

Нанолитография в экстремальном ультрафиолете как средство производства микропроцессоров сверхвысокой интеграции и инструмент будущих нанотехнологий

Р. П. Сейсян

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

Решающим фактором, обеспечивающим в течение последних 40 лет беспрецедентные темпы развития микроэлектроники, являлась возможность непрерывного уменьшения минимального характеристического размера элементов интегральных схем, $a_{\min}$, фотолитографическим методом. Притом, важнейшим преимуществом технологий фотолитографического формирования микрорисунка является возможность одновременного и параллельного переноса изображения, состоящего из многих миллионов элементарных фрагментов, обеспечиваемая волновым характером оптических процессов. Анализ тенденций дальнейшего уменьшения $a_{\min}$ показывает неизбежность выхода в ближайшие 5–10 лет в нанометровый диапазон с размерами $a_{\min} = 10\text{--}60$ нм. Однако возможности оптических систем ограничены дифракционным пределом и разрешаемая полоса не может быть много уже длины волны света. Дальнейшее уменьшение длины волны требует углубления в вакуумно-ультрафиолетовый (ВУФ) и мягкий рентгеновский диапазоны. Возникающие проблемы связаны, в частности, с отсутствием здесь оптически прозрачных материалов, а также с трудностью создания эффективных источников излучения в этой области длин волн. В силу ряда причин наиболее привлекательной областью длин волн, в которой может быть осуществлено создание супер-литографа, способного обеспечить дальнейший прогресс микроэлектроники, оказывается т.н. «экстремальный» ультрафиолет (ЭУФ) — коротковолновый край ВУФ-диапазона, примыкающий к «мягкому» рентгену.

Технологии, которые лежат в основе создания ЭУФ-нанолиитографа, приспособленного под изготовление микропроцессорных СБИС на уровне интеграции в $10^8\text{--}10^{10}$ элементов в кристалле, естественно, находятся в фокусе интересов крупнейших мировых фирм и научно-исследовательских институтов. Это — принципиально новый, не имеющий аналога в традиционной микротехнике, формирователь изображения топологического рисунка ИС. Источником ЭУФ обычно является высокотемпературная плазма, генерируемая, например, импульсным излучением мощного частотного лазера, сфокусированным на некоторую мишень, или же мощным электрическим разрядом. Оптическая система и шаблон создаются по принципам отражательной рентгеновской оптики нормального падения с многослойными брэгговскими покрытиями, наносимыми на атомарно-гладкие поверхности: плоские (ЭУФ-шаблон), или расчетной кривизны (объектив и конденсор).

Собственно источником ЭУФ здесь является $\sim 50\text{--}100$ микронное, быстро (со скоростью $\sim 10^6$ см/с) расширяющееся, ионизированное до 20 крат облачко вещества

мишени в плазменном состоянии при температуре от 0.12 до 1.2 миллионов градусов, соответствующей 10–100 эВ. Такой квазиточечный источник излучения весьма удобен для разработки и оптимизации всей оптической системы. Однако, здесь трудно преодолимым препятствием оказывается образование — наряду с излучением — большого количества микроосколков, загрязняющих оптическую систему и быстро выводящих ее из строя. Это вынудило в дальнейшем сосредоточиться на сверхзвуковых газовых струях тяжелого инертного газа — ксенона. Именно на лазерной плазме ксенона построены источники излучения в опытных версиях — американских и европейской — ЭУФ нанолитографов. Основным источником ЭУФ-фотонов в интересующей нас области спектра оказывается десятикратно ионизированный ксенон Xe^{10+} и эмиссия здесь обязана дискретным линиям поглощения в серии оптических переходов с участием четвертой и пятой атомных оболочек Хе. Используя Z-пинч разряд и его модификации, удастся получить более мощный источник излучения на олове: достигнута оптическая мощность порядка 40 Вт в так называемом «промежуточном фокусе» осветительной системы, пригодная для освещения маски. Преимущество разрядного источника состоит еще и в отсутствии мощного первичного лазерного источника возбуждения плазмы.

Для стандартной чувствительности фоторезиста в 5 мДж/см^2 , в зависимости от количества зеркал в изображающем объективе, по нашим расчетам, от источника требуется 10–130 Вт спектрально чистого ЭУФ-излучения в «промежуточном фокусе» (на маске) для соответствия современным требованиям по производительности.

Оптическая система ЭУФ литографа имеет несколько принципиальных особенностей, происходящих как от особенностей зеркальной системы вообще, так и от особенностей «брэгговских» отражательных покрытий. Так, зеркальная оптическая система не содержит диспергирующих элементов, вследствие чего ход лучей не зависит от длины волны и может поверяться светом любого диапазона электромагнитных волн. Зеркальная оптическая система не может иметь числовую апертуру, близкую к единице. Для всей оптической системы покрытия должны совпадать по длине волны максимума отражения таким образом, чтобы не выходить за пределы $\delta\lambda_{\text{max}}/\lambda \leq 2\%$.

