

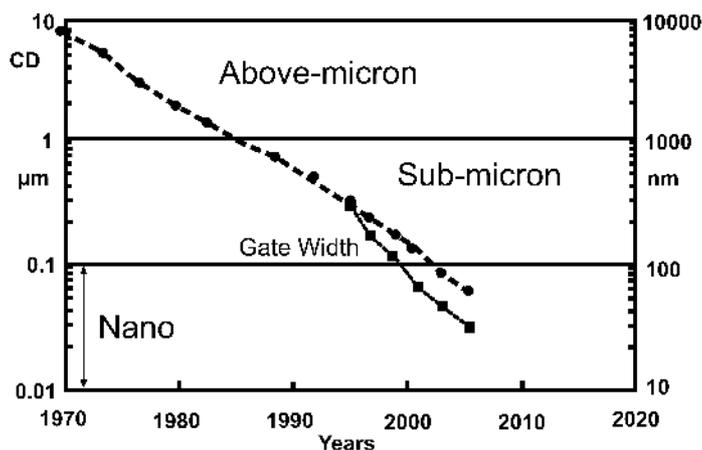
# Нанолитография в микроэлектронике

Р. П. Сейсян

## 1. Фотолитография в микроэлектронике

Последние полвека характеризовались беспрецедентно высокими темпами развития микроэлектроники. При этом эволюция большинства показателей микроэлектроники, как выясняется, носит экспоненциально быстрый характер, и до настоящего времени не всегда можно разглядеть даже начальные признаки замедления, не говоря уже о стагнации. Есть основания полагать, что первопричиной такого характера изменения самых различных показателей явилась возможность последовательного и непрерывного уменьшения минимального характеристического размера элемента интегральной схемы  $a_{min}$ , также носящего экспоненциальный характер. (Этот характеристический размер называют также «технологическим стандартом» или критическим размером - Critical Dimension, CD. В настоящей работе мы рассмотрим основные приёмы, при помощи которых осуществлялось это уменьшение CD, нередко путём преодоления, казалось бы очевидных физических ограничений.

На протяжении всего времени существования и развития микроэлектроники прогресс CD достигался исключительно применением фотолитографии. Степень владения методами фотолитографии в настоящее время предопределяет технический уровень и производственные возможности фирм, разрабатывающих и выпускающих интегральные схемы и другие полупроводниковые электронные приборы. Важнейшим преимуществом технологий фотолитографического формирования изображений является возможность одновременного и параллельного переноса изображения, состоящего из многих миллионов элементарных фрагментов – благодаря волновому характеру оптических процессов [1]. Именно это является основой высокой технической и экономической эффективности метода и возможности достижения уровня интеграции, характеризуемого на сегодняшний день количеством в  $10^7$ - $10^{10}$  элементов (транзисторов) на «чип». По уровню достигаемого CD фотолитография пересекла размер в 100 нм в направлении меньших размеров [2] и может далее называться «нанотехнологией» уже с 2000-2005 годов. Это обстоятельство можно проиллюстрировать графиком, приводимым на рис. 1.



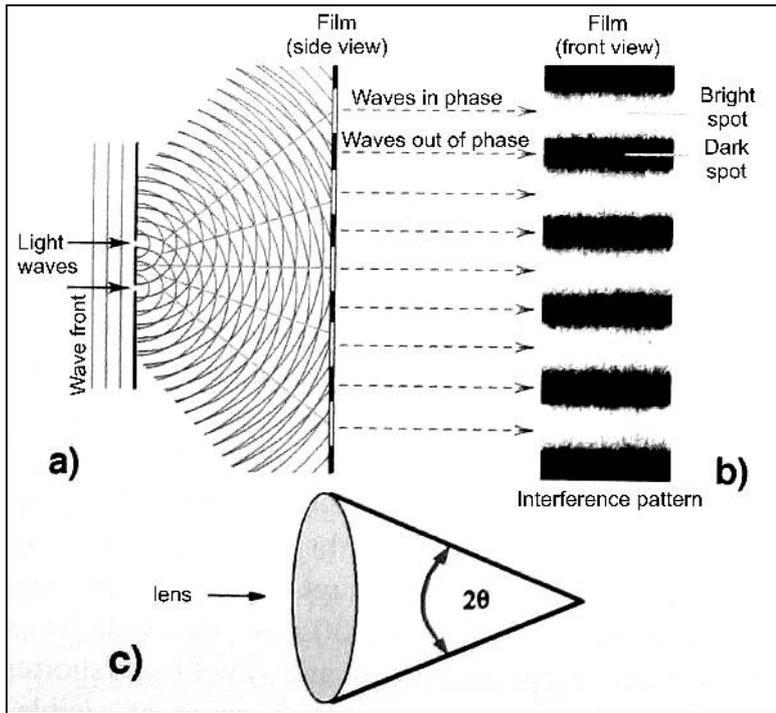
**Рис. 1.** Изменение по годам технологического стандарта интегральных схем. Отвечающая вниз кривая - длина затвора полевого транзистора.

Сначала нано - размеры были достигнуты длиной затвора полевого транзистора интегральной схемы (ИС) благодаря ряду технологических приёмов, обеспечивавших дополнительное сокращение его длины, затем, несколькими годами позже, всеми остальными элементами микросхемки ИС. С этого момента появилась тенденция

микроэлектронику, достигшую и преодолевшую соответствующую величину CD, именовать далее не микроэлектроникой, а наноэлектроникой, хотя основные принципы микроэлектроники при этом не претерпевают изменений.

## 2. Волновой характер переноса изображения и дифракционный предел

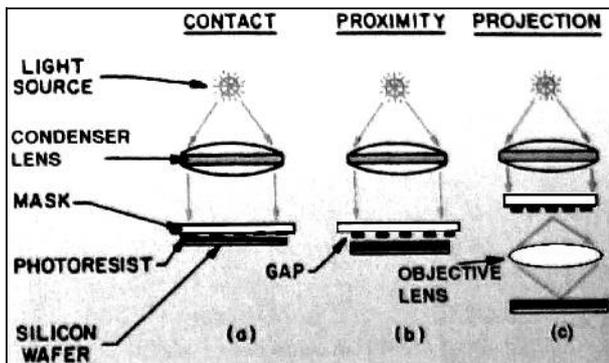
Волновой характер переноса изображения каждого топологического слоя ИС, задаваемого фотошаблоном, может быть проиллюстрирован рис. 2 из [3].



**Рис. 2.** Иллюстрация волнового характера процесса формирования изображения в оптической литографии. Снизу – к определению апертуры.

Отметим также, что сначала фотолитография обеспечивалась контактным, или «теневым» методом переноса изображения, доминировавшим до начала 80-х годов прошлого века, который затем уступил проекционному методу (см. рис.3), оказавшемуся существенно более эффективным в деле достижения меньших CD, так как здесь минимальный размер, ограниченный дифракционным пределом, пропорционален длине волны актиничного излучения, тогда как в

контактном методе – только корню квадратному длины волны [4], что делало недостаточно эффективным её уменьшение.



**Рис.3.** Варианты реализации оптической литографии: а. Контактная, или теньевая печать, б. Контактная печать с зазором, с. Проекционная печать.

Наиболее успешным методом создания микрорисунка в ИС, в конечном итоге, оказался проекционный перенос изображения с уменьшением масштаба. CD в нём регламентируется дифракционным пределом оптической системы, описываемым критерием Релея-Аббе. Изображение светящейся точки (рис. 4) может послужить выводом этого критерия, утверждающего, что CD прямо пропорционально произведению  $k_0$  на  $\lambda$ , и обратно пропорционально числовой апертуре  $NA$ , где  $\lambda$  длина волны актиничного излучения (т.е. излучения, обеспечивающего фотохимическую регистрацию изображения), а  $k_0$  – числовой коэффициент, равный для некогерентного света 0,61(см. [5]). На деле в реальном процессе этот коэффициент оказывается переменной величиной, существенно зависящей не только от степени когерентности, но и от метода регистрации изображения (его – в отличие от  $k_0$  обозначают  $k_1$ , и называют технологическим коэффициентом). При успешном применении некоторых технологических приёмов он может быть уменьшен до  $k_1 \sim 0,2$  [6](см. рис. 5). Так как при проекционном оптическом переносе изображения мы имеем дело с прямой пропорциональностью CD длине волны актиничного излучения, эффективно уменьшать  $\lambda$ , что и происходило естественным образом на протяжении всей истории развития микроэлектроники. Уменьшение длины волны и соответствующие источники излучения можно проследить сверху вниз по таблице 1.

Таблица 1.

