

ЛИТОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖЕСТКОГО УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ БЫТЬ ИЛИ НЕ БЫТЬ?

М.Гольцова

Традиционное масштабирование КМОП-микросхем, которое на протяжении многих десятилетий стимулировало развитие микроэлектроники, практически уже с трудом обеспечивает требуемое соотношение потребляемой мощности и быстродействия схем с 1х-нм топологическими нормами вследствие достижения основных физических пределов используемых материалов и технологий. Растет озабоченность производителей относительно стоимости работ по дальнейшему масштабированию микросхем. В связи с этим особое внимание привлекает ключевое технологическое звено современного полупроводникового производства – литография, доля которой в маршрутной карте производства микросхем достигает 60–70%. Сегодня для изготовления микросхем с нанометровыми проектными нормами разработчики привлекают литография с использованием экстремального, или жесткого УФ-излучения (EUV), иммерсионная глубокая УФ-литография с двойным экспонированием и безмасочная электронно-лучевая. Предлагаются и новые технологии. Каковы достоинства и недостатки технологий литографии? Каковы перспективы их применения?

Для полупроводниковой технологии наступил серьезный переломный момент. Пока масштабирование элементов микросхем продолжается, и в этом году можно ожидать освоения производства микросхем с 20-нм проектными нормами, а в 2014 – выпуск 14-нм устройств. Южнокорейский полупроводниковый гигант – компания Samsung – намерен уже в конце 2013 года представить пригодный для освоения в производстве процесс изготовления 14-нм микросхем на основе трехмерных транзисторов FinFET. Но 14-нм и менее технологии потребуют коренных изменений структуры микросхем и методов их формирования. На прошедшей в декабре 2012 года Международной конференции IEDM рассматривались достоинства и недостатки различных

технологий будущих микросхем с 1х-нм топологическими нормами:

- трехмерных на основе транзисторов FinFET, SiGe-транзисторах, полупроводниковых соединениях III-V, туннельных полевых транзисторах, на полностью обедненном кремнии на изоляторе (Fully-Depleted Silicon-On-Insulator, FD-SOI);
- планарных на чрезвычайно тонкой КНИ-подложке (ETSOI-технология).

И хотя сейчас самой перспективной считается трехзатворная (Tri-gate) FinFET-технология, представители различных направлений согласились, что пока не ясно, какой должна быть будущая микроэлектронная технология [1].

На протяжении почти 30 лет выполнение закона Мура обеспечивала фотолитография в соответствии с формулой, определяющей ее

разрешение: $CD = k_1(\lambda/NA)$, где λ – длина волны источника излучения, NA – числовая апертура объектива и k_1 – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа фоторезиста и технологического процесса, т.е. за счет уменьшения длины волны излучения источников, используемых в установках экспонирования, или увеличения числовой апертуры. Однако с достижением числовой апертуры, равной 1,35, и рабочей длины волны 193 нм дальнейшее масштабирование элементов с помощью традиционной фотолитографии затруднено из-за возникших физических и стоимостных ограничений. Для освоения 2х-нм технологии уже нужна литография следующего поколения (Next Generation Lithography, NGL). Но как до сих пор однозначно не сделан выбор будущей микроэлектронной технологии, так и не определен метод литографии следующего поколения, наиболее пригодный для реализации массового производства (High Volume Manufacturing, HVM) новейших нанометровых микросхем. Будет ли это 193-нм иммерсионная литография (глубокая УФ) с двойным (double patterning) или многократным экспонированием, EUV-технология, литография с направленной самоорганизацией (Direct Self-Aligned, DSA)

блок-сополимеров или безмасочная электронно-лучевая технология?

В 2010 году на вопрос, какую технологию предпочтительней использовать при экспонировании критических слоев, 41,3% экспертов в области литографии, участвовавших в проводимом консорциумом Sematech форуме Litho Forum 2010, указали на EUV, тогда как 33,3% отдали предпочтение иммерсионной литографии с двойным шаблоном. Однако на вопрос о том, какую технологию они будут применять в действительности, только 5,6% респондентов выбрали EUV, а 77,8% – двойное экспонирование. В 2016–2018 годах, когда будет осваиваться 11-нм процесс, 38% респондентов предполагают воспользоваться EUV-технологией и еще 22,6% – ее "расширенным" вариантом с большей числовой апертурой. Доля компаний, намеренных применять двойное экспонирование, составила всего 14% [2]. Но сейчас все еще самыми перспективными считаются иммерсионная и EUV-технологии.

