

НУЖЕН ЛИ РОССИИ САМОДЕЛЬНЫЙ EUV-НАНОЛИТОГРАФ?!

ТЕХНИКА И ЭКОНОМИКА

СОВРЕМЕННОЙ ЛИТОГРАФИИ

М.Макушин, ОАО «ЦНИИ «Электроника», В.Мартынов, д.т.н., профессор

В журнале "Фотоника" 2010, №1 была опубликована статья "EUV-нанолиитография. Проблемы и перспективы развития" В.Анчуткина, А.Бельского, О.Гущина. Другие авторы, признанные российские эксперты, излагают свою точку зрения на экономические и технологические аспекты развития литографии. С учетом знания реального уровня развития технологий и стратегических задач отечественной микроэлектроники они обсуждают вопрос: какая литография нужна российской электронике?

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Авторы В.Анчуткин, А.Бельский и О.Гушин в рамках своей статьи привели свой проект создания "EUV-наносканера" на фоне программы фирмы ASML по развитию проекционной литографии. Все выглядело бы вполне прилично, если бы этот проект содержал еще и главный показатель – погрешность совмещения, а также учитывал, что у главных "соисполнителей" проекта нет не только опыта в проектировании таких сложных оптико-механических систем, но и полностью отсутствует необходимая элементная база, соответствующее технологическое и метрологическое обеспечение для создания действующих экспериментальных и опытно-промышленных образцов. Ни один из "соисполнителей" проекта не создал за предыдущий период своей деятельности ни одной действующей установки проекционной литографии. Наличие у "соис-

полнителей" отдельных демонстрационных макетов на уровне подтверждения физических принципов действия узлов проектируемой установки не является основанием считать, что установка может быть создана. Правильность принципов уже подтверждена практической деятельностью фирмы ASML, и нет необходимости тратить государственные деньги для повторного подтверждения их на территории России. Наличие на действующем мировом рынке значительного количества современных сканеров (новых и "second hand") позволяет России решить задачи запуска новых "малоформатных производств" с существенной экономией времени и средств, нежели это предлагается в упомянутой статье. А ответ на вопрос "нужен ли EUV-литограф в России?" мы попытаемся дать ниже.

Плавное переходя к экономике, следует дать ответ на замечание статьи: в 2002 году был

дан четкий вывод, что основным экономическим сдерживающим фактором в развитии и применении проекционной литографии для уровней технологии ниже 40×30 нм будет являться стоимость шаблонов и обеспечение их бездефектности. Следует указать, что общая стоимость затрат на разработку опытного образца EUV-сканера (Engineering Test Stand, ETS) за рубежом корпорацией Intel а затем консорциумом EUV LLC* составила за период с 1996 года по 2001 год ~ 1,7 млрд. долл. Если даже российским "соисполнителям" удастся в разработке доморощенного EUV-сканера добиться успеха, то его следует ожидать не ранее чем через 17 лет (2027 год) при объеме затрат 52,7 млрд. руб.

* Организован в 1997 году корпорациями Intel, Motorola и AMD. В 2000 году присоединились Micron Technology и Infineon Technologies, в 2001 году – IBM. Последняя отказалась от EUV-литографии в пользу иммерсионной в 2007 году.

СЕРЬЕЗНО О ТЕХНИКЕ И ЭКОНОМИКЕ ЛИТОГРАФИИ

Прежде всего рассмотрим общую ситуацию на рынке литографического оборудования. Оборудование литографии, без сомнений, определяет достигнутый технологический уровень полупроводниковой промышленности: с его помощью формируется основная структура кристаллов ИС, дальнейшие по технологической цепочке типы оборудования подстраиваются под требования систем литографии. Во-вторых, в этом секторе, как ни в каком другом, ясно высвечивается дилемма: с технической точки зрения можно достичь предельно малых топологий, близких к физическим ограничениям используемых материалов; с экономической точки зрения целесообразность погони "за последним возможным нанометром" определяется рентабельностью продукции в массово-поточном производстве. Ведущим изготовителем в данном секторе по-прежнему является корпорация ASML, на которую приходится 51% отгрузок в натуральном выражении. За ней следуют Nikon (39%) и Canon (9%). В 2008 году данные показатели составляли 43%, 29% и 28%, соответственно. Отмечается, что сегмент литографического оборудования показывает сдвиг к увеличению отгрузок иммерсионных систем (37% в натуральном выражении в 2009 году, по сравнению с 22% в 2008 году), а также наблюдается значительное увеличение рыночных долей ASML и Nikon за счет Canon. Интересен следующий факт: несмотря на увеличение отгрузок иммерсионных систем с их значительно большими средними продажными ценами (СПЦ), общие доходы от продажи систем литографии как доли в оборудовании начальных этапов обработки, в 2009 году снизились до 19%, по сравнению с 22% в 2008 году. Это подчеркивает факт – изготовители ИС экономят на закупке литографического оборудования для того, чтобы поз-

