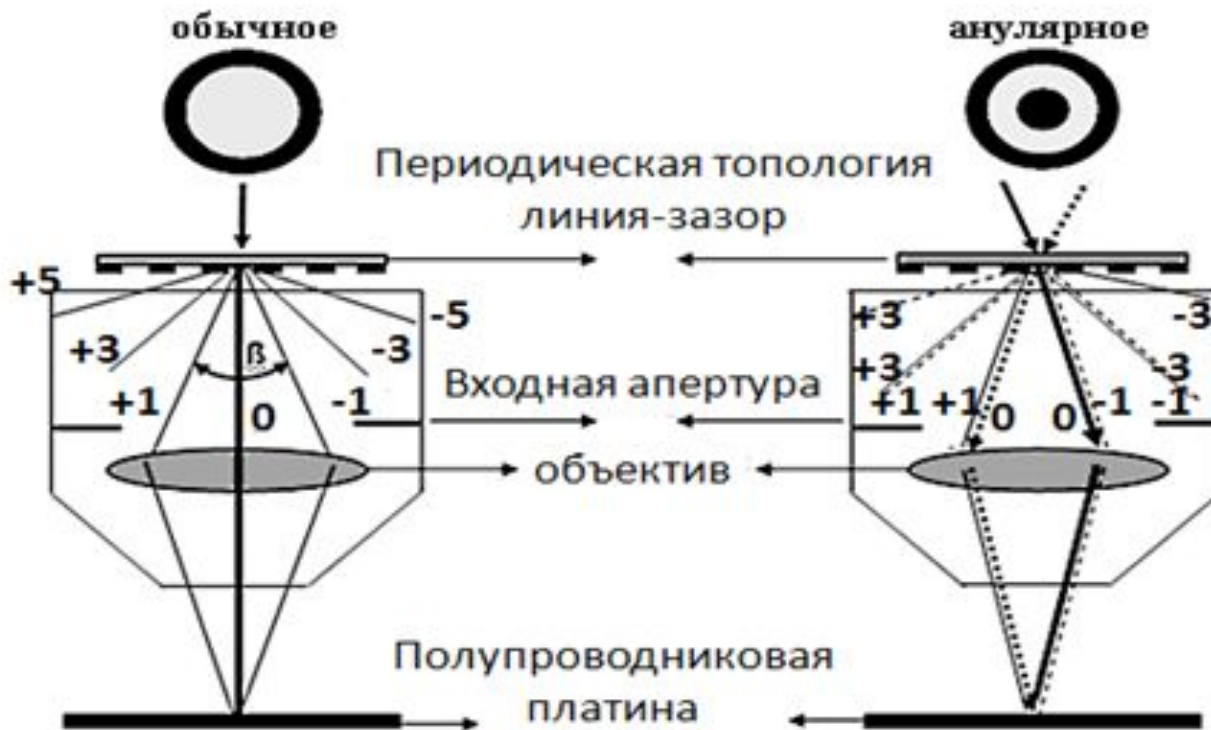
Числовая апертура (NA) для неиммерсионных систем ПФЛ достигла 0,93 при теоретическом пределе 0,95, а для иммерсионных систем ПФЛ достигла 1,35 при теоретическом пределе 1,37.

Поэтому в настоящее время наибольшие усилия прилагаются для уменьшения значения коэффициента фотолитографического процесса k_1 с помощью применения техники (приемов и способов) повышения разрешения (ТПР) (*resolution enhancement techniques - RETs*), которая позволяет значительно уменьшить величину k_1 по сравнению с дифракционным критерием Рэля с $k_1 = 0,61$

Техника повышения разрешения фотолитографического процесса

1. Использование вне осевого освещения
2. Иммерсионная литография
3. Использование различных типов поляризации экспонирующего излучения
4. Проведение коррекции эффектов оптической близости и использование фазосдвигающих фотошаблонов
5. Использование пленок контрастоусиливающих материалов поверх слоя фоторезиста (ФР), позволяющих повысить контраст передачи изображения в ФР слой.
6. Использование пленок антиотражающих покрытий (АОП) (*bottom anti-reflective coating - BARC*)
7. Использование техники многократного экспонирования (*multiple patterning - МРТ*) одного литографического поля.

1. Использование вне осевого освещения (*off-axis illumination - OAI*) фотошаблона (ФШ) путем вырезания с помощью диафрагм из осевого цилиндрического пучка излучения вне осевых трубчатых (кольцевых в сечении), дипольных (два полюса в сечении) или квадрупольных (четыре полюса в сечении) пучков освещения



Основной проблемой получения субмикронных размеров с использованием проекционной литографии является дифракция света на элементах шаблона, которые расположены на расстояниях порядка длины волны экспонирующего излучения.

В обычных шаблонах после дифракции на соседних элементах синфазные волны интерферируют и частично засвечивают фоторезист в областях между рассматриваемыми элементами. При уменьшении размеров элементов это приводит к тому, что плотно упакованные элементы не прорабатываются по резисту.

Для устранения этого эффекта и повышения разрешения, некоторые производители оборудования проекционной печати (ASML, Nikon и Canon) ввели дополнительные оптические системы внеосевого освещения внутри установок, такого как анулярное, квадрупольное, дипольное и т. д.

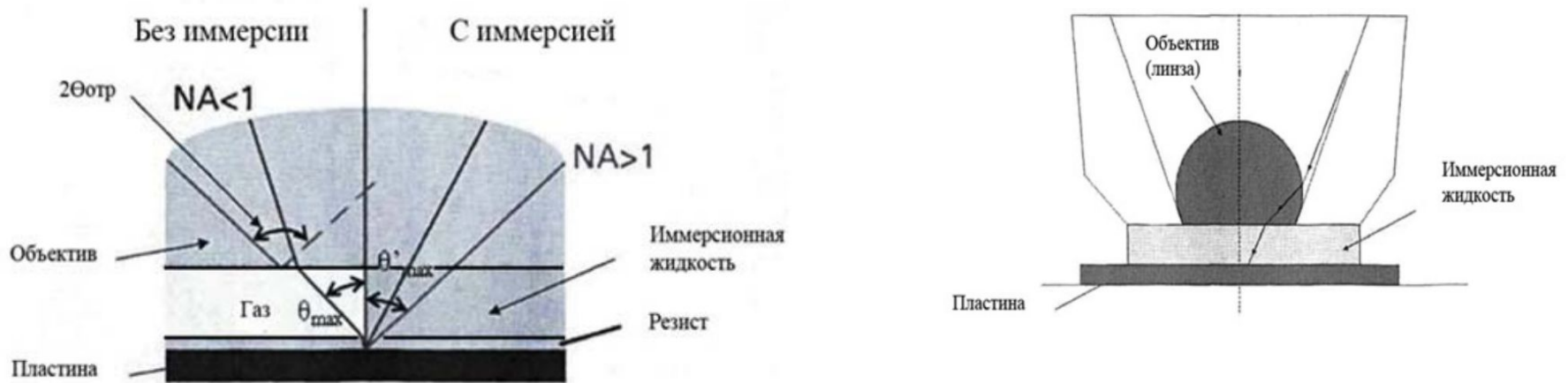
Световая волна, проходя через шаблон, дифрагирует с образованием четных и нечетных дифракционных порядков, в случае решетки с равными по ширине линиями и зазорами образуются только нечетные порядки.

При уменьшении периода дифракционной решетки, угол β увеличивается, и меньшее количество дифракционных порядков попадает во входную апертуру проекционной линзы. Чтобы получить качественное изображение, необходимо чтобы во входную апертуру попали 0-й и ± 1 -е дифракционные порядки. Интерференция этих 3-х лучей при обычном типе освещения определяет полную информацию об изображении, 0-й порядок содержит информацию о распределении интенсивности, а ± 1 порядки – информацию о пространственном распределении этой интенсивности (изображении). Значение глубины фокусировки проекционной системы сильно зависит от значения разности световых путей лучей 0-го и ± 1 -го порядков.

В случае анулярного освещения световая волна падает на шаблон под углом. После дифракции положение 0-го порядка смещается, и во входную апертуру попадают 0-й и -1 порядок падающего под углом справа потока, и 0-й и +1 слева. В этом случае наблюдается интерференция 2-х лучей 0 и -1 или 0 и +1 порядков, в результате повышается разрешение (вместо угла β получаем $\beta/2$) и глубина фокусировки (световые пути лучей 0 и ± 1 порядков практически равны).

Захаревич А. А., Достанко А. П. ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОЦЕССА ФОТОЛИТОГРАФИИ ПРИ СОЗДАНИИ ТОПОЛОГИИ МИКРОСТРУКТУР СУБМИКРОННОГО ПРОИЗВОДСТВА ИМС // Инновации в науке: сб. ст. по матер. V междунар. науч.-практ. конф. Часть I. – Новосибирск: СибАК, 2011.

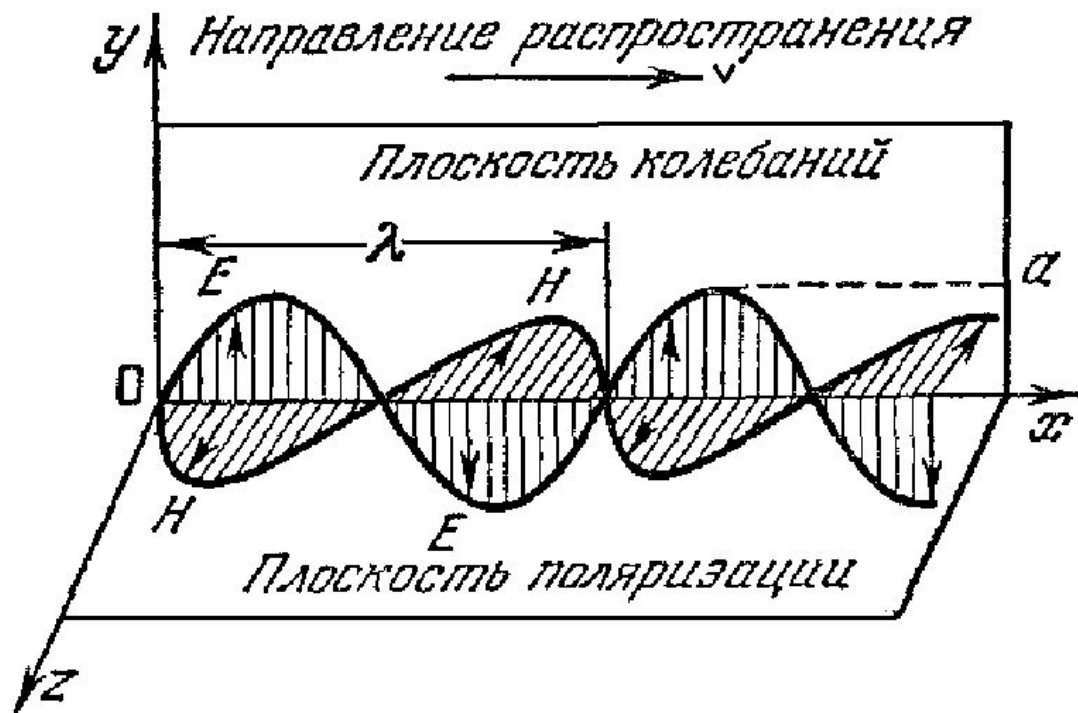
Метод ИУФЛ



Метод ИУФЛ позволяет значительно увеличить числовую апертуру проекционных систем за счет изменения угла полного отражения на границе раздела сред объектив - воздушный зазор (между объективом и пластиной). NA объектива определяется синусом максимального угла прохождения луча через объектив. $NA = n \sin \Theta$. Используя иммерсионные жидкости вместо воздушной среды можно получить значения числовой апертуры $NA > 1$.

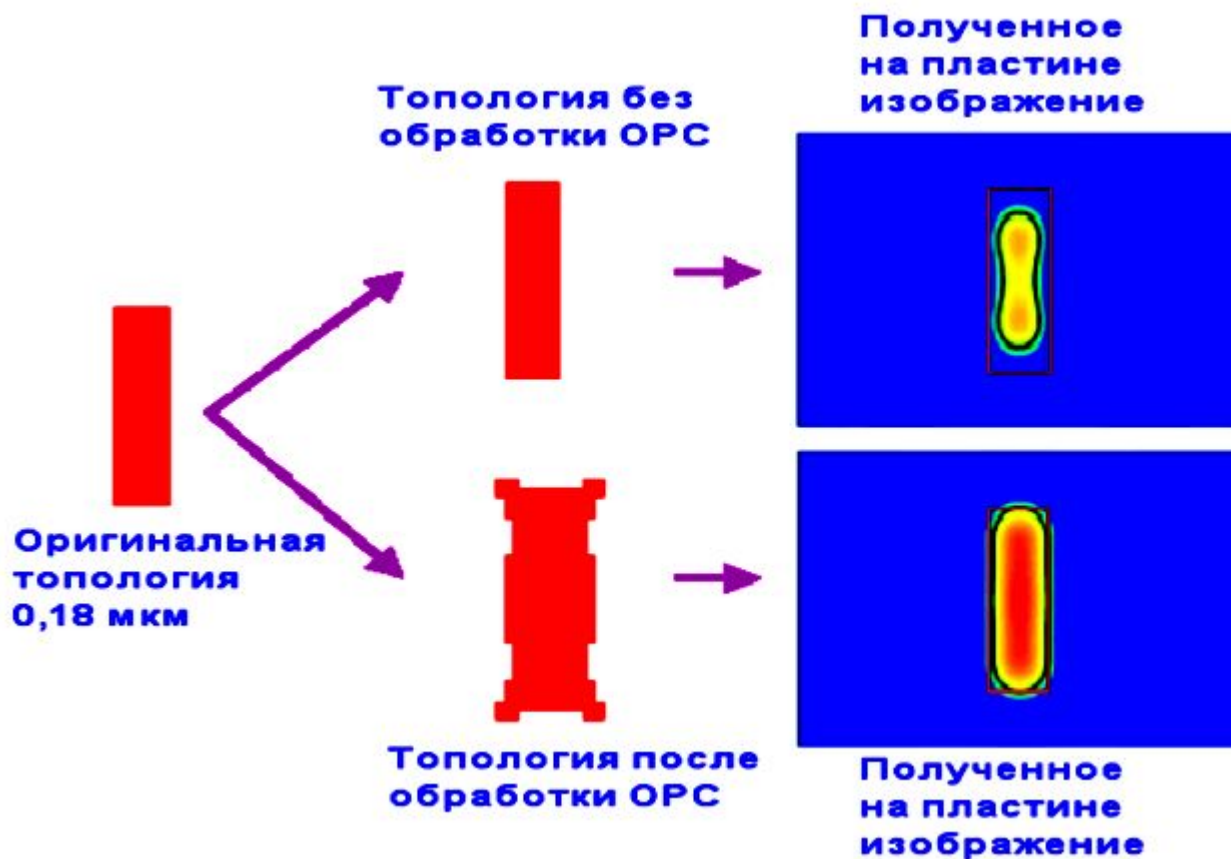
Числовая апертура определяется углом падения луча на объектив, при котором луч проходит через него, не испытывая полного отражения на границе раздела сред объектив – воздушная среда. При данном методе **угол падения луча на объектив, при котором происходит полное отражение света на границе раздела сред объектив – иммерсионная жидкость, увеличивается, что влечет увеличение числовой апертуры.** Увеличение числовой апертуры означает, что лучи, падающие под большими углами, попадут на пластину, т.е. количество информации, пропускаемой объективом увеличится, повышая разрешение.

2. Использование различных типов поляризации экспонирующего излучения.



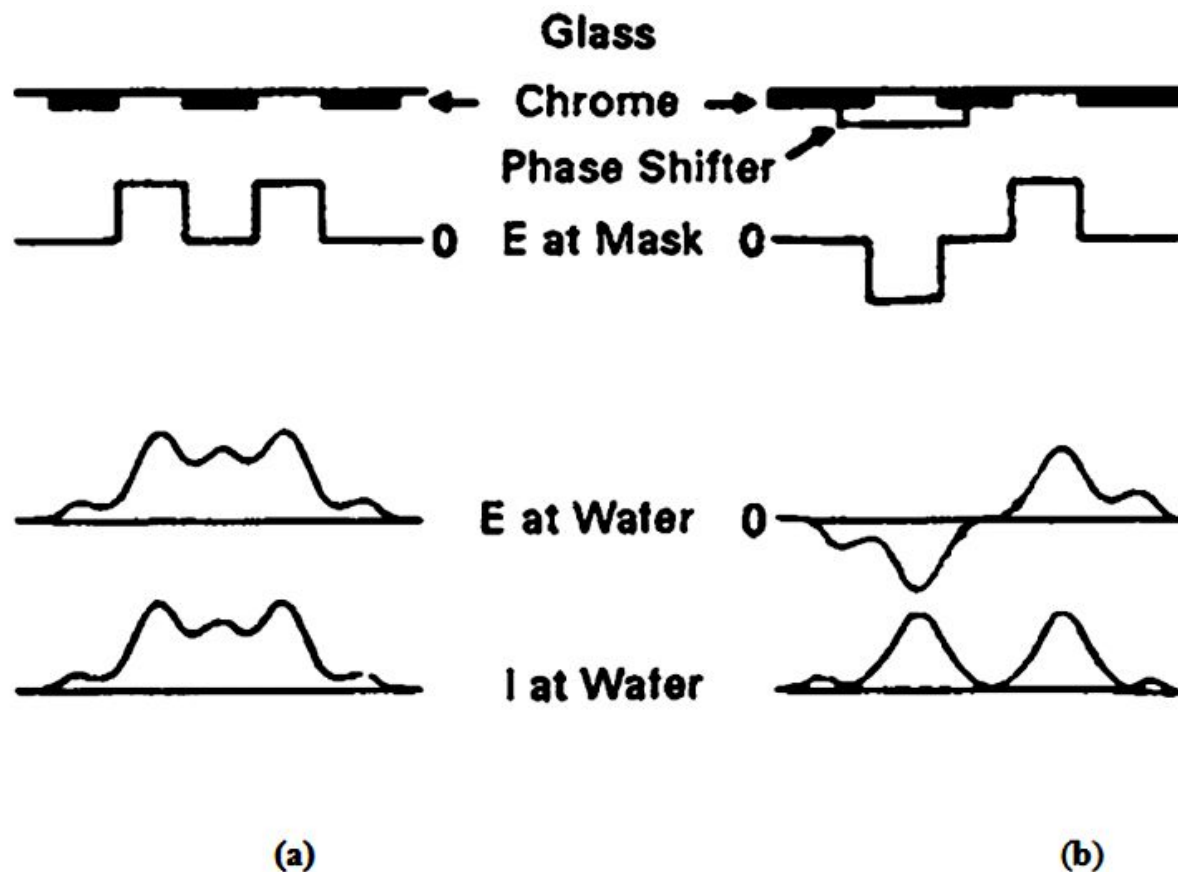
Применение линейной, азимутальной или радиальной поляризации экспонирующего излучения, позволяет на 20% улучшить контраст изображения, а, следовательно, увеличить разрешение и глубину фокуса

