

EUV-литография на пороге. Технологические и экономические аспекты освоения в производстве

М. Макушин¹, В. Мартынов, д. т. н.²

УДК 621.37 | ВАК 05.27.06

Технология литографии на источнике излучения в наиболее коротковолновой части ультрафиолетовой области спектра (предельной УФ-области спектра, extreme ultraviolet, EUV) с длиной волны излучения 13,5 нм разрабатывается более 20 лет. Ее внедрение в массовое производство планировалось еще 13 лет назад на топологиях порядка 90 нм. Однако этого не произошло прежде всего из-за недостаточной мощности источника излучения и производительности. Тем не менее работы не прекращаются. А корпорация Samsung строит под данную технологию завод по крупносерийному производству ИС. Большой интерес отрасли к EUV-литографии объясняется возможностью существенно сократить количество этапов обработки пластин и времени цикла.

По мере масштабирования ИС на уровне 32 нм и менее возникла потребность в методике двойного формирования рисунка (double patterning), которая предусматривает двухэтапное экспонирование. На первом этапе экспонируется половина линий, осуществляются травление и дальнейшие фазы технологического процесса. Затем на пластину наносится другой слой резиста, и вторая половина рисунка экспонируется в промежутки между линиями первого набора. Этот подход достаточно дорогостоящий, занимает много времени, но с технической стороны он сравнительно простой, хотя и требует повышенной точности совмещения – не хуже 2 нм.

Появление методик многократного формирования рисунка (multiple patterning), также разработанных для литографии в целях увеличения плотности размещения топологических элементов, привело к росту издержек и длительности цикла обработки. В то же время при переходе к топологиям менее 28 нм выяснилось, что с экономической точки зрения по новейшим процессам целесообразно формировать только критические элементы ИС, а другие – на базе более зрелых технологий. Иными словами, в одном и том же кристалле ИС стали использовать элементы с различными проектными нормами, что размывало понятие «технологический уровень ИС». Освоение EUV-литографии ставит вопрос ее сочетания в процессе производства как с более зрелыми технологиями, так и с перспективными методиками (наподобие непосредственной самосборки блок-сополимеров – Direct Self-Assembly, DSA).

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О EUV-ЛИТОГРАФИИ

В последнее время стоимость разработки каждого нового уровня технологического процесса повышается на 30%, тогда как долгосрочная ретроспективная тенденция показывает 10% [1]. Средняя стоимость проектирования планарных 28-нм приборов, по данным исследовательской корпорации Gartner, составила 30 млн долл., на уровне 16/14-нм ИС она выросла до 80 млн долл., а для 7-нм ИС она превысит 270 млн долл. [2]. Предполагается, что подобная динамика сохранится при переходе к проектным нормам 7 нм и менее. По мнению экспертов отрасли, использование EUV-литографии не начнется раньше освоения именно 7-нм топологий. Применение данной технологии окажет значительное воздействие на удельную стоимость формирования структур – она будет ниже, чем при использовании методики многократного формирования рисунка (рис. 1) [1].

Внедрение EUV-литографии (основа метода – использование отраженного оптического излучения, рис. 2) в серийное производство ИС порождает новые проблемы – прежде всего связанные с шаблонами, где, как известно, не существует простых решений. Литография обычно рассматривается как единая технология, но в случае EUV-литографии отрасль сталкивается с набором технологий, не все из них продвигаются и совершенствуются одновременно. Например, абберации в зеркалах, используемых для отражения EUV лазерного луча, могут обусловить высокую фоновую засветку. Аналогично любые несовершенства в линзе, фокусирующей EUV-излучение, могут привести к образованию шероховатостей поверхности пластины и ухудшению параметров формируемых приборов. Кроме того, дают о себе знать дробовый фотонный шум, проблемы совмещения и т. д.

¹ ЦНИИ «Электроника», главный специалист, mmackushin@gmail.com.

² ФГБНУ «Аналитический Центр», проф., Минобрнауки РФ, эксперт.

