

07;12

Нанолитография в микроэлектронике (Обзор)

© Р.П. Сейсян

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 8 февраля 2011 г.)

Приведен аналитический обзор современного состояния фотолитографии, ее основных приемов, позволивших достичь результатов, еще несколько лет тому назад казавшихся невероятными. Так, современная фотолитография в глубоком ультрафиолете дает возможность достаточно точного воспроизведения в интегральных схемах элементов, в 25 раз меньших длины волны излучения используемого для этих целей эксимерного лазера. Рассмотрены приемы, обеспечивающие оптической литографии возможность столь значительного преодоления дифракционного предела по Рэлею—Аббе. среди них коррекция оптической близости, введение искусственного фазового сдвига, иммерсия, двойное экспонирование, двойное паттернирование и др. Проанализированы перспективы дальнейшего развития фотолитографии в нанометровом диапазоне, при этом сопоставлены ее возможности с электронолитографией и литографией в экстремальном ультрафиолете и мягком рентгене.

Фотолитография в микроэлектронике

Последние полвека характеризовались беспрецедентно высокими темпами развития микроэлектроники. При этом эволюция большинства показателей микроэлектроники 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 изменений 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 рассмотрим основные приемы, при помощи которых осуществлялось уменьшение CD, нередко путем 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. Благодаря волновому характеру оптических процессов важнейшим преимуществом технологий фотолитографического формирования изображений является возможность одновременного и параллельного переноса изображения, состоящего из многих миллионов элементарных фрагментов [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 преодолела размер в 100 nm в направлении меньших размеров [2] и уже с 2000–2005 гг. может называться „нанотехнологией“. Это обстоятельство можно проиллюстрировать графиком, приведенным на рис. 1. Сначала наноразмеры были достигнуты длиной затвора полевого транзистора интегральной схемы (ИС) благодаря ряду технологических приемов, обеспечивавших дополнительное сокращение его длины; затем, несколькими годами позже, всеми остальными элементами микрорисунка ИС. С этого момента появилась тенденция микроэлектронику, достигшую и преодолевшую соответствующую величину CD, именовать далее не микро-, а нанoeлектроникой, хотя основные принципы микроэлектроники при этом не претерпевают изменений.

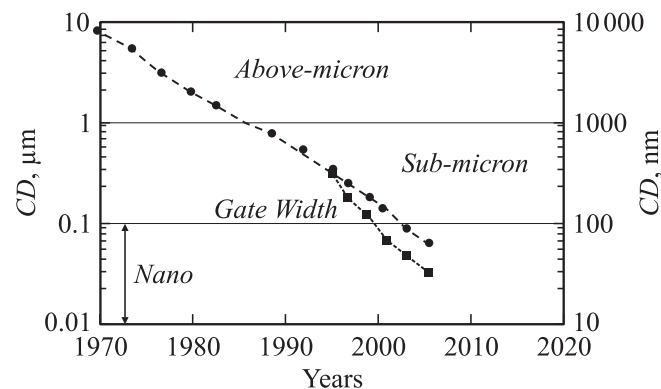


Рис. 1. Изменение по годам технологического стандарта интегральных схем. Ответвляющаяся вниз кривая — длина затвора полевого транзистора.

Волновой характер переноса изображения и дифракционный предел

Волновой характер переноса изображения каждого топологического слоя ИС задаваемого фотошаблоном, может быть проиллюстрирован рис. 2 из [3]. Отметим также, что сначала фотолитография обеспечивалась контактным, или „теньвым“, 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 ее уменьшение. Наиболее успешным методом создания микрорисунка в ИС в конечном итоге оказался проекционный перенос изображения с уменьшением масштаба. CD в нем

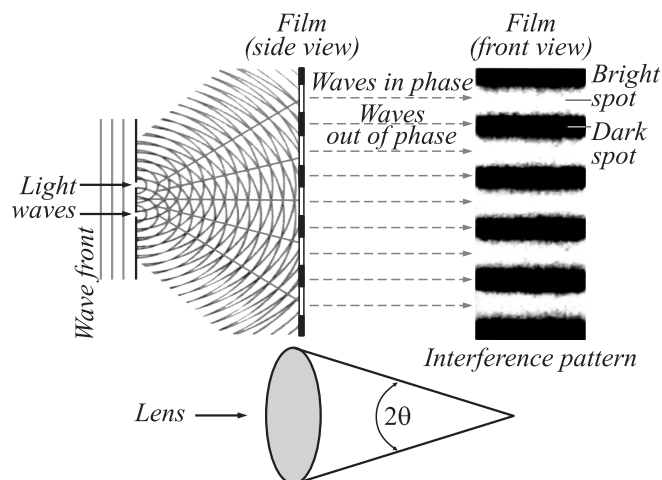


Рис. 2. Иллюстрация волнового характера процесса формирования изображения в оптической литографии. Снизу к определению апертуры.

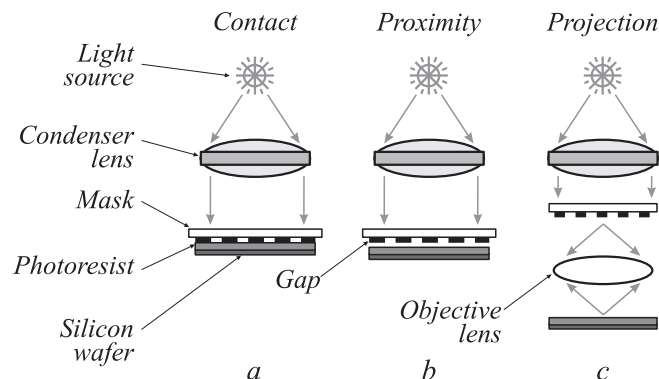


Рис. 3. Варианты реализаций оптической литографии: *a* — контактная или теньевая печать, *b* — контактная печать с зазором, *c* — проекционная печать.