Так как потери на неполное отражение ЭУФ «брэгговских» зеркал весьма существенны, естественно обходиться минимальным количеством зеркал. Чтобы проэкспонировать весь топологический слой кристалла СБИС, необходимо сканировать в пределах чипа по поверхности полупроводниковой пластины, так что такой нанолитограф должен будет представлять собой «степпер-сканер». В случае возможности пренебрежения размером поля изображения, числовая апертура может быть существенно увеличена при применении модифицированной схемы «шварцшильдовского» объектива. Достаточно высокое качество на большой площади, соответствующей приблизительно одной десятой части современного микропроцессорного чипа, достигается шести зеркальной схемой, а восьми зеркальная схема, согласно оценкам специалистов C. Zeiss, уже смогла бы обеспечить $NA \approx 0.4$ на уровне промышленного сканера-степпера. Таким образом, предполагаемое разрешение промышленного нанолитографа сможет достичь 20–30 нм в результате разработки 8-ми зеркального объектива, запланиро-

ванной на 2014 год. Но здесь уже становятся критическими потери восьмикратного отражения при коэффициенте отражения $R < 1$.

Качество зеркал, в частности, максимальный коэффициент отражения, полученный на многослойной «брэгговской» системе, находится в прямой зависимости от шероховатости поверхности заготовки, на которую наносятся слои. Близкие результаты получены на кварцевом стекле и монокристалле кремния. Они демонстрируют наличие технологии, обеспечивающей 0.1–0.33 нм среднеквадратичной шероховатости. Последняя величина свидетельствует о возможности создания действительно атомарно-гладких поверхностей! При этом необходимо с высочайшей точностью следовать расчетной кривизне профиля зеркальной поверхности, существенно отклоняющейся от сферы (т.н. асферика) — для подавления аберраций. Согласно критерию Марешаля точность должна соблюдаться на уровне $<0.05\lambda$ (при $\lambda = 13.4$ нм). Такую точность асферических поверхностей изображающих зеркал удается осуществить на практике.

Формула критерия Релея демонстрирует основные пути увеличения разрешающей способности фотолитографических систем. И первое — это уменьшение длины волны электромагнитного излучения λ . Этим путем фотолитография развивалась на протяжении всего времени существования микроэлектроники, достигнув на сегодняшний день 193 нм — длины волны излучения ArF эксимерного лазера. Для более коротковолнового излучения уже практически невозможно найти подходящую пару прозрачных материалов с заметно отличающимися коэффициентами преломления.

Для реализованного изображения правильно было бы переписать выражение, соответствующее критерию Релея, вводя в него другой коэффициент, k_1 , являющийся уже переменной величиной, зависящей от деталей организации процесса воспроизведения микрорисунка. Эту величину удавалось уменьшать в течение последних двадцати лет. Естественно, возникает вопрос: есть ли предел ее уменьшению и как сказывается это уменьшение на качестве изображения? Этот вопрос является в настоящее время предметом многочисленных исследований, которые можно было бы отнести к разряду поисков метода искусственного снижения дифракционного предела. Существует, по крайней мере, три вида технических приемов, приводящих к уменьшению k_1 . Первый — это создание масок, создающих более высокий контраст в оптическом поле изображения за счет искусственного фазового сдвига на границах элемента рисунка. Другой метод сводится к такой обработке фоторезиста — после образования в результате экспонирования т.н. «скрытого изображения», — которое делает дальнейшее ионно-плазменное проявление микрорисунка квази-вертикальным. Наконец, третий метод сводится к повышению «контрастности» самого фоторезиста. Следует заметить, однако, что уменьшение k_1 имеет отрицательное влияние на качество микрорисунка, и — во избежание этого — становится необходимой специальная коррекция рисунка на фотошаблоне. Поэтому предпочтительно избегать слишком большого уменьшения этой величины.

Наконец, последний путь увеличения разрешающей способности фотолитографического процесса — это увеличение числовой апертуры объектива NA . Как обнаружилось, вода, обладающая на рабочей длине волны коэффициентом преломления 1.44,

может быть впрыснута в промежуток между «обычным» изображающим объективом и полупроводниковой пластиной практически безо всяких отрицательных последствий для качества воспроизводимого рисунка. Это приводит к тому, что рабочая длина волны сокращается до $\lambda/n = 135$ нм и в n раз увеличивается числовая апертура объектива, что открывает возможность работы при значениях NA , превышающих единицу, уже на тех объективах, которые существуют, и у которых на воздухе $NA < 1$. По оптимистическим оценкам применение иммерсии даст возможность выйти в конечном итоге к 2014 г. на разрешение полос размером менее 35 нм, не меняя существенно конструкцию уже существующих литографических установок. Открытие и интенсивная разработка иммерсионной литографии на эксимерных лазерах оставляет ЭУФ нанолитографии в принципе лишь «экстремальную» нишу сверхразрешения с $a_{\min} < 20$ нм. Но достижение разрешения полос < 20 нм уже вряд ли возможно при помощи иммерсии.