Используемые в микроэлектронике источники света и соответствующие длины волн [7]

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 <sub>2</sub>	157nm	вакуумный УФ (VUV)

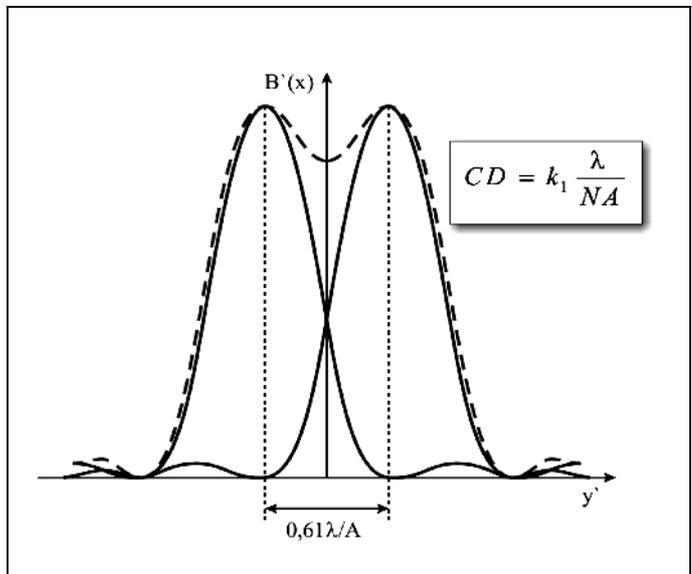
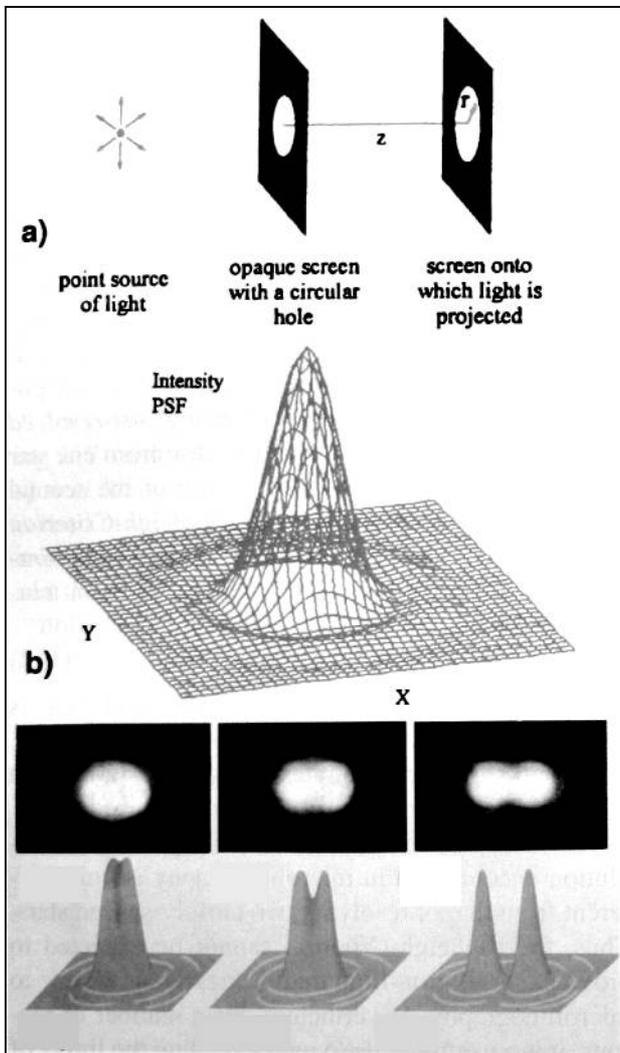
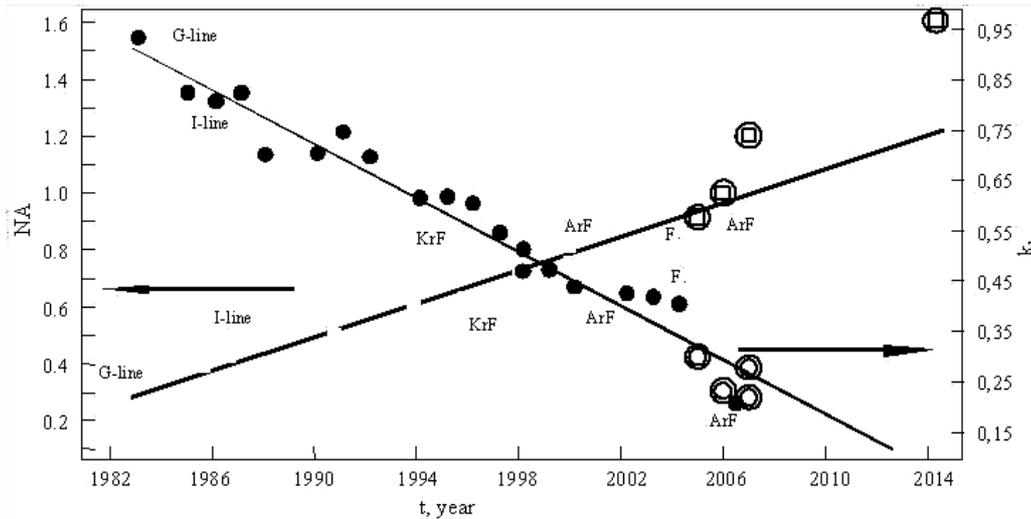


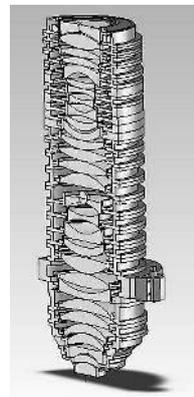
Рис. 4. Изображение светящейся точки (а), двух светящихся точек, разрешаемых по Релею-Аббе (б), и (с) – к формулировке критерия Релея-Аббе.



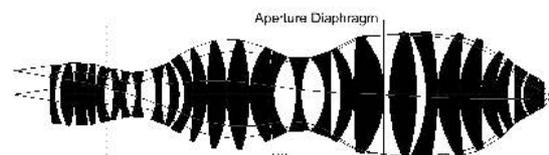
*Рис.5.Изменение по годам параметров, входящих в критерий Релея-Аббе: а. числовая апертура, б. «технологический» коэффициент  $k_1$ . На рисунке указан основной источник излучения (см. табл. 1)*

На рис.6 представлен один из наиболее современных инструментов нанотехнологии в микроэлектронном производстве, широко применяющийся на чиповых фабриках мира. Это сканер-степпер голландской фирмы ASML TWINSKAN XT1700i [8], обеспечивающий производство порядка 100 кремниевых пластин диаметром 300мм в час - в одном топологическом слое. При этом на пластине экспонируется более ста микропроцессорных чипов размером 33x26 мм<sup>2</sup>. Ширина линии излучения источника (эксимерного лазера ArF , 193 нм) на частоте порядка 10 kHz измеряется пикометрами. А основным элементом оптической системы является объектив фирмы Zeiss, изготовленный из кварца глубокой очистки и состоящий из трёх десятков линз диаметром до 300мм. Пример отечественного аналога, изготовленного с использованием монокристаллов флюорита [11], приводится на рис. 7.

*Рис.6. Внешний вид одного из наиболее популярных степперов-сканеров голландской фирмы ASML – TWSINSCAN XT1700i, NA = 1.2, D = 45nm.*



*Рис.7. Разрез и структура типичного изображающего объектива – по данным [11].*



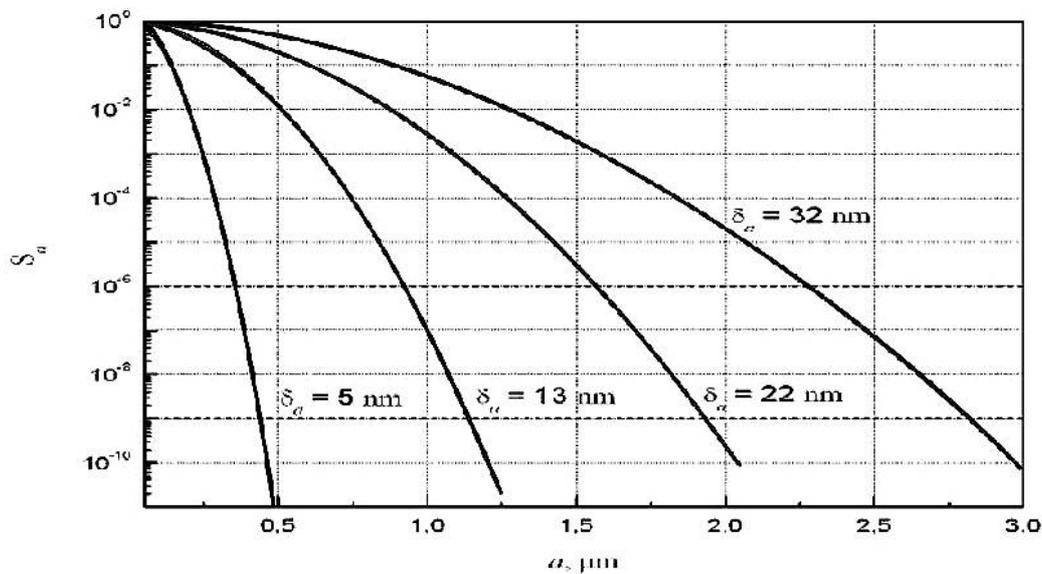
### 3. Фотолитография и электролитография

Что касается дифракционного предела, электролитография (ЭЛ) всегда считалась альтернативой фотолитографии, способной разрешить все проблемы перехода к большему разрешению – к нанолитографии. Потенциальные возможности этой техники хорошо известны (например, электронный микроскоп). Как правило, ЭЛ всегда опережала ФЛ по разрешению. Но, в принципе, использование острогофокусированного пучка приводит к поэлементному (или