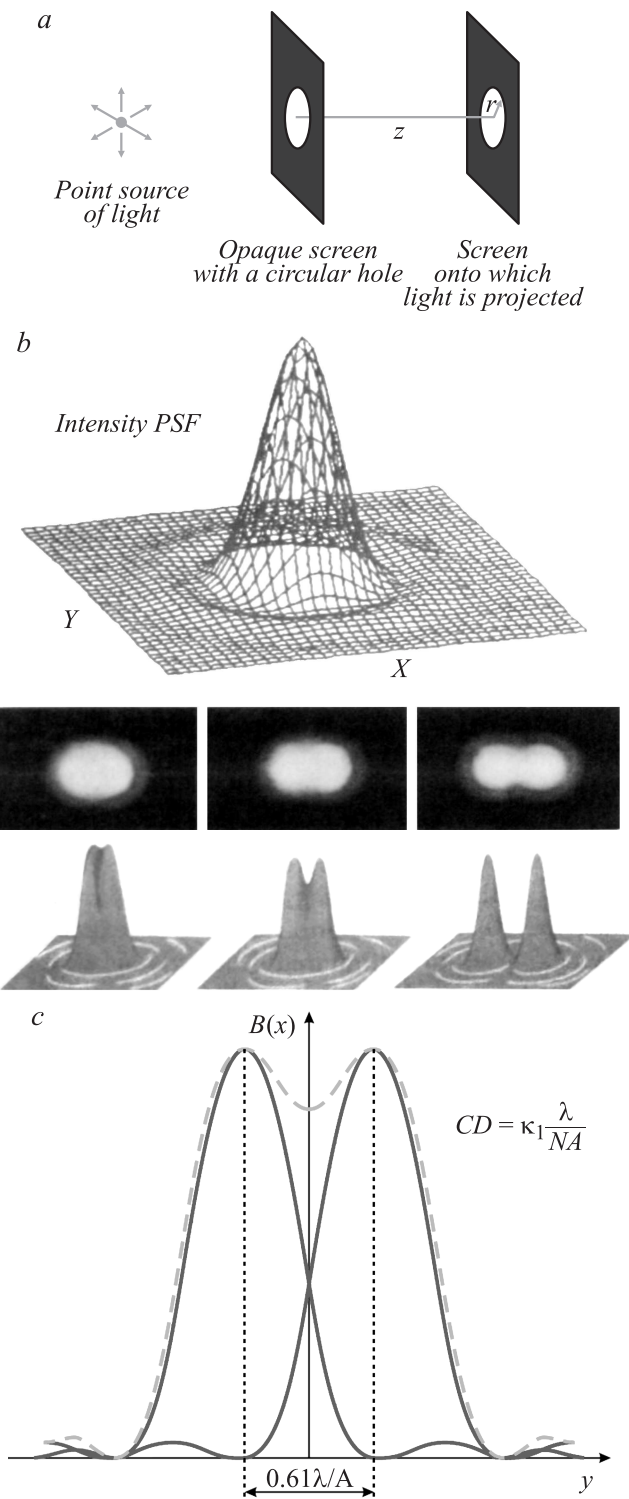


Рис. 4. Изображение светящейся точки (*a*), двух светящихся точек, разрешаемых по Рэлю—Аббе (*b*), и (*c*) — к формулировке критерия Рэля—Аббе.

регламентируется дифракционным пределом оптической системы, описываемым критерием Рэля—Аббе. Изображение светящейся точки (рис. 4) может служить подтверждением этого критерия, утверждающего, что CD

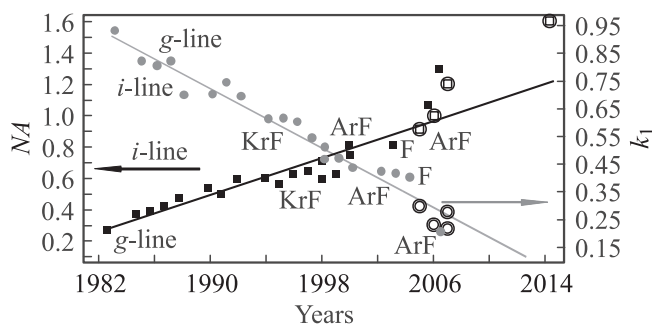


Рис. 5. Изменение по годам параметров, входящих в критерий Рэля–Аббе: NA — числовая апертура, k_1 — „технологический“ коэффициент. На рисунке указан основной источник излучения (табл. 1).



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

прямо пропорционально произведению k_0 на λ и обратно пропорционально числовой апертуре NA , где λ — 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 приемов он может быть уменьшен до $k_1 \sim 0.2$ [6] (см. рис. 5). Так как при проекционном оптическом переносе изображения имеем дело с прямой пропорциональностью CD длине волны актиничного излучения, эффективно уменьшать λ , что и происходило естественным образом на протяжении всей истории развития микроэлектроники. Уменьшение длины волны и соответствующие источники излучения можно проследить сверху вниз по табл. 1.

На рис. 6 представлен один из наиболее современных инструментов нанотехнологии в микроэлектронном производстве, широко применяемый на чиповых фабриках мира. Это сканер-степпер голландской фирмы ASML TWINSCAN XT1700i [8], обеспечивающий производство порядка 100 кремниевых пластин диаметром 300 mm в час — в одном топологическом слое. При этом на пластине экспонируется более ста микропроцессорных чипов размером 33×26 mm. Ширина линии излучения источника (эксермерного лазера ArF, 193 nm) на частоте порядка 10 kHz измеряется пикометрами. А основным элементом оптической системы является объектив фирмы Zeiss, изготовленный из кварца глубокой очистки и состоящий из трех десятков линз диаметром до 300 mm. Пример отечественного аналога, изготовленного с использованием монокристаллов флюорита [9], приводится на рис. 7.

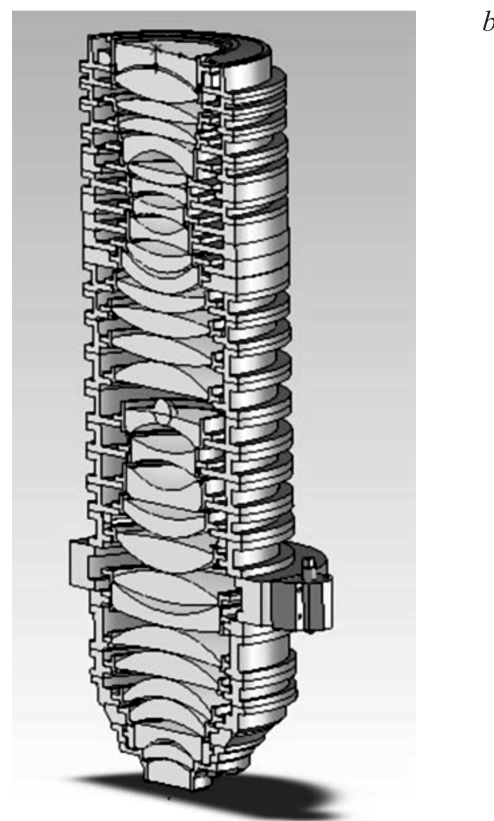
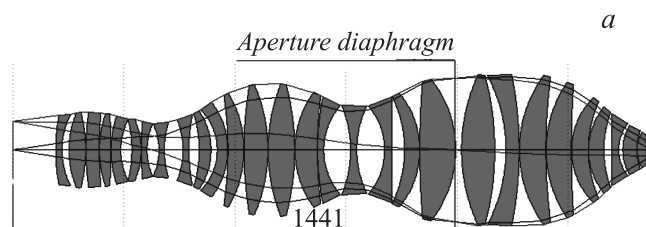


Рис. 7. Разрез (a) и структура (b) типичного изображающего объектива — по данным [9].

Таблица 1. Используемые в микроэлектронике источники света и соответствующие длины волн [7]

Источник света	Спектральная линия	Длина волны, nm	Расположение в спектре электромагнитной радиации
Ртутная дуговая лампа	<i>g</i>	436	Видимый
	<i>h</i>	405	"
	<i>i</i>	365	Ближний УФ (mUV)
	DUV	240–255	Глубокий УФ (DUV)
Эксимерный лазер	KrF	248	То же
	ArF	193	"
	F ₂	157	Вакуумный УФ (VUV)

Фотолитография и электронолитография

Что касается дифракционного предела, электронолитография (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 остросфокусированного пучка приводит к поэлементному (или мелкофрагментарному) экспонированию, что удлиняет результирующую экспозицию. Это вступает в противоречие с экспоненциальным ростом интеграции, или с выполнением „закона“ Мура. Еще Уолмарком [10] 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 η) 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 (Π) от номинала не превышает нормы допуска на величину параметра (ДП), можно вычислить, пользуясь интегралом вероятностей Гаусса [10]:

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

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. Результат выглядит несколько обескураживающим: даже для столь высоких технологических стандартов, как 32–22 nm, минимальный размер элемента в ультрабольших интегральных схемах (УБИС) с 10^6 элементов должен составить величину 1.5–2.3 μm , а для 10^9 — 1.9–2.8 μm ; уменьшение стандарта вплоть до 5–13 nm, являющееся целью разработок следующего десятилетия, могло бы обеспечить возможность изготовления УБИС, состоящих из элементов с, как минимум, субмикронными размерами [11]. 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

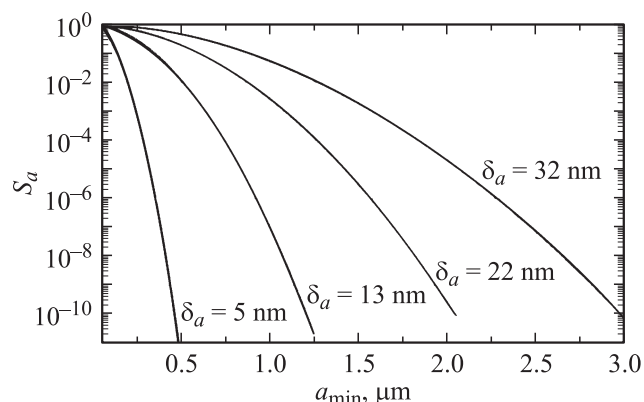


Рис. 8. Допустимый минимальный размер элемента ИС ($a_{\min}$) для реализуемого $CD = \delta$ согласно теории вероятностей.