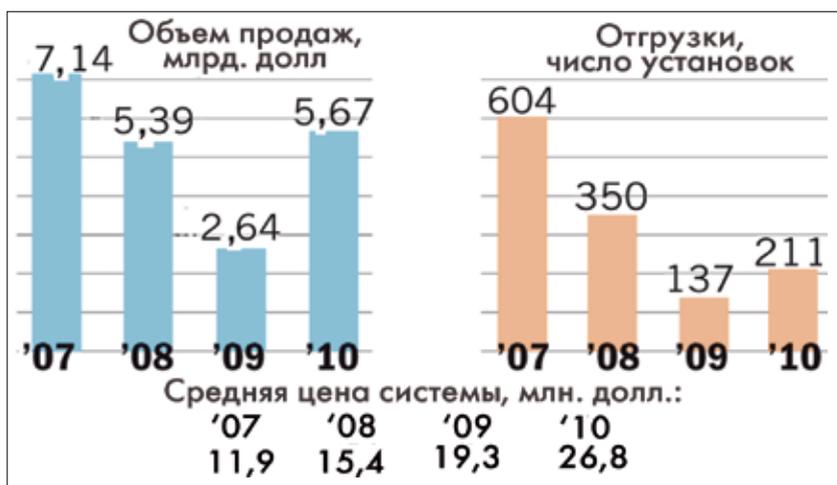


Рис.1. Динамика рынка систем литографии

волить себе начальные инвестиции в иммерсионные системы, а также опровергает тезис о том, что доля литографического оборудования в оборудовании начальных этапов обработки пластин растет до неустойчивых уровней.

Во время прошедшего кризиса сектор литографических систем в 2009-м сократился на 51%, но в текущем году он расширится на 114% (рис.1). При этом наблюдается рост средней цены системы: в 2008 году цена увеличилась на 29,4%, в 2009 году рост слегка замедлился до 25,3%, а в 2010 году он снова "подпрыгнет" до 38,9%. Это объясняется увеличением в общем объеме продаж оборудования литографии доли иммерсионных систем, о чем уже было сказано [1].

ОСНОВНЫЕ КОНКУРИРУЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТОГРАФИИ

Литография является ключевой технологией, на которой держится цикл масштабирования процесса изготовления ИС, описываемый "Правилем Мура"*. Существующая технология оптической литографии останется пригодной дольше, чем ранее ожидалось, но в ближайшем будущем у нее могут возникнуть серьезные конкуренты. Работы над технологи-

* Moore's Law – "Закон Мура" – эмпирическое наблюдение, а не природный (физический) закон, поэтому его правильно считать не "законом", а "правилом" – удвоение числа транзисторов на кристалле каждые 18 месяцев без

ями литографии следующего поколения (NGL) ведутся более 10 лет, наиболее перспективными считаются: литография на источниках излучения, работающих в предельной УФ-области спектра (EUV), бесшаблонная электронно-лучевая (Maskless Lithography, ML2), наноимпингивная литография и направленная самосборка. В качестве основных конкурентов на среднесрочную перспективу рассматриваются 193-нм иммерсионная литография и EUV-литография.