мелкофрагментарному) экспонированию, что удлиняет результирующую экспозицию. Это вступает в противоречие с экспоненциальным ростом интеграции, или с выполнением «закона» Мура. Ещё Уолмарком [9] на заре микроэлектроники было отмечено, что между предельно малым размером элемента микрорисунка на поверхности полупроводниковой пластины, достигаемым при применении того или иного технологического метода –  $CD$ , и его реализацией в ИС должна существовать некоторая дистанция, определяемая нормой допуска на электрические параметры  $\Delta P/P$  и степенью интеграции  $n$ . Этот вывод вполне актуален и сегодня. Действительно, для нормального функционирования схемы мы должны потребовать, чтобы с отличной от нуля вероятностью (соответствующей выходу  $\eta$ ) ни один из  $n$  элементов не превысил нормы допуска на параметр  $P$ . Это и приведет к тому, что мы не сможем воспользоваться минимальной величиной  $a_{min} = CD$ , и должны будем отступить в сторону больших размеров  $a_{min} \gg CD$ . Так, если отклонения размеров от заданных распределены по плоскости равномерно, случайно, и подчиняются нормальному распределению, вероятность того, что отличие параметра  $\Pi$  от номинала, не превышает нормы допуска на величину параметра  $\Delta \Pi$  можно вычислить, пользуясь интегралом вероятностей Гаусса [9]:

$$S_a = 1 - \left[ \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{y_1} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \right]^2, \text{ где } y_1 = a/(2)^{1/2} \delta_a.$$

Согласно теории вероятностей это неизбежно, и для  $n$  случайных независимых событий мы должны будем потребовать  $S_a n > 1$ . Допустимый минимальный размер элемента ИС ( $a_{min}$ ) для реализуемого  $CD = \delta$ , согласно теории вероятностей можно определить по рис.8.



**Рис. 8.** Допустимый минимальный размер элемента ИС ( $a_{min}$ ) для реализуемого  $CD = \delta$ , согласно теории вероятностей.

Результат выглядит несколько обескураживающим: даже для столь высоких технологических стандартов, как 32-22 нм, минимальный размер элемента в УБИС с  $10^6$  элементов должен составить величину в 1,5-2,3 мкм, а для  $10^9$  - 1,9-2,8 мкм; уменьшение стандарта вплоть до 5-13 нм, являющееся целью разработок следующего десятилетия, могло бы обеспечить возможность изготовления УБИС, состоящих из элементов с – как минимум - субмикронными размерами [10]. Меньшие размеры при большом числе элементов неизбежно приведут к недопустимым отклонениям реализовавшихся параметров ИС. Однако, в действительности ИС с таким уровнем интеграции сегодня уже существуют, и созданы они по технологическим стандартам практически соответствующим предельным технологическим возможностям фотолитографии. Это обстоятельство можно понять, только если не считать процесс изготовления каждого элемента

(транзистора) ИС независимым случайным событием. Так могло бы быть в случае последовательного и независимого изготовления элементов схемы остросфокусированным электронным лучом, но не в волновом методе переноса изображения, когда все элементы «прорисовываются» одновременно и коррелированно. Можно полагать, что это обстоятельство и является главным источником преимущества фотолитографии и причиной её доминирующего положения в микроэлектронике во все годы её развития [1,10].

#### 4. Преодоление фотолитографией дифракционного предела

Современная оптическая фотолитография по технологическому стандарту ушла далеко за дифракционный предел в сторону меньших размеров, и на повестке дня сегодня уже освоение с её помощью  $CD=22\text{nm}$ . На современном фотолитографическом объективе с числовой апертурой 0,95 и при применении эксимерного лазера ArF мы получим в качестве исходной длины Релея на воздухе 124 нм. Сравнивая её с реализуемыми на практике CD, в зависимости от реально применяемой длины волны  $\lambda$ , исходной числовой апертуры объектива и её увеличения (уменьшения  $\lambda$ ) за счёт иммерсии, мы получим ту, или иную меру преодоления дифракционного предела по Релею-Аббе. Эту составляющую мы будем учитывать как реализацию определённого «технологического» коэффициента  $k_1$ , меньшего, чем релеевский  $k_0 = 0,61$ . Среди методов преодоления дифракционного предела рассмотрим четыре основных процесса. Это следующие приёмы.

- Коррекция оптической близости (1)
- Введение искусственного фазового сдвига (2)
- Иммерсия (3)
- Двойное экспонирование и двойное создание микрорисунка («паттернирование») (4а и 4б)

Помимо этих четырёх способов преодоления дифракционного ограничения, как правило, для тех же целей одновременно и независимо применяются ещё

- а) внеосевое освещение маски, а также
- б) многослойный фоторезист и силилирование в процессе проявления рисунка.

Рассмотрим их по отдельности.

#### 5. Коррекция оптической близости

При экспонировании микроизображения с размерами равными и меньшими предельного размера по Релею-Аббе, изображение претерпевает различного рода искажения. Это - сужение или недоэкспонирование узкой длинной линии, сокращение и округление её концов, заплывание узких зазоров и острых углов т.п. С этими искажениями можно бороться, создавая упреждающие компенсирующие их элементы на фотошаблоне (см., например, [3,4]). Один из типичных случаев на примере Т-образного и Г-образного элементов ИС приводится на рис. 9.

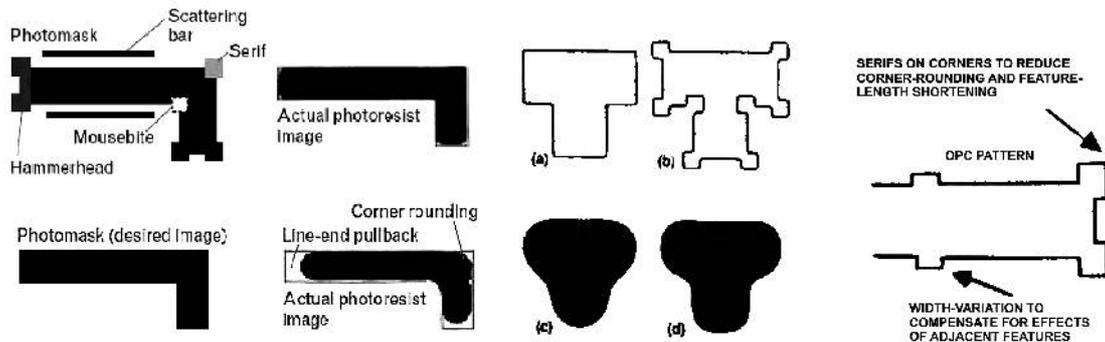


Рис. 9. Коррекция оптической близости на примере Т-образного и Г-образного элементов ИС.

Здесь мы видим угловые засечки для уменьшения скруглений и предотвращения укорачивания элементов рисунка, а также локальные изменения ширины линии для предотвращения её сужения. Эти элементы позволяют воспроизвести необходимую структуру микрорисунка ИС при размерах, существенно меньших, чем «релеевский», вычисленный для заданных длины волны и числовой апертуры по формуле (1). Их введение существенно усложняют фотошаблон и повышают требования к средствам их производства, но делают в конечном итоге рисунок топологического слоя приемлемым для «штатного» функционирования элемента ИС в условиях работы с размерами, переходящими дифракционный предел. Нарботаны комплекты программ, позволяющих вводить в фотошаблон набор элементов, корректирующих эффекты оптической близости и моделировать результат их применения. Приёмы коррекции эффектов оптической близости стали неотъемлемой частью технологического процесса СБИС и УБИС.

## 6. Введение искусственного фазового сдвига

Введение фазосдвигающих элементов - это один из мощнейших приёмов для работы с размерами элементов ИС, находящимися за гранью дифракционного предела, был предложен ещё в начале 80-х годов прошлого века М.Левенсоном и др. [12]. Он состоит во введении в структуру фотошаблона дополнительных элементов, или в вытравливании канавки, сдвигающих фазу проходящего света. Идея может быть проиллюстрирована рис.10, из которого видно, что волна электромагнитного излучения, проходящая сквозь фотошаблон на двух смежных участках микрорисунка может проинтерферировать деструктивно и, в случае разности фаз в  $180^\circ$  привести к нулю сигнала.

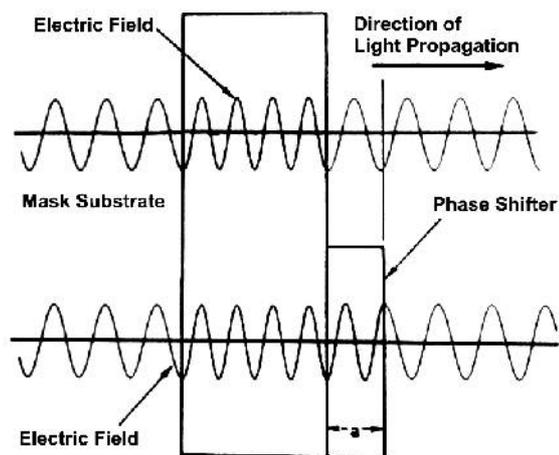


Рис. 10. Иллюстрация принципа «работы» маски с фазовым сдвигом.

Для этого либо вытравливается прямоугольная канавка в материале основы фотошаблона, либо наносится слой прозрачного материала с заданной толщиной и определённым коэффициентом преломления  $n > 1$ . Однако, легко увидеть, что простое применение фазосдвигающих вставок из материала необходимой толщины, так что на этой толщине образуется фазовый сдвиг  $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)(2n - 1)$ , не вполне универсально и не решает всех задач формирования микрорисунка ИС. Для различных частей ИС применяются, по крайней мере, пять вариантов вставок для создания фазового сдвига, рассматриваемых Г.Левинсоном в [4], приводимые в Табл. 2. Они нередко они применяются в комбинации друг с другом, или с масками от других элементов планарного процесса. Тем не менее, по своей сути все эти варианты происходят и работы [12].