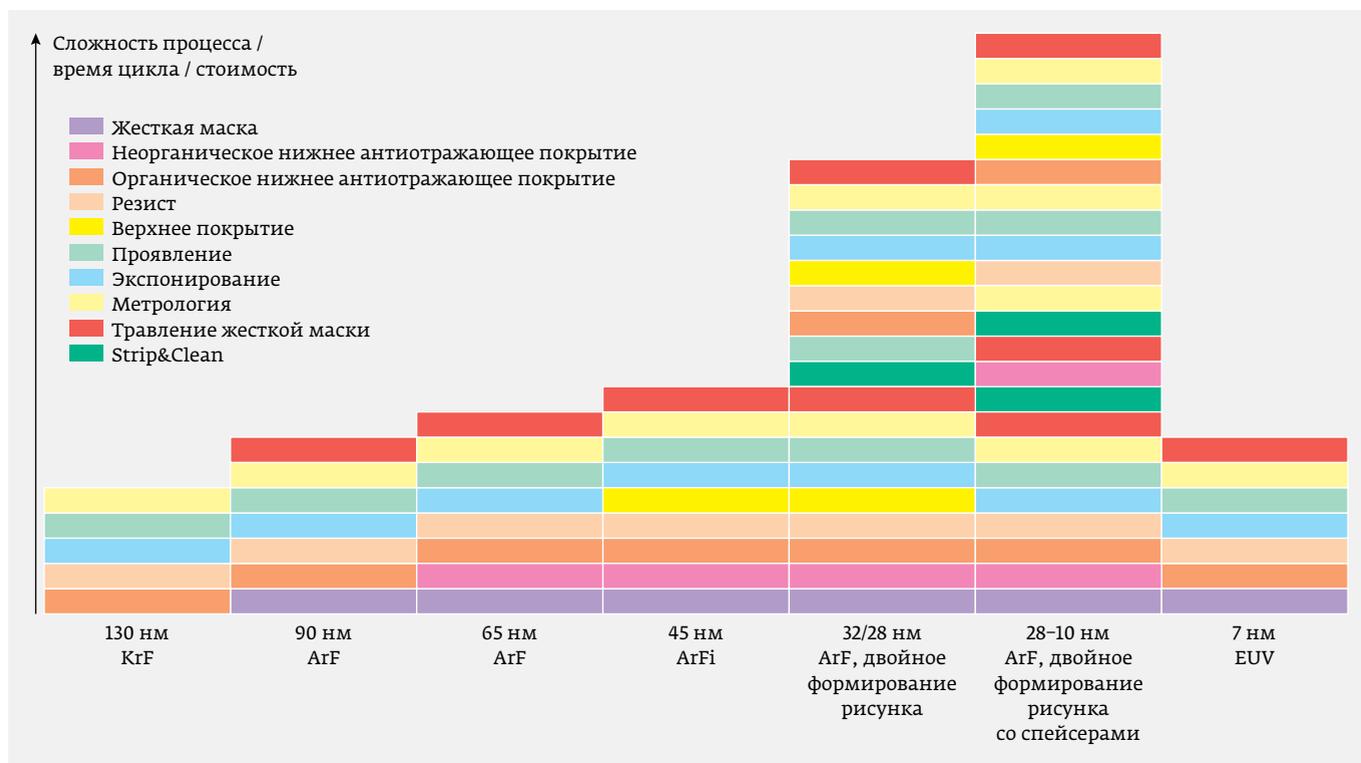


Рис. 1. Сопоставление структуры издержек формирования рисунка при использовании методик иммерсионного двойного формирования рисунка и EUV-литографии. *Источник: ASML*

Любая проблема, связанная с освоением EUV-литографии, сама по себе критичной не является. В то же время их сочетание и взаимное наложение может дать кумулятивный эффект. В условиях, когда кремниевые заводы планируют достаточно быстро перейти от методик многократного формирования рисунка с использованием 193-нм иммерсионных установок к EUV-сканерам, нельзя исключать непредвиденных последствий.

Например, в случае иммерсионной литографии практически любой сканер можно заменить подобным оптическим устройством. Взаимозаменяемыми являются и шаблоны. Кроме того, один и тот же шаблон можно использовать с любым сканером.

В случае EUV-литографии не всегда и не все шаблоны могут быть взаимозаменяемыми – многое зависит от взаимозаменяемости сканеров, что оказывает влияние на процесс формирования шаблонов. Исторически, еще на первых этапах развития полупроводниковой промышленности, пришли к пониманию, что одну версию шаблона необходимо готовить таким образом, чтобы обеспечить ее

использование на различных сканерах. Сейчас аналогичный подход применяется в области EUV-литографии и считается прорывным [3].

При этом переход на меньшие топологии (5 нм, а затем и 3 нм) демонстрирует как обострение существующих проблем, так и появление новых. По оценкам ASML (нидерландская компания, крупнейший производитель фотолитографических систем для микроэлектронной промышленности), применение EUV-литографии на 5/3-нм топологиях



Рис. 2. Основа EUV-литографии – использование отраженного оптического излучения. *Источник: ASML/ Carl Zeiss*