3. Проведение коррекции эффектов оптической близости (*optical proximity correction - OPC*) элементов топологического рисунка на фотошаблоне (ФС) путем добавления к этим элементам дополнительных служебных элементов, повышающих точность передачи рисунка на фоторезистивную маску (ФРМ)



Воспроизведение требуемой топологии элемента в проявленной фоторезистивной маске (ФРМ) на пластине с помощью обычного фотошаблона (ФС) (верхний ряд) и с помощью фотошаблона с геометрической коррекцией эффектов оптической близости элемента

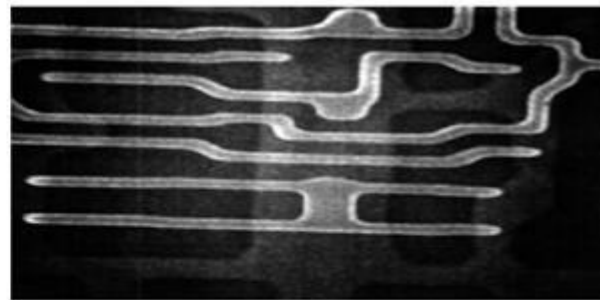
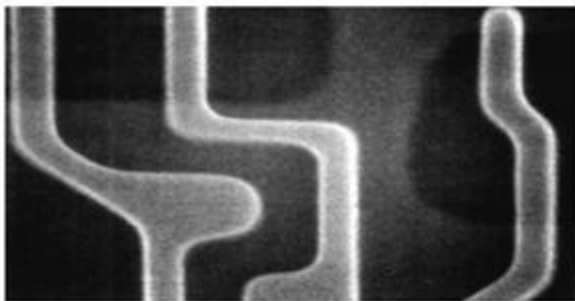
4. Использование фазосдвигающих фотошаблонов (ФС) (*phase shift mask - PSM*), позволяющих так изменять фазу и коэффициент пропускания проходящего через топологический рисунок ФС излучения, чтобы повысить его разрешение на ФРМ



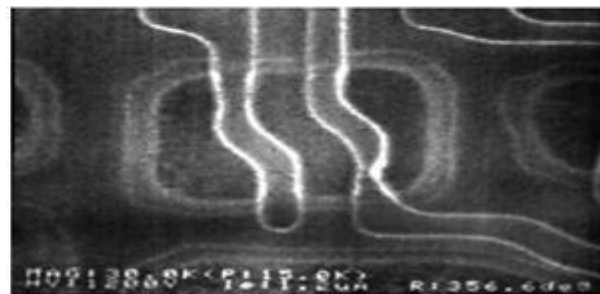
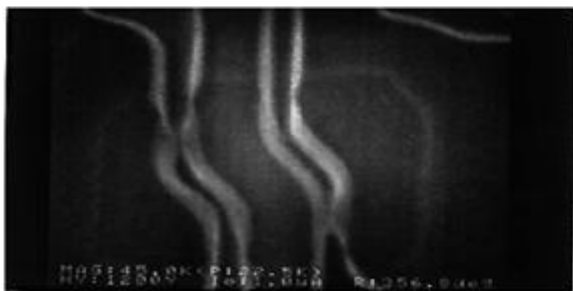
Повышение разрешения оптической проекционной фотолитографии (оптической ПФЛ или оптической нанолитографии) с помощью использования фазосдвигающих фотошаблонов (ФС): **a** - обычный фотошаблон; **b** - фазосдвигающий фотошаблон

5. Использование пленок контрастоусиливающих материалов поверх слоя фоторезиста (ФР), позволяющих повысить контраст передачи изображения в ФР слой.

6. Использование пленок антиотражающих покрытий (АОП) (*bottom anti-reflective coating - BARC*) под слоем ФР для уменьшения влияния отраженного от функционального слоя (ФС) (подложки) излучения на точность передачи топологического рисунка в слой ФР



Competitor BARC



Влияние нижнего антиотражающего покрытия (АОП) (BARC XRNi) толщиной 184,4 нм на качество воспроизведения топологического рисунка линий шириной 400 нм в проявленной фоторезистивной маске на топологическом рельефе со ступеньками (*steps*) высотой 250 нм: *верхний ряд - с использованием АОП; нижний ряд - без использования АОП (competitor BARC)*

Оптимальное применение перечисленной техники повышения разрешения к системам не иммерсионной оптической ПФЛ позволяет достичь значений $k_1 = 0,3$ (при теоретическом пределе $k_1 = 0,25$). Подставляя $k_1 = 0,3$ в формулу для наиболее совершенных проекционных систем с $NA=0,93$, можно получить выражение

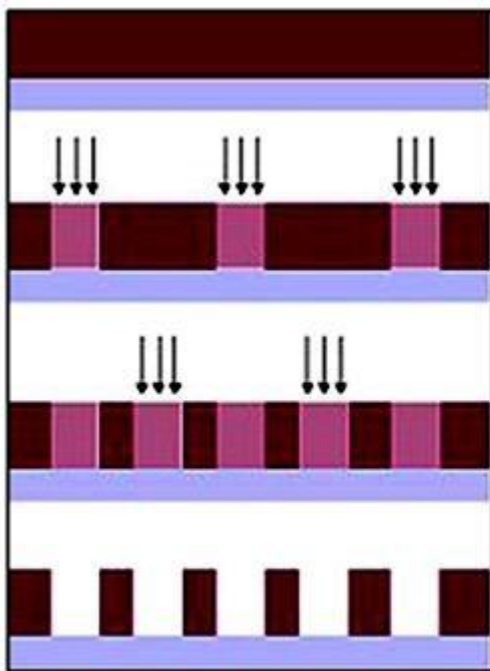
$$L_{\min} = 0,32 \lambda,$$

из которого следует, что при $\lambda = 365$ нм можно достичь максимального разрешения $L_{\min} = 130$ нм, при $\lambda = 248$ нм - $L_{\min} = 90$ нм и при $\lambda = 193$ нм - $L_{\min} = 65$ нм

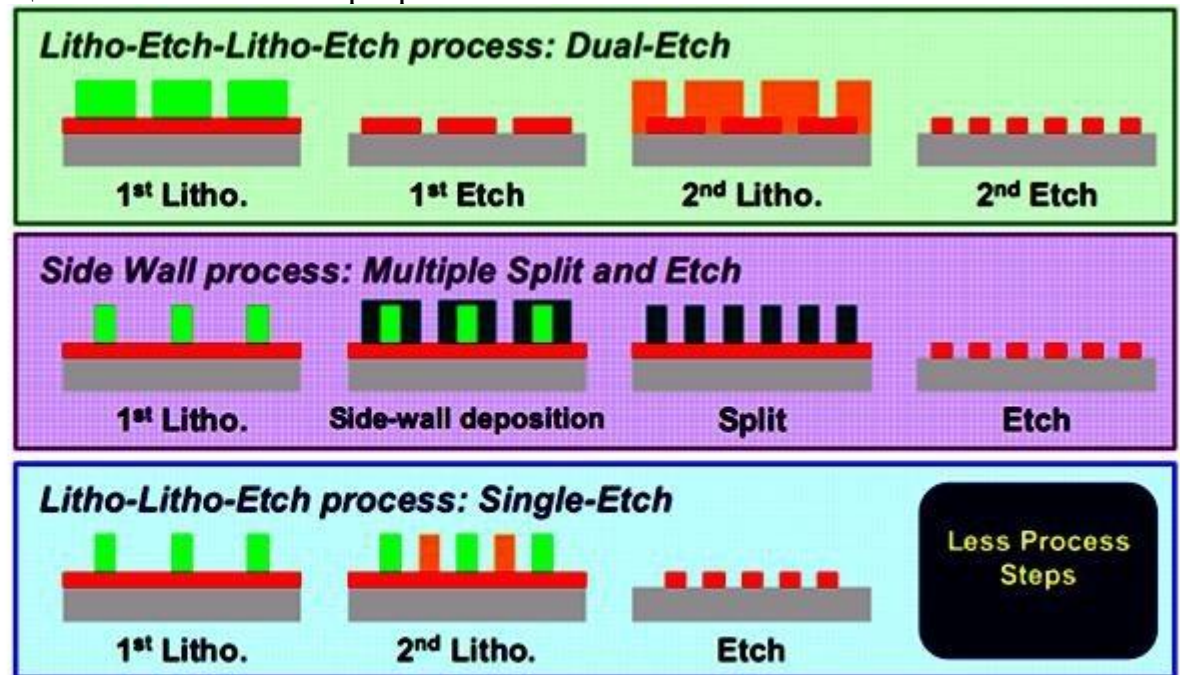
Дальнейшее повышение разрешения иммерсионной оптической ПФЛ

связано с разработкой техники многократного экспонирования (multiple patterning - MPT) одного литографического поля. При этом топологический рисунок одного функционального слоя разбивается на две части, содержащие соответственно горизонтальные (X) и вертикальные (Y) топологические элементы, сформированные на двух отдельных фотошаблонах (ФШ). Эти фотошаблоны последовательно экспонируются соответствующим линейно поляризованным излучением (с X поляризацией и Y поляризацией), созданным с помощью вне осевого дипольного освещения (double exposure – DE or double dipole lithography – DDL).

Метод двойного экспонирования позволяет преодолеть теоретический предел однократного экспонирования для фактора $k_1 = 0,20$, и, тем самым, еще больше повысить разрешение оптической ПФЛ



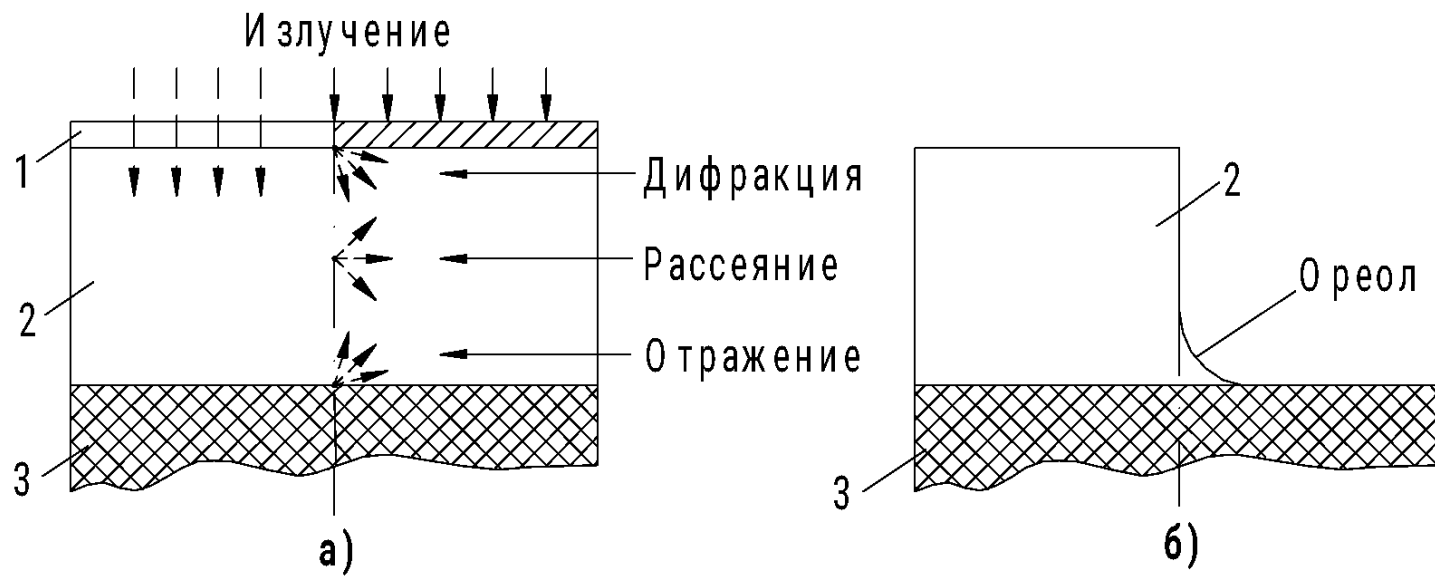
(a)



(b)

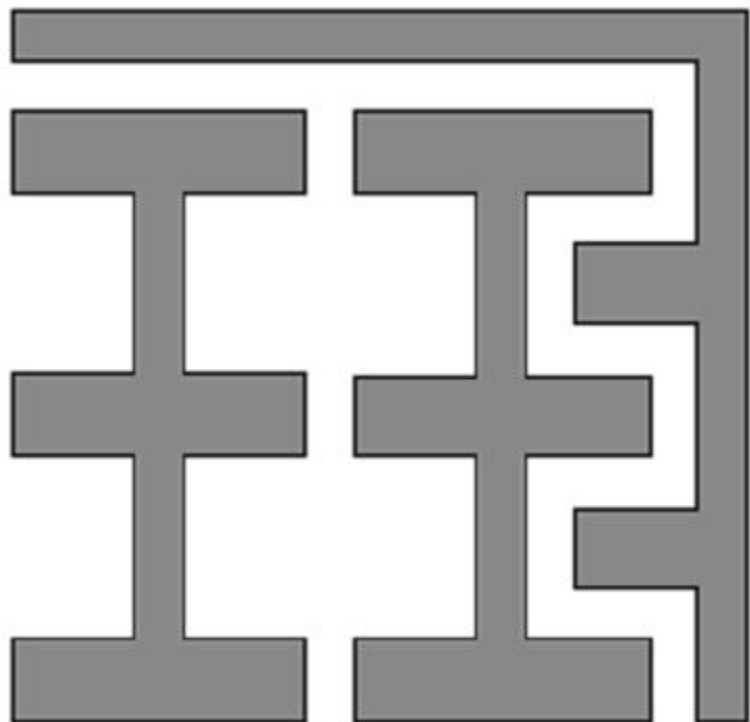
Принцип (a) и варианты (b) двойного экспонирования для повышения разрешения оптической проекционной фотолитографии (оптической ПФЛ или оптической нанолитографии)

Успешное применение техники многократного экспонирования к иммерсионной оптической ПФЛ, сдвинуло топологические нормы, характеризующие уровни технологии (УТ), в меньшую сторону до реально получаемых пределов разрешения (например, УТ 28 нм вместо УТ 32 нм) и значительно ускорило развитие микроэлектроники, начиная с 2009 года. В настоящее время уровни технологии, получаемые с помощью техники многократного экспонирования, характеризуются двумя значениями: рассчитанной по закону Мура (*Moore's Law*) величине минимального размера и величине предела разрешения оптической нанолитографии, например УТ 32/28, УТ 22/20, УТ 16/14

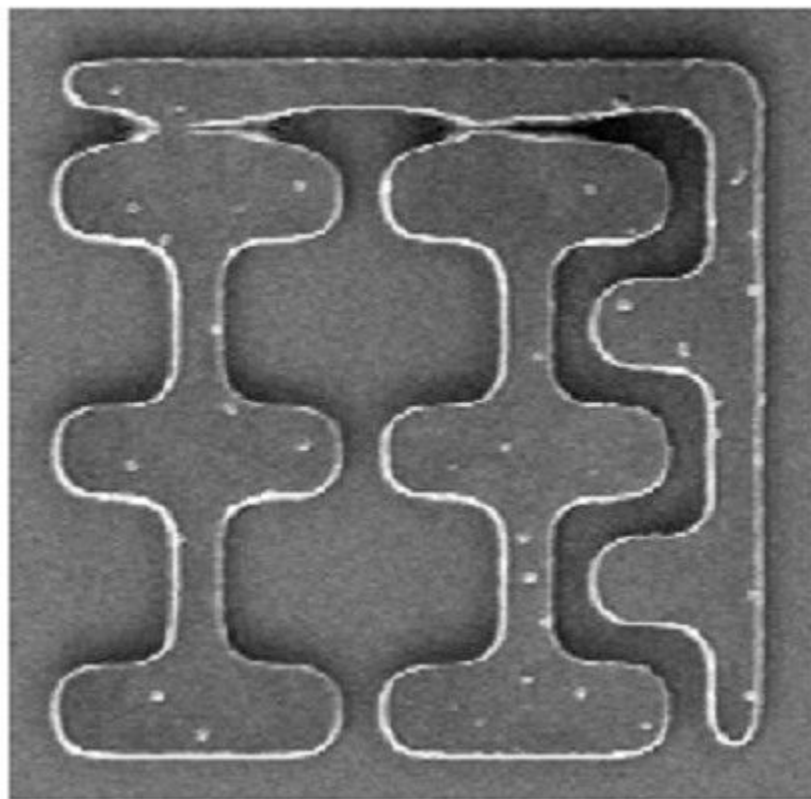




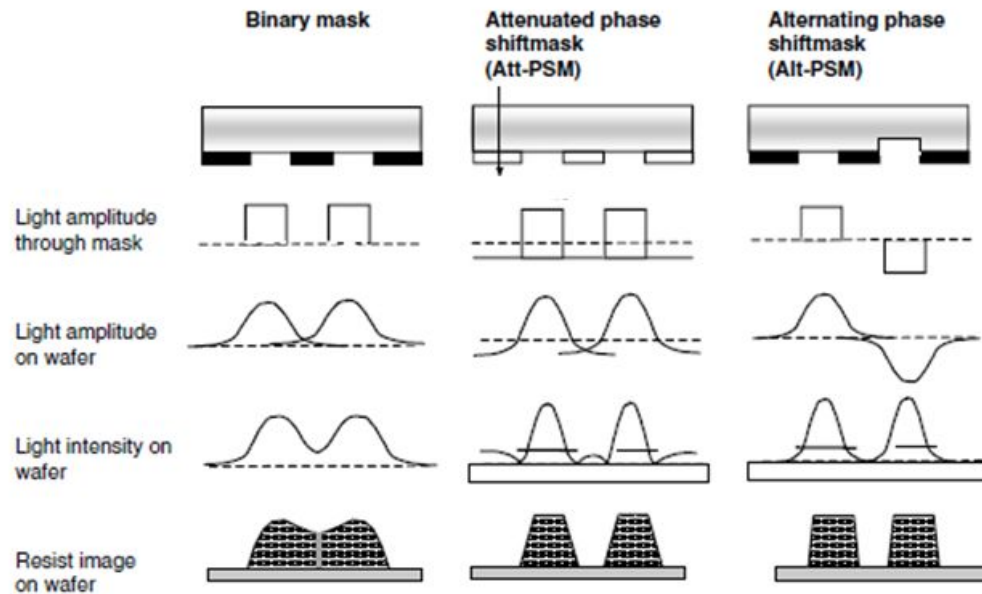
Aspect ratio = T/W



Изображение в проекте



Результат на пластине



Сдвиг фазы зависит от толщины и типа используемого материала, необходимую толщину материала для сдвига по фазе на π можно рассчитать по формуле: $d = \lambda/2(n - 1)$, где λ — длина волны излучения.