Фазосдвигающие маски АЛТ создают сильный эффект увеличения разрешения, но их применение ограничено скоплениями узких линий с узкими зазорами, в то же время окаймляющий фазосдвигающий элемент (RIM) не создаёт столь сильного эффекта, хотя возможности его применения весьма широки. Его можно применять и на изолированных элементах ИС. То же можно сказать и о фазосдвигающих элементах консольного типа (ОТР), с той лишь разницей, что ОТР требует дополнительного места. К числу наиболее сильных средств следует отнести элементы типа «фазовой границы» (PHE), но они годятся, прежде всего, для создания одиночных тонких линий. Например, бесхромовая маска с относительно широкой полосой прозрачного материала подложки, вытравленная из подложки фотошаблона, при экспонировании создаст две тёмные предельно узкие полосы на обеих фазовых границах (рис. 11).

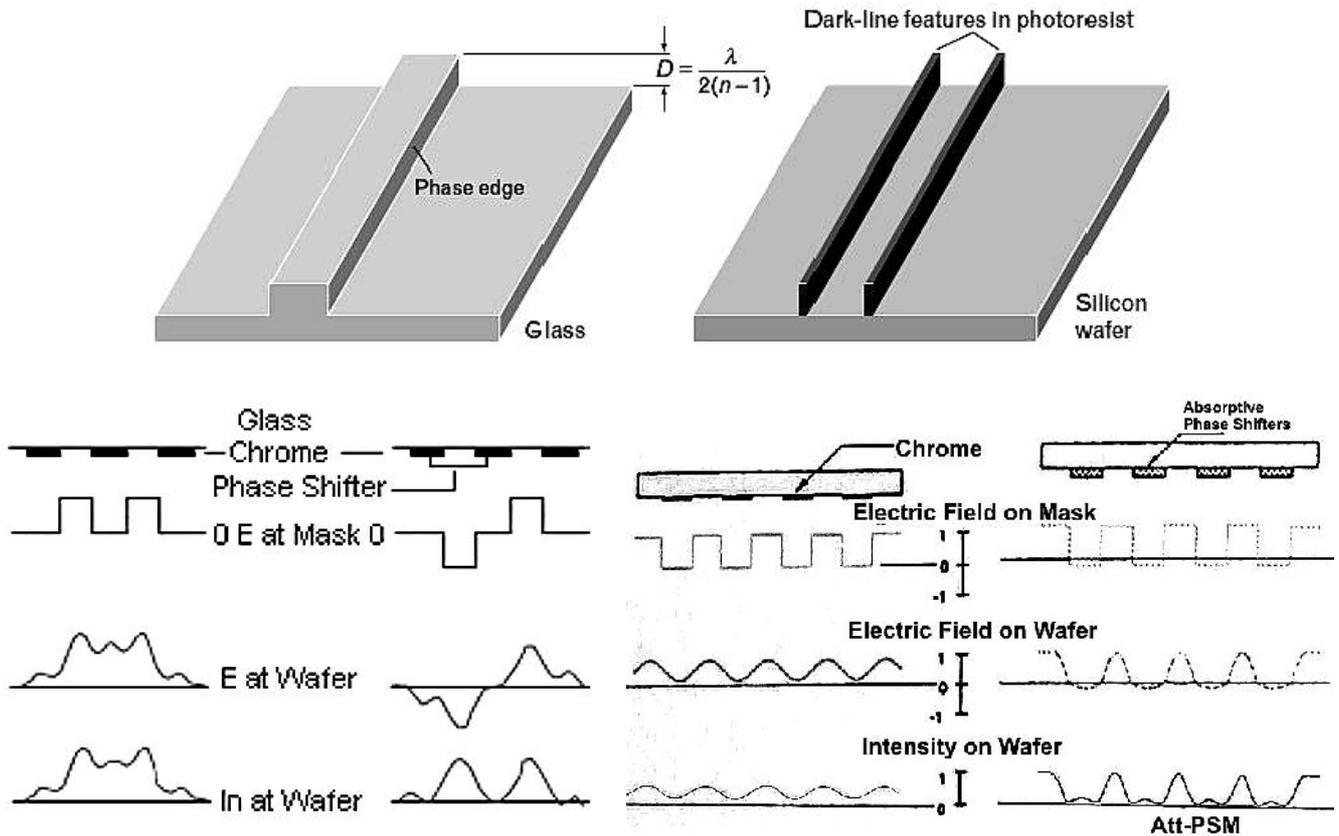


Рис.11. «Работа» фазосдвигающего элемента типа «фазовой границы» (PHE) (а), «чередующихся полос» (ALT) (б), «полутонных» (ATT) (в).

Существенно более универсальны и получили весьма широкое применение «полутонные» фазосдвигающие маски (ATT), изготавливаемые как комбинация прозрачного сдвигающего фазу слоя и полупрозрачного поглощающего покрытия. Эти элементы часто применяют для создания контактных площадок и других изолированных элементов. Различные типы элементов с фазовым сдвигом показаны на рис. 12. Проиллюстрировать реальное совместное применение различных элементов фазового сдвига при создании современного транзисторного узла ИС можно рисунком 13. Здесь применяются два вида масок и два слоя фоторезиста. Первый служит для вытравливания в подложке маски шести прямоугольных лунок с глубиной, необходимой для 180-градусного фазового сдвига, создающего при экспонировании узкие линии затворов полевых транзисторов. Вторая – хромовая, ограничивает протяжённость этих линий и создаёт остающиеся элементы рисунка.

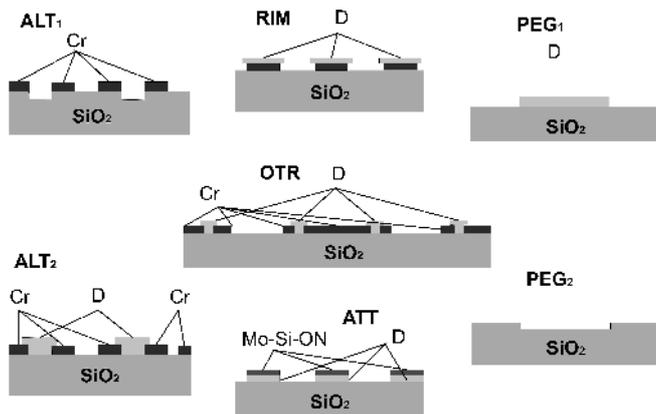


Рис.12. Конструкции различных элементов фазового сдвига: а) чередующегося (ALT), б) окаймляющего (RIM), в) «полутонных» ослабленных элементов (ATT) и г) консольного типа (OTR).

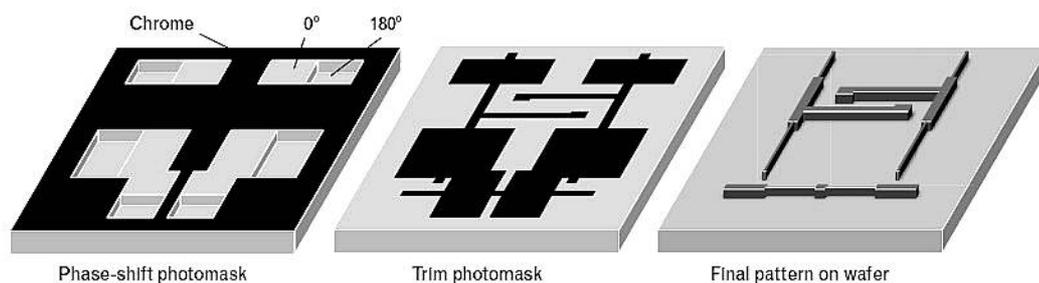


Рис. 13. Пример решения транзисторного узла ИС при помощи комбинации масок с различными видами фазосдвигающих элементов (например, [14]).

### 7. Внеосевое освещение маски

Одним из важнейших элементов фотолитографического процесса является правильное освещение маски. Можно показать, что нормальное освещение маски с элементами меньше дифракционного предела не может способствовать правильному переносу изображения маски (см., например, [7]). Действительно, при нормальном падении пучка света только нулевой порядок дифракции попадает в зрачок объектива, в то время как другие лучи (+1 и -1 порядки дифракции) выйдут за пределы поля зрения (рис. 14). Изображение не формируется, так как отдельный луч представляет собой плоскую волну, не несущую никакой пространственной информации. Когда освещающий пучок является наклонным, в зрачок изображающей оптики попадает, помимо луча нулевого порядка ещё и луч первого порядка. В таком случае рисунок формируется, более того, улучшается глубина фокуса. Изображения, формируемые таким образом объективами с меньшей числовой апертурой, обладают при этом большей глубиной фокуса.