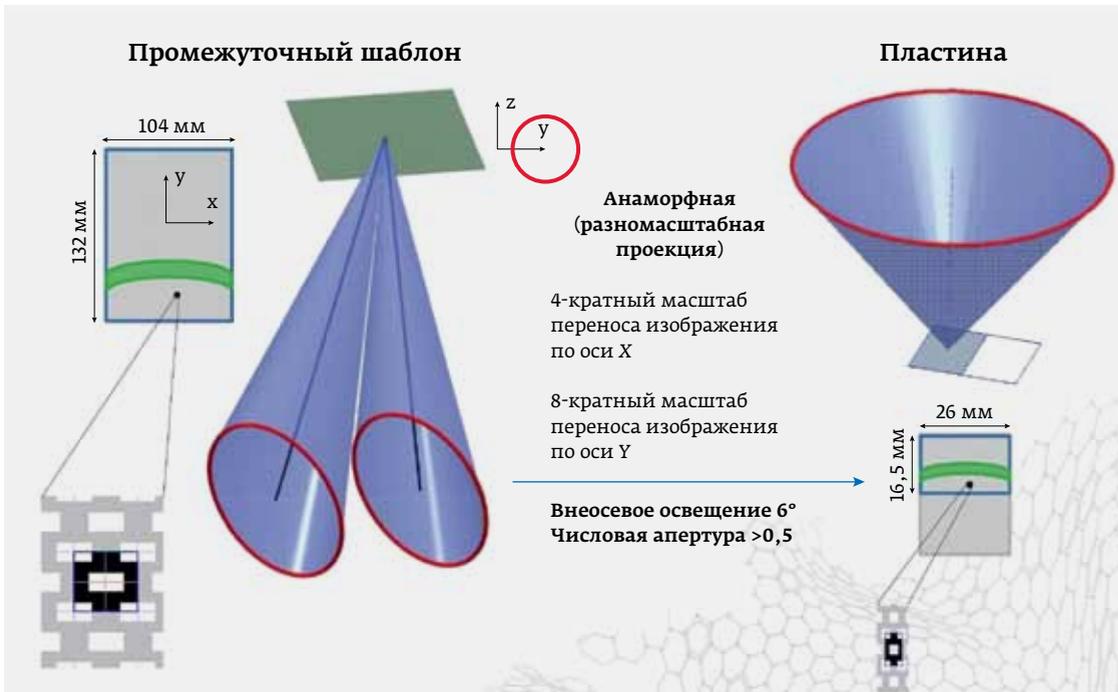


Рис. 3. Анаморфная разномасштабная EUV-система, разрабатываемая ASML и Zeiss, потребует увеличения рисунка шаблона в четыре раза по оси X и в восемь раз по оси Y. *Источник: Carl Zeiss SMT*

потребуется использования технологии с высокой числовой апертурой (NA), а также активизации использования вычислительных методов для прогнозирования возможных дефектов. ASML разрабатывает оборудование со значением $NA > 0,5$, которое будет способно формировать топологии с полшагом порядка 8 нм, его отличает использование анаморфных зеркал – в целях снижения эффекта затенения (экранирования) структур наноразмерных шаблонов. Новая конструкция зеркал позволяет системе по числовой апертуре $> 0,5$ достичь производительности, характерной для текущего поколения инструментальных средств ASML с $NA = 0,33$ при тех же мощности источника излучения и чувствительности резиста (рис. 3). Предполагается, что подобное оборудование появится к 2020 году.

Анаморфные системы при переходе от $NA = 0,33$ к $NA \geq 0,5$ требуют модернизации шаблонов. Для сравнительно больших кристаллов ИС, экспонируемых последовательно с использованием двух различных анаморфных шаблонов, возможно, придется согласовывать их структуры, приводить к одинаковому размеру поля с понижением разрешающей способности и к одной числовой апертуре порядка 0,33. Очевидно, что подобное воздействие на один слой должно быть «прошито» на уровне проектирования, что дополнительно ограничивает развитие технологических инструментальных средств САПР.

Хотя формирование крупных кристаллов ИС потребует вдвое большего числа полупольных шаблонов, можно использовать способ анаморфного создания изображения. Специалисты корпораций ASML и Zeiss сообщили, что формирование «идеальных» отверстий, которые «затеняют» центры зеркал, может способствовать улучшению характеристик

инструментальных средств с $NA = 0,33$. Подобные отверстия позволяют зеркалам лучше отображать и выстраивать ряд отображений. Теоретически после каждого полупольного экспонирования с $NA > 0,5$ новое отображение может экспонироваться со скоростью вдвое большей, чем при полнопольном отображении с $NA = 0,33$. При этом, правда, удваивается количество этапов технологического процесса, что приводит к снижению производительности на несколько процентов.

Исследователи отмечают, что выполнение сдвоенных операций EUVL-экспонирования с $NA > 0,5$ – сложная задача. Факторами снижения производительности технологического процесса станут:

- двойное экспонирование полнопольного изображения с применением EUVL с $NA = 0,33$;
- восьмикратное экспонирование полнопольного изображения с использованием иммерсионного ArF источника;
- четырехкратное экспонирование с совмещенным использованием иммерсионного ArF источника излучения и источника непосредственного формирования изображения электронным лучом (Ebdw) или методикой непосредственной самосборки (DSA).

По некоторым оценкам, одна EUVL-система для поточно-массового производства, предлагаемая ASML, будет стоить не менее 100 млн долл. Производительность подобных систем составит около 45 тыс. пластин, начатых обработкой в месяц. Более того, для формирования 7-нм конструкций производителям придется приобрести 7–12 EUV-степперов, соответственно инвестиции в оборудование для формирования критических литографических слоев могут превысить 1 млрд долл. [4].