ПРОБЛЕМЫ EUV-ЛИТОГРАФИИ

Сегодня ни одна компания, даже такая, как IBM или Samsung, не располагает достаточными средствами для решения всех проблем, возникающих при освоении новой технологии. Об

этом свидетельствуют трудности, связанные с освоением EUV-литографии в массовом производстве. Многие производители микросхем готовы к применению литографии жесткого ультрафиолета. В наноцентре Олбани уже введено в строй обещанное IBM штату Нью-Йорк здание под EUV-литографию. Но пока оно пустует. Созданы и работают установки жесткой УФ-литографии. Так, компания ASML еще в 2011 году поставила бельгийскому межуниверситетскому исследовательскому центру микроэлектроники (IMEC) литографическую установку NXE:3100 (компании ASML) с источником жесткого УФ-излучения, генерируемого с помощью возбуждаемой разрядом плазмы (Discharge Produced Plasma, DPP). Разрешение ее составляло 27 нм, числовая апертура – 0,25, размер поля – 26 нм, совмещение – 4 нм и размытие границ – менее 5%. В режиме одиночного экспонирования за год было обработано около 3 тыс. кремниевых пластин, т.е. производительность установки стоимостью около 100 млн. долл. оказалась в 15–30 раз меньше, чем у значительно более дешевого оборудования фотолитографии. Но такой показатель слишком мал и не соответствует требованиям крупносерийного производства таких компаний, как Intel, Samsung, GlobalFoundries, TSMC и др. [3].

Основная причина низкой производительности – малая мощность источника излучения. Поскольку длина волны жесткого ультрафиолета составляет 13,5 нм, и излучение на этой длине волны поглощается всеми материалами, в том числе стеклом, из которого изготавливаются традиционные линзы, в EUV-литографии вместо полностью поглощающих излучение линз, используется отражающая система многослойных зеркал. Фотошаблоны, которые традиционно являются пропускающими, также должны быть отражающими. Кроме того, нужно, чтобы вся система находилась в вакууме, поскольку световые волны EUV-диапазона поглощаются воздухом. Тем не менее, система отражающих зеркал и фотошаблоны могут поглощать до ~94% генерируемого излучения. Следовательно, для обеспечения коммерческих объемов выпуска микросхем мощность источников EUV-установок должна быть не менее 250 Вт, тогда как сейчас она не превышает 10 Вт.

Отсутствуют необходимые фоторезистивные материалы, бездефектные маски, метрологическое оборудование и другие компоненты, без которых проведение процесса фотолитографии невозможно. Вот почему прогнозировавшееся в начале 2000 годов освоение выпуска 45-нм микросхем с использованием EUV-литографии не состоялось.

Установок с необходимыми мощными источниками нет и сейчас, и для освоения производства микросхем с 2х-нм нормами пришлось вновь обратиться к 193-нм иммерсионной литографии с двойным экспонированием. Возможно использование EUV-литографии для выполнения критически важных слоев и иммерсионной литографии для остальных слоев (правда, в этом варианте необходимо обеспечивать точное совмещение фотошаблонов). Но при двойном экспонировании (не говоря о многократном) затраты на проведение 193-нм иммерсионной литографии оказываются весьма значительными. Стоимость микросхем с проектными нормами 14 нм, изготовленных с помощью иммерсионной литографии, на 90% превосходит стоимость современных 28-нм схем. Следует отметить и высокую стоимость фотошаблонов: цена одного шаблона для формирования микросхемы с 90-нм нормами на 300-мм пластине составляет ~1 млн. долл. Таким образом, по-видимому, резкого снижения цен на микросхемы с нормами 14 нм ожидать не следует.