На пути освоения технологии EUV-литографии стоят три основные преграды: проблемы с мощностью источников EUV-излучения, с резистами и бездефектными EUV-шаблонами. Кроме того, для устранения отставания EUV-метрологии от требований данной литографии в целом потребуется еще около 400 млн. долл. Стоимость инструментальных средств также впечатляет: цена опытной EUV-системы ASML может достигнуть 90 млн. долл. Работы по созданию данной технологии были начаты консорциумом EUV LLC под руководством Intel еще в 1997 году. Предполагалось коммерциализировать ее в 2005 году на топологическом уровне 90 нм, но отрасль ждет

увеличения удельной стоимости функций для конечного потребителя. Сформулировано в конце 70-х годов XX века Гордоном Муром, одним из основателей и ведущим специалистом корпорации Intel.

Таблица 1. EUV-литография: хроника несбывшихся надежд (задержка вывода на рынок – 10 лет!)

Организация, давшая прогноз освоения EUV	Год коммерческого освоения EUV по прогнозу, уровень топологии
Консорциум EUV LLC, 1997-2001 гг.	2005 г., 90 нм
SEMI*, 2002 г.	2007 г., 45 нм
SPIE**, Advanced Lithography conference-2003	2009 г., 32 нм
SPIE, Advanced Lithography conference-2005	2011 г., 22 нм
SPIE, Advanced Lithography conference-2007	2013 г., 16 нм
SPIE, Advanced Microlithography conference-2010	2015 г., менее 16 нм
ISS*** SEMI, январь 2010 г.	2015 г., 13-нм логические процессы

* *Semiconductor Equipment and Material International* – Международная организация поставщиков оборудования и материалов для производства полупроводниковых приборов
 ** *Международной общество по оптической технике*
 *** *Industry Strategy Symposium* – симпозиум по промышленной политике, проводится несколько раз в год в разных частях света.

до сих пор (табл.1). Samsung считает, что эта задача вполне выполнима уже в 2012 году, но большинство отраслевых аналитиков называют даты ближе к 2015 году.

Основным отличием EUV-литографии от современных стандартных инструментальных средств литографии является использование излучения с длиной волны 13,5 нм. Этапы процесса происходят в мультизеркальной вакуумной камере. Используемые в ней оптические элементы, по существу, являются бездефектными атомарногладкими зеркалами, отражающими излучение посредством межслойной интерференции. Процесс вывода EUV на рынок оказался медленным. Напри-

мер, для достижения производительности (по обработке) 100 пластин, EUV-установка должна обладать источником, генерирующим 100 Вт постоянной мощности [2]. До последнего времени с этим были проблемы. Однако, в конце апреля этого года японский технологический консорциум по разработке систем EUV-литографии (Extreme Ultraviolet Lithography System Development Association (EUVA) of Japan) заявил, что добился рекордного значения выходной мощности EUV источника излучения – 104 Вт. Этого достижения удалось добиться в рамках программы разработки источника излучения на лазере, возбуждаемом плазмой (Laser Produced

Plasma (LPP) Light Source Development Program for EUV Lithography), проводящейся EUVA. Данная работа включает важные открытия в использовании оловянных мишеней и газовых CO₂-лазеров для улучшения эффективности преобразования, а также использования магнитных полей для удаления осколков. Возможность достижения выходной мощности источника излучения более 100 Вт будет влиять на стоимость обладания инструментальными средствами EUV-литографии, опуская ее до уровня аналогичного показателя инструментальных средств иммерсионной литографии с двойным формированием рисунка. Предполагается, что это приведет к по-

Таблица 2. Оценка дополнительных затрат на EUV-литографию (для устранения разрыва в области инструментальных средств может потребоваться еще 400 млн. долл.)

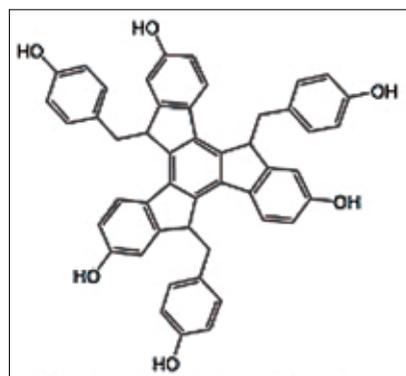
Позиция	Наличие реализованного поставщиком решения	Оценочная стоимость серийного решения	Дата доступности серийного решения
Полнопольный производственный сканер	Да	Профинансировано	2012 г.
Источник излучения	Да	Профинансировано	2011 г.
Резист	Да	Профинансировано	2011 г.
Средства контроля подложки шаблона	Да	Профинансировано	2013 г. ?
Средства контроля заготовки шаблона со слоем резиста	Да	Не Профинансировано, требуется Более 50 Млн. Долл.	2013 г. ?
Средства анализа дефектов	Нет	Не Профинансировано, требуется Более 50 Млн. Долл.	2013 г. ?
Средства контроля шаблона маски	Нет	Не Профинансировано, требуется Более 100 Млн. Долл.	2013 г. ?
Метрология шаблонов	Нет	Не Профинансировано, требуется Более 200 Млн. Долл.	2013 г. ?