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ EUV-ЛИТОГРАФИИ

Современное состояние EUV-литографии определяется документами и материалами последних конференций SPIE* по перспективной литографии (SPIE AL EUVL Conference – март 2017 и 2018 гг.), семинаров по EUV-литографии (2017 EUVL Workshop – июнь 2017 и 2018 гг.), выставки-конференции 2017 Semicon West и т. п. Кроме того, в сентябре 2018 года пройдет конференция SPIE по технологии шаблонов и EUV-литографии (2018 SPIE Photomask Technology+EUV Lithography).

Источники излучения

В сентябре 2017 года корпорация ASML, единственный на данный момент поставщик EUV-сканеров, продемонстрировала автономный источник излучения мощностью 250 Вт (в I кв. 2017 года этот показатель составлял 210 Вт). Мощность интегрированных источников при внутрифирменном тестировании ASML была равна 148 Вт, что соответствует производительности сканера 104 пластины в час (WPH). При тестировании на месте эксплуатации (у одного из заказчиков EUV-сканера ASML) была достигнута стабильная мощность источника излучения в 130 Вт, а в лабораторных условиях мощность EUV-источника составила 375 Вт в импульсном режиме на частоте 50 кГц. В начале 2018 года стабильная мощность при тестировании у одного из заказчиков достигла 200 Вт. Современный уровень доступности (в данном случае защищенности, легкого и быстрого восстановления после небольших простоев преимущественно автоматизированными средствами) источников равен 75%, в то время как, согласно требованиям к массовому производству (HVM), должен превышать 90%. Увеличился технологический срок службы генераторов капель и коллекторов, однако пока этот показатель не соответствует требованиям HVM. Снижение отражательной способности коллектора достигло 0,4% на один гигаимпульс. Обнадеживающий прогресс демонстрирует корпорация Gigaphoton, второй поставщик источников EUV-излучения высокой мощности для массового производства. В стадии изучения находятся возможности создания источников EUV-излучения мощностью более 500 Вт.

Сканеры

На конец 2017 года заказчикам отгружено 14 EUV-сканеров, из них четыре – в 2016-м. В спецификациях устройств указаны воспроизводимость критических размеров – CDU 0,3 нм и точность совмещения 1,8 нм. Пропускная способность сканеров с источником излучения 148 Вт составляет 104 пластины/ч, при этом повышение производительности на 8 пластины/ч достигается за счет увеличения скорости этапа при том же источнике питания. Доступность сканера NXE3300

>75%. Большая часть времени простоя сканера обусловлена источником экспонирования.

К настоящему времени готова конструкция EUVL-сканера с увеличенной цифровой апертурой (NA), в которой используется анаморфная оптика (увеличение 4x/8x), расширяющая возможности EUV-литографии. Сканеры с увеличенной NA будут отличаться меньшей глубиной резкости (DOF, 1/3 значения глубины резкости сканеров с NA=0,33) и сокращенной в два раза областью печати. Кроме того, для них потребуются чистые комнаты более высокого класса. Для шаблонов подобных сканеров нужны будут средства актиночного контроля дефектов (AIMS), контроля шаблонов без (MBI) и со сформированным рисунком (PMI).

Шаблоны

В настоящее время дефекты необработанных шаблонов могут быть устранены с помощью специально разработанных для исправления методик. На уровне более 60 нм дефекты необработанных шаблонов считаются нулевыми. Общее число дефектов на топологиях более 23 нм, таких как сферический эквивалент объемного диаметра (spherical equivalent volume diameter, SEVD), измеряется в цифрах от 0 до 10 – в зависимости от плотности формируемого рисунка шаблона. Возможные дефекты на 3D-шаблонах в ближайшей перспективе будут компенсироваться путем использования методики оптимизации источника формирования шаблона (source mask optimizing, SMO), а в отдаленной перспективе – благодаря применению новых материалов при формировании этажерки (стека) шаблона.

Тонкие пленки (пелликулы) шаблона

Для изготовителей ИС существенной проблемой остаются дефекты шаблона, возникающие в процессе эксплуатации. Непредсказуемость их возникновения обуславливает необходимость использования пелликул. В настоящее время пелликулы могут выдерживать облучение источника мощностью 140 Вт. В дальнейшем по мере увеличения мощности источника излучения до 205 Вт потребуются аппаратное обеспечение охлаждения, а также пелликулы, способные выдерживать мощность источника излучения до 250 Вт. В этом плане интерес представляют разработки Межуниверситетского центра микроэлектроники IMEC (Лёвен, Бельгия) – формирование пелликул на основе углеродных нанотрубок (УНТ). Недавно подобное решение протестировала корпорация Intel на партии в 4 тыс. пластин при мощности источника излучения в 140 Вт. Дополнительных дефектов не возникло, поэтому они были признаны пригодными для использования в массовом производстве.