Но пока компания Intel считает экономически эффективным производство микросхем на основе транзисторов FinFET с проектными нормами вплоть до 10 нм, применяя иммерсионную литографию с четырехкратным экспонированием некоторых критичных слоев, а также ряд экспериментальных технологий (фотонику, графен, синтез материала, память большой емкости, нанопроводы) [4]. Как отметил руководитель работ по архитектуре и интеграции микросхем Марк Бор, компания хотела бы использовать EUV-технологии при изготовлении 10-нм схем. Однако маловероятно, что все ее проблемы будут решены к моменту создания микросхем с такими нормами.

Как и Intel, компании, разрабатывающие сложные высокопроизводительные микросхемы, считают, что литография жесткого УФ-излучения найдет применение в производстве лишь при освоении 7-нм технологии. Правда, специалисты компании GlobalFoundries утверждают, что смогут изготавливать с помощью иммерсионной литографии и схемы с 7-нм нормами, хотя и не исключают возможность перевода основных операций на EUV-литографию. Рассмотрение EUV-литографии как будущей производственной технологии нанометровых микросхем не удивительно, поскольку продление "жизни" оптической литографии экономически не эффективно. По данным Barclays Capital (инвестиционное подразделение крупнейшего банка Великобритании Barclays Bank PLC, предлагающее услуги по стратегическому

консультированию), переход от одиночного экспонирования к многократному увеличит стоимость процесса литографии на 56%. Как отмечают эксперты Varclays, при производстве схем с 22- и 20-нм нормами необходимо проводить 52 операции литографии, из которых 31 предусматривает выполнение иммерсионной литографии с 11 этапами многократного экспонирования. В результате изготовитель при обработке 1000 пластин в месяц будет затрачивать на проведение литографии 27 млн. долл.

Таким образом, как уже указывалось, EUV-литография – пока самая перспективная для замены оптической иммерсионной технологии. Но для создания оборудования литографии жесткого ультрафиолета, пригодного для массового производства нанометровых микросхем, помимо увеличения мощности источника УФ-излучения, необходимо решить и такие проблемы, как:

- получение бездефектных фотошаблонов;
- создание инфраструктуры контроля и анализа дефектов;
- повышение долгосрочной надежности источника излучения;
- улучшение разрешения и чувствительности резиста;

- уменьшение размытости линий.

Поставленные перед разработчиками систем EUV-литографии задачи и существующие проблемы столь сложны и ресурсоемки, что требуют привлечения к их решению производителей микросхем. Сегодня крупнейший поставщик сложнейшего литографического оборудования полупроводниковой промышленности – голландская компания ASML, на долю которой приходится более 80% рынка передовых систем литографии. В 2011 году, по данным VLSI Research, компания заняла первое место в перечне крупнейших поставщиков этих систем, опередив Applied Materials [5]. Компания Nikon – основной конкурент ASML в области создания систем EUV-литографии – заняла лишь седьмое место и не намерена проводить работы по совершенствованию оборудования литографии в жестком ультрафиолете до 2014 года.

Для расширения работ в области литографии ASML в октябре 2012 года объявила о приобретении компании Сумер – производителя источников глубокого и жесткого УФ-излучения. Кроме того, ASML в июле 2012 года учредила программу по привлечению своих крупнейших заказчиков к приобретению пакетов не дающих контроля акций и инвестированию НИОКР по будущим программам

развития работ, направленных на совершенствование оборудования жесткой УФ-литографии, которое перспективно для обработки пластин диаметром 450 мм во второй половине этого десятилетия. Потребители, участвующие в программе, разделяют риски и финансовое бремя по доведению оборудования EUV-литографии до промышленного уровня. Но в случае успеха они имеют приоритет в получении этого оборудования.

Первой на предложение ASML откликнулась компания Intel, заключившая соглашение, согласно которому она инвестирует 4,1 млрд. долл. в работы по совершенствованию EUV-литографии и переходу на обработку 450-мм пластин. По первой фазе договора 2,1 млрд. долл. предназначены на приобретение 10% акций ASML. По второй фазе Intel намерена приобрести еще 5% акций за ~1 млрд. долл. Оставшийся 1 млрд. долл. предназначен для ускорения работ по указанной тематике, по крайней мере, на два года. Решение компании Intel усилило доверие к возможности реализации промышленной литографии жесткого УФ. И уже в августе 2012 года крупнейший мировой контрактный производитель TSMC и компания Samsung инвестировали по аналогичному соглашению 1,4 млрд. и 970 млн. долл., соответственно [6].