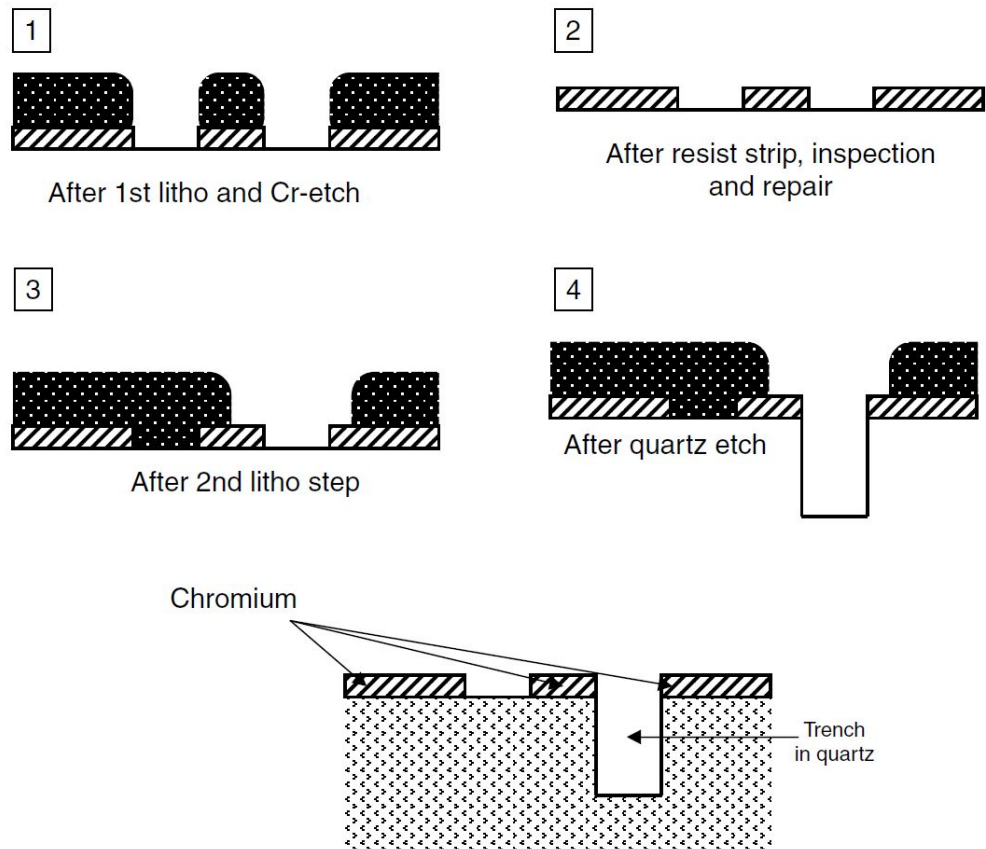


FIGURE 20.9 Manufacturing process of Alt.PSM. (From Maurer, W., and F. Schellenberg, In *Handbook of Photomask Manufacturing Technology*, Taylor & Francis Group, 163–89. Boca Raton, FL, 2005.)

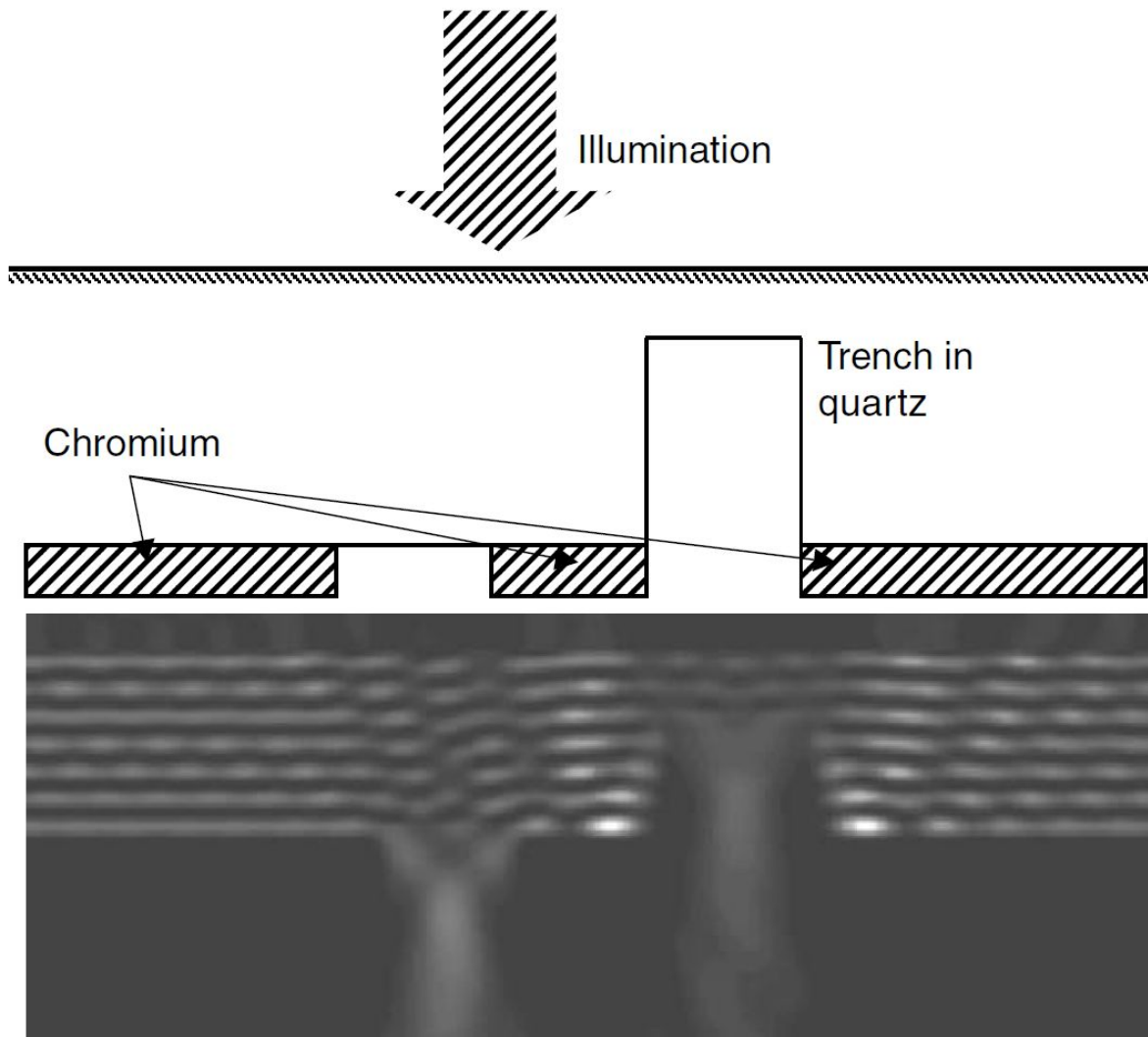
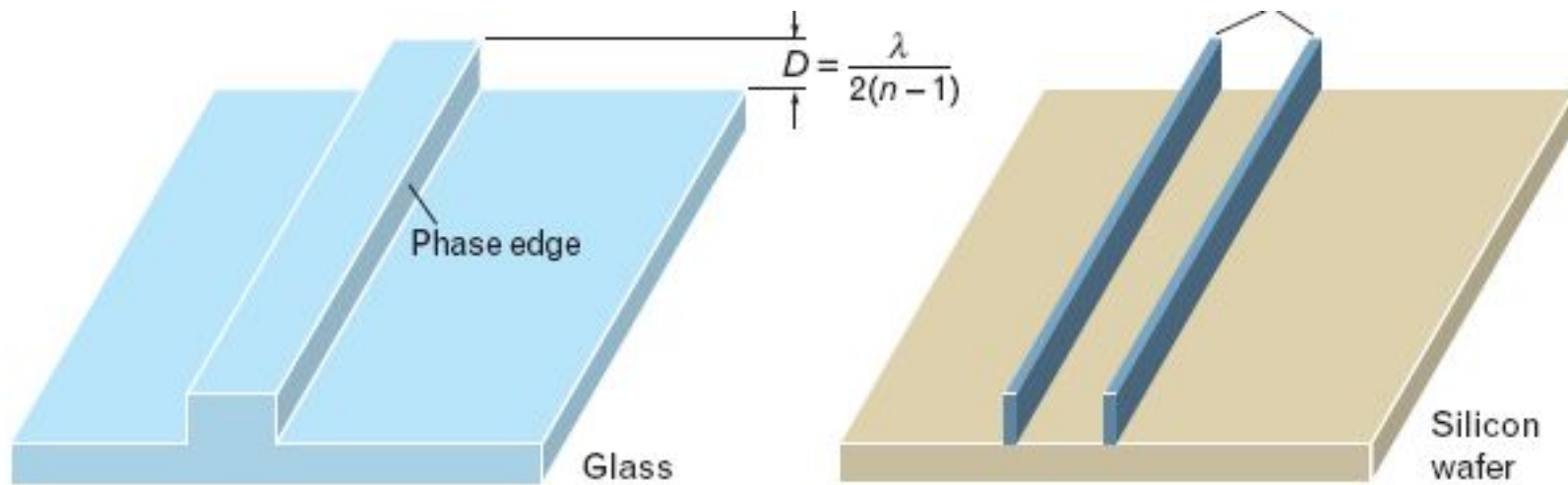
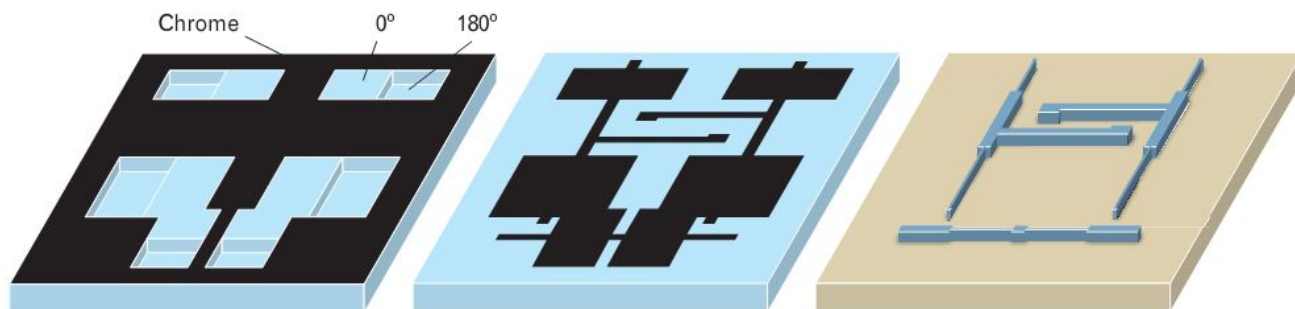


FIGURE 20.10 Two-dimensional intensity plot of light passing through two openings in an Alt.PSM. Openings are 80 nm each separated by 80 nm chromium, Simulation of 193 nm. (From Maurer, W., and F. Schellenberg, In *Handbook of Photomask Manufacturing Technology*, Taylor & Francis Group, 163–89. Boca Raton, FL, 2005.)



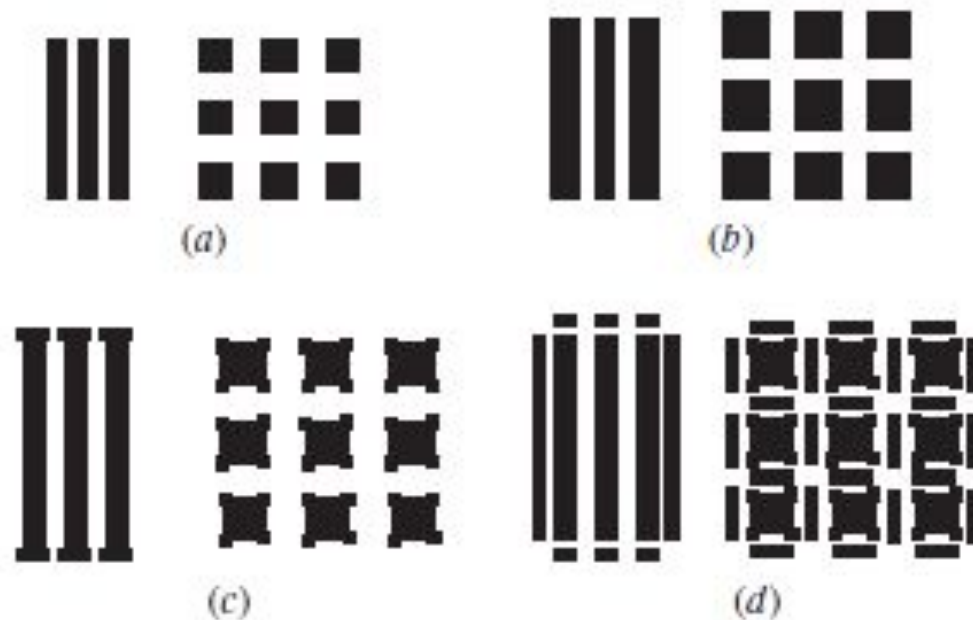
Схематическое изображение безхромного PSM (слева) и тонкие линии, которые он формирует на поверхности фоторезиста (справа).



Поскольку все фазосдвигающие границы формируют узкие темные линии на фоторезисте, только замкнутые области могут обрабатываться с помощью фазосдвигающего фотошаблона.

Обычно требуются две экспозиции: вторая экспозиция дополняет первую

Схематическое изображение фотолитографического процесса с двойной экспозицией. Фазосдвигающий фотошаблон (слева) и корректирующий фотошаблон (в середине) последовательно экспонируются на одну и ту же область кристалла. Окончательный рисунок на кристалле (справа) является результатом этих двух экспозиций.



Варианты коррекции оптического эффекта близости.

- (a) — без OPC; (b) — простое OPC (коррекция размеров элементов);
- (c) — умеренное OPC (введение дополнительных линий);
- (d) — агрессивное OPC (введение дополнительных фигур).

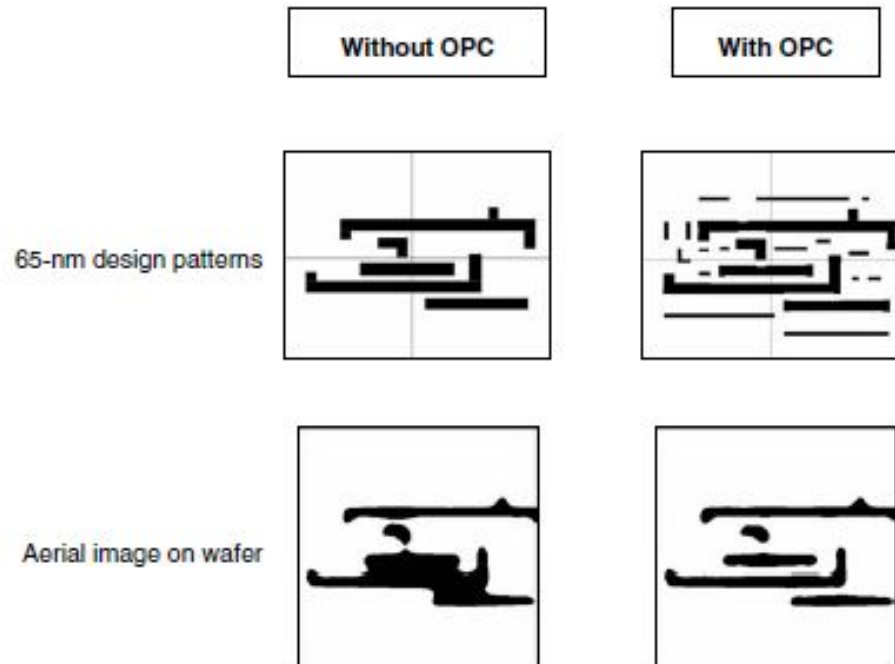


FIGURE 6.9

An example of OPC performances obtained by lithography simulation (simulation condition: 157 nm lithography; NA = 0.85).