Контроль дефектов шаблона

Потребность в совершенствовании средств AIMS, MBI и PMI сохраняется. Более того, от новых средств обнаружения дефектов шаблона требуется адресность. Недавно

* SPIE (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers) – Международное общество оптики и фотоники.

жнокорейская корпорация Samsung создала собственное инструментальное средство типа AIMS и планирует использовать его в массовом производстве. Данное инструментальное средство отличается генерацией высших гармоник на основе источника EUV-излучения и сканирующей зонной пластинки (пластинки Core).

Важность контроля уровня дефектов шаблонов объясняется необходимостью повышения выхода годных при производстве ИС. Эксперты указывают, что без создания средств актиночного контроля сформированных шаблонов (APMI) невозможно освоить топологический уровень 7 нм. Средства APMI требуются в первую очередь для контроля шаблонов с нанесенными пелликулами.

Резисты

Для решения проблем, возникающих при переходе к 7-нм топологиям, необходимо добиваться улучшения такого показателя, как локальная воспроизводимость критических размеров (local CD uniformity, LCDU). Решение задач стохастичности потребует увеличения мощности EUV-излучения и повышения уровня поглощения этого излучения резистом. Важно понимать взаимодействие EUV-излучения и резиста, а также процессы проектирования резистивных материалов с учетом стохастичности (теория вероятности). Остаются вопросы соотношения типа резиста и неравномерности ширины линии (LWR). Данная проблема может быть решена путем применения методик коррекции эффекта оптической близости (OPC) и оптимизации процесса литографии/ травления. Разработки в области химически усиленных резистов (CAR) связаны с созданием неорганических и молекулярных резистов, что позволит поддержать освоение топологий 7 нм и менее. В современных сканерах также используются внеполосовые фильтры (OOB), призванные не допустить газовыделения при работе с резистом [3, 5].

ИЗГОТОВЛЕНИЕ EUV-ШАБЛОНОВ

Одна из целей фирм, планирующих освоить EUV-литографию в серийном производстве, а также их партнеров в сегменте производства материалов и оборудования, – создание бездефектных EUV-шаблонов по приемлемой стоимости.

Современные EUV-шаблоны достаточно дорогостоящие. В рамках НИОКР изготовителям удастся добиться снижения уровня их дефектности. Однако при освоении массового производства требования относительно дефектов ужесточатся. Необходимо не просто приобрести несколько инструментальных средств контроля дефектов, а реализовать стратегию на всех трех основных этапах технологического цикла шаблонов: от поставщика необработанных шаблонов (подложек) до производителя шаблонов и их использования на заводе по обработке пластин и выпуску ИС. Технологический процесс изготовления EUV-шаблона начинается с создания необработанного шаблона, который служит

базовой структурой собственно шаблона (рис. 4). Современные оптические необработанные шаблоны состоят из непрозрачного слоя хрома на стеклянной подложке, а подложки EUV-шаблонов – из 40–50 чередующихся слоев кремния и молибдена, образуя тем самым многослойную этажерку толщиной 250–350 нм. Поверх этажерки наносится герметизирующий слой на базе рутения, а на него – поглотитель на основе танталового материала.

Для формирования EUV-шаблонов перспективны электронно-лучевые установки со множественными лучами (Multi-beam, при этом «пределный ультрафиолет» не является их единственной областью применения). Многолучевой подход позволяет продлить сроки использования оптической литографии, для сложных вычислительных шаблонов он также перспективен. Главное, что существенно повышается производительность формирования шаблонов.

Принятие решения о применении VSB (изменяемая форма луча – variable shape beam, VSB) или многолучевого подхода зависит от нескольких факторов. VSB-архитектуре отдают предпочтение при формировании слоев, если используется сравнительно небольшое количество процессов экспонирования, в то время как многолучевой подход больше подходит для инверсионной литографии (ILT) и криволинейных конструкций или в случае, когда один слой пластины формируется одним EUV-шаблоном.

Производители шаблонов будут пытаться использовать VSB-подход как можно дольше, прежде чем перейти к новой архитектуре. Даже по мере освоения многолучевых методик они в обозримом будущем будут применять VSB-системы. То есть определенное время будут сосуществовать два подхода (рис. 5). В области многолучевых подходов есть как минимум два поставщика с жизнеспособным решением – Intel/IMS и NuFlare. Многолучевые средства этих поставщиков во многих отношениях достаточно схожи. Так, архитектура обоих подходов предусматривает наличие 262144 программируемых лучей, каждый из которых на основе 10-нм топологии. Однако есть и различия. Инструментальное средство IMS генерирует луч мощностью 5 кэВ, который затем усиливается до 50 кэВ. Инструментальное средство NuFlare сразу генерирует луч мощностью 50 кэВ [6, 7].