Консорциум Sematech в апреле этого года привлек к выполнению программ по развитию литографии и начальных процессов производства микросхем компанию Intermolecular – разработчика комбинаторной платформы обеспечения высокой производительности (High Productivity Combinatorial, HPC). Цель – сокращение стоимости владения EUV-средствами и совместное исследование новых материалов, процессов и схем интеграции для перспективных логических микросхем.

Дополнительно ASML заключила соглашение с GlobalFoundries по оказанию помощи в области компьютерной литографии при производстве 28- и 20-нм микросхем и ускорению создания схем с меньшими топологическими нормами, в том числе и формируемыми с помощью EUV-литографии. Услуги по компьютерной литографии окажет отделение ASML Holdings – Brion Technologies. В результате GlobalFoundries сможет предоставлять своим заказчикам высокопроизводительную платформу моделирования литографических шаблонов с высокой плотностью элементов Tachyon Flex компании Brion. По утверждению специалистов ASML, приложения Tachyon по возможности пропорционального уменьшения размеров элементов превосходят конкурирующие продукты, обеспечивая тем самым экономию времени

и стоимости при подготовке микросхем к массовому производству.

Приведут ли новые инвестиции в EUV-литографию (с конца 1990-х годов в эту область уже вложено около 1 млрд. долл.) к скорому ее освоению в производстве микросхем следующих поколений?

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ

Основная задача, стоящая перед производителями оборудования литографии, – выполнение требований промышленности к мощности источника УФ-излучения и производительности оборудования. Этим вопросам было уделено большое внимание на Международной конференции по перспективной литографии 2013 Общества оптики и фотоники (SPIE Advanced Lithography), проводимой центром IMEC совместно с консорциумом SEMATECH и расположенным в Японии Международным консорциумом по разработке технологии фотошаблонов и фоторезистов для EUV-литографии (Infrastructure Development Center, EIDEC).

Компания ASML описала статус нового промышленного сканера NXE3300B, значительно улучшенного по сравнению с оборудованием предыдущего поколения NXE3100. Считается, что производительность сканеров NXE3100 составляет 6–60 пластин/ч (wafers-per-hour, wph), тогда как этот показатель для модели NXE3300B достигает 50–125 пластин/ч. В результате отношение мощности источника к производительности увеличится с 1 (10 пластин/ч при мощности 10 Вт) для NXE3100 до 1,6 (50 пластин/ч при мощности 80 Вт) для NXE3300B и в конечном итоге достигнет 2 при увеличении мощности источника до 250 Вт для поддержки производительности 125 пластин/ч. Сейчас ASML создает 11 систем NXE3300B, девять из которых будут поставлены заказчикам в конце этого года или в начале 2014. Какой в них будет использован источник, не указывается. Поэтому участники конференции с большим интересом ожидали доклад компании Sumet.

В результате приобретения AMSL компании Sumet на рынке остались лишь два крупных независимых поставщика таких систем – Xtreme Technologies, Германия (входит в конгломерат Ushoi Group) и Gigaphoton (Япония). Правда, и компаний, намеренных осваивать 10-нм технологию, сейчас на больше шести. При небольшом числе компаний и производителей конечного оборудования, заинтересованных в развитии EUV-литографии, разработка мощных источников жесткого УФ связана с риском.

Хотя ASML считает, что для получения нужной ее заказчикам производительности литографического оборудования в 125 пластин/ч мощность EUV-источника должна составлять 250 Вт, по расчетам Intel, для формирования отверстий под контакты и обработки критических слоев с помощью EUV-литографии необходим источник мощностью в диапазоне 1 кВт. Но мощность современных источников намного меньше требуемой.

Сократить этот разрыв активно стремится компания Sumeg, разработавшая план развития (дорожную карту) по достижению мощности источника в 250 Вт. В 2012 году она утвердила, что вскоре выпустит источник мощностью до 20 Вт, а в декабре – до 100 Вт. На конференции SPIE Advanced Lithography 2013 компания с гордостью продемонстрировала усовершенствованный источник мощностью 40 Вт, образцы которого уже поставлены ASML для сканеров модели 3300. Система с 40-Вт источником проработала более 8 ч в имитированных условиях полномасштабного производства, в том числе с контролем дозы излучения. Это говорит о том, что производительность сканера с 40-Вт источником составила 30 пластин диаметром 300 мм в час.