вышению уровня поддержки EUV-литографии промышленностью и ускорит момент достижения дальнейших прорывов в области мощности, отвечающих нуждам будущих требований к формированию рисунка. Предполагается, что производство данных источников начнется в 2011 году [3].

В области резистов также наблюдается прогресс. Корпорация Toshiba в ноябре 2009 года заявила о разработке EUV-фоторезиста и проверке его применимости в рамках первого в мире 20-нм технологического процесса. Как ожидается, созданный на основе нового полимера фоторезист решит проблемы разрешения 20-нм технологического поколения, которые для ныне используемых ArF-лазерных литографических систем, работающих в области дальнего УФ-излучения (deep ultra violet) оказались "не по зубам". EUV-литографическое оборудование интенсивно изучается уже достаточно давно, но был необхо-

Рис.2. Структура труксена

Звездообразная структура производных труксена позволяет создать устойчивый низкомолекулярный резист, отличающийся большей долговечностью по сравнению с используемыми в настоящее время резистами



дим подходящий резист и другие инфраструктурные разработки, такие как пеллики [4]. Toshiba разработала молекулярный резист для EUV-литографии, используя одну из производных труксена (trixene; рис.2, [5]), материала с малым молекулярным весом, который более тонок и надежен, чем используемые в настоящее время полимерные материалы. Формирование рисунка полупроводниковой схемы требует фоторезистов, которые, в целях обеспечения прецизионности структурирования, можно

было бы использовать в качестве как позитивных, так и негативных резистов [4].

Итак, пожалуй, главной проблемой EUV-литографии стали вопросы метрологии. Они до сих пор не решены, и для их снятия с повестки дня требуется около 400 млн. долл. и, по крайней мере, 2-3 года. Вопрос серьезный: если изготовители ИС не смогут контролировать EUV-шаблоны, которые должны быть бездефектными, EUV-литография вряд ли состоится. За предыдущий этап в разработку EUV уже были вложе-

ны миллиарды долларов, в том числе и на средства метрологии. Теперь консорциум SEMATECH (куда входят, в частности, IBM, Intel, Samsung и TSMC) сформировал альянс по разработке инструментальных средств метрологии. Общая оценка ожидаемых затрат – более 400 млн. долл. (табл.2). Некоторые эксперты при этом полагают, что на многих начальных рутинных операциях обнаружение дефектов в EUV-шаблонах можно использовать системы метрологии зеркального отображения (AIMS – aerial imaging metrology system) в массово-поточном производстве. Для контроля заготовок шаблонов со слоем резиста и контроля рисунка (структуры) ИС можно обойтись существующими оптическими инструментальными средствами. Однако SEMATECH утверждает, что существующие инструментальные средства метрологии мало чувствительны для обнаружения дефектов в EUV-шаблонах и требуется разработать активные системы, работающие на той же 13,5 нм длине волны, что и EUV.

Разрыв между EUV-метрологией и EUV-литографией в целом возник из-за того, что вопросы метрологии в первые годы не являлись ключевыми для разработчиков. Этакая проблема "курицы и яйца" – что нужно сначала? Сформировавшийся разрыв предполагается преодолеть в три этапа до 2015 году. На первом этапе основное внимание будет уделено разработке средств контроля заготовок шаблонов со слоем резиста с окончанием в 2011 году (опытный образец). На втором этапе до 2013-го предполагается разработать средства AISM, а на третьем (к 2015 году) – средства контроля шаблона маски [6].