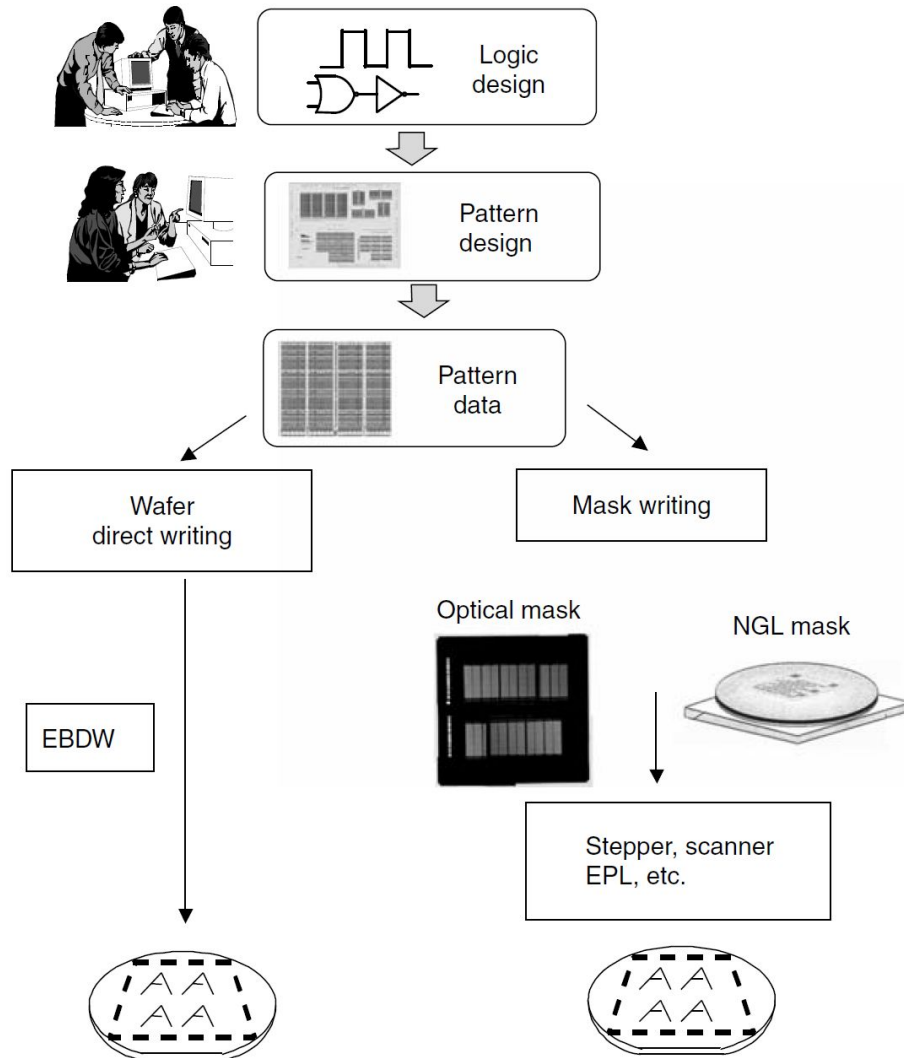
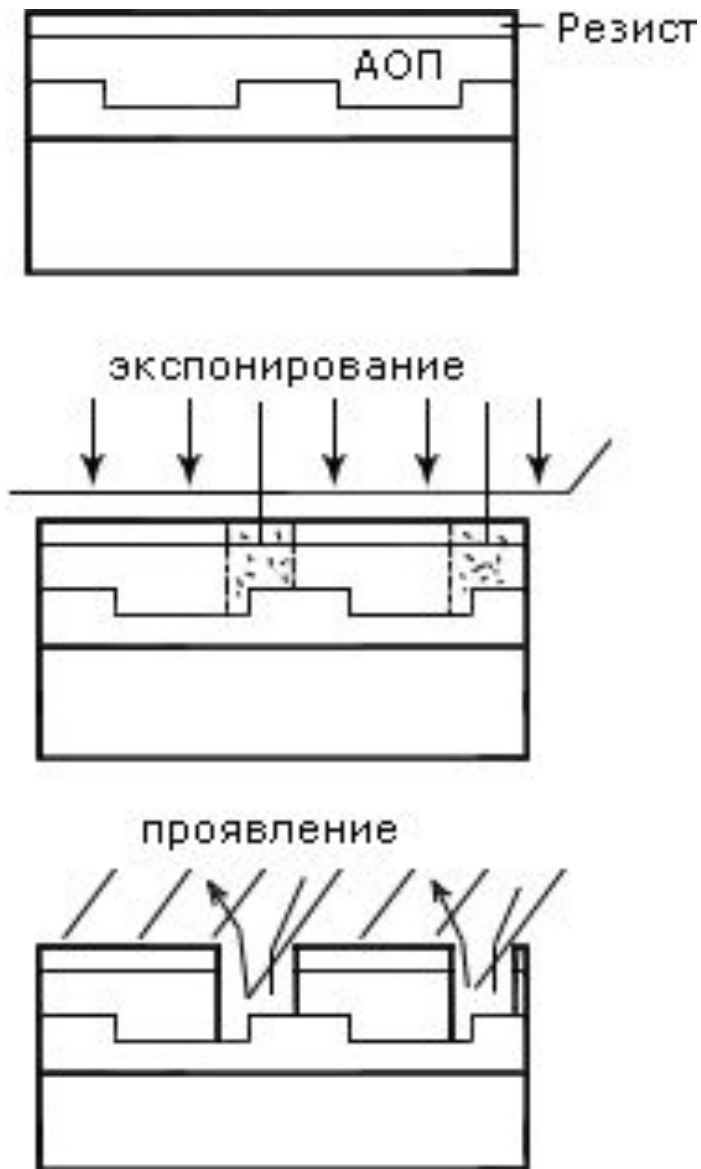
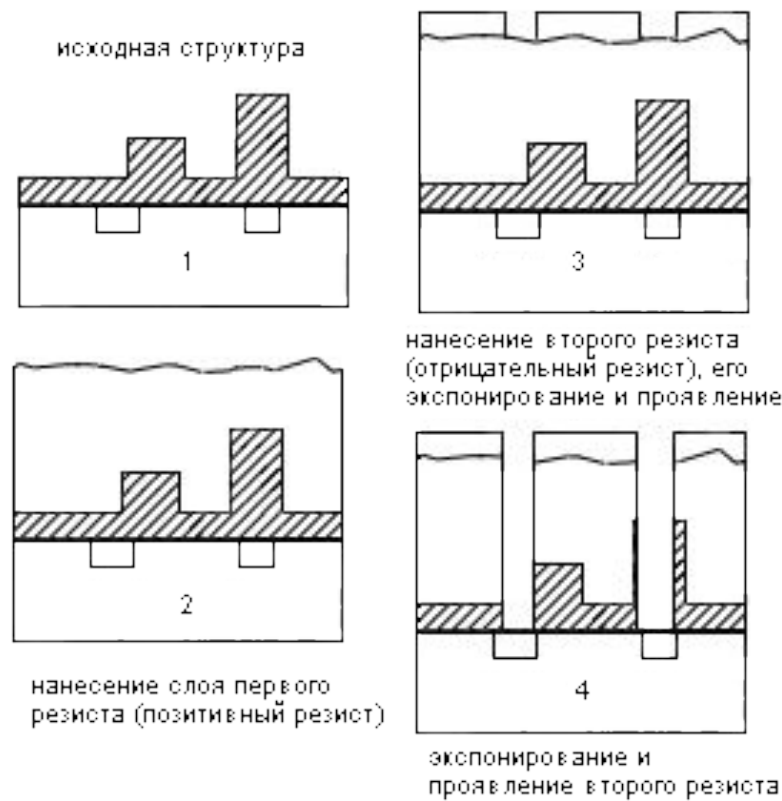


FIGURE 20.21 E-beam lithography for wafers and masks. (From Saitou, N., In *Handbook of Photomask Manufacturing Technology*, Taylor & Francis Group, 59–98. Boca Raton, FL, 2005.)



Перед нанесением фоточувствительного резистивного слоя на подложку наносится тем или иным способом специальное антиотражающее покрытие. Этот дополнительный слой выполняет различные функции. В первую очередь его можно рассматривать как **дополнительный планаризирующий слой**, который сглаживает сложную топологию уже организованного на поверхности пластины рельефа. Кроме того, он **поглощает** отраженные от поверхности подложки обратно рассеянные лучи, которые могут существенно исказить получаемую картину. Высокочувствительный слой верхнего резиста может иметь малую толщину, что положительно влияет на допустимую глубину фокуса процесса. **Обычно в качестве АОП используются различные низкочувствительные органические композиции.** Они должны пропускать свет в том же спектральном диапазоне, что и резист, обладать хорошей адгезией к подложке и резисту и удаляться тем же процессом, что и резист.



Схемы литографического процесса с двойным резистом разной полярности.

На первом этапе на подложку с ранее организованным сложным рельефом наносится толстый слой положительного резиста. Его толщина выбирается из условия **достижения максимальной планаризации поверхности** пластины. Затем наносится тонкий слой резиста другой полярности. Его толщина выбирается из условия получения **оптимальной глубины фокуса и достижения наивысшего разрешения** для данной оптической системы. После экспонирования и проявления тонкого верхнего резистивного слоя он играет роль маски при глубоком экспонировании толстого нижележащего резиста.

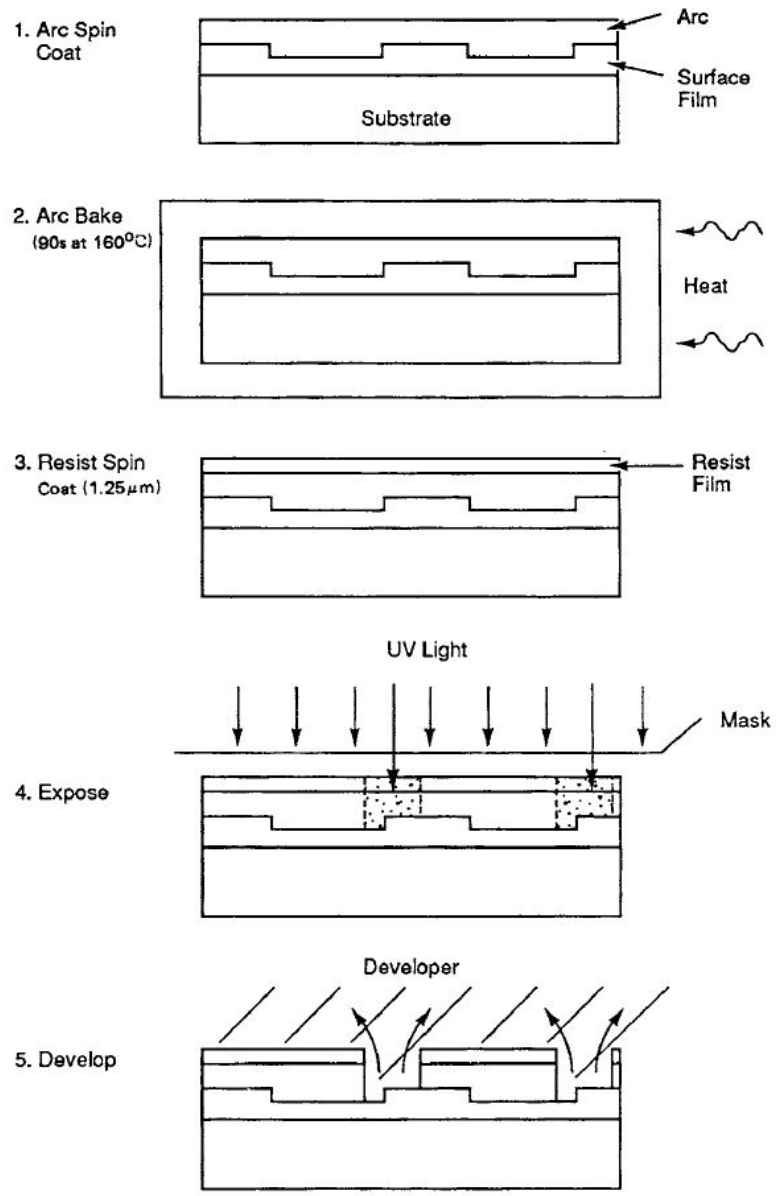


Figure 10.20 Antireflective process sequence.

Silylation/DESIRE process

A novel approach to surface imaging is the diffusion enhanced silylating resist (DESIRE) process²⁰ (Fig. 10.26). Like other multilayer resist processes, the concept is to planarize the wafer and form the image in

a surface layer. The DESIRE process uses one layer exposed by a standard UV exposure. In this process, the exposure is confined to the top layer of the planarizing layer. Next, the wafer is placed in a chamber (see vapor prime baking)²¹ for exposure to HMDS for a *silylation process*. During this step, silicon becomes incorporated into the exposed areas. The silicon-rich areas become a hard mask, allowing the dry development and removal of the underlying material with an anisotropic RIE etch (Chapter 9). During the etch step, the silylated areas are converted to silicon dioxide (SiO_2), forming a more resistant etch mask. Techniques relying on defining the pattern in the top most layer are called *top surface imaged* (TSI).

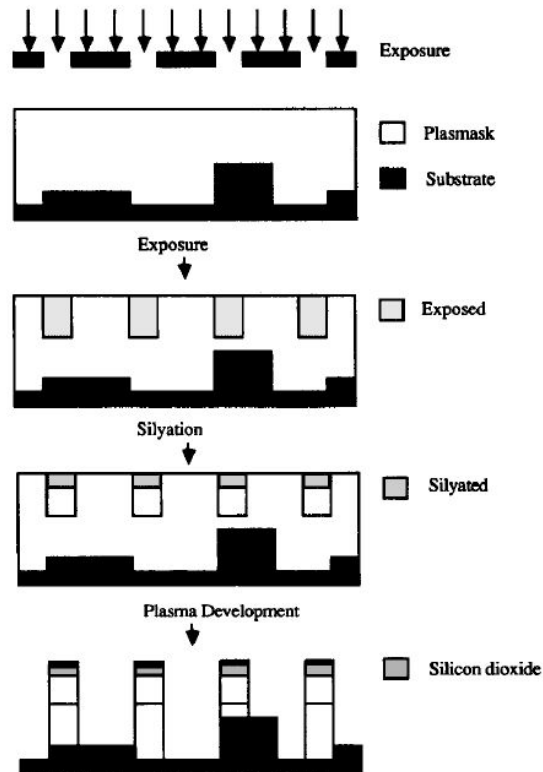


Figure 10.26 DESIRE process. (Source: Solid State Technology, June 1987.)

[Hexamethyldisilazane](#)

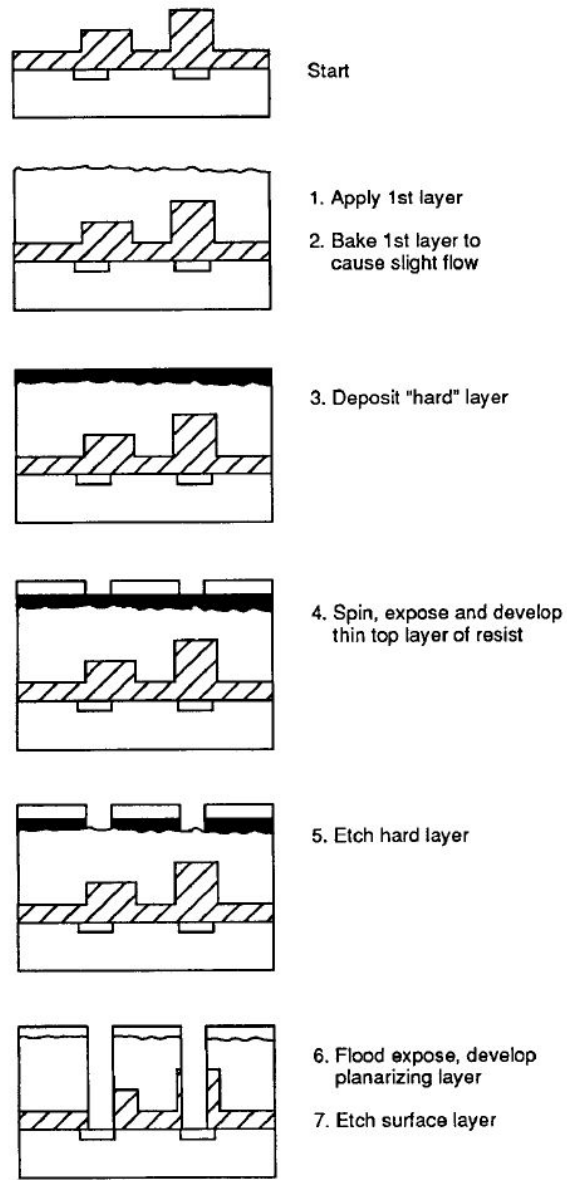


Figure 10.25 Trilevel resist process.

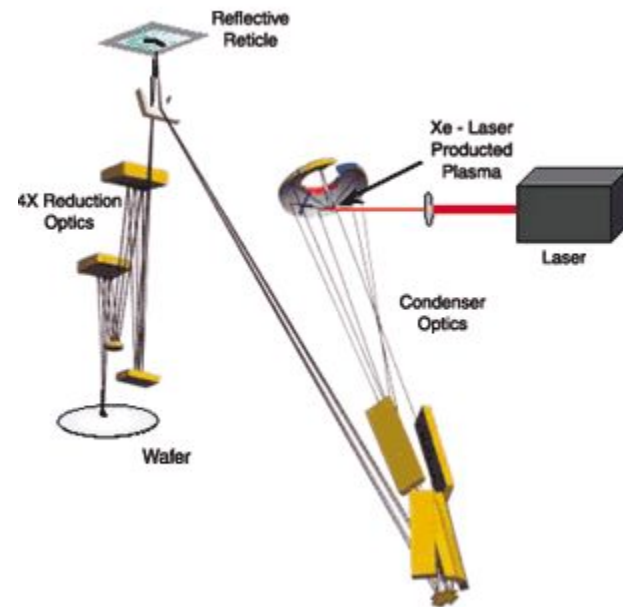
Для получения структур с разрешением значительно ниже 100 нм становится обоснованным использование принципиально новых способов экспонирования. Принимая во внимание необходимость разработки высокопроизводительных литографических систем можно выделить следующие 4 основные направления: предельный или экстремальный ультрафиолет (extreme UV lithography – EUVL), электронная проекционная литография (SCALPEL), рентгеновская литография (X-ray lithography), ионная литография (ion beam lithography).

$$50 > \lambda > 10 \text{ nm}$$

ЭУФ-литография

$NA=0,25 - 0,40$; $k_1=0,6 - 0,4$; $R = 32 - 12$ нм

- **Преимущества:**
 - ЭУФЛ является оптической и проекционной, используются стеклянные заготовки для шаблонов;
 - может быть использована для нескольких поколений ИС;
 - работоспособность уже продемонстрирована на прототипах литографов,
 - возможность создать источник света с меньшей длиной волны.