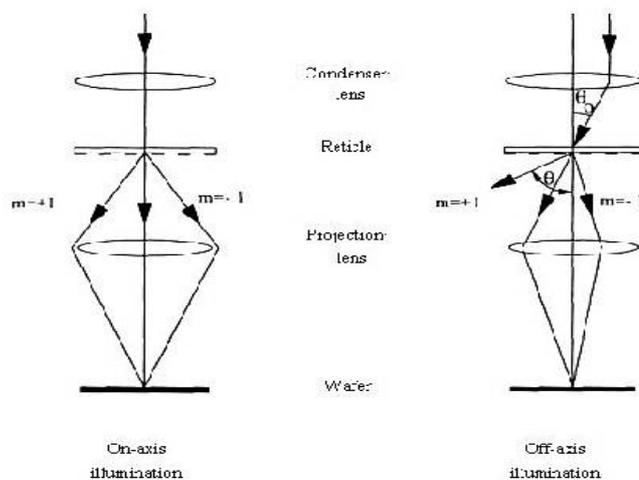


Рис.14. Иллюстрация к внеосевому освещению маски.

### 8. Иммерсия

Иммерсирование дало мощный импульс развитию микроэлектроники и уменьшению минимального размера воспроизводимого в ИС элемента. На рис. 5 хорошо виден скачок в значении числовой апертуры воспроизводящего объектива, приходящийся на период 2007-8 годов. Хотя само по себе применение иммерсии в оптических приборах отнюдь не ново и может проследиваться ещё с 18-го века в письмах Левенгука в Британское королевское общество, применение иммерсии в фотолитографии долго казалось сомнительным. Принято считать, что первым добиться успеха здесь удалось профессору Рочестерского технологического института Брюсу Смигу [13], показавшему, что вполне применимой иммерсионной жидкостью является простая вода, которую необходимо впрыснуть в промежуток между объективом и

полупроводниковой пластиной (рис. 15). Вода вполне прозрачна на 193 нм и имеет при этом коэффициент преломления 1.44. Соответственно, длина волны эксимерного лазера в иммерсионной среде составит не 193 нм, а 134 нм. Числовая апертура объектива может быть сосчитана как  $NA = n \sin\alpha$ . Близкая к пределу наилучшая полученная величина числовой апертура изображающего объектива на воздухе  $NA_0$ , составляет сегодня 0,95, что с водяной иммерсией даст  $NA = n NA_0$ , или 1.368 (ход лучей в иммерсионной системе показан на рис.16). Использование воды привело к существенному падению выхода годных чипов по причине выделения растворённых в ней газов в форме пузырьков, что заставляло некоторые фирмы до поры до времени воздерживаться от иммерсирования – пока не нашлись достаточно эффективные средства борьбы с их образованием. Более того, нашлись иммерсионные жидкости с коэффициентом преломления, большим, чем у воды, но – по разным причинам, они на сегодняшний день не нашли широкого применения.

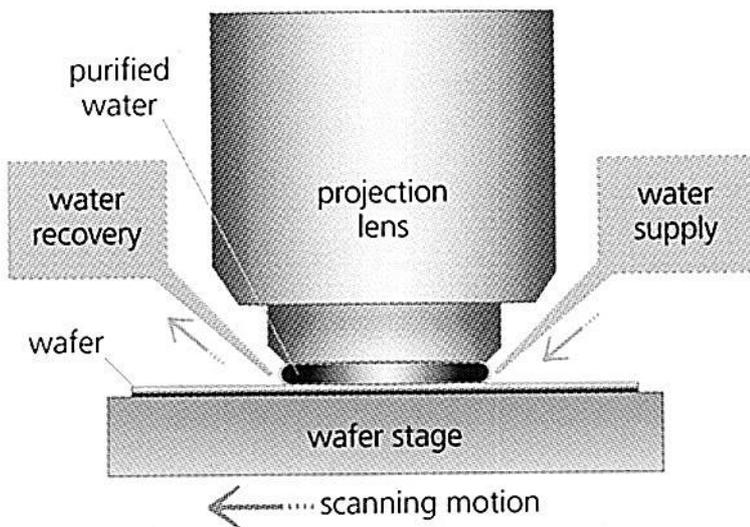
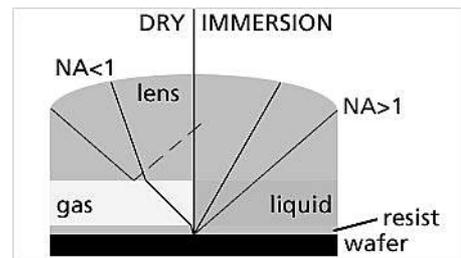


Рис. 15. Иммерсионный элемент в проекционной оптике (схематически).

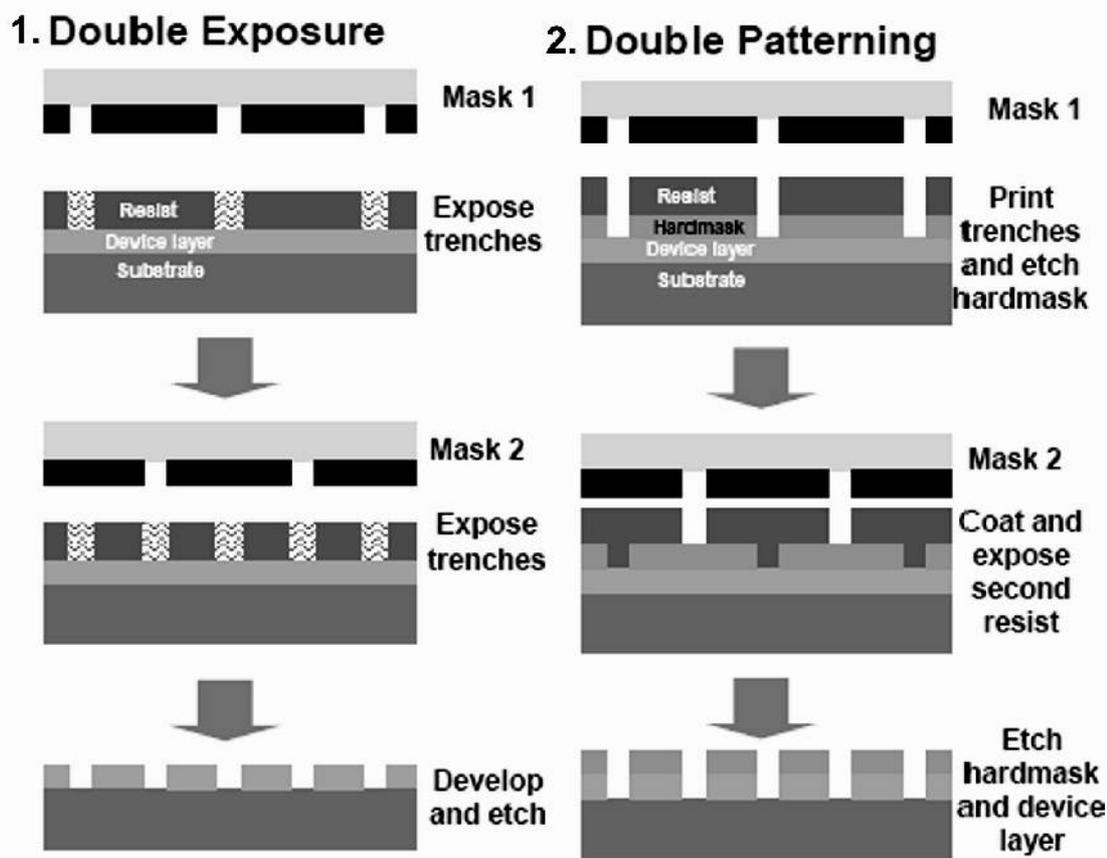
Рис. 16. Ход лучей между изображающим объективом и полупроводниковой пластиной на воздухе и с иммерсионной вставкой.



## 9. Двойное экспонирование и двойное «паттернирование»

Двойное экспонирование и двойное «паттернирование» [14], или двойное создание микрорисунка, появились в арсенале средств планарной технологии относительно недавно, но именно их применению микроэлектроника обязана наивысшими достижениями в уменьшении критических размеров элементов ИС. Двойное экспонирование сводится к применению двух фотошаблонов с различными, дополняющими друг друга микрорисунками при экспонировании одного и того же слоя фоторезиста. Двойное «паттернирование» это более радикальный приём, он состоит в поочерёдном создании двух взаимодополняющих микрорисунков, задаваемых парой согласованных фотошаблонов, притом фоторезист наносится, экспонируется и проявляется дважды, образуя два встроенных один в другой микрорисунка («pattern»), см. рис. 17. Понятно, что такие технологии стали возможны лишь в результате разработки и усовершенствования нового класса фоторезистов, так называемых «химически усиленных» или “chemically amplified” (CA) фоторезистов [3,15]. Эти резисты были созданы в начале 80-х на IBM при необходимости перехода к стандарту 250 нм. Выяснилось, что традиционные резисты с фоточувствительной компонентой на нафтохинондиазидах (НХД) и на новолачной смоле не могут работать на длинах волн 248 нм и короче, в связи с сильным поглощением смолы и НХД, а также со слабой фоточувствительностью последнего. CA резисты – это принципиально новый тип резистов, в которых основная фотохимическая реакция не является прямым следствием поглощения кванта излучения. Схема его работы приводится на рис. 18. С фотоном непосредственно реагирует фотокислотный генератор (photo acid generator – PAG), в небольшой пропорции включаемый в состав резиста, он выделяет при этом кислоту, которая модифицирует звенья полимерной матрицы, делая их растворимыми. Важно при этом, что, прореагировав со звеньями полимерной цепочки матрицы, PAG регенерируется – наподобие катализатора, и так может происходить до