Требуемое излучение на длине волны 13,5 нм источника возбуждает плазма, создаваемая лазерным пучком (Laser-Produced Plasma, LPP), воздействующим на капли олова. В источнике компании применен усилительный задающий генератор (Master-Oscillator Power Amplifier, MOPA), содержащий мощный задающий CO₂-лазер и три оптических усилителя для получения интенсивного 15-кВт источника лазерного излучения на длине волны 10 мкм с диаметром пучка 100 мкм. Кроме того, в источнике реализован принцип предварительного воздействия импульса (pre-impulse*) второго, менее мощного, лазера на капли олова. Это приводит к образованию области легкого тумана (миста, mist) металлических частиц, размер которой примерно равен диаметру пучка CO₂-лазера. Еще одно достоинство нового 40-Вт источника жесткого ультрафиолета – система управления, которая, перемещая лазерный пучок в двух осях, следует за потоком капель и обеспечивает попадание излучения CO₂-лазера в движущуюся каплю.

* Метод был предложен учеными Института лазерной техники Университета Осака на Международном конгрессе по физике плазмы 2008.

Компания сообщила, что система NXE3300B с 40-Вт источником в условиях производства, имитирующих реальные, при проведении шести операций длительностью 1 ч обеспечивает выход годных свыше 99,7%. Стабильность дозы была равна $\pm 0,2\%$ при рабочем цикле более 90% (что соответствует требованиям коммерческих сканеров). Была проведена одночасовая операция литографии при мощности 55 Вт (выход годных при имитируемых условиях производства – 97,5%) и продемонстрирована возможность увеличения мощности до 60 Вт. Теоретически полученные результаты соответствуют производительности 165 пластин/ч. Но проблема пока заключается в том, как поддержать такую производительность в реальных условиях производства.

К концу 2013 года ASML планирует начать поставку систем с источником мощностью 80 Вт (что, по мнению ряда обозревателей, маловероятно). EUV-источник такой мощности позволит обрабатывать 40 пластин/ч, что достаточно для изучения проблем производства микросхем с помощью литографии жесткого ультрафиолета. Но для того чтобы выполнить поставленную компанией ASML цель (довести к концу 2014 года производительность оборудования EUV-литографии до 70 пластин/ч), Сумер должна повысить мощность источника до 140 Вт. Отмечается, что в дальнейшем для выполнения плана, определенного дорожной картой компании, и создания источника мощностью 250 Вт будет использован генератор МОРА с четырьмя усилителями. Эти задачи совсем не простые, и хотя компания усиленно работает над их реализацией, из-за громких, но не выполняемых уже несколько лет обещаний по увеличению мощности EUV-источников, присутствовавшие на конференции специалисты отнеслись к планам Сумер со скептицизмом. Однако о серьезности намерений обеих компаний (ASML и Сумер) свидетельствует тот факт, что в работах по созданию мощного EUV-источника будет участвовать 1 тыс. человек. Правда, по данным ASML, отгрузки оборудования EUV-литографии в следующие два года будут средними (немногим больше десяти) [7, 8, 9].

Серьезную конкуренцию Сумер по созданию перспективного мощного источника жесткого ультрафиолета для коммерческих систем EUV-литографии может составить компания Gigaphoton. В 2012 году она выпускала LPP-источники мощностью, несколько превышающей 7 Вт. Компания провела большой объем работ по созданию

включаемого "по запросу" генератора капель олова диаметром менее 20 мкм, повышению эффективности формирования жесткого УФ-излучения благодаря применению CO₂-лазера мощностью 5 кВт и второго твердотельного лазера для выполнения принципа pre-pulse. Для увеличения срока службы зеркала коллектора использован сверхпроводящий электромагнит, позволяющий удалять нежелательные инородные частицы, образуемые при воздействии на капли олова излучения мощного лазера, направляющего их на "ловушку капель". С усовершенствованием источника продлился срок службы генератора капель, сократилось время простоя и снизилась его стоимость. В результате мощность EUV-источников компании Gigaphoton составляет 10 Вт, что, по мнению ее руководства, доказывает возможность создания стабильных LPP-источников УФ-излучения с низкой стоимостью эксплуатации. Для LPP-источников мощностью 250 Вт в компании ведется разработка модуля CO₂-лазера мощностью 40 кВт [10].