Выбирая оптимальный диапазон длин волн, учтем главный ограничивающий фактор: рассеяние фотоэлектронов, возникающих в материале фоторезиста при поглощении высокоэнергетического излучения. Радиус их рассеяния быстро растет с увеличением энергии кванта — как $E^{1.75}$ и уменьшается обратно-пропорционально плотности материала резиста. В случае проекционной печати это ограничение возникает уже при величинах $a_{\min}$ порядка 10 нм, и наиболее благоприятная область энергий фотона находится — в зависимости от плотности резиста и числовой апертуры объектива — при длинах волн около 10 ± 5 нм ($h\nu = 83 \dots 250$ эВ). Таким образом, предпочтительны часть области ЭУФ, примыкающая к мягкому рентгену и наиболее длинноволновая часть мягкого рентгена.

Рассматриваемый спектральный диапазон оказывается существенно коротковолнее фундаментальной полосы поглощения, формируемой переходами из валентной зоны в зону проводимости, и всецело принадлежит переходам из внутренних атомных оболочек. Это значит, что спектральное поведение оптического поглощения (отражения) никак не зависит от кристаллической структуры вещества, и полностью определяется — для многоатомного вещества — стехиометрией и соответствующей суммой парциальных коэффициентов поглощения, что резко ограничивает возможности построения оптических элементов. В этой области спектра полностью отсутствуют прозрачные материалы, и относительно низкий коэффициент поглощения может быть получен в области скачка поглощения, соответствующего переходу к поглощению следующей электронной орбитой. Тем не менее, здесь удастся получить относительно высокий коэффициент нормального отражения в многослойной «брэгговской» системе. Брэгговское интерференционное зеркало образуется распределенным отражением от чередующихся четвертьволновых слоев двух материалов. В зеркалах такого типа малая часть падающего света отражается от каждой пары, а толщины слоев подобраны так, чтобы отраженные волны при интерференции складывались. С помощью многослойного покрытия такого типа в системе «Mo–Si» был получен максимальный коэффициент отражения зеркала 70%, и он приходится на длину волны 13.4 нм. Притом абсолютный максимум оптимизированного коэффициента отражения для практически

всех возможных «брэгговских» пар приходится именно на эту длину волны.

Эксперименты, выполненные в ФТИ с рядом тонких неорганических пленок, позволили обнаружить эффект гигантского контраста передачи изображения, проявляющийся на некоторых материалах при определенных режимах облучения. Профиль формы края реализованного изображения — при соблюдении этих режимов — оказывается существенно более резким, чем световое поле. Одновременно с высоким контрастом экспериментальное исследование показывает возможность получения весьма высокой чувствительности, достигаемой при приемлемой пороговой интенсивности. Однако, такой фоторезист, являясь нелинейным, теряет свойство взаимозаместимости интенсивности и времени экспонирования: необходимо превысить в каждом импульсе некоторую пороговую энергию. Экспериментальное исследование показывает практическую возможность разрешения полос шириной 30–40 нм при использовании некоторых неорганических резистов с чувствительностью порядка 5 мДж/см², притом минимальное значение размеров здесь задавалось использованным методом формирования изображения.

Построение экспериментального ЭУФ-нанолитографа, позволявшее рассмотреть и оценить основные проблемы ЭУФ-нанолитографии в комплексной взаимосвязи, было одной из главных задач, поставленных при выполнении проекта ФТИ. Авторы проекта уделили основное внимание созданию условий достижения предельного разрешения. Такое разрешение могло быть получено как путем разработки относительно широкоапертурных схем изображающих объективов, так и изысканием нелинейных сред, эффективных в качестве фоторезистов с высоким контрастом передачи изображения.

Осветительная часть ЭУФ оптической системы состоит из источника света — лазерной искры, собирающего свет вогнутого асферического коллекторного зеркала и плоского отклоняющего зеркала. Изображающая часть оптической системы состоит из маски-фотошаблона, проекционного объектива и образца с фоторезистом, на котором формируется уменьшенное в 10 раз изображение маски. В качестве объектива для ЭН выбран простой осесимметричный двух зеркальный шварцшильдовского типа объектив. Моделирование показало, что разрешение, получаемое при помощи такого объектива, составляет $a_{\min} = 15\text{--}20$ нм при приемлемом контрасте. Можно вполне рассчитывать на улучшение, как минимум, вдвое получаемой оптической разрешающей способности системы в процессе проявления и закрепления изображения, т.е. на 7.5 и 5 нм для двух и четырех зеркальных объективов, соответственно. Для дальнейшего продвижения в сторону одного нанометра можно будет перейти, пренебрегая потерями, на более короткие длины волн, вплоть до 3–7 нм с использованием других «брэгговских» систем.

Диапазон 10–20 нм, по-видимому, окажется критическим для полевого транзистора с изолированным затвором. Какие объекты могут оказаться предметом исследований на таком нанолитографе? Это квантово-точечный кристалл, интерференционные мезотранзисторы и логические элементы, одноэлектронный транзистор, фотонные кристаллы. Кроме того, нанолитография способна вдохнуть новую жизнь в некоторые «старые» приборы. Однако, все это может показаться потугами слабого и зашоренного

воображения на фоне возможности использования нанолитографических структур в качестве «печатной наноплаты» с организованной и взаимосвязанной системой затрат для наноструктур, получаемых самоорганизацией.