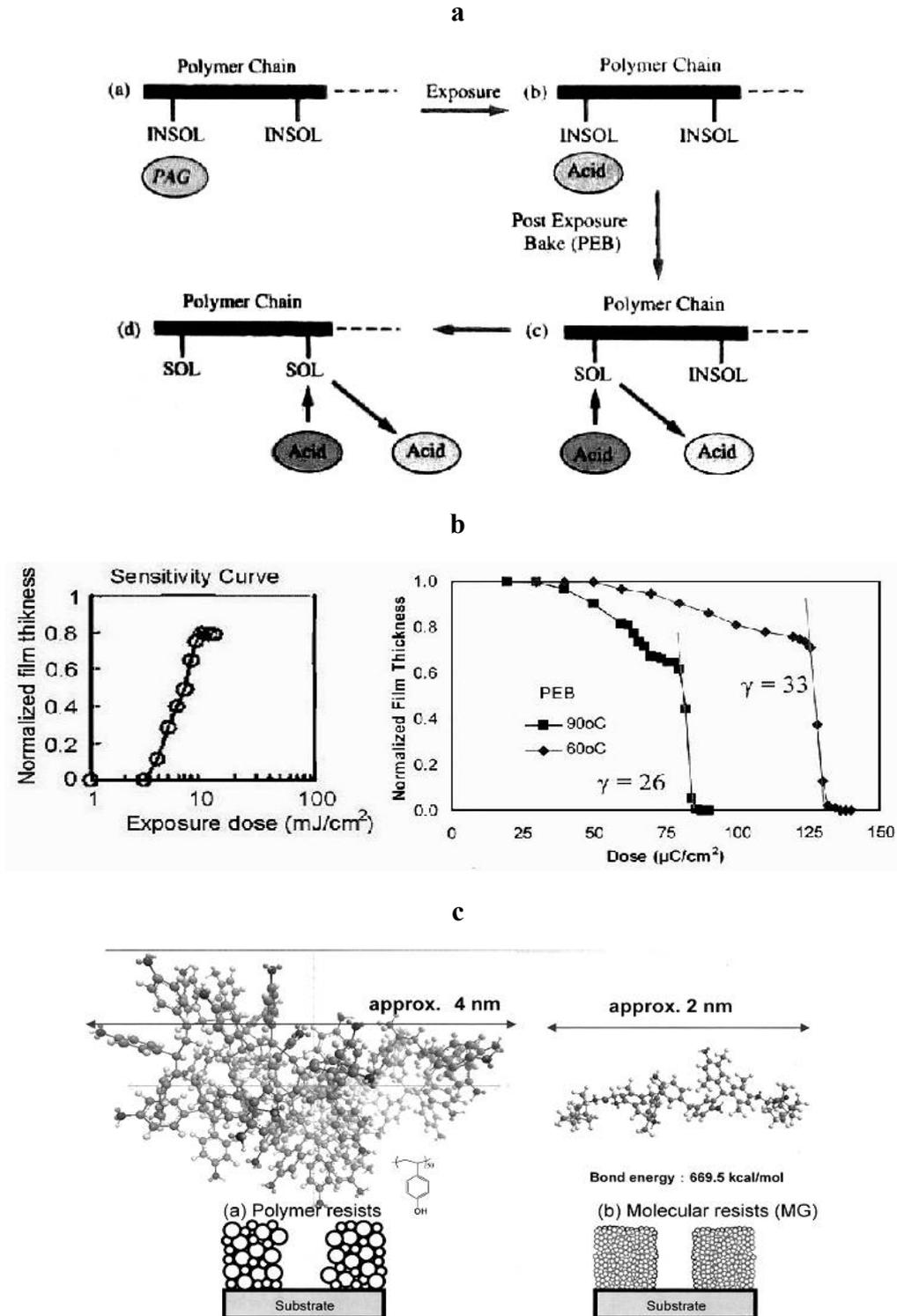
500 - 1000 раз, главным образом, в процессе постэкспозиционной термообработки. SA резисты отличаются высокой чувствительностью – 10-50 мДж/см<sup>2</sup>, притом, она сохраняется вплоть до очень коротких длин волн, включая ЭУФ, высокой разрешающей способностью и высоким контрастом передачи изображения [16] (см. рис. 18). Последнее оказывается решающим фактором, создающим условия для удвоения разрешающей способности, и, соответственно, интеграции чипа. (Отметим, что на рис. 17 боковые стенки слоя проявленного фоторезиста условно изображены вертикальными, что может быть некоторым приближением очень высокого контраста.)



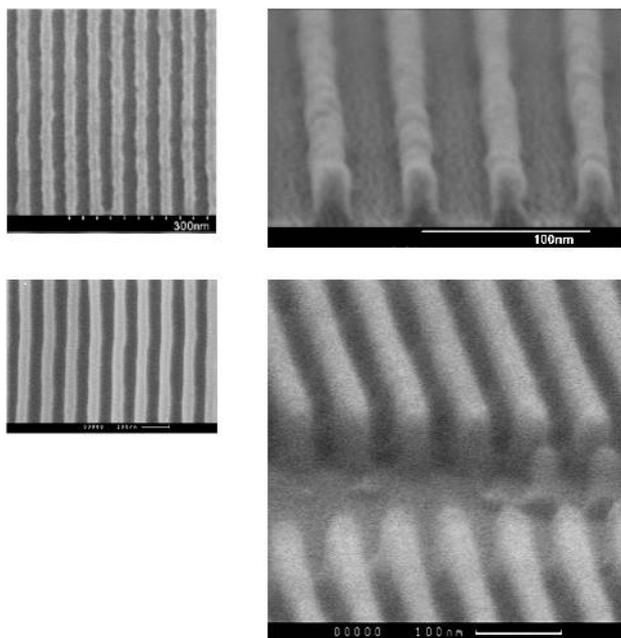
**Рис. 17.** Схема двойного экспонирования (1) и двойного «паттернирования» (2). В последнем случае имеются и применяются различные варианты: «литография – травление, литография – травление» (LELE), с «замораживанием» (Freeze), со «спейсером» (Spacer).

К известным недостаткам SA резистов, связанным с каталитической природой процесса, относится высокая вероятность прерывания реакции из-за отравления поверхности некоторыми загрязнениями воздушной среды между экспозицией и пост - экспозиционной термообработкой. Загрязнения, например, аммиаком, приводит к образованию T-образной формы сечения полосы. Во избежание такого рода загрязнений приходится принимать особые меры по фильтрации воздушной среды, что проще осуществить, создавая изолированные «фото-островки», предназначенные для совокупности операций фотолитографии, начиная с нанесения фоторезиста (см. [3]). Принципиальные недостатки SA – резистов начинают проявляться при попытках продвижения в область  $CD \leq 20-30$  нм. Они, как и следовало ожидать, связаны с протяжённостью полимерной матрицы и с диффузионной природой «очувствления» (рис. 18). В поисках путей уменьшения их отрицательного влияния осуществляется переход к низкомолекулярной основе, а также оптимизируется диффузионный процесс выбором PAG-а и режимов пост-экспозиционной термообработки [17]. Как результат, найдены составы и технологии обеспечивающие надёжную работу с  $CD \leq 20$  нм, а также вплоть до 11-16 нм в области экстремального ультрафиолета [18]. В поисках путей уменьшения их отрицательного влияния осуществляется переход к низкомолекулярной основе, вплоть до полного отказа от полимера и перехода к «органическому стеклу» т.е. стеклообразному состоянию органической основы, а также оптимизируется

диффузионный процесс выбором PAG-а и режимов пост-экспозиционной термообработки. Как результат, найдены составы и технологии обеспечивающие надёжную работу с  $CD \leq 20$  нм, а также вплоть до 11-16 нм в области экстремального ультрафиолета [18]. Для достижения меньших CD более перспективными могут оказаться неорганические резисты, в частности, полупроводниковые халькогенидные стёкла. Эксперименты с ХСП имеют давнюю историю, они применимы и области глубокого ультрафиолета, и в ЭУФ (например, [19,20]). На опытах с синхротронным излучением 13,4 нм здесь были достигнуты результаты, свидетельствующие о возможности разрешения, лучшего, чем 30 нм. Однако, обстоятельством, сдерживающим применение ХСП в микроэлектронной технологии оказывается необходимость отказа от традиционного нанесения резиста на центрифуге и перехода к нанесению в вакууме.