Компания Xtreme Technologies, выпускающая EUV-источники под маркой холдинга Ushio, продемонстрировала систему мощностью 51 Вт, обеспечивающую 80%-ный рабочий цикл при работе в течение часа, и 72%-ный цикл при мощности 74-Вт и работе в течение нескольких минут. Плазма формируется разрядом, инициируемым лазером (LDP), что представляет собой своего рода гибридный метод генерации излучения на основе уже используемых DPP- и LPP-подходов. Правда, неизвестно, будут ли LDP-источники применяться в первых образцах установок NXE3300B.

Помимо хороших новостей, касающихся повышения мощности EUV-источников, на конференции обсуждались и проблемы освоения литографии жесткого УФ-излучения в процессе производства микросхем: фотохимическая проверка EUV-шаблонов, оптическая коррекция эффекта их близости (OPC), интеграция EUV-литографии в процесс производства КМОП-схем с исследованием причин низкого выхода годных.

Совместный доклад представителей японского и тайваньского отделений компании Nissan Chemical Industries позволил закончить непрекращающееся обсуждение проблем влияния излучения на длине волны вне заданной полосы (Out-of-Band, OoB) и дегазации фоторезиста на формируемый рисунок и характеристики фильтра спектральной частоты. Для решения этих критических проблем предложено наносить на фоторезист верхнее покрытие, материал которого подавляет OoB-эффект, служит барьерным слоем,

предотвращающим дегазацию, и улучшает его свойства. Материал характеризуется высокими коэффициентами поглощения дальнего ультрафиолета и пропускания излучения на длине волны 13,5 нм. Анализ результатов времяпролетной масс-спектроскопия вторичных ионов показал влияние химии используемого полимера на свойства барьера.

Много докладов было посвящено разработке EUV-резистов, отвечающих требованиям, предъявляемым к разрешению, размытию краев линии и чувствительности (Resolution, LER, Sensitivity – RLS). Внимание присутствующих привлек доклад тайваньской компании JSR Micro, в котором были представлены новые резисты, нижние слои и верхние покрытия, используемые при экспонировании элементов с нормами менее 20 нм. Изучение результатов включения в состав EUV-резиста полимеров с высокими температурой стеклования (Tg-полимеров) и коэффициентом поглощения продемонстрировало хорошие показатели резистов с Tg-полимером по размытию линии и локальной

однородности разрешающей способности, а также увеличение чувствительности резистов с полимером с высоким коэффициентом поглощения. Чтобы улучшить экспонирование, в качестве нижнего слоя резиста использовались материалы на основе кремния с различной гидрофобностью. Материал с более высокой гидрофобностью поверхности позволил повысить целостность линии и улучшить разрешающую способность резиста. С использованием EUV-резистов на основе новых материалов были экспонированы 15-нм линии и области, а также 20-нм окна под контакты.

Ключевой момент при решении задачи создания установок EUV-литографии для крупномасштабного производства – актиническая проверка заготовки шаблона (ABI). Проведение такой проверки в начале процесса производства шаблона позволяет получить набор критических данных, на основании которых можно судить о качестве и рабочих показателях шаблона. Как показали многие доклады на конференции, плотность дефектов подложек и заготовок шаблонов большое, а задача

их устранения – трудно решаемая. Надежду дало сообщение компании Lasertech о создании инструмента, позволяющего обнаруживать со 100%-ной точностью дефекты заготовки высотой и шириной 1 и 33 нм.