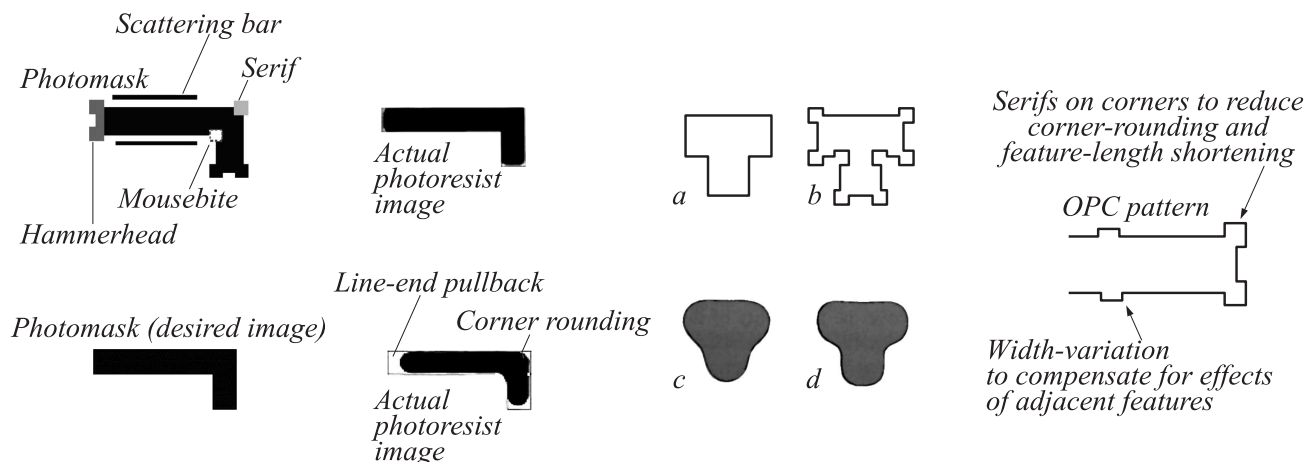


Рис. 9. Коррекция оптической близости на примере Т-образного и Г-образного элементов ИС.

изображения, когда все элементы „прорисовываются“ одновременно и коррелированно. Можно полагать, что это обстоятельство и является главным источником преимущества фотолитографии и причиной ее доминирующего положения в микроэлектронике во все годы ее развития [1,11].

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 ее помощью $CD = 22\text{ nm}$. На современном фотолитографическом объективе с числовой апертурой 0.95 и при применении эксимерного лазера ArF получим в качестве исходного критерия Рэлея на воздухе значение 124 nm . Сравнивая его с реализуемыми на практике CD , в зависимости от используемой длины волны λ , исходной числовой апертуры объектива и ее увеличения (уменьшения λ) за счет иммерсии получим ту или иную меру преодоления дифракционного предела по Рэлею—Аббе. Эту составляющую мы будем учитывать как реализацию определенного „технологического“ коэффициента k_1 , меньшего, чем релеевский $k_0 = 0.61$. Среди методов преодоления дифракционного предела рассмотрим четыре основных процесса:

- коррекция оптической близости,
- введение искусственного фазового сдвига,
- иммерсия,
- двойное экспонирование и двойное создание микрорисунка („паттернирование“).

Помимо этих четырех способов преодоления дифракционного ограничения, как правило, для тех же целей одновременно и независимо применяются также: а) вне-

осевое освещение маски; б) многослойный фоторезист и силилирование в процессе проявления рисунка.

Рассмотрим их по отдельности.

Коррекция оптической близости

При экспонировании микроизображения с размерами, равными и меньшими предельного размера по Рэлею—Аббе, изображение претерпевает различного рода искажения. Это сужение или недоэкспонирование узкой длинной линии, сокращение и округление ее концов, заплывание узких зазоров и острых углов и 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. Здесь мы видим угловые засечки для уменьшения скруглений и предотвращения укорачивания элементов рисунка, а также локальные изменения ширины линии для предотвращения ее 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 Рэлея (рис. 4,с). Их введение существенно усложняет фотошаблон и повышает требования к средствам их производства, но делает в конечном итоге рисунок топологического слоя приемлемым для „штатного“ функционирования элемента ИС в условиях работы с размерами, переходящими дифракционный предел. Наработаны комплексы программ, позволяющих вводить в фотошаблон набор элементов, корректирующих эффекты оптической близости, и моделировать результат их применения. Приемы коррекции эффектов оптической близости стали неотъемлемой частью технологического процесса сверхбольших интегральных схем (СБИС) и УБИС.

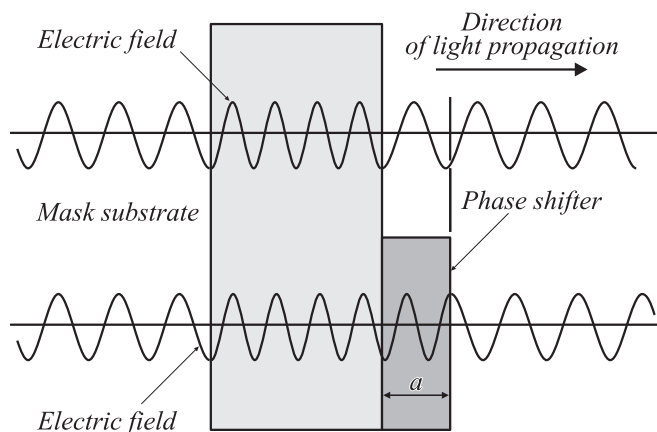


Рис. 10. Иллюстрация принципа „работы“ маски с фазовым сдвигом.

Введение искусственного фазового сдвига

Введение фазосдвигающих элементов — это один из мощнейших приемов для работы с размерами элементов ИС, находящимися за гранью дифракционного предела. Он был предложен еще в начале 80-х годов прошлого века М. Левенсоном и др. [12] и 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 deg, привести к нулевому значению сигнала. Для этого либо вытравливается прямоугольная канавка в материале основы фотошаблона, либо наносится слой прозрачного материала с заданной толщиной и определенным коэффициентом преломления $n > 1$. Однако легко увидеть, что простое применение фазосдвигающих вставок из материала необходимой толщины такое, 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 [7], приведенных в табл. 2. Они нередко применяются в комбинации друг с другом или с масками от других элементов планарного процесса. Тем не менее по своей сути все эти варианты происходят из работы [12]. Фазосдвигающие маски ALT создают сильный эффект увеличения разрешения, но их применение ограничено скоплениями узких линий с узкими зазорами, в то же время окаймляющий фазосдвигающий элемент (RIM) не создает 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 (OTR), с той лишь разницей, что OTR 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,