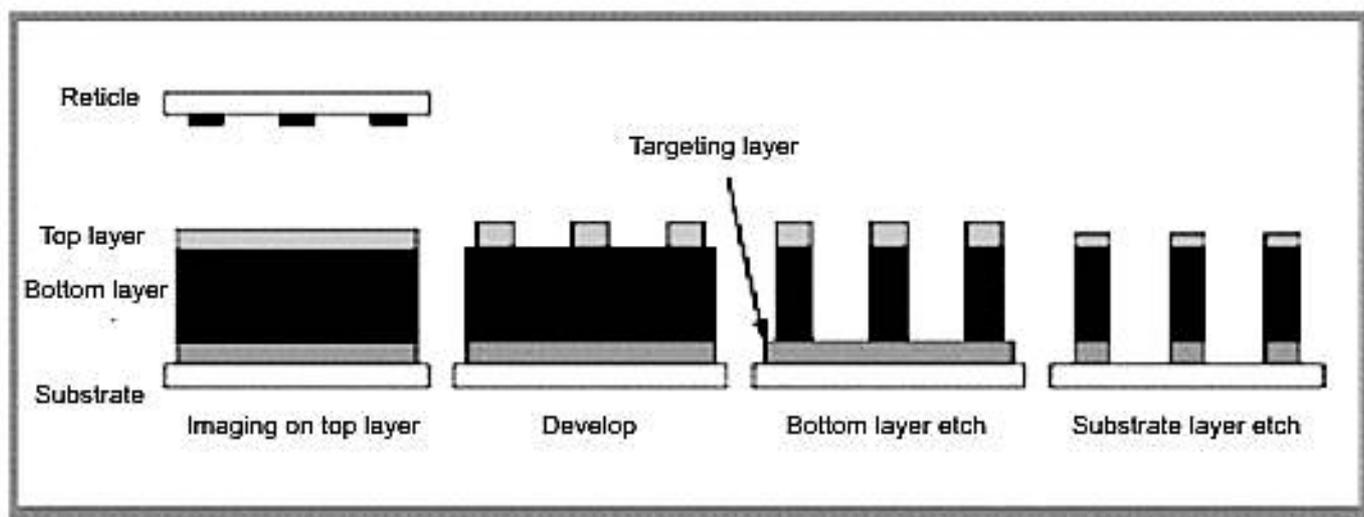
d



**Рис. 18.** Схематическое пояснение принципа действия СА-резиста (по [3]) – (а). На фрагменте (b) – контраст, достигаемый на СА-резистах при ЭУФ облучении (слева), и – при электронно-лучевом экспонировании (справа); на фрагменте (с) – модель и «работа» СА-резиста с протяжённой и низкомолекулярной матрицами; на фрагменте (d) – сравнение результатов применения СА-резиста, в ЭУФ – диапазоне (в верхней части рисунка), и неорганического резиста (халькогенидный стеклообразный полупроводник – ХСП); ЭУФ, проэкспонировано на синхротроне, 13.4 нм, интерференционная засветка (в нижней части рисунка).

## 10. Двухслойный резист и силилирование

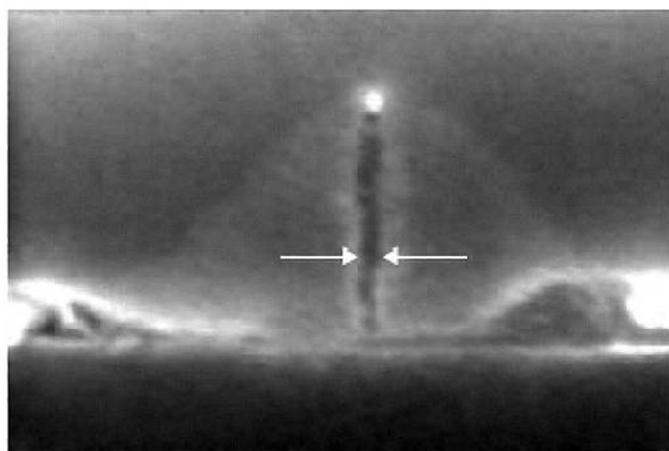
При изотропном проявлении микрорисунка мы должны будем потребовать нанесения фоторезиста толщиной не более минимального воспроизводимого размера. Естественно, это войдёт в противоречие со стойкостью его по отношению к последующим воздействиям, необходимым для формирования ИС. Выходом из создающегося положения является применение многослойных резистов, например, двухслойного. При этом верхний слой делается тонким, обеспечивающим воспроизведение достаточно тонкого рисунка, тогда как нижний выбирается по толщине соответствующим достижению необходимой стойкости при проведении последующих операций, т.е. существенно толще. Тогда возникает проблема сохранения точности микрорисунка в верхнем слое резиста и в нижнем слое. Эта задача может быть решена при анизотропном переносе изображения, например, реактивным ионным травлением. Её решение может быть обеспечено созданием между слоями некоторого пограничного слоя, обогащённого кремнием. Простая выдержка слоя с резистом в термостате с тёплым газообразным силаном (90°С) при давлении 250 Торр достаточна для диффузии на глубину до 300 нм в резист. Если затем поместить образец в кислородную плазму при давлении ниже 10 Торр, в кремнийсодержащих областях образуется двуокись кремния  $\text{SiO}_2$ , а необработанные силаном области вытравятся (сгорят). Маска  $\text{SiO}_2$  прекрасно далее защитит верхний слой резиста при переносе его изображения в толстый нижний слой и обеспечит его квазивертикальное стравливание. Описанный процесс (рис. 19) и называют «силилированием» [21]. Он эффективно применяется в планарной технологии кремниевых ИС. Возможны другие реализации этого процесса, но главным остаётся внедрение кремния в резист, или резистную систему, и применение его окисла в качестве внесённой твёрдой маски для реактивного травления или окисления.



**Рис. 19.** Принцип «силилирования»: экспонирование (позитивного) резиста, термообработка в газообразном силане ( $90^\circ$ , 250 Торр, обогащение кремнием на глубину до 300 нм), обработка в кислородной плазме низкого давления ( $< 10$  Торр), образование  $\text{SiO}_2$  и удаление неэкспонированных областей.

### 11. Достижения оптической нанолитографии и перспективы дальнейшего развития

Достижения современной оптической литографии достойны восхищения. На рис. 20 приведено изображение поперечного сечения полевого транзистора с изолированным затвором, полученного технологами Линкольновской лаборатории МИТ и сфотографированного при помощи трансмиссионного электронного микроскопа [22].

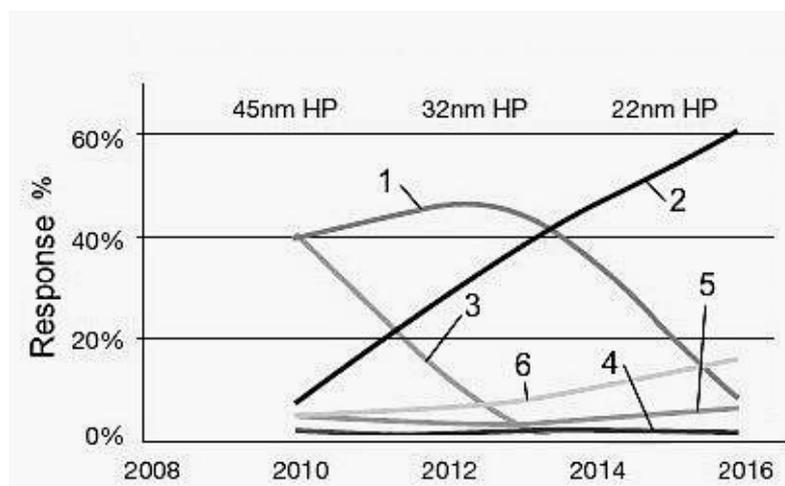


Gate length = 9 nm

**Рис. 20.** Разрез полевого транзистора интегральной схемы, полученного с применением двух двойных «паттернированных». Снимок на просвечивающем электронном микроскопе [22].

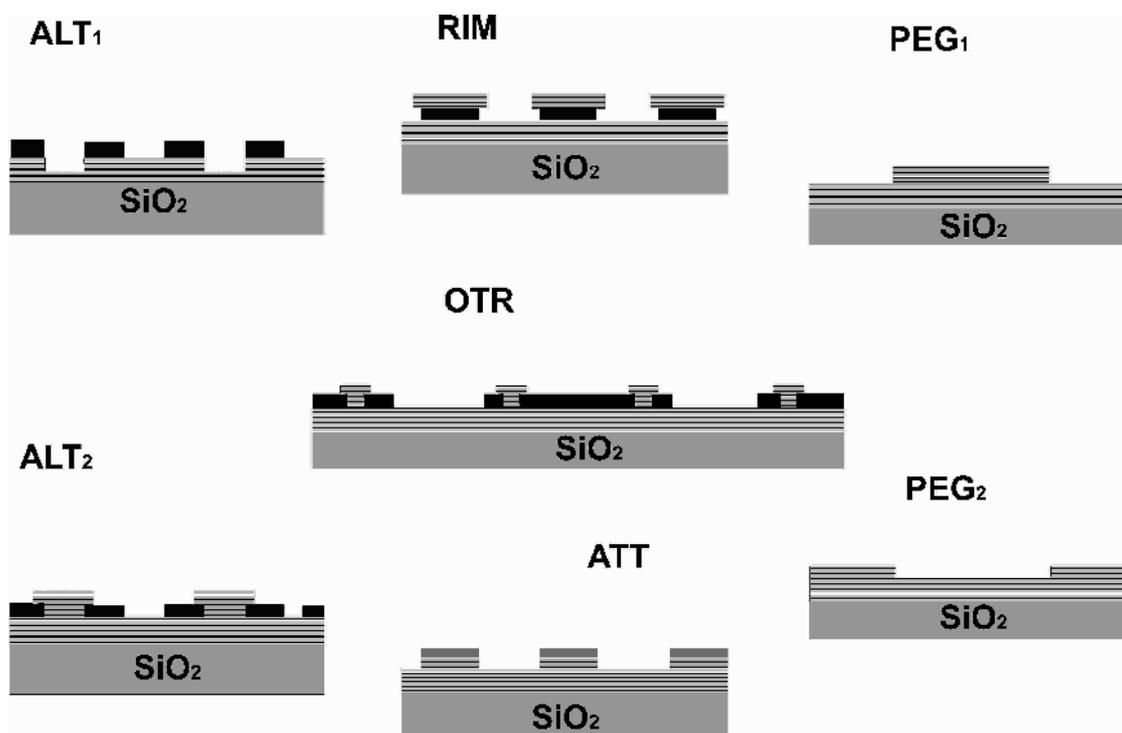
Транзисторная структура получена с использованием двух двойных экспозиций на масках с фазовым сдвигом. При этом длина канала составляет всего-навсего 9 нм! Отметим, что структура получена на литографе с KrF-лазером, обладающим длиной волны излучения 248 нм. Таким образом, она меньше чем 4% длины волны экспонирующего излучения и помещается всего на 18-ти периодах кремниевой решётки.