Заслуживающим внимания был и доклад представителей компании IBM, в котором сообщалось о возможности с помощью нанообработки в два этапа устранять обусловленные неплоскими слоями зеркала шаблона изменения амплитуды и фазы отраженного света вблизи дефекта. Отклонение амплитуды от заданного значения приводит к погрешности разрешающей способности, тогда как отклонение фазы – к асимметричному экспонированию. Сначала в результате нанообработки слоя многослойной структуры вблизи дефекта с помощью зонда атомного силового микроскопа исключалась возможность изменения фазы. Затем путем модификации рисунка, окружающего поглотитель, устранялась погрешность амплитуды, вызванная как дефектом, так и результатом исправления фазового эффекта. Таким образом, была показана возможность получения различных прошедших нанообработку структур, пригодных для формирования рисунка. И сейчас усилия специалистов компании направлены на исправление дефектов реальных шаблонов для EUV-литографии с помощью рисунков, окружающих поглотитель.

По мере увеличения числовой апертуры до более 0,4 и с применением шаблонов с четырехкратным уменьшением изображения излучение падает на кристалл под различными углами. При использовании современных многослойных MoSi-поглотителей и поглотителей на основе тантала это приводит к нежелательным последствиям: уменьшению размера поля при работе со стандартным 6-дюймовым шаблоном или необходимости применения шаблонов больших размеров (9 дюймов). Последнее потребует значительных затрат на новое оборудование изготовления шаблонов и займет не меньше двух лет [11]. В новых материалах поглотителей для EUV-литографии с четырехкратным уменьшением изображения при работе с большой числовой апертурой предложено использовать никель и алюминий. Правда, для подтверждения работоспособности такого решения потребуются большой объем НИОКР. Кроме того, уменьшить разброс углов падения можно за счет:

- разбиения поля экспонирования на две или четыре части;
- применения в сканерах двух дополнительных зеркал при увеличении числовой апертуры до 0,45. В этом случае при внеосевом освещении

(и малом значении k_1) возможно изготовление микросхем с нормами 10 или 11 нм, хотя это будет не легко.

На основе докладов, прозвучавших на конференции SPIE Advanced Lithography 2013, можно предположить, что в 2014 году в установках литографии жесткого ультрафиолета появятся источники мощностью 40 Вт. Вполне вероятно, что в конце 2014 года начнется выпуск систем NXE3300B, хотя скорее всего источника мощностью 80 Вт в них еще не будет. Источники мощностью 100 Вт, по мнению экспертов, не появятся до 2015 года. И все же конференция показала, что в 2012 году многое было достигнуто в области EUV-литографии. Еще большего можно ожидать в 2013 году.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольцова М.** Конференция IEDM 2012. Не так сложно создать новый прибор, как отказаться от старого. – Электроника: НТБ, 2013, №1, с.138–144.
2. **Hand A.** EUV lithography cannot come soon enough. – www.edn.com/electronics-news/4363455/EUV-lithography-cannot-come-soon-enough
3. **Lapedus M.** ASML claims progress in EUV. – www.eetimes.com/electronics-news/4213730/ASML-claims-progress-in-EUV
4. **Merritt R.** Intel's Bohr sees path to 10-nm chips. – www.eetimes.com/electronics-news/4396146/Intel-sees-quad-patterned-path-to-10-nm-chips
5. www.semiconportal.com/en/archive/news/main-news/120712-asml-intel-nikon.html
6. Why's Everyone Investing in ASML? – www.forbes.com/sites/jimhandy/2012/08/27/whys-everyone-investing-in-asml
7. SPIE Advanced Lithography 2013 – day 4. – life.lithoguru.com/index.php?itemid=271
8. **Watts Michael P.C.** Extreme sources, block copolymers, and resist polishing at SPIE Advanced Lithography. – semimd.com/watts/2013/03/04/extreme-sources-block-copolymers-and-resist-polishing-at-spie-advanced-lithography/
9. **Watts Michael P.C.** Cymer's EUV Team Has An Exciting Few Months – semimd.com/watts/2013/03/14/cymer%E2%80%99s-euv-team-has-an-exciting-few-months
10. Gigaphoton hits 20W with EUV source. – optics.org/news/4/2/20
11. **Bakshi V.** Bring me the rhinoceros: A Review of the 2013 SPIE Advanced Lithography EUVL Conference – www.electroiq.com/blogs/euwl-focus/2013/03/bring-me-the-rhinoceros-a-review-of-the-2013-spie-advanced-lithography-euwl-conference.html