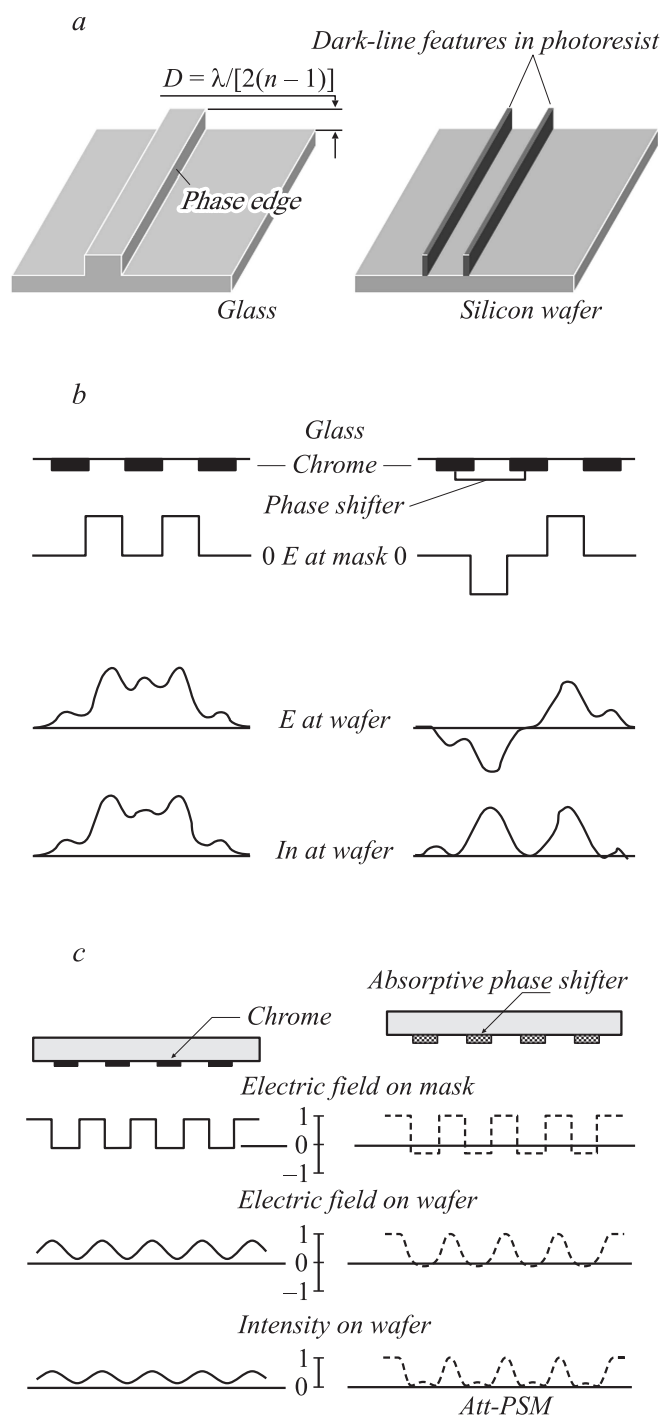


Рис. 11. Принцип действия фазосдвигающего элемента типа „фазовой границы“ (PHE) (a), „чередующихся полос“ (ALT) (b), „полутонных“ (ATT) (c).

Таблица 2. Типы фазосдвигающих масок по [7]

Тип фазосдвигающей маски	Альтернативное название	Категория	Область применения
Чередующийся (ALT)	Левензона	Сильный	Сгруппированные линии и зазоры
Окаймляющий (RIM)		Слабый	Контакты, изолированные элементы
Ослабленный (ATT)	Пропупрозрачный хром, полутоновой рисунок	„	То же
Фазовая граница (PHE)	Бесхромовая, неослабленная	Сильный	Узкие линии
Консольная (OTR)	Суб-разрешение, дополнительная апертура	Слабый	Изолированные элементы

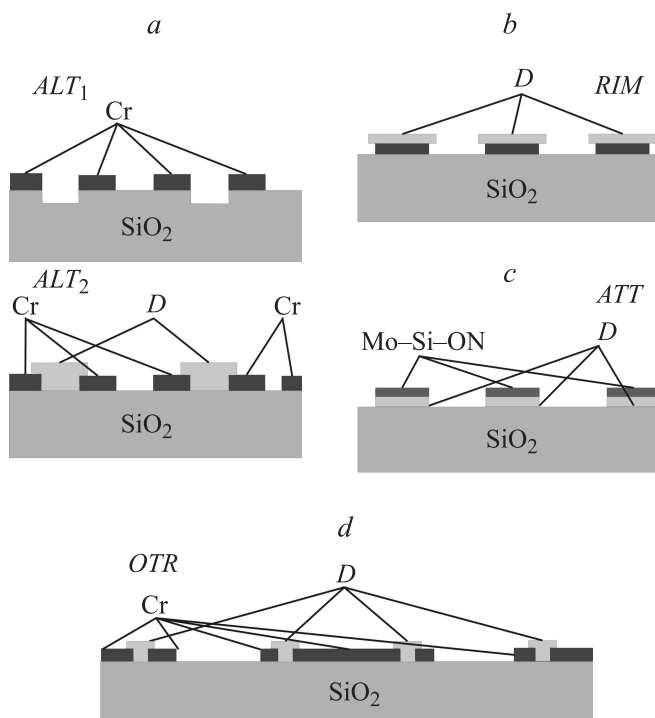


Рис. 12. Конструкция различных элементов фазового сдвига: *a* — чередующегося (ALT), *b* — окаймляющего (RIM), *c* — „полутоновых“ ослабленных элементов (ATT) и *d* — консольного типа (OTR).

вытравленная из подложки фотошаблона, при экспонировании создает две темные предельно узкие полосы на обеих фазовых границах (рис. 11). Существенно более универсальны „полутоновые“ фазосдвигающие маски (ATT), получившие весьма широкое применение и изготавливаемые как комбинация прозрачного сдвигающего фазу слоя и полупрозрачного поглощающего покрытия. Эти элементы часто применяют для создания кон-

тактных 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 рис. 13. Здесь применяются два вида масок и два слоя фоторезиста. Первый служит для вытравливания в подложке маски шести прямоугольных лунок с глубиной, необходимой для фазового сдвига 180 deg, создающего при экспонировании узкие линии затворов полевых транзисторов. Вторая — хромовая, ограничивает протяженность этих линий и создает остальные элементы рисунка.

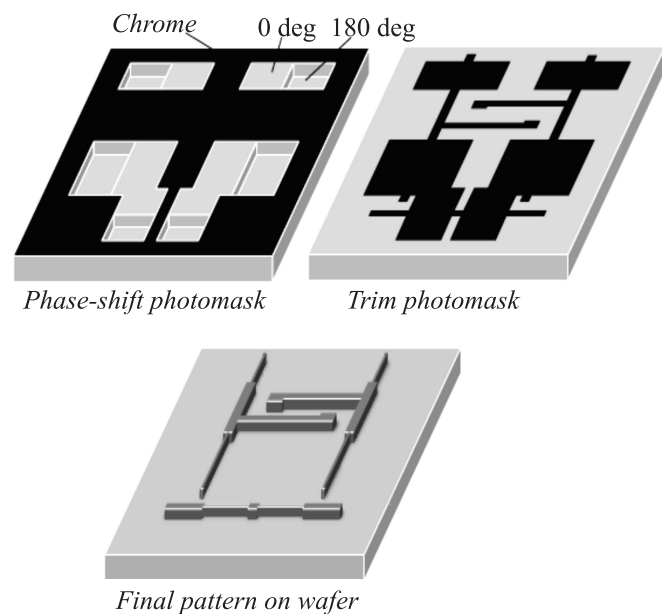


Рис. 13. Пример решения транзисторного узла ИС при помощи комбинации масок с различными видами фазосдвигающих элементов (например, [13]).