Демонстрируемый результат показывает, что практически любой стандарт, начиная от 10 нм, может быть реализован в рамках традиционной оптической литографии. Понятно, что вопрос о предпочтительном методе литографии из плоскости возможности технической реализации перешёл в плоскость экономической целесообразности. На рис. 21 приводится результат анализа SEMATECH возможного применения различных технологий к производству микропроцессоров по стандартам 45-32-22нм 2008 года [23].



*Рис. 21. Оценка конкурентных возможностей различных литографических процессов для  $CD < 45\text{nm}$ . Результат опроса специалистов на форуме 2008 г.: 1 – 193 нм, иммерсия и двойное «паттернирование», 2 – ЭУФ-литография, 3 – 193 нм, иммерсия и однократное экспонирование, 4 – наноиmprинт, 5 – 193 нм, иммерсия в жидкостях с повышенным коэффициентом преломления, 6 – «безмасочная» литография, в т.ч. электроннолучевая.*

Результат – в пользу оптической литографии для 45-32 нм и в пользу экстремального ультрафиолета – начиная с 22нм и ниже. При этом принимаются во внимание такие факторы, как стоимость и производительность оборудования, материалов, комплекта масок. (См. таблицу 3). Более поздний анализ, датируемый 2010 годом, смещает границу преимущества оптической литографии от 32 к 22 нм, т.е. за экстремальным ультрафиолетом остаётся всё, что ниже 16 нм. Возникает вопрос: как долго и далеко в сторону меньших CD может продлиться экспансия оптической литографии? Арсенал средств преодоления дифракционного ограничения на сегодняшний день выглядит исчерпанным. Обсуждая конкурентные возможности ЭУФ литографии, учтём, прежде всего, что собственно рельефная длина на  $\lambda=13,5$  нм составляет от 18.7 до 16.5 нм при числовой апертуре изображающего объектива от 0.3 до 0.5, соответственно, так что никаких мер типа коррекции оптической близости и искусственного фазового сдвига не понадобится при  $CD \leq 22 - 16$  нм. Это существенно упрощает конструкцию и технологию фотошаблона, а также сокращает количество литографий. Рассматривая ЭУФ-литографию, отметим также, что она в полной мере характеризуется волновым методом переноса изображения и наследует все отмеченные преимущества волновых методов построения изображений. Здесь вполне реализуемы также рассматривавшиеся выше методы преодоления дифракционного предела при помощи введения искусственного фазового сдвига, свойственные оптической литографии с применением эксимерных лазеров. Возможные решения для искусственного фазового сдвига в ЭУФ мы приводим на рис. 22. Кроме того, здесь не следует считать исчерпанными возможности, связанные с дальнейшим уменьшением длины волны и переходом в мягкий рентген. Исследования новых многослойных брэгговских систем показывают существование пар металлических покрытий, пригодных для работы в областях длин волн от 3-х до 7 нм [24, 25]. Интересно, что в связи с отсутствием в оптических компонентах диспергирующих элементов, основа зеркал может быть вполне сохранена, хотя и с усилением требований к шероховатости поверхностей. Правда, здесь придётся мириться с существенным уменьшением максимального коэффициента отражения, что вынудит выбирать изображающие системы с минимальным числом зеркал, и потребует увеличения мощности источника излучения. В то же время, нам, по-видимому, следует исключить из рассмотрения приёмы иммерсии, так как в природе не существует жидкостей, прозрачных на ЭУФ. Впрочем, здесь возможным ответом может стать применение т.н. метаматериалов [26]. С другой стороны, необходимо отметить, что у оптической литографии с применением эксимерных лазеров также остаётся небольшой «запас прочности» связанный с использованием фторного (157 нм), аргонового (126 нм) и водородного (116 нм) лазеров, не востребованных ранее ввиду стремительного прогресса литографии на 193 нм. Кроме того, не нашла ещё широкого применения «супериммерсия», с другими жидкостями, способными превзойти коэффициент преломления воды 1.44 на 20 - 30%. Но применение новых лазеров сталкивается с отсутствием подходящих оптических материалов для изображающего объектива и фотошаблона, а «супериммерсии» - с технологическими трудностями.



**Рис. 22.** Возможные решения для искусственного фазового сдвига в ЭУФ – диапазоне. Обозначения соответствуют аналогам, применяемым в оптическом диапазоне (рис. 11, 12).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Seisyan R.P. EVUV Nanolithography for VLSI// Proc. Of “Japan-Russia advanced Science and Technology Forum”, 2000, Tokyo, Japan, p.164-172
2. Сейсян Р.П. Формирование наноизображений волновыми методами// Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.278
3. Wolf S. Microchip manufacturing, Lattice press, California
4. Г.Н.Березин, А.В.Никитин, Р.А.Сурис Оптические основы контактной фотолитографии
5. Сейсян Р.П. Прикладная физика. Микроэлектроника, ч.2, 2002г., Изд СПбГПУ6.
6. Сейсян Р.П.ЖТФ 2005, т.75, №5, с.1-13
7. Principles of lithography / Harry J. Levinson. SPIE Bellingham, Washington
8. <http://www.asml.com/asml/show.do?ctx=427> ASML - поставщик систем литографии. Размещенный в Вельдховене, Нидерланды.

9. J.T.Wallmark. In Microelectronics. Ed. E.Keonjan, Ch.2, NY 1966
10. Р.П.Сейсян International Conference “Laser Optics, LO-2010” Saint-Petersburg, 28 June-02July, 2010, p. 25
11. М.А.Ган, Р.П.Сейсян Перспективы развития оптической нанолитографии // Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.48, А.Б. Бельский, М.А. Ган, И.А. Миронов , Р.П.Сейсян. 2009, //Оптический журнал, т.76, №8,с.59-69. 2009,
12. M.D.Levenson, N.S.Viswanathan, R.A.Simpson. IEEE Trans. Electr. Dev.,ED-29(12), pp. 1628-1836, 1982
13. B.W.Smith et al. Proc. SPIE 5377, 2004 (2004)
14. R. Fabian Pease and Stephen Y. Chou // Proceedings of the IEEE, v. 96, No. 2, p. 248, February 2008.  
<http://inst.eecs.berkeley.edu/~ee143/sp08/PeaseChou.pdf>
15. D. Yost, T. Forte, M. Fritze, D. Astolfi, V. Suntharalingam, C. K. Chen, and S. Cann. // J. Vac. Sci. Technol. B 20, p. 191 (2002)
16. Wolf S. Microchip manufacturing, Lattice press, California CA, resist, Ch 1
17. T.Hirayama et al. 2008 Int. EUV SEMATECH Symposium (Tahoe 08).
18. Sematech 2007 Int. EUV Symposium. M.Shirai et al. (Low molecular Weight CA-resist.; W.Yueh et.al. (Single molecule CA-resist).
19. 2008 Int. EUV Symposium, (Tahoe 08), T/Hirayama et al.
20. Р.П.Сейсян Формирование наноизображений волновыми методами// Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.278
21. Калитеевская Н.А., Нестеров С.И., Горелов В.А., Сейсян Р.П. Регистрация наноизображений при помощи нелинейных фоторезистов работающих в вакуумно- и экстремально-ультрафиолетовых диапазонах // Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.249; Е.Г.Бараш, А.Ю.Кабин и В.М.Любин, Сейсян Р.П. Воздействие импульсного вакуумного ультрафиолета на пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников// ЖТФ, 1992, т.62, в.3, с.106-113.
22. D. Yost, T. Forte, M. Fritze, D. Astolfi, V. Suntharalingam, C. K. Chen, and S. Cann. // J. Vac. Sci. Technol. B 20, p. 191 (2002)
23. Michael Fritze et al// Lincoln Lab. Journal. v. 14, No.2, .237 ;(2003).  
<http://inst.eecs.berkeley.edu/~ee143/sp08/PeaseChou.pdf> ; . <http://www.ll.mit.edu/publications/journal/journalarchives14-2.html>
24. M. Lercel. //Future Fab. Int. #28, 2009, <http://www.future-fab.com/>
25. Гапонов С.В. //Матер. Симпозиума «Нанофизика и нанозлектроника», 2005, т.1, Н.Новгород, 2005, Салашенко Н.Н., Вестник РАН 2008, , т.78, №5.
26. Т.Kuhlmann,S.Yulin, T.Feigl et al. //Appl. Optics, V.41, # 10, p. 2048, 2002.
27. Белов П.А., Симовский К.Р., Хао Я. В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики, СПб: СПбГУИТМО, 2006, с.37-53.