У экономического аспекта этого вопроса есть еще одна сторона – позиция поставщиков инструментальных средств (метрология здесь, но относится и к другим). Затраты на разработку растут, а рентабельность инвестиций (прибыль на инвести-

рованный капитал) под большим сомнением. Так, НИОКР на разработку средств активно-го контроля шаблона составляет около 100 млн. долл., затраты на используемые материалы и компоненты – 5–10 млн. долл. Рынок для метрологических средств будет представлен дюжиной крупнейших изготовителей ИС. Поэтому для получения достойной отдачи (прибыли) изготовителям метрологических средств придется продавать свои машины по премиальным ценам*. Соответственно, цена EUV-системы контроля на одну установку литографии может достигнуть до 40 млн. долл. (и это не включая стоимость других систем контроля – контроля заготовки шаблона со слоем резиста, анализа дефектов и т. п.) [6]. Сам же EUV-сканер может стоить от 100 млн. до 130 млн. долл. [2].

Иммерсионная литография, по сути, является последней стадией развития проекционной (оптической) литографии на эксимерных лазерах. Ее суть в том, что между шаблоном и кремниевой пластиной вводится жидкость (очищенная вода) в качестве дополнительной среды. Применение воды обусловлено ее более высоким, по сравнению с воздухом, коэффициентом преломления, что дает большее значение числовой апертуры проекционной системы и позволяет добиться увеличения разрешающей способности оптической литографии без изменения длины волны источника излучения.

Ранее ожидалось, что иммерсионная технология закончит свой путь на уровне 40 нм, после чего ее сменят технологии NGL. Теперь же, из-за постоянных задержек с введением в оборот этих технологий, и прежде всего EUV-литографии, разработчики ИС, полагаясь на различные методики совершенствования параметров, рассчиты-

вают продлить использование иммерсии на уровне менее 20 нм. Среди них можно выделить методики двойного экспонирования, двойного формирования рисунка и двойного формирования рисунка со спейсерами [2, 6].

Методика двойного экспонирования (**double exposure**) включает в себя экспонирование первого набора линий, а затем, перед осуществлением других этапов технологического процесса, перенос зоны экспозиции в смежную область и экспонирование второго комплекта линий. Отличается большим быстродействием, чем методика двойного формирования рисунка, основная трудность – нахождение нелинейного резиста, химические свойства которого позволяли бы поглощать слабое излучение соседней зоны экспонирования без формирования рисунка.

Методика двойного формирования рисунка (**double patterning**) требует двукратного осуществления нанесения и экспонирования – на первом этапе осуществляется экспонирование половины линий, травление и осуществление дальнейших этапов технологического процесса. Затем на пластину наносится другой слой резиста, и другая половина рисунка экспонируется в промежутки между первым набором линий. Этот подход достаточно дорог и медлителен, но, с технической стороны, он сравнительно легок, хотя требует повышенной точности совмещения порядка 2 нм.

Двойное формирование рисунка со спейсерами (**spacer double patterning**) является дальнейшим развитием методики двойного формирования рисунка. Дополнительное формирование спейсеров позволяет вводить элементы топологии с размерами, равными тол-

* Premium price – цена с надбавкой, цена с премией, премиальная цена. Цена товара или услуги, установленная на более высоком уровне, чем цены сходных товаров/услуг, установленные

конкурентами (например, цена, повышенная благодаря наличию у товара/услуги уникальных особенностей, либо благодаря интересу потребителей к данной торговой марке).

щине слоя спейсера (методика включает процессы низкотемпературного осаждения слоев окисла и химико-механическую полировку для формирования спейсеров). Сначала осаждается слой материала, на котором формируется начальный рисунок, определяющий критические топологические элементы разводки (с использованием однократного экспонирования). Потом осаждается спейсерный материал, осуществляется травление, при котором он удаляется с горизонтальных поверхностей подложки и первого рисунка, но остается в вертикальных углублениях начального рисунка. Далее осуществляется удаление первоначального рисунка с подложки, при этом спейсерный рисунок остается. Этот рисунок заполняется окончательным материалом, и осуществляются завершающие операции.

Однако использование иммерсионной литографии с подобными методиками может привести к тому, что дополни-

тельные затраты и сложность сделают подобные технические достижения нерентабельными.