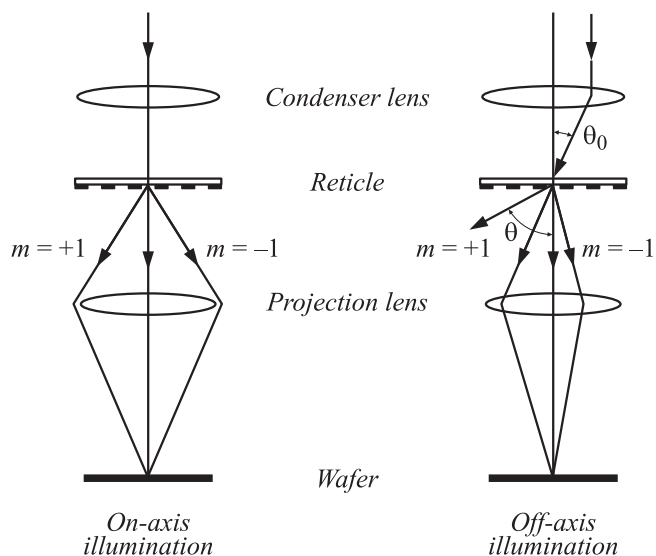


Рис. 14. Иллюстрация к внеосевому освещению маски.

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-й –1-й 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 еще 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.

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 2007–2008 гг. Хотя само по себе применение иммерсии в оптических приборах отнюдь не ново и может проследиваться еще с XVIII века в письмах Левенкука Британскому королевскому обществу, применение иммерсии в фотолитографии долго казалось сомнительным. Принято считать, что первым добиться успеха здесь удалось

профессору Рочестерского технологического института Брюсу Смиту [13], показавшему, что вполне применимой иммерсионной жидкостью является простая вода, которую необходимо впрыснуть в промежуток между объектом и полупроводниковой пластиной (рис. 15). Вода вполне прозрачна на длине волны 193 nm и имеет при этом коэффициент преломления 1.44. Соответственно длина волны эксимерного лазера в иммерсионной среде составит не 193, а 134 nm. Числовая апертура объектива может быть вычислена как $NA = n \sin \alpha$. Близкая к пределу наилучшая полученная величина числовой апертуры изображающего объектива на воздухе NA_0 составляет сегодня 0.95, что с водяной иммерсией даст $NA = nNA_0$, или 1.368 (ход лучей в иммерсионной системе показан на рис. 16). Использование воды привело к существенному падению выхода годных чипов по причине выделения растворенных 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

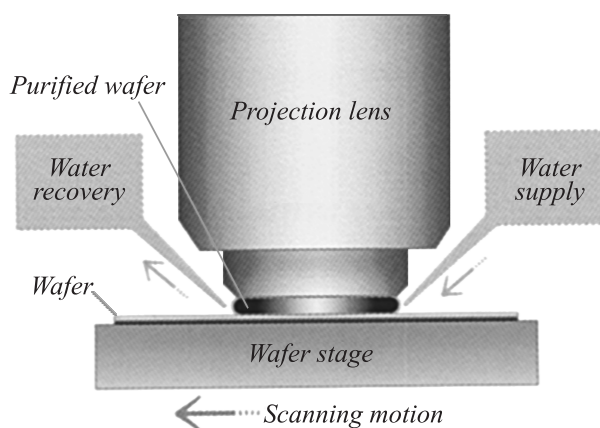


Рис. 15. Иммерсионный элемент в проекционной оптике (схематически).

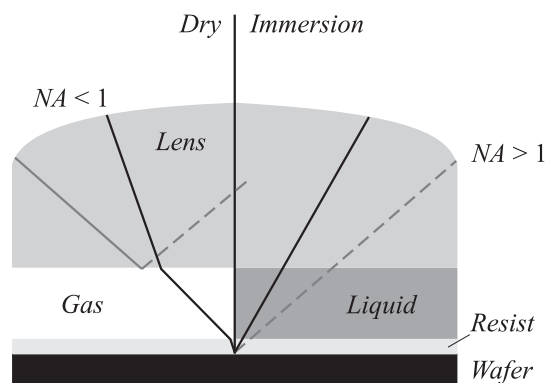


Рис. 16. Ход лучей между изображающим объектом и полупроводниковой пластиной на воздухе и с иммерсионной вставкой.

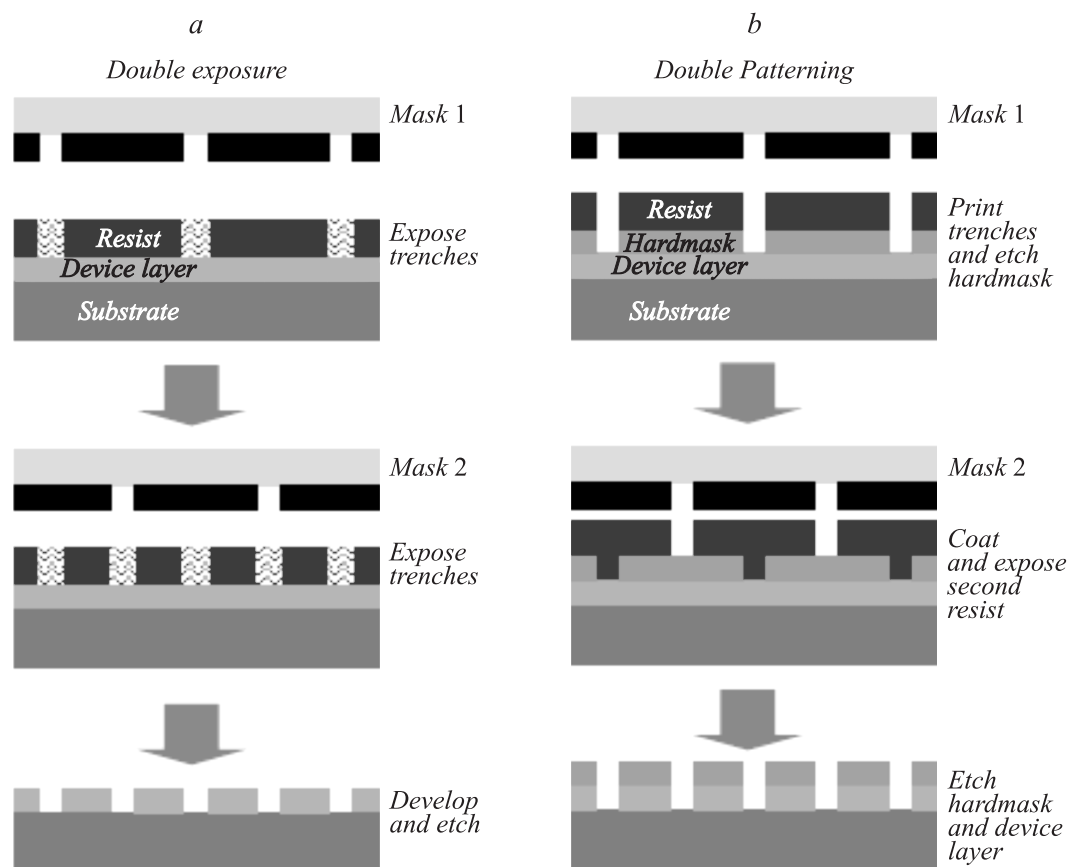


Рис. 17. Схема двойного экспонирования (а) и двойного „паттернирования“ (b). В последнем случае имеются и применяются различные варианты: „литография–травление, литография–травление“ (LELE), с „замораживанием“, со „спейсером“.

у воды, но по разным причинам они на сегодняшний день не нашли широкого применения.