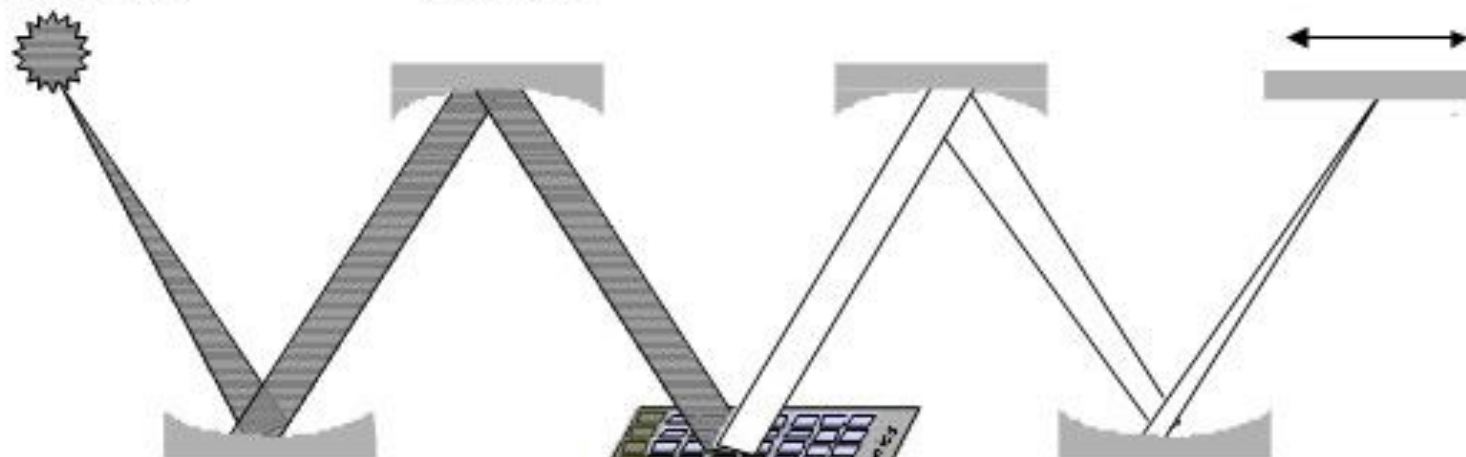


Все отражательные оптические системы должны быть асферическими с размером неоднородностей ~ 10 Å. Эти зеркала представляют собой сложные пленочные покрытия: от 40 до 80 двухслойных пленок с толщиной каждого слоя $\sim \lambda / 4$. Такое же сложное строение имеет маска для EUV литографии,

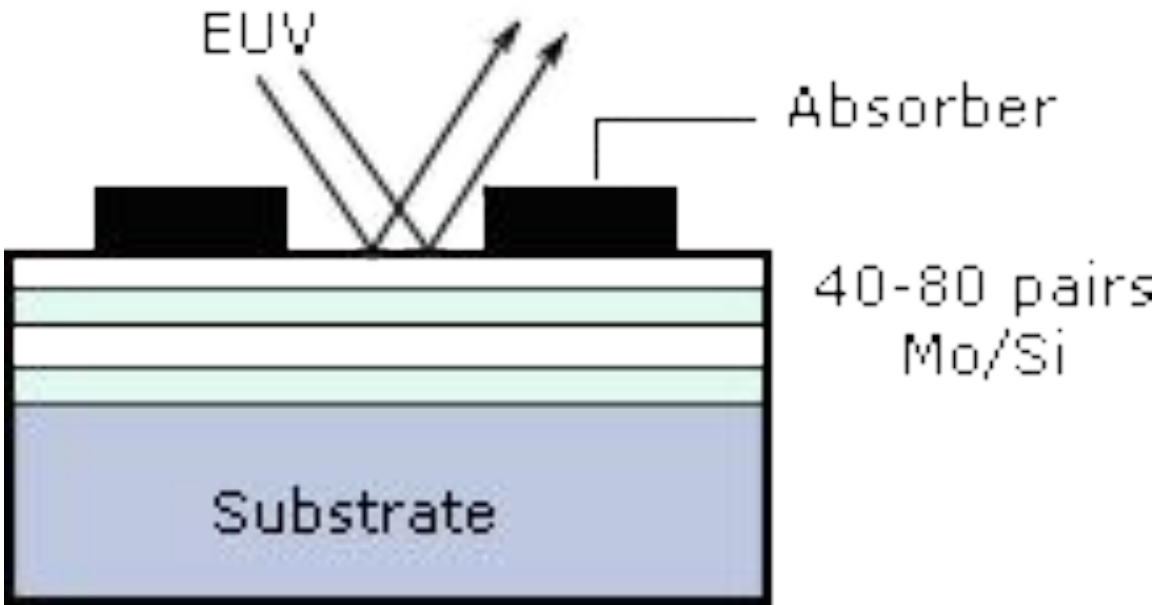
13,4 нм
источник
излучения

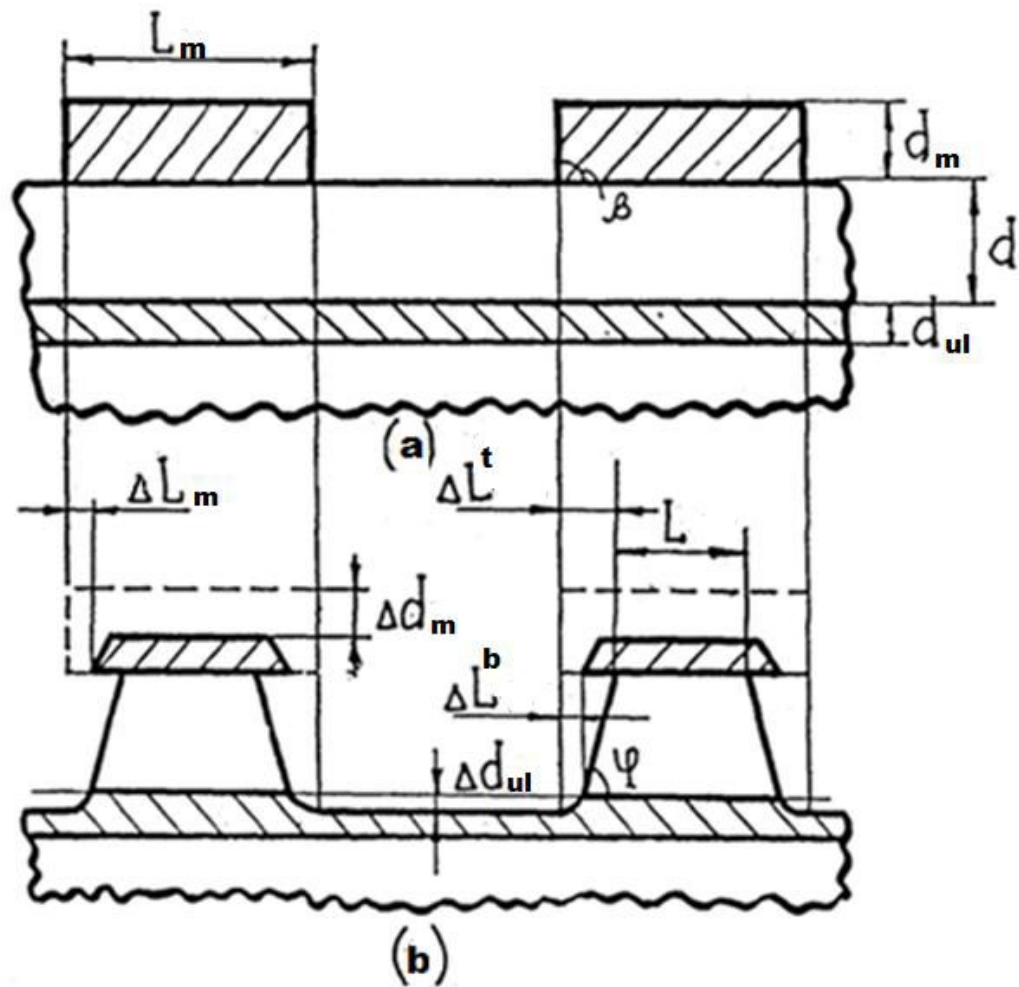
Многослойные отражающие
зеркала

Пластина



Фотошаблон





Вид структуры: а - после операции формирования маски (М) из фоторезиста (ФР); б - после операции травления функционального слоя (ФС) на подслое (П).

Структура, выходящая с операции формирования маски (а), характеризуется следующими параметрами:

- материал маскирующего покрытия (маски) и режим ее обработки;

-средняя толщина маски d_m , определяемая, согласно формуле

$$d_m = [d_{(max)} + d_{(min)}]/2$$

-неравномерность толщины маски $r(dm)$, определяемая, согласно формуле

$$r(d) = [d_{(max)} - d_{(min)}]/[d_{(max)} + d_{(min)}] \cdot 100$$

- средний размер элемента в маскирующем покрытии L_m ,

- разброс размера элемента в маскирующем покрытии по пластине $r(L_m)$,

- материал подслоя (слоя, на котором находится обрабатываемый функциональный слой).

- средняя толщина подслоя d_{ui} ,

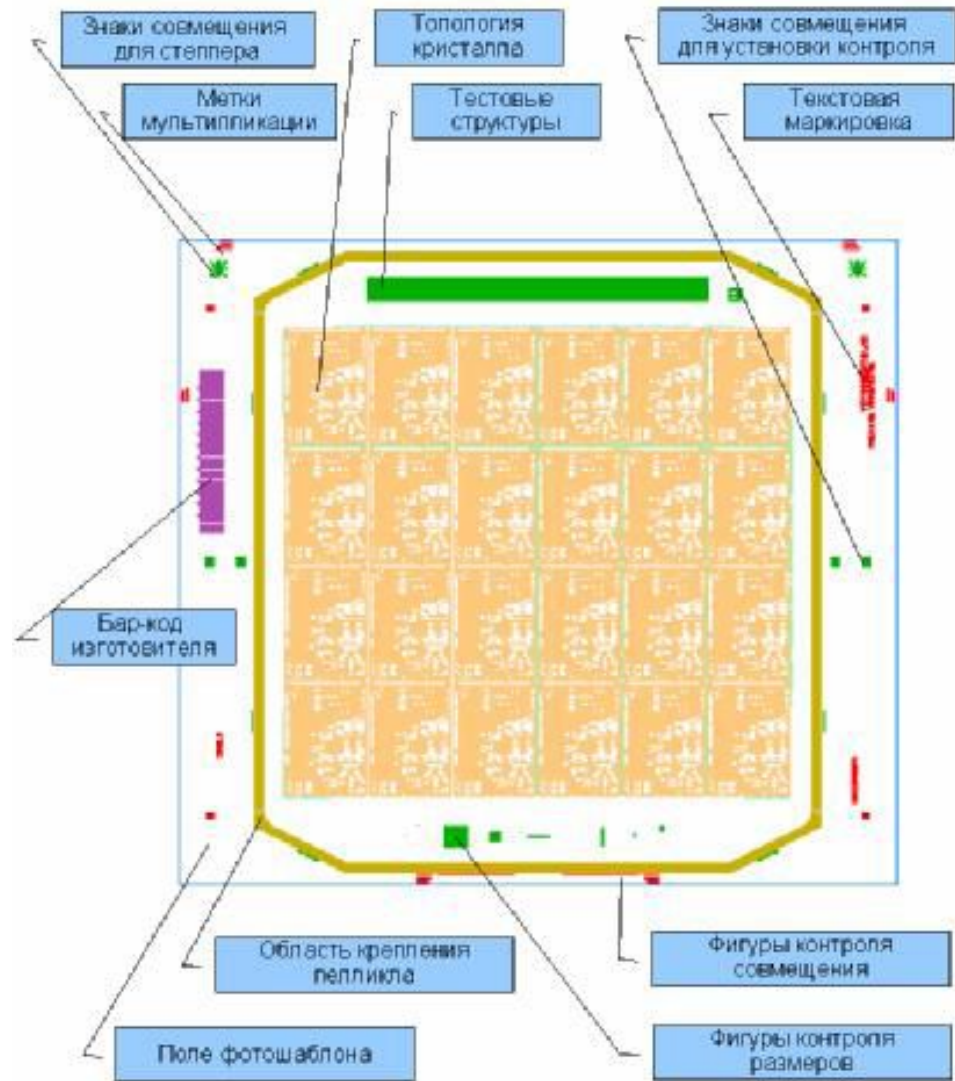
-неравномерность толщины подслоя $r(d_{ui})$.

-В отдельных случаях могут задаваться среднее значение угла наклона профиля элемента маски и его разброс по пластине

$$\beta \cdot [1 \pm r(\beta)]$$

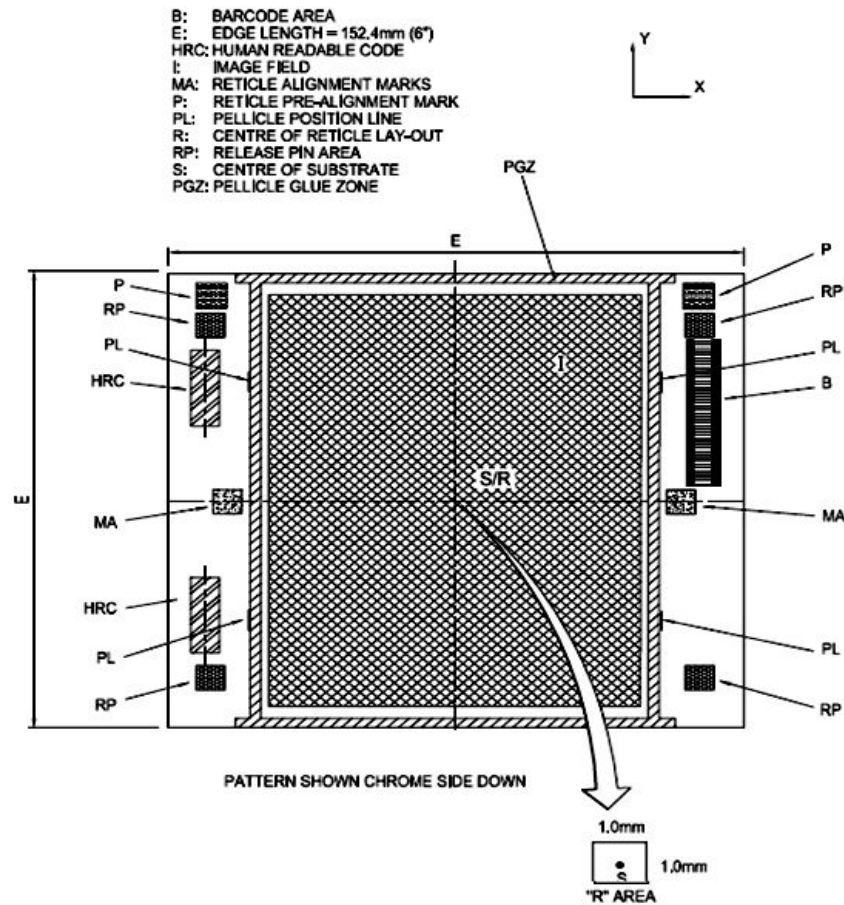
На структуре, выходящей с операции травления функционального слоя (входной структуре), необходимо обеспечить получение следующих характеристик (параметров) (b):

- средний размер элемента в функциональном слое L ,
 - разброс размера элемента в функциональном слое по пластине,
 - среднее значение угла наклона профиля элемента в функциональном слое и его разброс по пластине
- допустимый уход толщины подслоя
- допустимый уход толщины маски, который обычно задается при травлении на рельефной поверхности при низкой селективности травления функционального слоя относительно маски;
 - допустимый уход размера элемента в маскирующем покрытии;
 - допустимые уходы размера элемента функционального слоя относительно первоначального размера элемента в маске по верхней и нижней кромкам



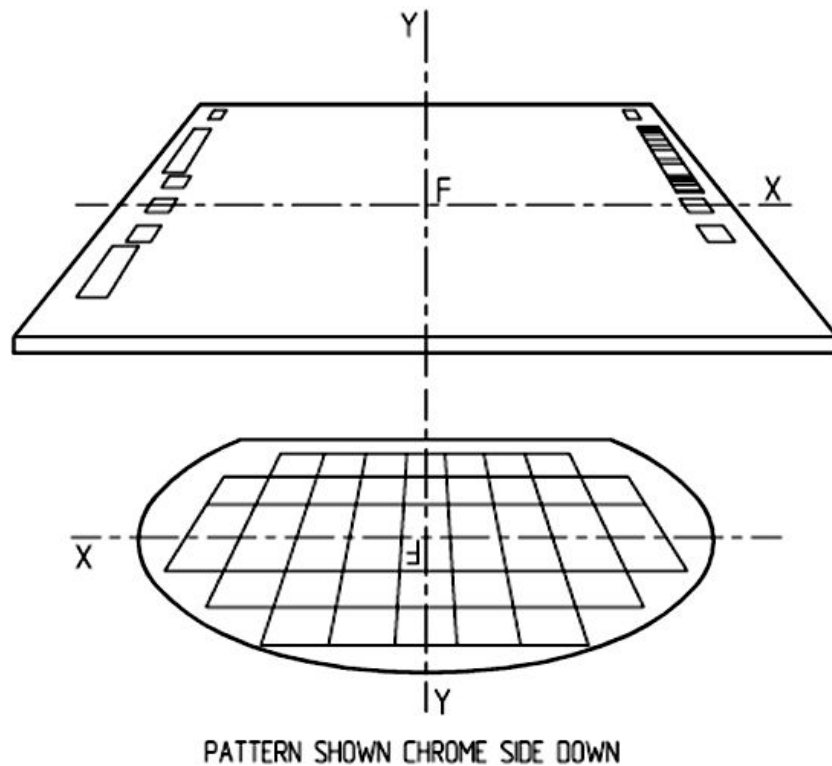
Структура хромового фотошаблона и области расположения технологической и служебной информации (отечественный вариант обозначений)

Введение в дизайн фотошаблонов для микро- и наносистем Synopsys. /Под ред. В.А. Беспалова и А.Н. Кононова. – Изд-во МИЭТ, М.: 2012. – 240 с.

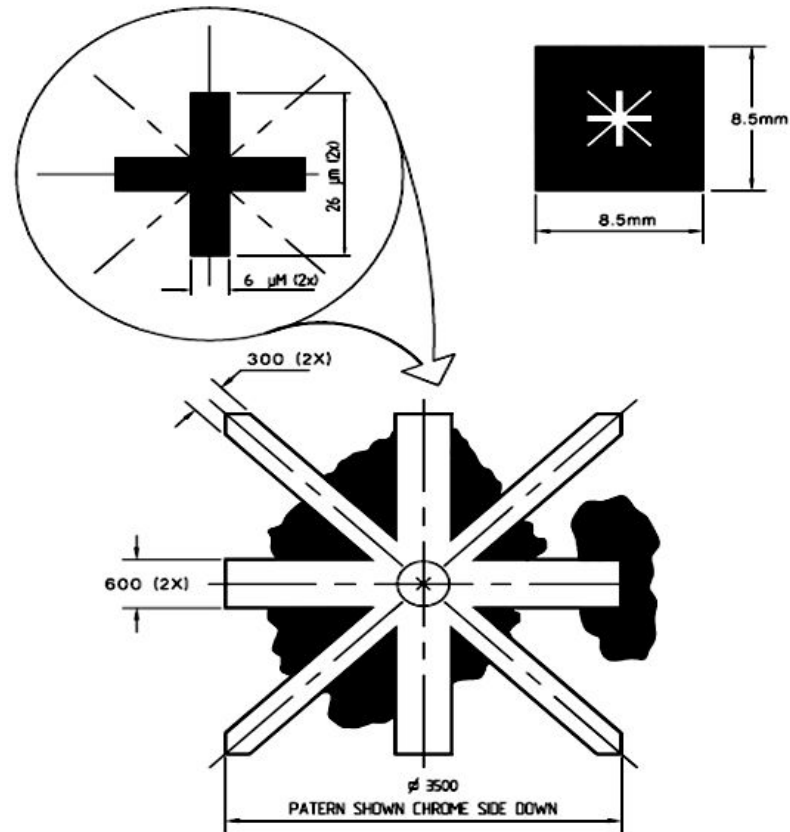


Структура хромового фотошаблона и области расположения технологической и служебной информации (международный вариант обозначений)

Handbook of photomask manufacturing technology/Edited by S. Rizvi, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005. – 632 pp.