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ EUV И ИММЕРСИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

Специалисты говорят об использовании EUV-литографии для печати всего нескольких критических слоев ИС, изготавливаемых на производственных линиях, оснащенных степперами (прежде всего это установки иммерсионной ArF 193-нм литографии). Первое описание подобных моделей представила в 2017 году корпорация GlobalFoundries. На заводе в г. Мальта (шт. Нью-Йорк) в течение двух недель обрабатывалось пять партий по 20 пластин в каждой с использованием сканеров фирмы ASML – NXT:1970Ci и NXE:3300B.

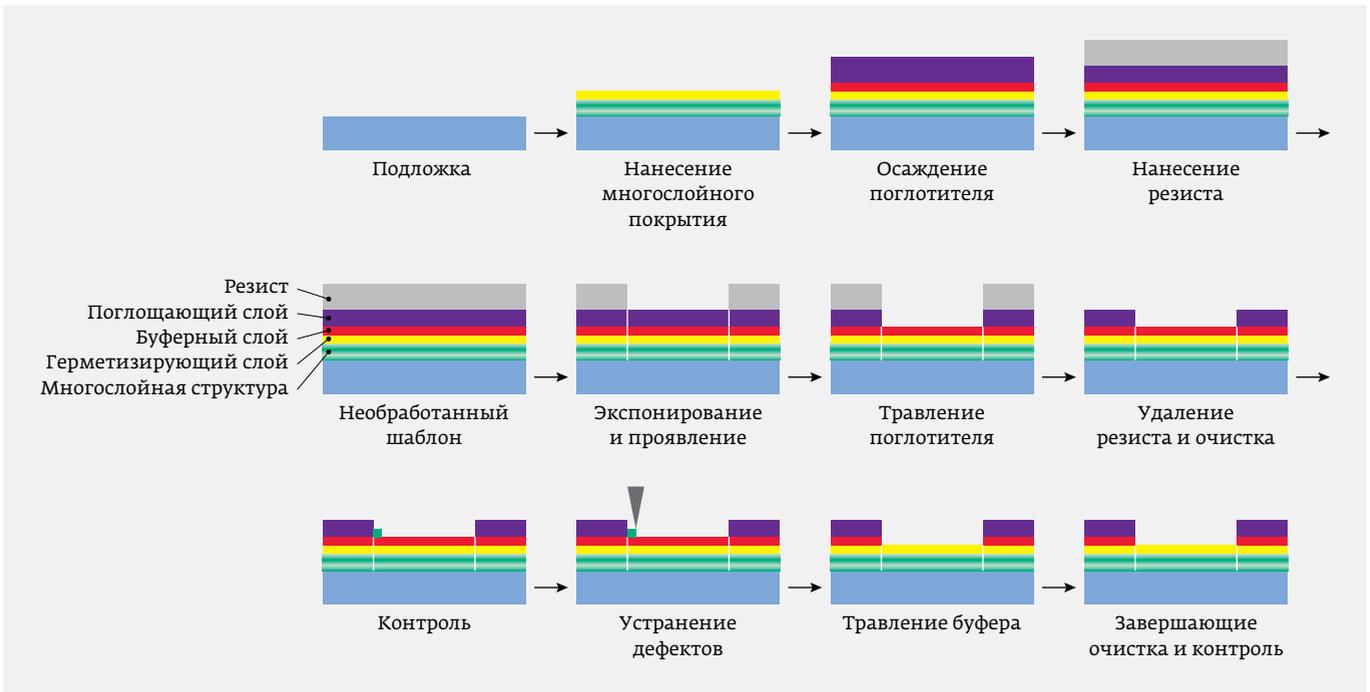


Рис. 4. Изготовление EUV-шаблона. Источник: Sematech

Удалось достичь кросс-платформенной производительности, сопоставимой с производительностью при одновременном применении различных средств иммерсионной литографии. Но при этом были также обнаружены ограничения по некоторым методам коррекции (табл. 1).

Тем не менее GlobalFoundries заявила, что EUV-сканеры «очень вероятно» будут использованы для формирования отдельных слоев в серийном 7-нм процессе. Предполагается,

что переход на этот процесс произойдет к 2020 году, причем это будет модернизированный вариант 7-нм процесса, который начнет обкатываться в 2018 году [8, 9].

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ EUV И DSA

В отличие от большинства методик литографии, где формируемый рисунок определяется шаблоном, в случае DSA рисунок существует в самом материале.