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 прием, он состоит в поочередном создании двух взаимодополняющих микрорисунков, задаваемых парой согласованных фотошаблонов, при этом 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 [13]. Эти резисты были созданы в начале 80-х на IBM при необходимости перехода к стандарту 250 nm. Выявилось, что традиционные резисты с фоточувствительной компонентой на нафтохинондиазидах (НХД) и на новолачной смоле не могут работать на длинах волн 248 nm и короче в связи с сильным поглощением смолы и НХД, а также со слабой фоточувствительностью последнего. СА-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. СА-резисты отличаются высокой чувствительностью (10–50 мДж/см², при этом она сохраняется вплоть до очень корот-

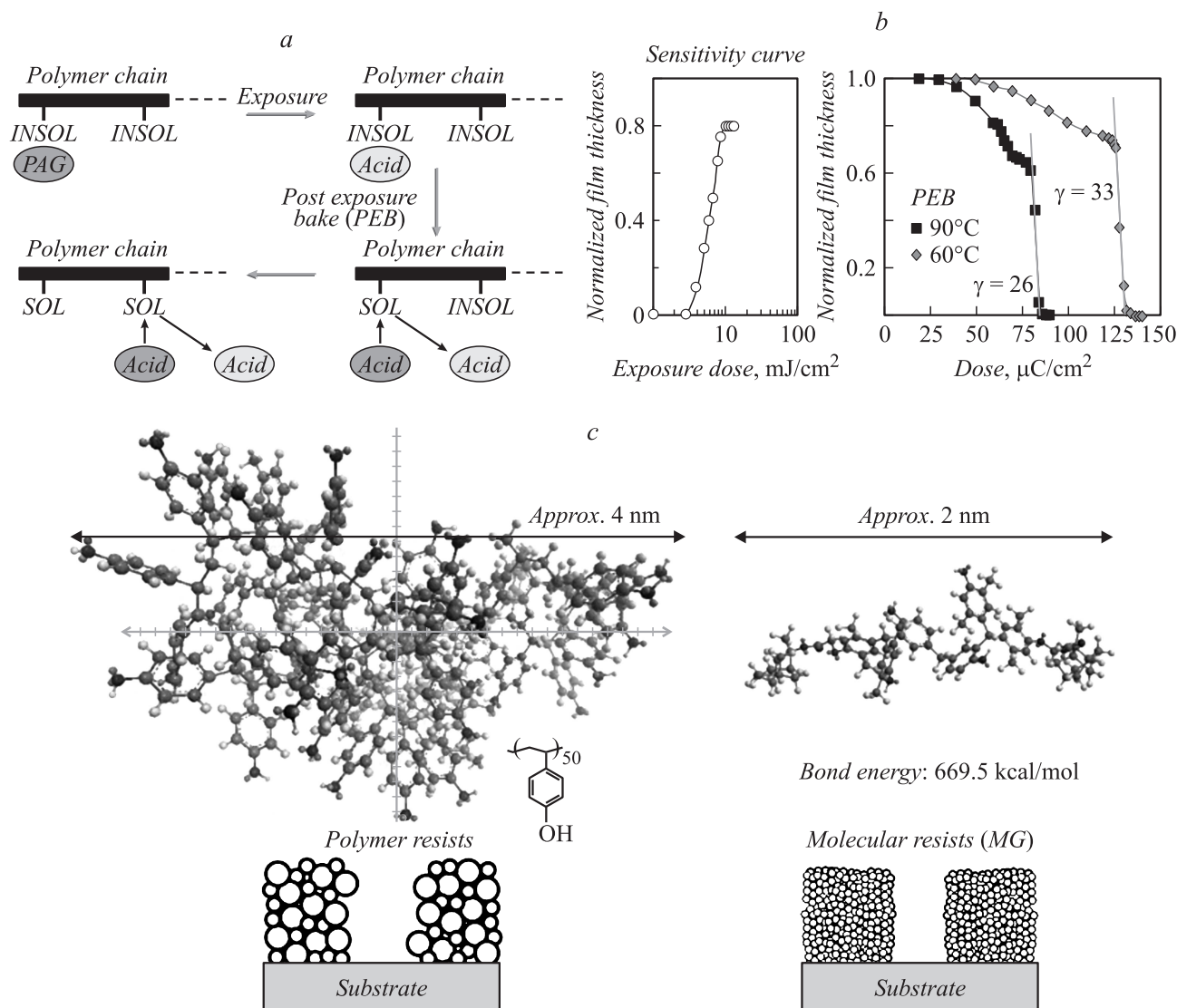


Рис. 18. Схематическое пояснение принципа действия СА-резиста по [3] — (a); b — контраст, достигаемый на СА-резистах при ЭУФ-облучении (слева) и при электронно-лучевом экспонировании (справа); c — модель и „работа“ СА-резиста с протяженной и низкомолекулярной матрицами; d — сравнение результатов применения СА-резиста в ЭУФ-диапазоне (в верхней части рисунка) и неорганического резиста (халькогенидный стеклообразный полупроводник — ХСП); ЭУФ, проэкспонировано на синхротроне 13.4 nm, интерференционная засветка (в нижней части рисунка).

ких длин волн, включая экстремальный ультрафиолет (ЭУФ)), высокой разрешающей способностью и высоким контрастом передачи изображения [15] (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. К известным недостаткам СА-резистов, связанным с каталитической природой процесса, относится высокая вероятность прерывания реакции из-за отравления поверхности некоторыми загрязнениями воздушной среды между экспозицией и постэкспозиционной термообра-

боткой. Загрязнение, например, аммиаком приводит к образованию Т-образной формы сечения полосы. Во избежание такого рода загрязнений приходится принимать особые меры по фильтрации воздушной среды, что проще осуществить, создавая изолированные „фотоостровки“, предназначенные для совокупности операций фотолитографии, начиная с нанесения фоторезиста (см. [3]). Принципиальные недостатки СА-резистов начинают проявляться при попытках продвижения в область $\text{CD} \leq 20\text{--}30\text{ nm}$. Они, как и следовало ожидать, связаны с протяженностью полимерной матрицы и с диффузионной природой „очувствления“ (рис. 18). В поисках путей уменьшения их отрицательного влияния осуществляется переход к низкомолекулярной основе, а также оптимизи-