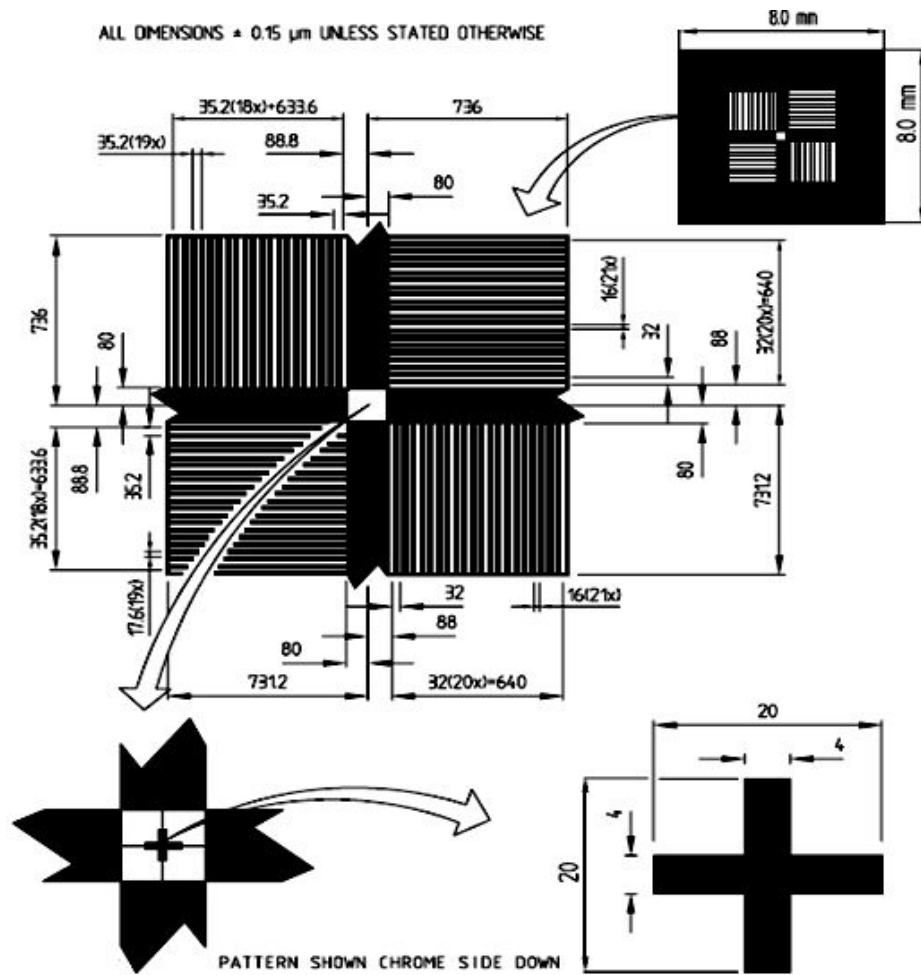


Расположение координатной системы фотошаблона (вверху) относительно пластины (внизу) (фотошаблон расположен хромированной стороной вниз)



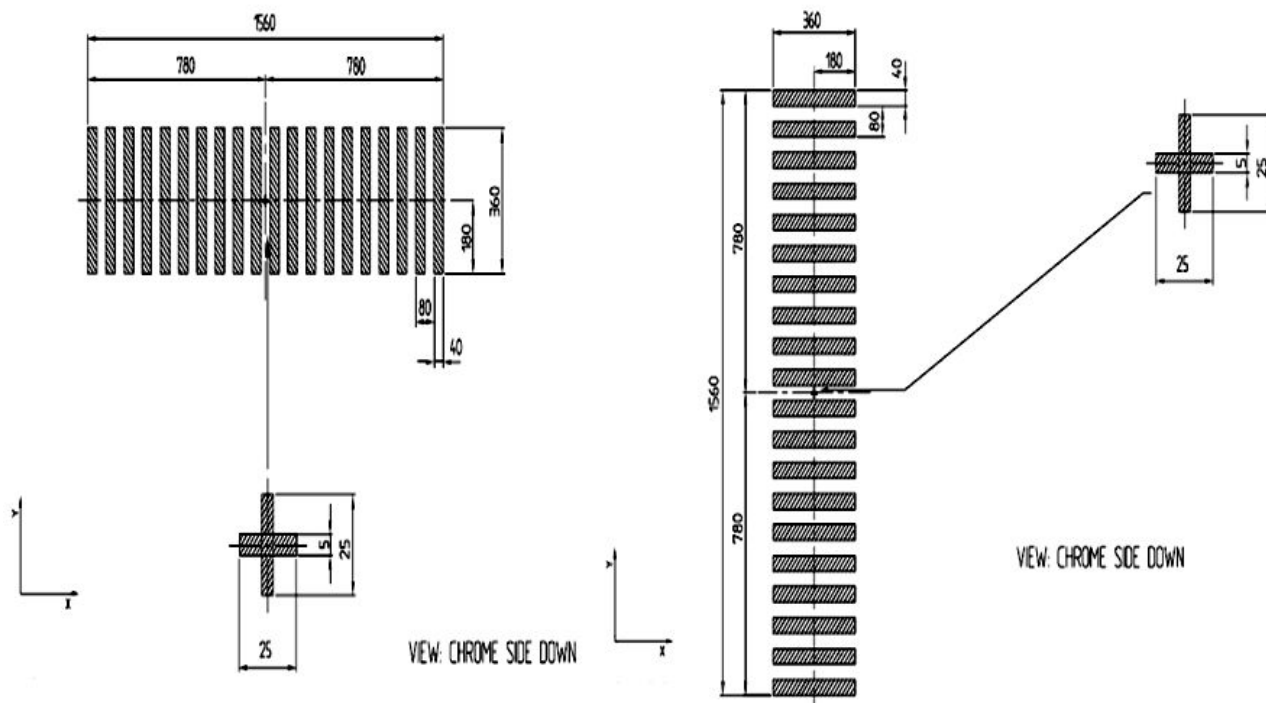
Геометрия меток на фотошаблоне (ФС) для предварительного совмещения ФС и пластины (ФС расположен хромированной стороной вниз; черные области - области покрытые пленкой хрома).

Handbook of photomask manufacturing technology/Edited by S. Rizvi, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005. – 632 pp.



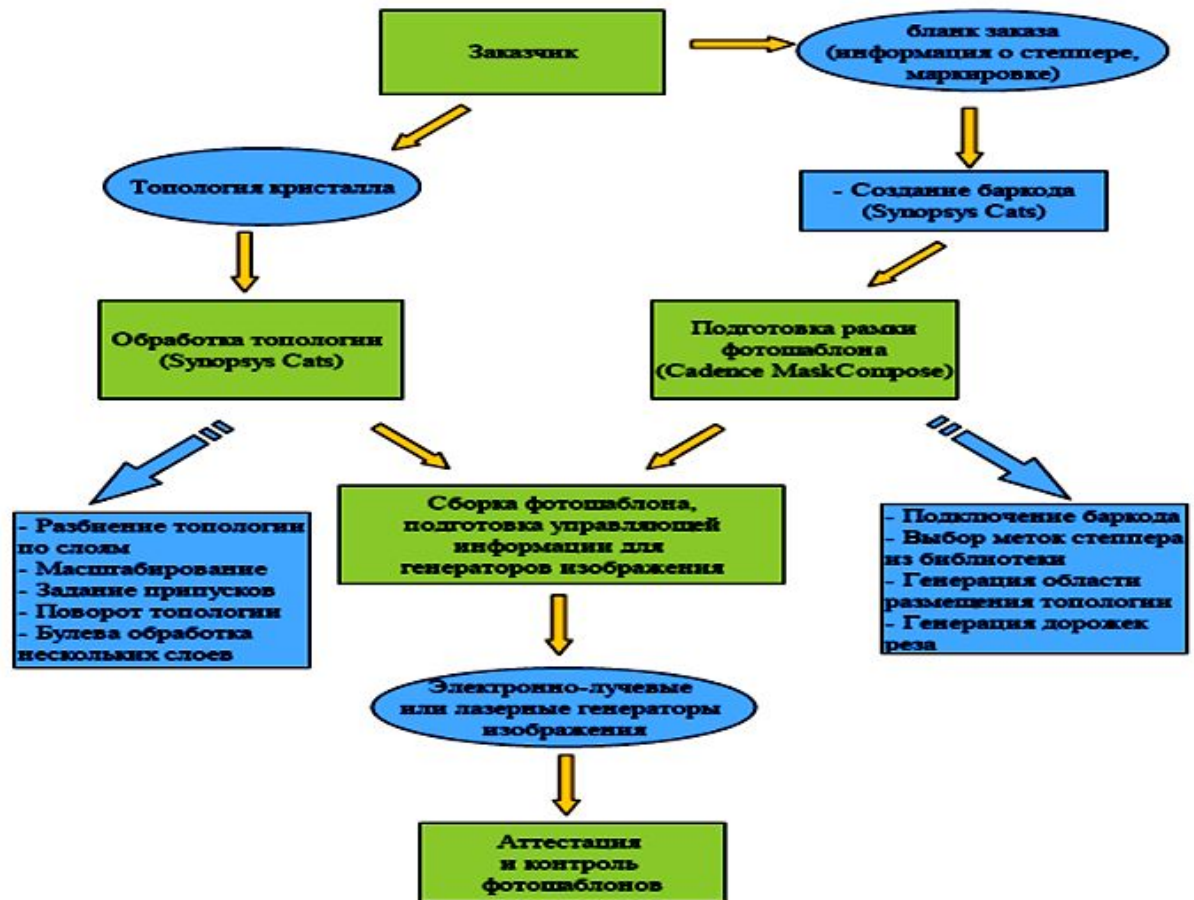
Геометрия меток на фотошаблоне (ФШ) для точного совмещения ФШ и пластины (ФШ расположен хромированной стороной вниз; черные области - области покрытые пленкой хрома)

Для совмещения полей экспонирования используются локальные метки совмещения, которые располагаются в дорожках резов (в скрайберных дорожках) между кристаллами. Геометрия несегментированных локальных меток ХРА-Х и ХРА-У для совмещения полей экспонирования соответственно по координатам X и Y



Маршрут
производства
фотошаблонов (ФС)
состоит из
нескольких основных
этапов

- проектирование
топологии
кристалла;
- подготовка
управляющей
информации для
фабрики-
изготовителя
ФС;
- изготовление
ФС;
- аттестация ФС.



Общая схема процесса производства фотошаблонов

Топология кристалла является входной информацией для подготовки управляющей информации, используемой при проектировании ФШ



Общая схема подготовки управляющей информации для изготовления фотошаблонов

Заказчик должен заполнить специальную форму заказа, в которой указываются все топологические слои для изготовления, критические размеры, шаг сетки проектирования, полярность слоев, необходимость проведения оптической и фазовой коррекции (в том числе с какими слоями) и т.д.

Разработчики управляющей информации для изготовления ФШ должны провести входной контроль предоставленной топологии на соответствие конструктивно-технологическим ограничениям, в англоязычной терминологии MRC (MRC – *Manufacture Rule Check*).

В соответствии со спецификацией по формированию фрейма (рамки) для ФШ и картой заказа проводится подготовка управляющей информации для изготовления ФШ, в англоязычной терминологии MDPR (MDPR - *Mask Data Preparation*) с использованием специализированных систем автоматизированного проектирования фотошаблонов. Это позволяет не только на порядки ускорить исходный процесс, но и изготовить бездефектные ФШ для производства интегральных схем (ИС).

В соответствии со спецификацией по формированию фрейма (рамки) для ФШ и картой заказа проводится **подготовка управляющей информации для изготовления ФШ**, в англоязычной терминологии MDPР (MDPР - *Mask Data Preparation*) с использованием специализированных систем автоматизированного проектирования фотошаблонов. Это позволяет не только на порядки ускорить исходный процесс, но и изготовить бездефектные ФШ для производства интегральных схем (ИС).

Данные системы MDPР позволяют формировать выходную информацию в формате, требуемом для изготовителя ФШ, включая процессы их аттестации на наличие дефектов и контроля критических размеров.

Заключительной операцией перед передачей информации на изготовление ФШ должен являться **выходной контроль подготовленной информации**. Указанный этап также проводится средствами специализированных систем верификации подготовленной выходной информации (например, в формате MEBES) на соответствие исходной топологии (например, в формате GDSII) [5].

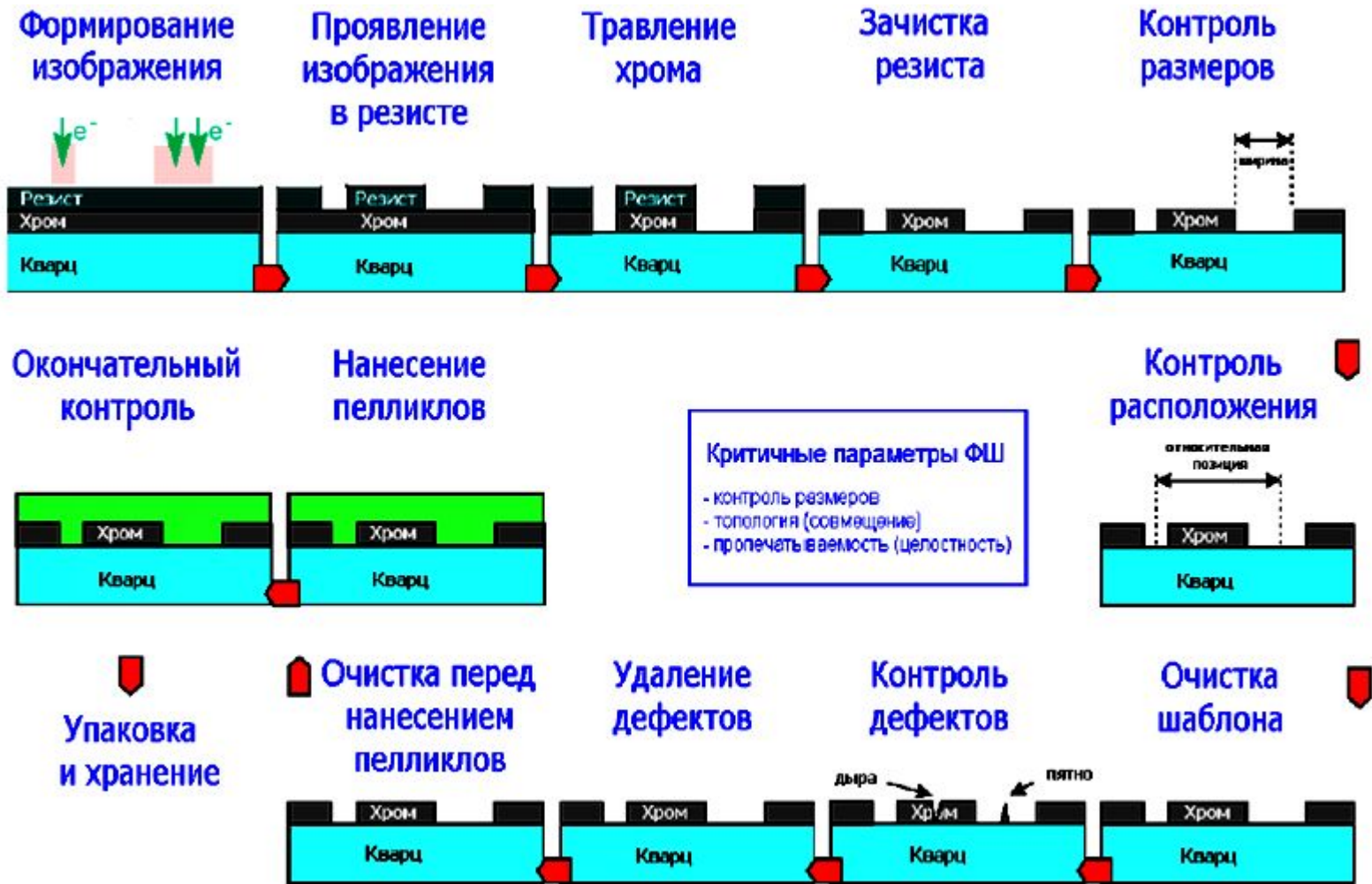
В качестве базовых программных средств в процессе проектирования ФШ обычно используются:

- программный комплекс CATS (*Computer Aided Transcription System*), *разработанный компанией Synopsys, далее Synopsys CATS;*

и программный комплекс Mask Compose, разработанный компанией Cadence, далее Cadence Mask Compose.

Средствами программного пакета Cadence Mask Compose создается рамка фотошаблона, которая представляет собой набор всех необходимых технологических меток и служебной информации.

В Synopsys CATS **проводится обработка топологической информации кристалла, которая включает в себя перевод данных в управляющую информацию для генератора изображений (лазерного или электронно-лучевого)**, установок контроля критических размеров и аттестации на дефектность. Также осуществляется проверка соответствия проектным нормам – MRC, коррекция эффектов оптической близости (OPC), создание управляющей информации для проектирования фазосдвигающих ФШ (PSM) и др.



Технологический маршрут изготовления фотошаблонов для оптической нанолитографии

Введение в дизайн фотошаблонов для микро- и наносистем Synopsys. /Под ред. В.А. Беспалова и А.Н. Кононова. – Изд-во МИЭТ, М.: 2012. – 240 с.

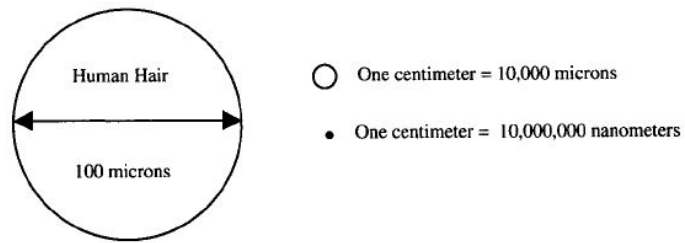


Figure 5.1 Relative sizes.

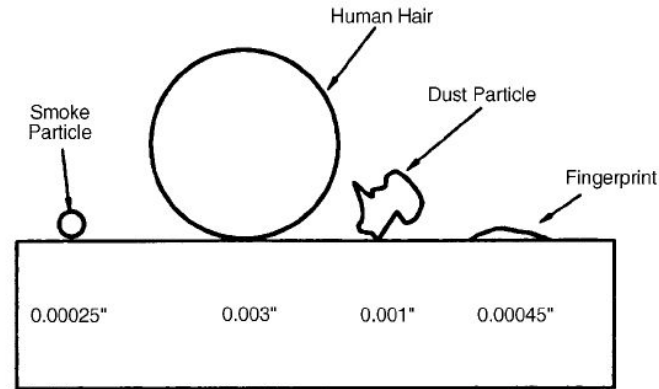


Figure 5.2 Relative size of contamination. (Source: Hybrid Microcircuit Technology Handbook.¹²)

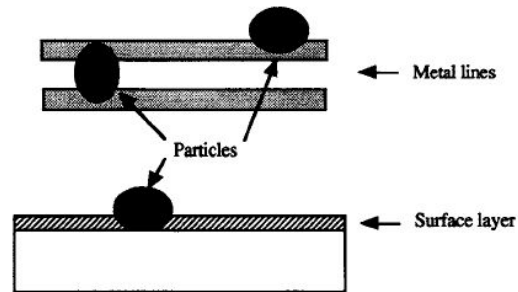


Figure 5.3 Relative size of airborne particles and wafer dimensions.