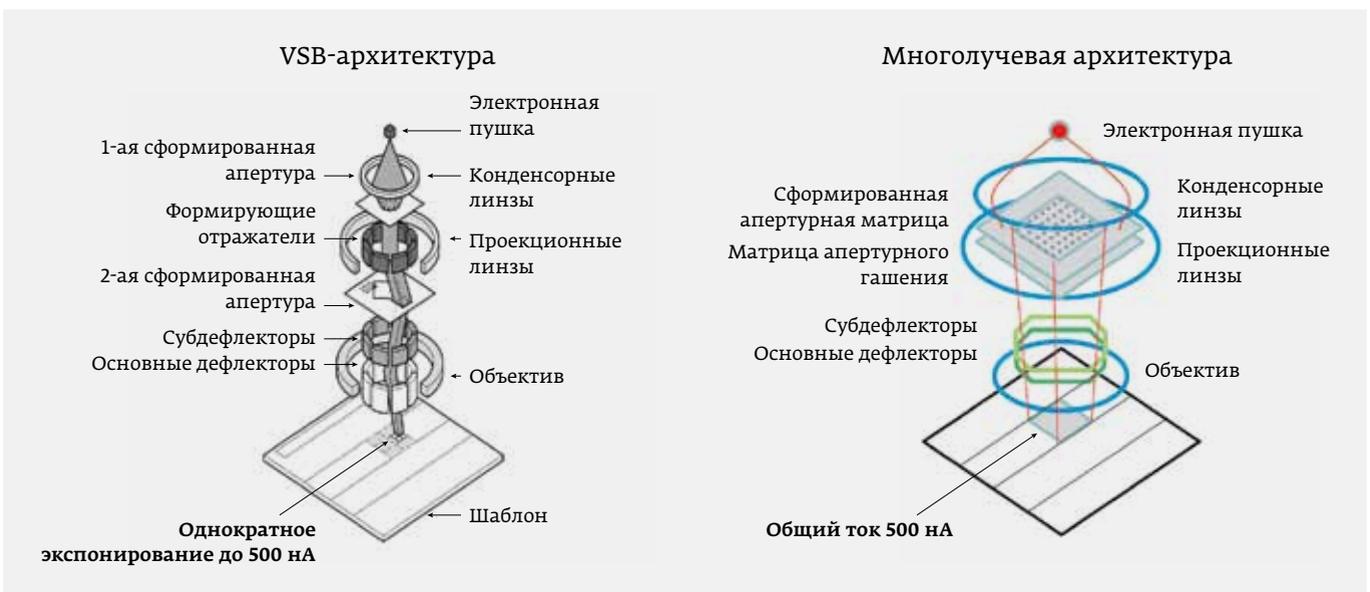


Рис. 5. VSB и многолучевая технологии NuFlare. Источник: NuFlare

Проблемы объединения иммерсионных и EUV сканеров в рамках одной производственной линии.

Источник: GlobalFoundries

Область	Подсистемы	EUV	193i	Воздействие наложения на смещение и подгонку
Внутримодульная (в пределах одного кристалла)	Облучение	Нетелецентрическое на шаблоне	Телецентрическое	Рисунок и расположение в зависимости от технологического проектирования с прогнозированием
	Шаблон	Отражающий	Пропускающий	Боковое искажение вследствие изменения толщины шаблона
	Закрепление промежуточных шаблонов	Электростатическое, с тыльной стороны	Вакуум	Нарушение плоскостности вследствие неплоскостности шаблона
	Проецирование	Отражающие зеркала	Пропускающий объектив	Различная сигнатура аберрации. Различные сроки коррекции
На уровне пластины (межмодульная)	Координатный стол (для пластины)	В вакууме	Иммерсия	Разогрев пластины
	Калибровка координатной сетки	Интерферометры, 1D зеркальное отображение	2D-кодер, 2D-кодировщик отображений	Рассогласование координатной сетки

Исходные блок-сополимеры (BCP) сочетают два полимера – полистирол (PS) и полиметилметакрилат (PMMA), естественным образом разделяющие себя по различным участкам. Регулируя относительные доли PS и PMMA в PS-PMMA материале можно изменять морфологию от шаровидной до цилиндрической и пластинчатой (рис. 6) [10].

Совместное использование технологий EUV и DSA может стать наиболее эффективным решением, которое позволит реализовать преимущества каждой из них. Оба метода могут достигать уровня разрешения, совместимого с технологическими уровнями логики в 7 и 5 нм (N7 и N5). EUV-литография хорошо подходит для формирования рисунка конструкции с различными величинами шага между элементами, а также с шириной линий и интервалов между ними. Однако для таких малых значений шага число шаблонов и этапов их использования может сделать данную технологию чрезмерно дорогостоящей. Проблемной может стать и локальная воспроизводимость критических размеров (LCDU), особенно в условиях высокой производительности оборудования [11].

Первоначальный литографический процесс с использованием жесткой маски* одинаков для EUV и DSA, но различается процесс формирования рисунка. После того как BCP осаждены, DSA может обеспечить достижение топологических размеров элементов порядка 30 нм без использования дополнительных шаблонов. Этап отжига естественным путем разделяет две части BCP в правильную морфологию. Однако DSA-процесс лучше всего подходит для конструкций с однородным шагом элементов.

EUV-литографию можно использовать для формирования на кристалле рисунка топологических элементов с низкой разрешающей способностью и создания спейсеров для

* Hard mask – жесткая маска, используемая при полупроводниковой обработке в качестве маски травления вместо полимеров или прочих органических мягких материалов. Полимеры легко стравливаются кислородом, фтором, хлором или другим химически активным газом, что во время плазменного травления приводит к быстрой деградации рисунка, определяемого полимерным шаблоном. Жесткую маску (или часть ее) можно использовать многократно, что расширяет возможности формирования топологического рисунка в технологических слоях.