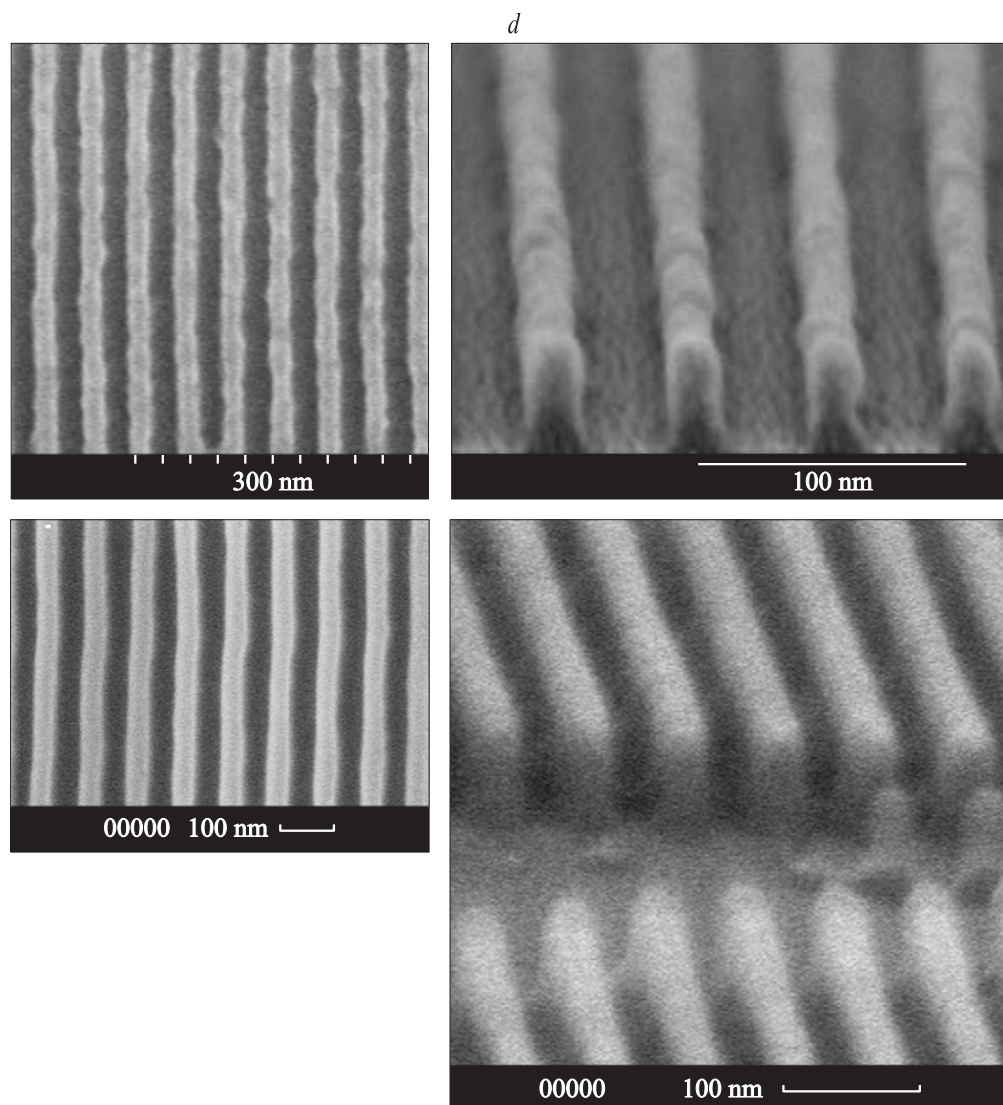


Рис. 18 (продолжение).

руется диффузионный процесс выбором PAG и режимов постэкспозиционной термообработки [16]. В результате были найдены составы и технологии, обеспечивающие надежную работу с $CD \leq 20$ nm, а также вплоть до 11–16 nm в области ЭУФ [15]. Для достижения меньших CD более перспективными могут оказаться неорганические резисты, в частности полупроводниковые халькогенидные стекла (ХСП). Эксперименты с ХСП имеют давнюю историю, они применимы и области глубокого ультрафиолета и в ЭУФ (например, [2,17]). На опытах с синхротронным излучением 13.4 nm были достигнуты результаты, свидетельствующие о возможности разрешения, лучшего, чем 30 nm. Однако обстоятельством, сдерживающим применение ХСП в микроэлектронной технологии, оказывается необходимость отказа от традиционного нанесения резиста на центрифуге и перехода к нанесению в вакууме.

Двухслойный резист и силилирование

При изотропном проявлении микрорисунка мы должны будем потребовать нанесения фоторезиста толщиной не более минимального воспроизводимого размера. Естественно, это войдет 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 и в нижнем слоях резиста. Эта задача может быть решена

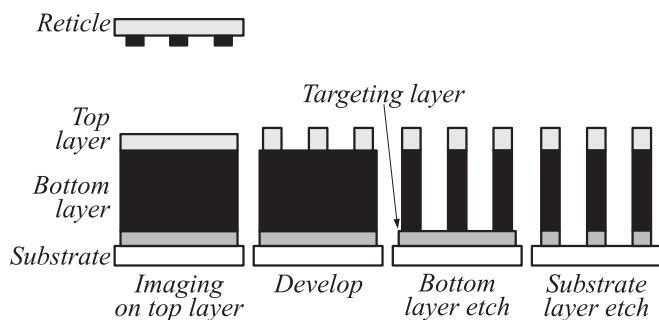


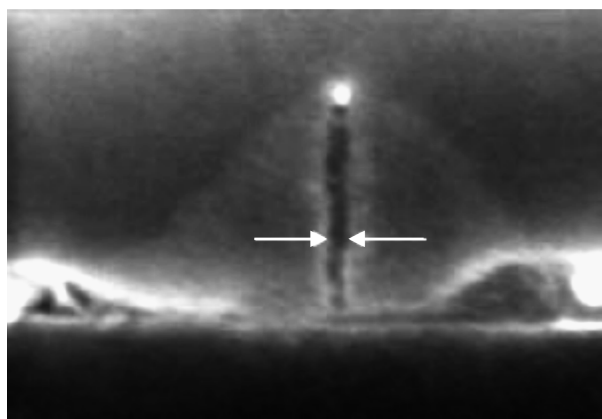
Рис. 19. Принцип „сيليрирования“: экспонирование (позитивного) резиста, термообработка в газообразном силане (90°C , 250 Torr), обогащение кремнием на глубину до 300 nm), обработка в кислородной плазме низкого давления ($< 10\text{ Torr}$), образование SiO_2 и удаление неэкспонированных областей.

при анизотропном переносе изображения, например, реактивным ионным травлением. Ее решение может быть обеспечено созданием между слоями некоторого пограничного слоя, обогащенного кремнием. Простая выдержка слоя с резистом в термостате с теплым газообразным силаном (90°C) при давлении 250 Torr достаточна для диффузии на глубину до 300 nm в резист. Если затем поместить образец в кислородную плазму при давлении ниже 10 Torr в кремнийсодержащих областях образуется двуокись кремния SiO_2 , а необработанные силиками области вытравятся (сгорят). Маска SiO_2 далее прекрасно защитит верхний слой резиста при переносе его изображения в толстый нижний слой и обеспечит его квазивертикальное стравливание. Описанный процесс (рис. 19) и называют „сيليрированием“ [18]. Он эффективно применяется в планарной технологии кремниевых ИС. Возможны другие реализации этого процесса, но главным остается внедрение кремния в резист или резистную систему и применение его окисла в качестве внесенной твердой маски для реактивного травления или окисления.

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 просвечивающего электронного микроскопа [19]. Транзисторная структура получена с использованием двух двойных экспозиций на масках фазовым сдвигом. При этом длина канала составляет всего 9 nm. Отметим, что структура получена на литографе с KrF лазером, обладающим длиной волны излучения 248 nm. Таким образом, размер структуры меньше 4% длины

волны экспонирующего излучения и помещается всего на 18 периодах кремниевой решетки. Демонстрируемый результат показывает, что практически любой стандарт, начиная от 10 nm, может быть реализован в рамках традиционной оптической литографии. Понятно, что вопрос о предпочтительном методе литографии из плоскости возможности технической реализации перешел в плоскость экономической целесообразности. На рис. 21 приводится результат анализа SEMATECH возможного применения различных технологий к производству микропроцессоров по стандартам 45–32–22 nm 2008 г. [20]. Результат в пользу оптической литографии для 45–32 nm и в пользу ЭУФ начиная с 22 nm и ниже. При этом принимаются во внимание такие факторы, как стоимость и производительность оборудования, материалов, комплекта масок (см. табл. 3). Более поздний анализ, датируемый 2010 г. „сдвигает границу преимущества оптической литографии от 32 к 22 nm, т.е. за ЭУФ



Gate length = 9 nm

Рис. 20. Разрез полевого транзистора ИС, полученного с применением двух двойных „паттернирований“. Снимок на просвечивающем электронном микроскопе [22].