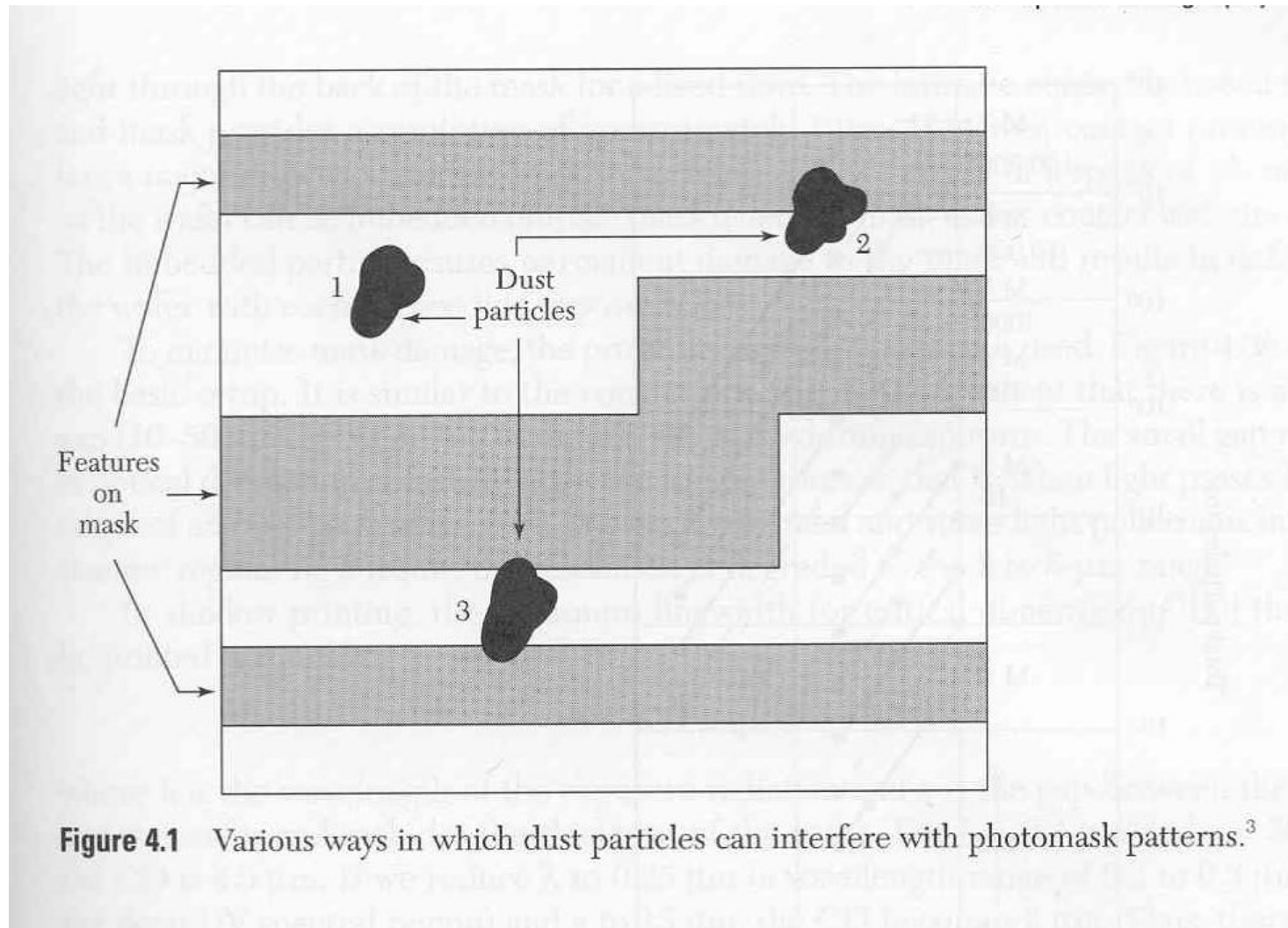


Figure 4.1 Various ways in which dust particles can interfere with photomask patterns.³

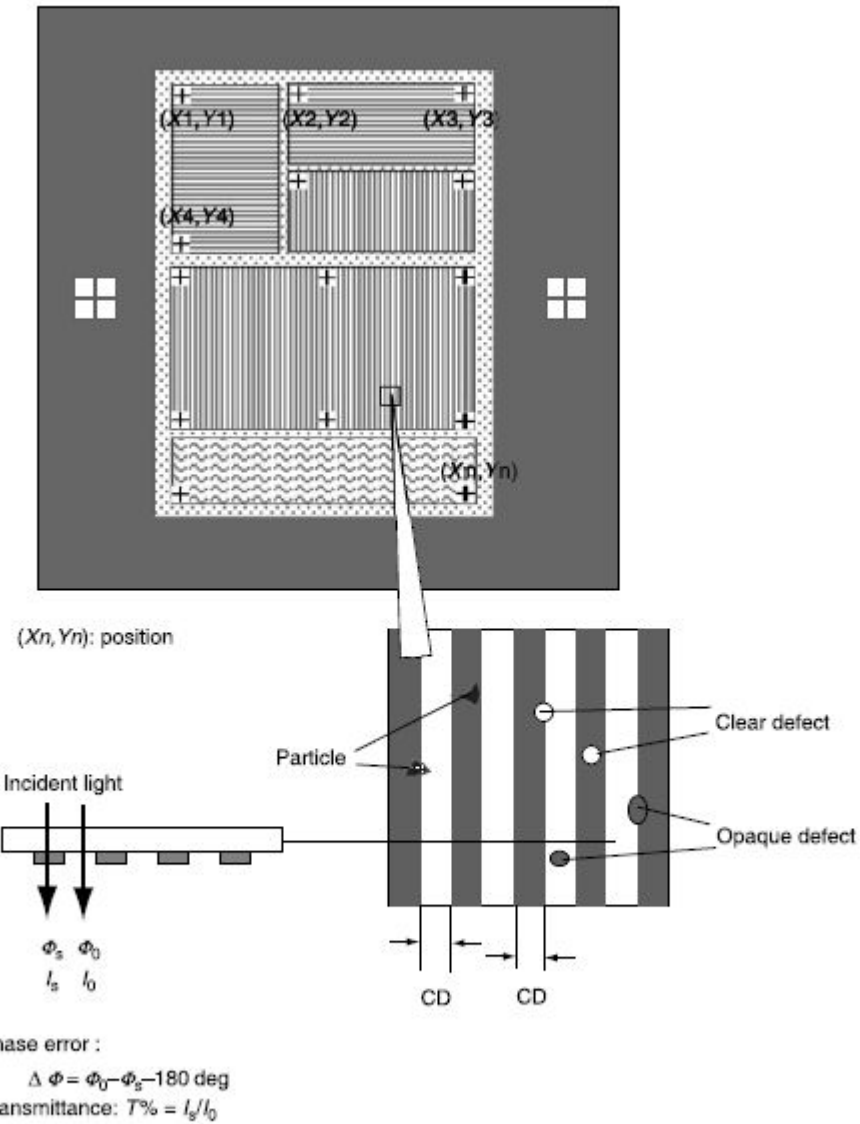


FIGURE 6.14
Mask quality items.

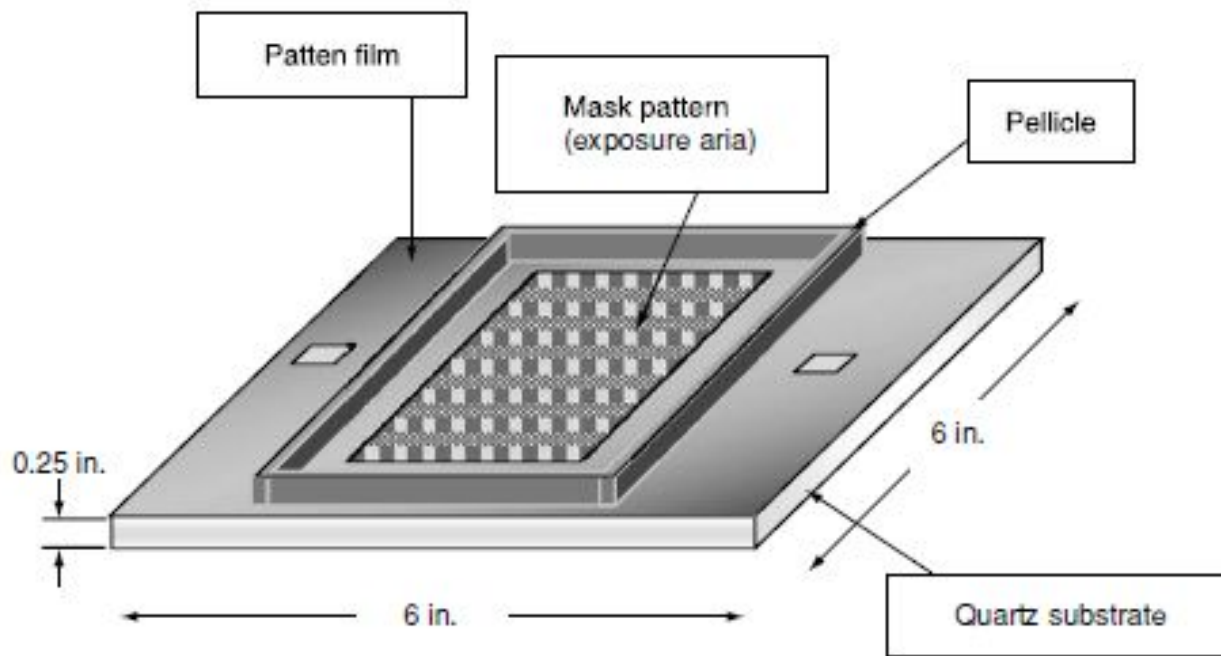


FIGURE 6.6
Schematic structure of optical mask (6-in. reduction mask: reticle).

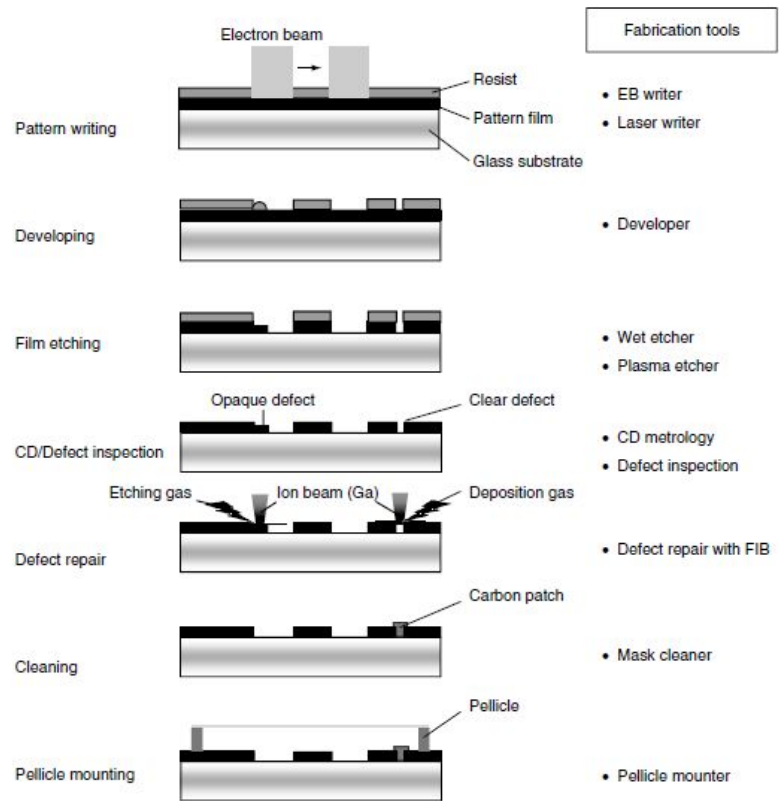


FIGURE 6.12
Process technologies of optical mask.

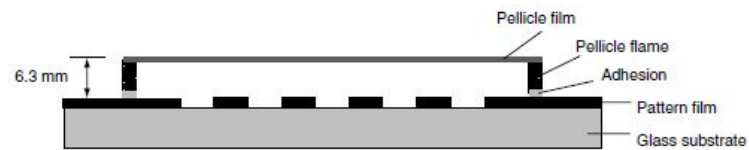
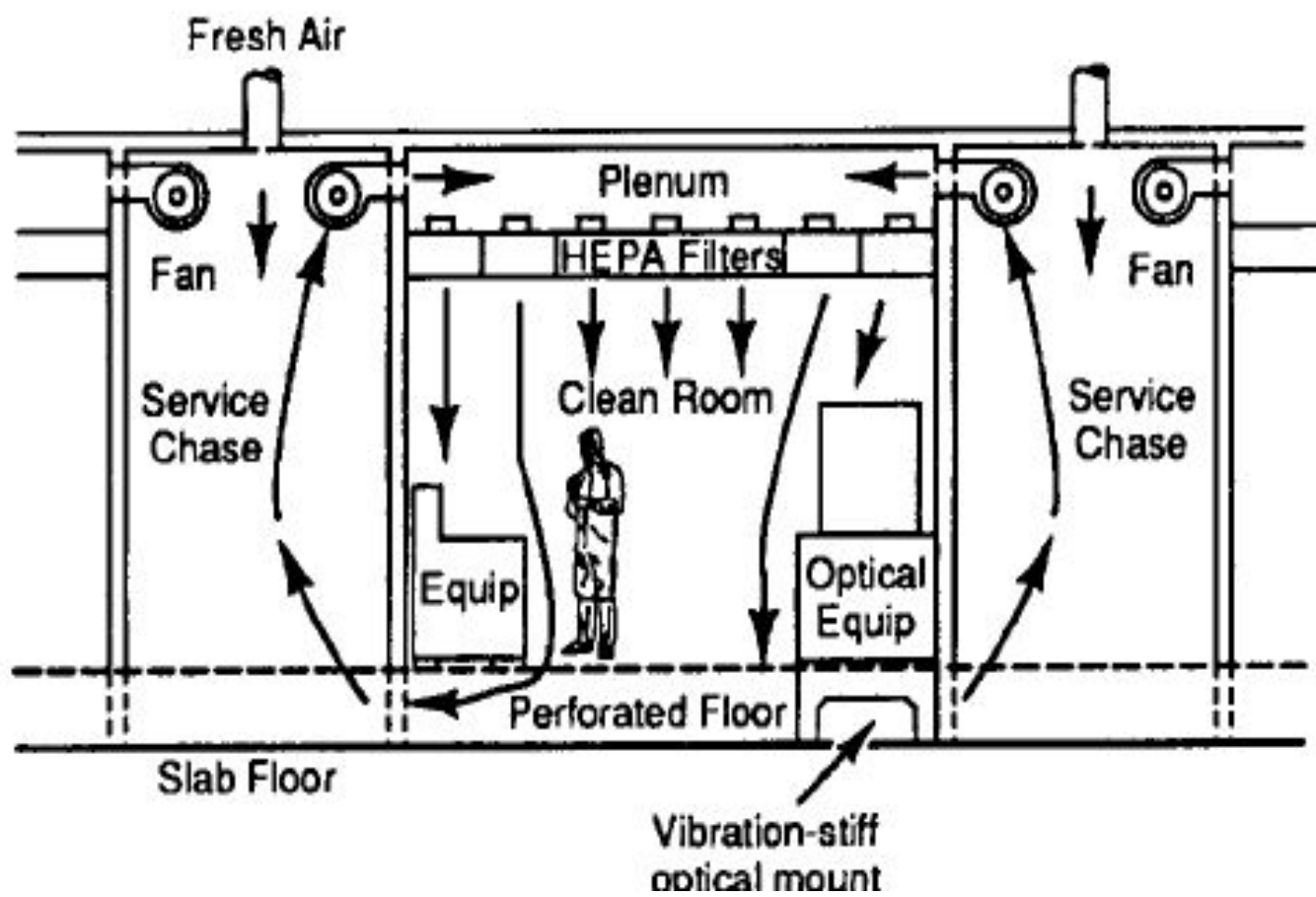


FIGURE 6.13
Structure of mask mounted pellicle (6-in. reticle).



If we expose a 200-mm wafer for 1 minute to an air stream under a laminar-flow condition at 30 m/min, how many dust particles will land on the wafer in a class 10 clean room?

SOLUTION For a class 10 clean room, there are 350 particles (0.5 μm and larger) per cubic meter. The air volume that goes over the wafer in 1 minute is

$$(30 \text{ m / min}) \times \pi \left(\frac{0.2 \text{ m}}{2} \right)^2 \times 1 \text{ minute} = 0.942 \text{ m}^3$$

The number of dust particles (0.5 μm and larger) contained in the air volume is $350 \times 0.942 = 330$ particles.