последующего DSA-осаждения. Подобное сочетание обеспечивает максимальную гибкость конструкции при одновременной оптимизации производственного процесса благодаря сокращению числа его этапов и снижению издержек на шаблоны. Показатель LCDU также будет лучше, чем при использовании только EUV-литографии.

DSA лучше подходит для приборов с несколькими повторяющимися элементами с постоянным малым шагом между ними. Благодаря этому данная технология в первую очередь, похоже, будет востребована при производстве ДОЗУ, а затем для формирования межслойных переходных отверстий в логических приборах. Графоэпитаксия, особенно с использованием EUV-литографии для осаждения спейсеров, может обеспечить создание более сложных конструкций в рамках технологии DSA, в которых области формируемого кристалла ИС требуют различных величин шага элементов. Можно предположить, что подобный подход будет применяться при формировании логических ИС.

Несмотря на перспективность совместного использования DSA и EUV-литографии, полупроводниковая промышленность реализует данный подход только тогда, когда производители ИС убедятся том, что новые материалы преодолели технические ограничения. Задержка с освоением технологии DSA связана с рядом проблем, возникших по ходу ее развития. В первую очередь это уровень дефектности, точность размещения рисунка, простота интеграции в производственные процессы, стоимость. Однако по мере совершенствования химических веществ и методов обработки по всем указанным позициям наблюдается позитивная динамика.

DSA и EUV следует рассматривать как взаимодополняющие, а не конкурирующие технологии, которые со временем станут основными для литографии, обеспечивающей формирование структур с малым шагом элементов на топологических уровнях N7 и менее. В отличие от предыдущих попыток освоения DSA-технологии отдельными организациями, нынешний этап связан с налаживанием взаимодействия поставщиков материалов и поставщиков химических веществ/реактивов [10, 11].

Лидером в освоении EUV-литографии считается корпорация Samsung. На ее заводе в г. Хвасон (S3 Fab) в феврале 2018 года приступили к сооружению линии по обработке 300-мм пластин с использованием EUV-литографии. Общий объем инвестиций – 6 млрд долл. Прогнозируется, что линия будет введена в эксплуатацию в конце 2019 года, а производство ИС с топологическими нормами 7 нм и менее начнется в 2020-м. При этом в зависимости от конъюнктуры рынка инвестиции могут быть увеличены [12, 13]. Подробно о политике компании



Рис. 6. Морфология типичного блок-сополимера как функция (химического) состава. По мере возрастания доли компонента А конфигурация изменяется от сферической к цилиндрической и далее к пластинчатой

и ее достижениях расскажем в статье, которая будет опубликована в следующем номере журнала.

В заключение остается напомнить, что появления EUV-литографии ждали еще в 2005 году на уровне 90-нм топологий. Сейчас ее «окно жизни» – 7/5-нм топологии, хотя при совместном использовании с методикой непосредственной самосборки (direct self-assembly, DSA) можно достичь 3-нм уровня. В любом случае выводы о будущем технологии можно будет сделать уже очень скоро.

ЛИТЕРАТУРА

1. Entegris launches Oktolox membrane technology to improve yield in ArF, KrF and EUV lithography. Solid State Technology. Wafer News. September 18. 2017.
2. LaPedus M. Foundry Challenges In 2018. Semiconductor Engineering. December 27th. 2017.
3. Merritt R. Chip Execs More Bullish on EUV. Surveys take temperature on litho, masks. EE Times. 9/11/2017.
4. Korczynski E. High-NA EUV Lithography Investment. Solid State Technology. The Pulse. December 5. 2016.
5. LaPedus M. Searching For EUV Mask Defects. Semiconductor Engineering, October 19th, 2017.
6. LaPedus M. Next-Gen Mask Writer Race Begins. Semiconductor Engineering. October 19th. 2017.
7. eBeam Initiative surveys report increased optimism for EUV and new photomask trends. Solid State Technology. Wafer News. September 18. 2017.
8. Merritt R. ASML Revs EUV Engines. EE Times. 3/1/2017.
9. Sperling E., LaPedus M. Unsolved Litho Issues At 7nm. Scanners are no longer interchangeable. Semiconductor Engineering. September 21st. 2017.
10. Guerrero D. J. DSA and EUV: Complementary technologies to enable fine-pitch lithography. Solid State Technology. Wafer News. October 02. 2017.
11. Korczynski E. EUV leads the next generation litho race. Solid State Technology. Wafer News. November 20. 2017.
12. Dylan McGrath Samsung Says EUV on Schedule for 2018. EE Times. 9/12/2017.
13. Mu-Hyun C. Samsung begins construction of \$6 billion EUV semiconductor line. ZDNet. February 23. 2018.