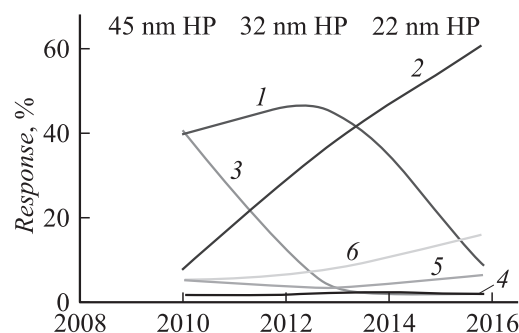


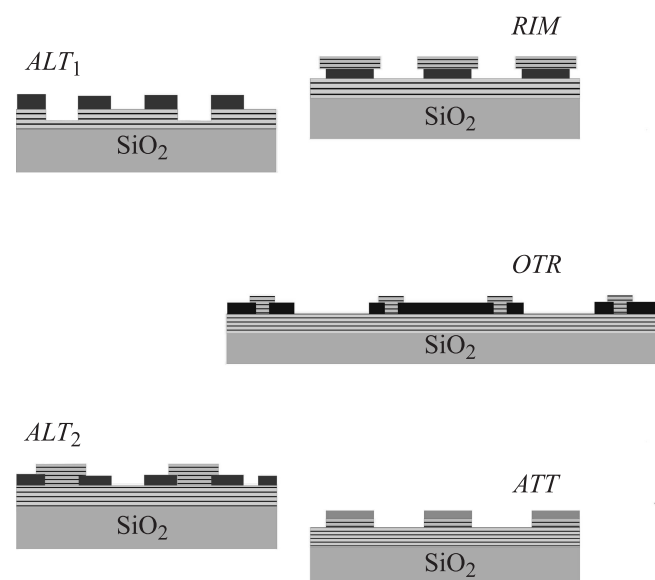
Рис. 21. Оценка конкурентных возможностей различных литографических процессов для $\text{CD} < 45\text{ nm}$. Результат опроса специалистов на форуме 2008 г.: 1 — 193 nm, иммерсия и двойное „паттернирование“, 2 — ЭУФ-литография, 3 — 193 nm, иммерсия и однократное экспонирование, 4 — нанопечать, 5 — 193 nm, иммерсия в жидкостях с повышенным коэффициентом преломления, 6 — „безмасочная“ литография, в том числе электронно-лучевая.

Таблица 3. Параметры модели производственных затрат, использованные при сравнении перспектив различных нанотехнологий микроэлектроники на рис. 21 ([23])

	45 nm	22 nm		
	ArF(иммерсия), однократная экспозиция	ArF (иммерсия), двойное паттернирование	ЭУФ- литография	наноимпринт литография
Стоимость литографа, mln. \$	40	52	89	
Производительность пластин, h ⁻¹	200	200	100	
Стоимость литографа в пересчете на 1 пластину	0.3	0.3	0.9	0.3
Стоимость маски (ретикла), \$	200000	1176000	252000	622000

остается все, что ниже 16 nm. Возникает вопрос: как долго и далеко в сторону меньших CD может продлиться экспансия оптической литографии? Арсенал средства преодоления дифракционного ограничения на сегодняшний день выглядит исчерпанным. Обсуждая конкурентные возможности ЭУФ-литографии учтем прежде всего, что рэлеевская длина на $\lambda = 13.5$ nm составляет от 18.7 до 16.5 nm 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 $CD \leq 22-16$ nm. 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 приведены 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 до 7 nm [21,22]. 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 придется 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, по-видимому, следует исключить из рассмотрения приемы иммерсии, так как в природе не существует жидкостей, прозрачных в ЭУФ. Впрочем, здесь возможным ответом может стать применение так называемых метаматериалов [23]. С другой стороны, необходимо отметить, что у оптической литографии с применением эксимерных лазеров также остается небольшой „запас прочности“, связанный с использованием фторного (157 nm), аргонового (126 nm) и водородного (116 nm) лазеров, не востребованных ранее ввиду стремительного прогресса литографии на 193 nm. Кроме того, не нашла еще широкого применения „супериммерсия“ с жидкостями, способными превысить коэффициент преломления воды 1.44 на 20–30%. Но применение новых лазеров сталкивается с отсутствием

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

подходящих оптических материалов для изображающего объектива и фотошаблона, а „супериммерсии“ — с технологическими трудностями.

Список литературы

- [1] *Seisyan R.P.* // Proc. of the Japan–Russia advanced Science and Technology Forum. Tokyo, Japan, 2000. P. 164–172.
- [2] *Сейсян Р.П.* // Сб. тез. Междунар. форума по нанотехнологиям „RUSNANOTECH 08“. М., 2008. С. 278.
- [3] *Wolf S.* Microchip manufacturing. Sunstet Beach: Lattice press, 2004. 564 p.
- [4] *Березин Г.Н., Никитин А.В., Сирус Р.А.* Оптические основы контактной фотолитографии. М.: Радио и связь, 1982. 104 с.
- [5] *Сейсян Р.П.* Прикладная физика. Микроэлектроника. Ч. 2. СПб.: СПбГПУ, 2002. 80 с.
- [6] *Сейсян Р.П.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 5. С. 1–13.
- [7] Principles of lithography / Ed. by H.J. Levinson. Washington: SPIE Press, 2001. 410 p.
- [8] www.ASML.Com.
- [9] *Ган М.А., Сейсян Р.П.* // Сб. тез. Междунар. форума по нанотехнологиям „RUSNANOTECH 08“. М., 2008. С. 48; *Бельский А.Б., Ганн М.А., Миронов И.А., Сейсян Р.П.* // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 8. С. 59–69.
- [10] *Wallmark J.T.* Microelectronics / Ed. by E. Keonjan. Ch. 2. N.Y.: McGraw-Uill, 1963. P. 10–96.
- [11] *Seisyan R.P.* // Int. Conf. „Laser Optics, LO-2010“. SPb., 2010. P. 25.
- [12] *Levenson M.D., Viswanathan N.S., Simpson R.A.* // IEEE Trans. Elect. Dey. 1982. Vol. 29. N 12. P. 1628–1836.
- [13] *Smith B.W.* et al. // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5377.
- [14] *Pease R.F., Chou S.Y.* // Proc. IEEE. 2008. Vol. 96. N 2. P. 248; *Yost D., Forte T., Fritze M., Astolfi D., Suntharalingam V., Chen C.K., Cann S.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2002. Vol. 20. P. 191.
- [15] *Hirayama T.* et al. // Int. EUV SEMATECH Symposium. Tahoe, 2008.
- [16] *Shirai M.* et al. // Int. EUV Sematech Symposium. Sapporo, Japan, 2007.
- [17] *Калитеевская Н.А., Нестеров С.И., Горелов В.А., Сейсян Р.П.* // Сб. тез. Междунар. форума по нанотехнологиям „RUSNANOTECH 08“. М., 2008. С. 249; *Бараи Е.Г., Кабин А.Ю., Любин В.М., Сейсян Р.П.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 3. С. 106–113.
- [18] *Yost D., Forte T., Fritze M., Astolfi D., Suntharalingam V., Chen C.K., Cann S.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2002. Vol. 20. P. 191.
- [19] *Fritze M.* et al. // Lincoln Lab. Journal. 2003. Vol. 14. N 2. P. 237.
- [20] *Lercel M.* // Future Fab. Int. 2009. N 28.
- [21] *Гапонов С.В.* // Матер. симп. „Нанофизика и нанoeлектроника“. Н. Новгород, 2005; *Ухало Н.И., Салащенко Н.Н.* // Вестник РАН. 2008. Т. 78. № 5.
- [22] *Kuhlmann T., Yulin S., Feigl T.* et al. // Appl. Opt. 2002. Vol. 41. N 10. P. 2048.
- [23] *Белов П.А., Симовский К.Р., Хао Я.* // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. СПб.: СПбГУИТМО, 2006. С. 37–53.