Therefore, if there are 400 IC chips on the wafer, the particle count amounts to one particle on each of 82% of the chips. Fortunately, only a fraction of the particles that land adhere to the wafer surface, and of those only a fraction are at a circuit location critical enough to cause a failure. However, the calculation indicates the importance of the clean room. ◀

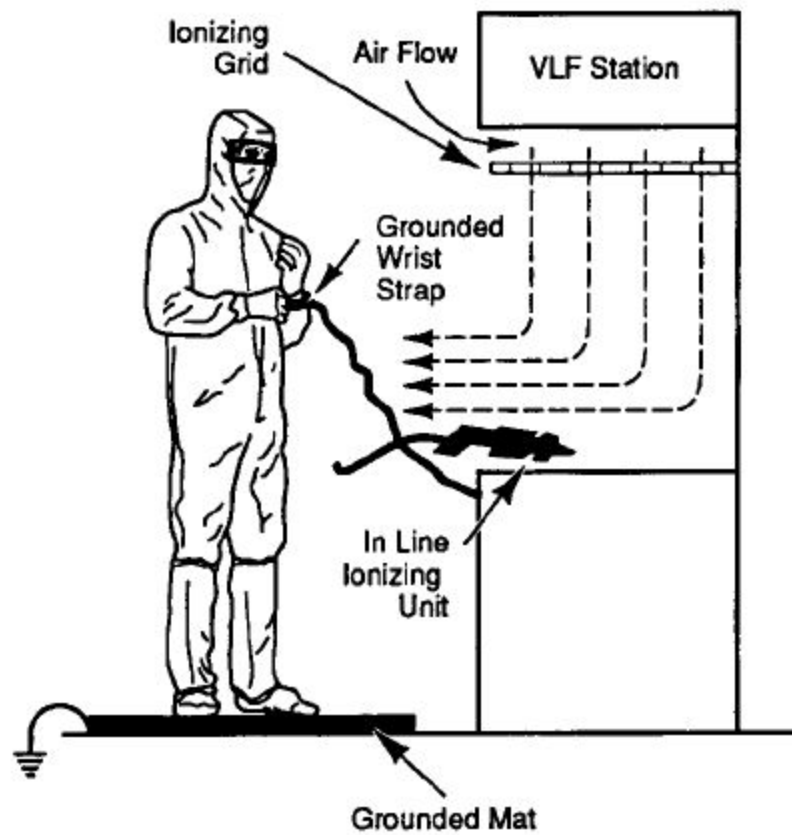
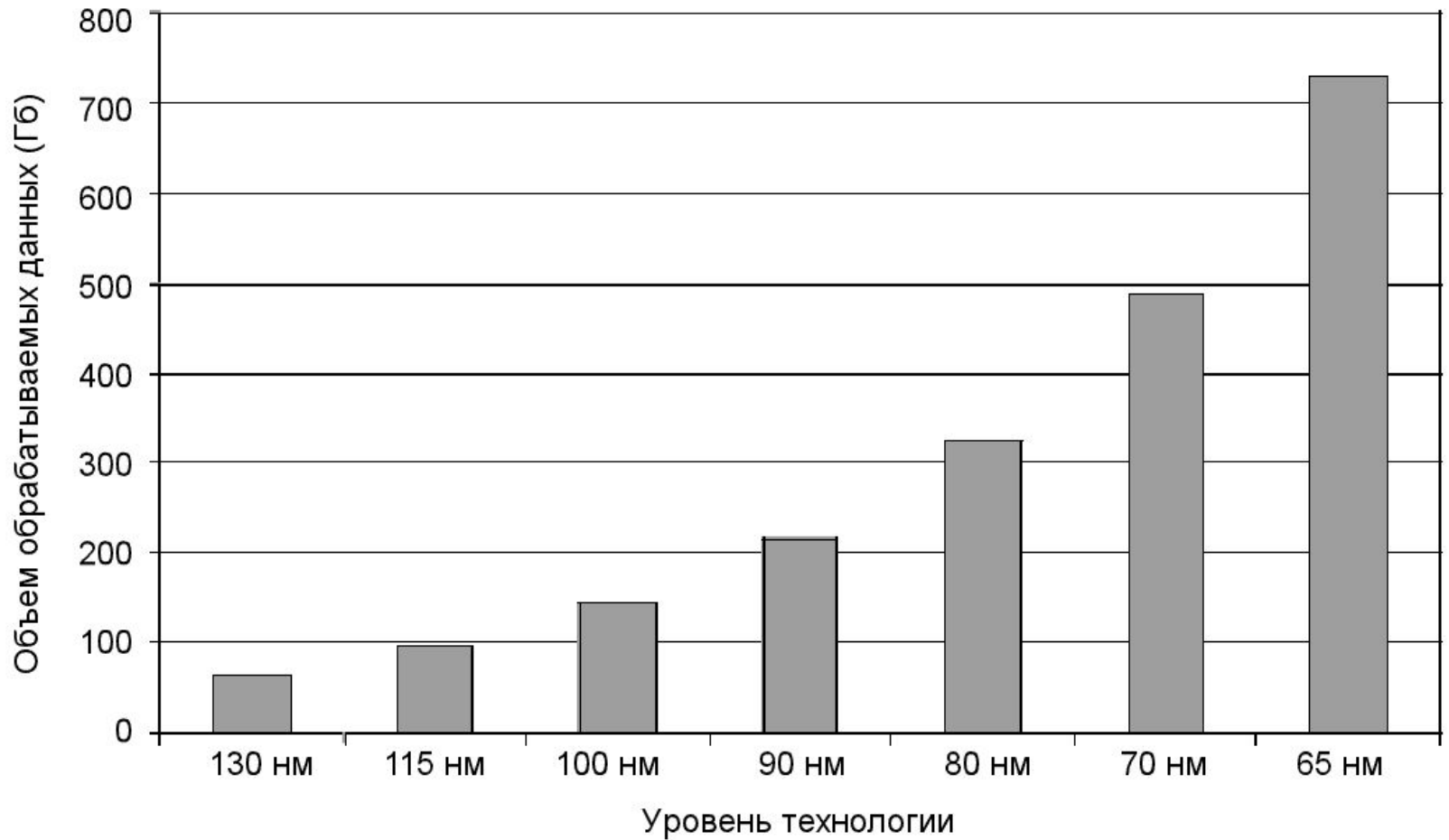
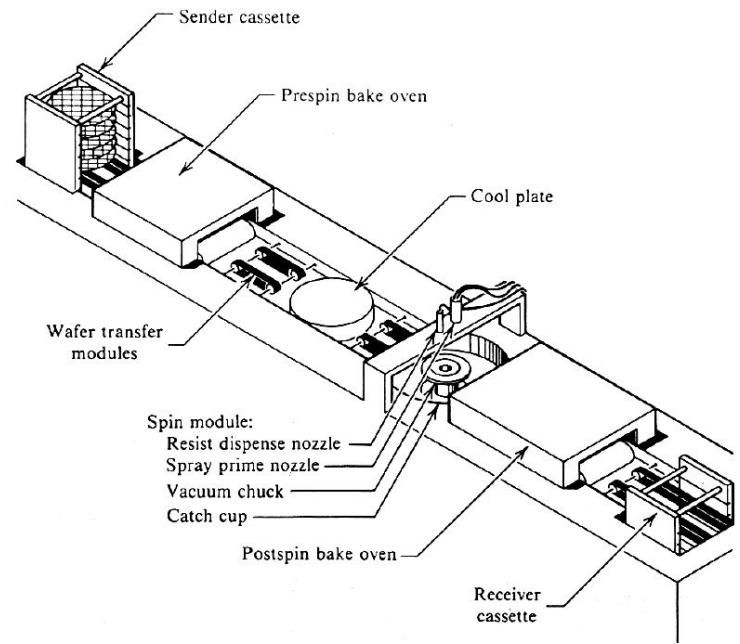


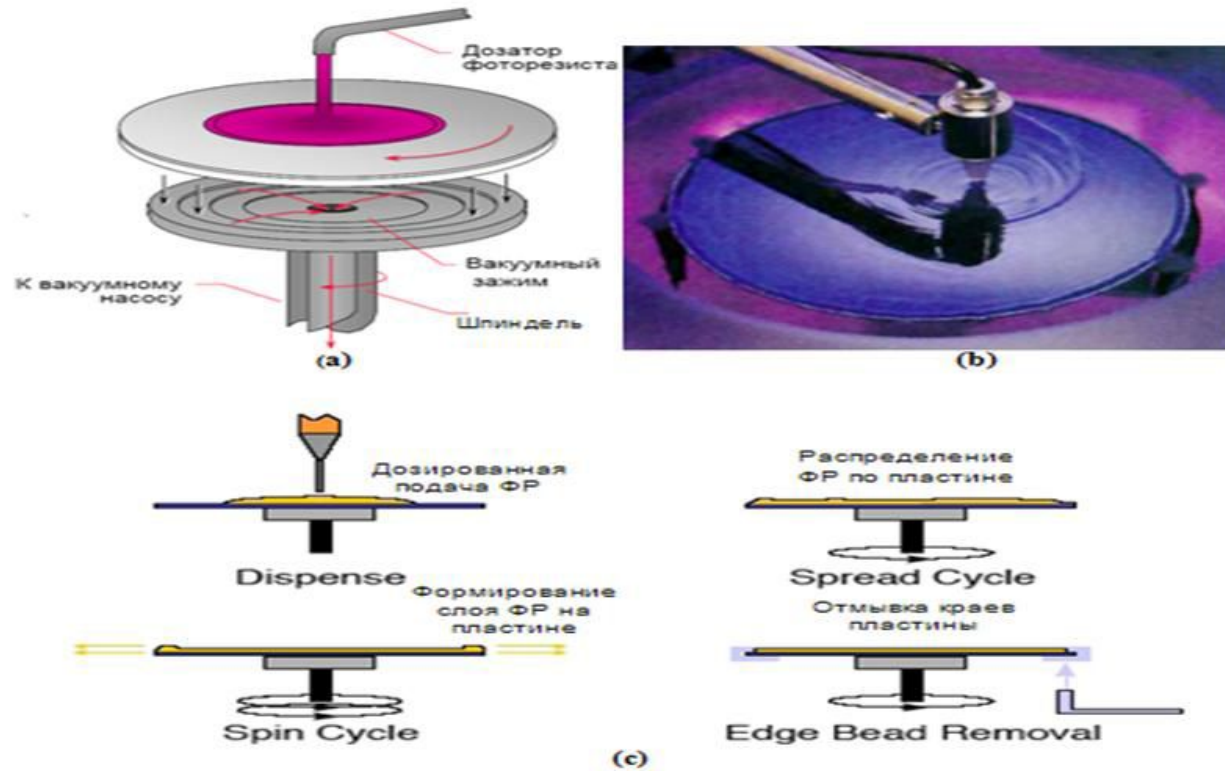
Figure 5.17 Static-charge reduction techniques.



Расчетные данные объема обрабатываемой информации при проектировании фотошаблонов для уровня технологии 130-65 нм.

Minimum Geometries (μm)	Total Fabrication Cost* (\$/Wafer)
1.5	300–350
1.0	400–450
0.8	500–600
0.5–0.18	800–1800
0.13–0.10	2000–4000**
* Estimated costs	
** Assumes 300 mm wafers	





Нанесения слоя фоторезиста на поверхность пластины методом центрифугирования:
 а - схема центрифуги; в - фотография центрифуги; с - стадии нанесения слоя фоторезиста на пластину



Установки контактной печати

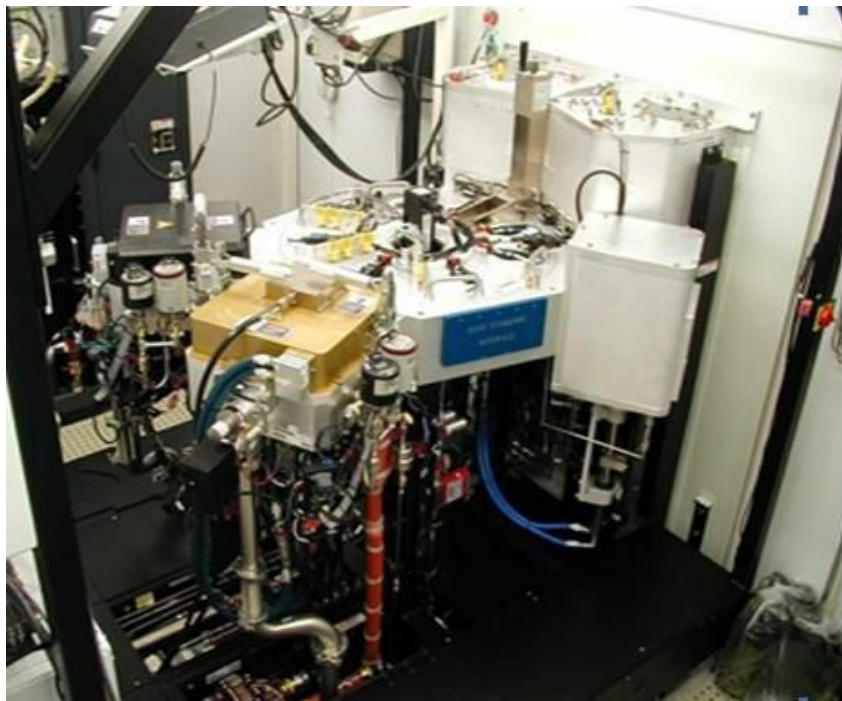


Жидкостная многомодульная трековая система формирования фоторезистивной маски компании DNS - K-SPIN 12/8

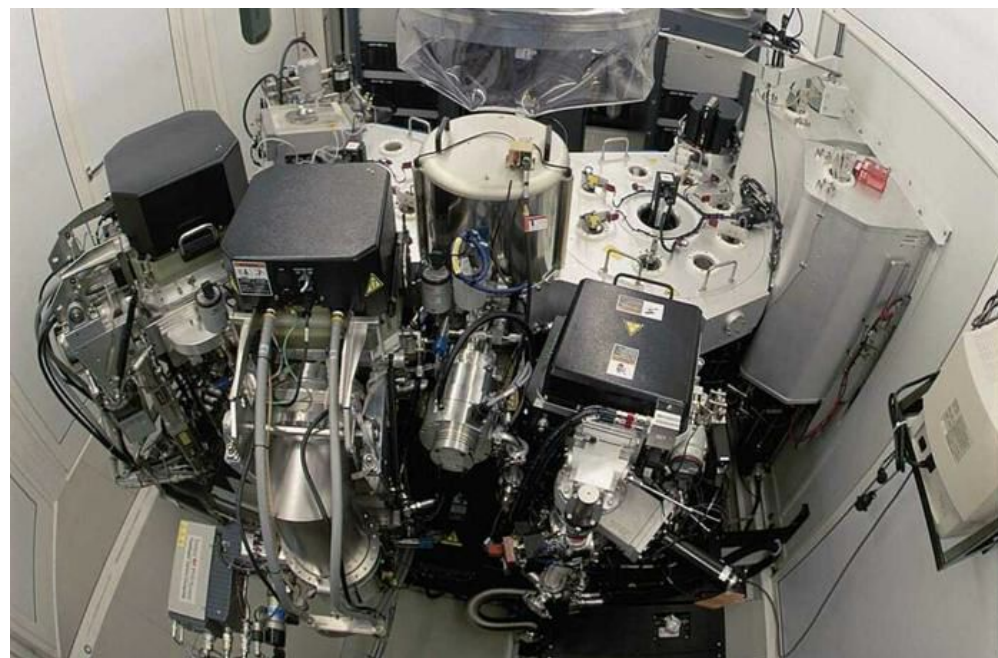
Модуль нанесения центрифугированием



Иммерсионный сканер NSR-S630D компании Nikon



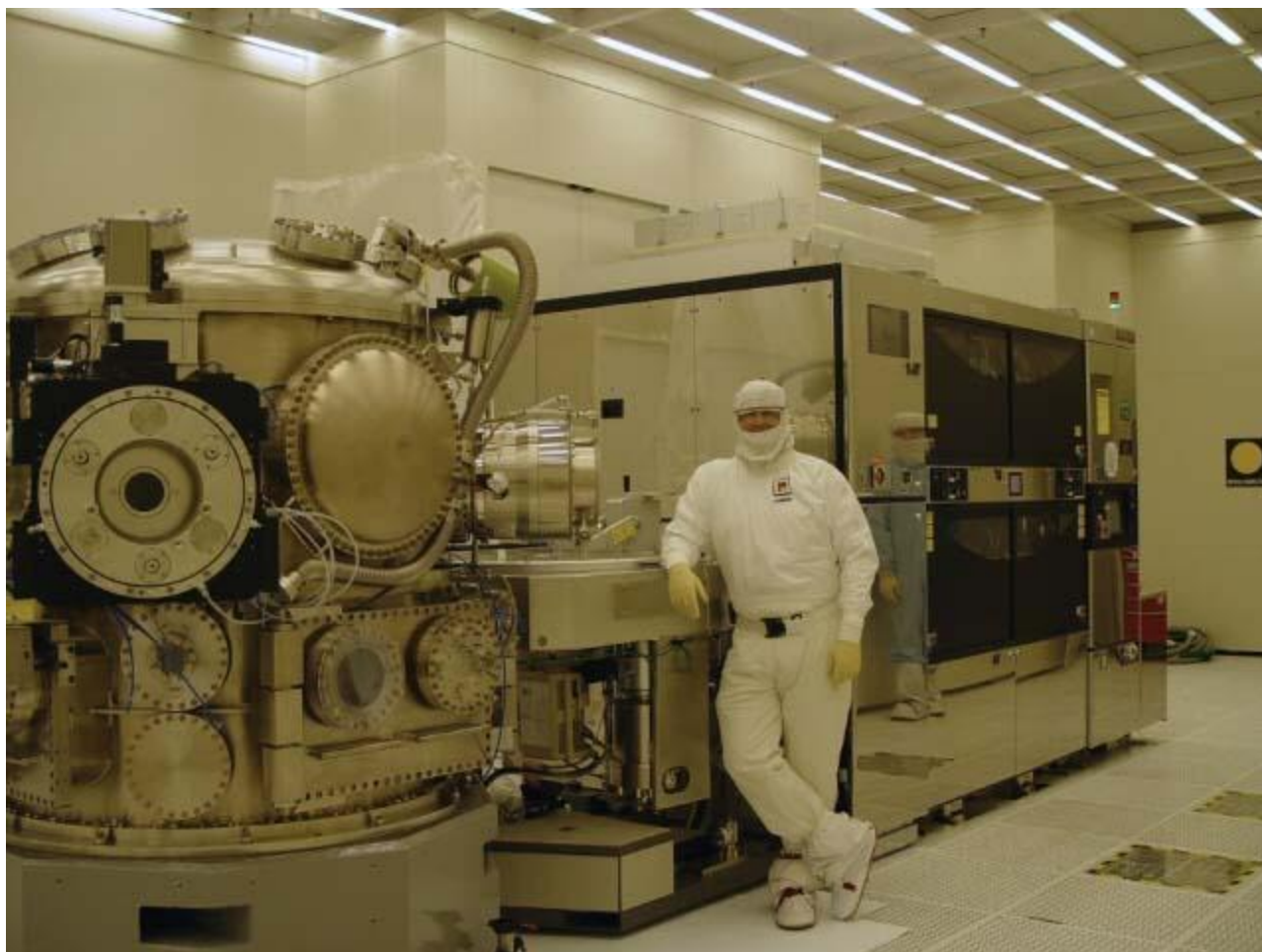
a



b

Специализированное кластерное производственное оборудование компании AMAT для вакуумно-плазменной обработки, травления и удаления маскирующих покрытий и функциональных слоев ИИС на базе транспортных платформ Centura (a) и Endura (b)

Сайт компании Applied Materials - www.amat.com



оборудование для ультрафиолетовой вакуумной фотолитографии (Extreme Ultraviolet Light Photolithography Tool).



Схема линейного кластерного производственного участка с технологическим оборудованием.



Схема кольцевого кластерного производственного участка с технологическим оборудованием