С целью ухода от удвоения издержек производства ИС при использовании двойного формирования рисунка поставщики 193-нм иммерсионных инструментальных средств, такие как ASML и Nikon, соревнуются друг с другом в создании иммерсионных систем с увеличенной производительностью. ASML рассчитывала поставить первую подобную машину (NXT:1950i) в апреле или мае, однако из-за ряда проблем ее выпуск отложен. Аналогичная ситуация с системой S620D корпорации Nikon. Правда, обе фирмы обещают в ближайшее время представить полные спецификации своих систем. Аналитики полагают, что появление этих машин может позволить изготовителям ИС использовать оптическую литографию в "глубоко суб-30-нм зоне" [7].

О СИНИЦЕ В РУКЕ И ЖУРАВЛЕ В НЕБЕ

Итак, на рынке уже существуют и успешно реализуются установки иммерсионной литографии, работающие на уровне 32-нм топологий. Теоретически существует возможность использования иммерсионной литографии на уровне до 11 нм, но опробованных технологических решений для уровней менее 22 нм пока не существует. С другой стороны, по-прежнему нет уверенности, что на этот раз EUV-литография выйдет на рынок в очередные прогнозируемые сроки. При этом рост затрат на разработку и эксплуатацию новых процессов в рамках обоих процессов может сделать их нерентабельными.

Каковы позиции ведущих изготовителей относительно EUV-литографии? Samsung, самая оптимистичная в этом плане фирма, предполагает приступить к использованию EUV в 2012 году, начав с ДОЗУ, а не с флеш-памяти NAND-типа,

которая наравне с ДОЗУ стала "двигателем" масштабирования ИС. ДОЗУ более чем двумерная структура, у нее в три раза больше критических слов, чем у флэш-памяти NAND-типа, и поэтому использование EUV для производства сразу ДОЗУ должно подтолкнуть отрасль к освоению этой технологии. По сравнению с ДОЗУ, флэш-память NAND-типа можно рассматривать как "одномерный" рисунок, поэтому для 2X-нм топологий поставщики этих ИС могут использовать 193-нм иммерсионную литографию с методикой двойного формирования рисунка со спейсерами.

Корпорация IBM, бывшая членом консорциума EUV LLC, отказалась от работ в области EUV-литографии еще в 2007 году – в пользу совершенствования иммерсионной литографии и разработки бесшаблонной электронно-лучевой литографии. Изготовители логических ИС, такие как Intel, могут отложить свой переход на EUV, так как проектные нормы для логики более мягкие, чем для памяти. В плане масштабирования ИС Intel идет на полшага сзади ведущих изготовителей ДОЗУ и NAND-флэш. Корпорация предполагает использовать 193-нм иммерсию до 15 нм, затем для 11 нм применит стратегию комбинированной литографии, которая будет сочетать традиционный сканер с EUV или ML2 литографией – в зависимости от того, какая к тому моменту будет готова для серийного производства [7].

Со стороны кремниевых заводов и, в частности, крупнейшего из них TSMC, выбор между EUV, ML2 и 193-нм иммерсией с двойным формированием рисунка еще не сделан.

В связи с неясностью относительно последовательности с преемственностью и применением различных видов литографии изготовители рассматривают схемы, позволяющие обойтись без NGL. Инновационные подходы в этом плане включают в себя "этажирование" существующих

приборов в трехмерные конфигурации с использованием отверстий сквозь всю толщу кремния (through-silicon vias), а также освоением экзотических структур, таких как FinFET* и графеновые** транзисторы. Однако, как и NGL, вся эта экзотика по большей части пока представляет собой "бумажных тигров" [2].

РОЛЬ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ПОТРЕБНОСТИ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Как и в полупроводниковой промышленности, в индустрии полупроводникового оборудования имеется относительная неопределенность по поводу перспектив развития. Переход на меньшие топологические нормы во все большей мере определяется не физическими возможностями используемых материалов, а экономическими соображениями. В том числе реальным соотношением выпускаемой по новым топологиям продукции с потребностями рынка, определяемыми пользовательскими предпочтениями. Существует вероятность, что топологии менее 22 нм еще долго останутся в стенах лабораторий. Соответственно, возрастает длительность цикла присутствия на рынке каждого нового технологического поколения полупроводниковых приборов. Для изготовителей инструментальных средств все труднее становится выживать в условиях, когда их заказчиками фактически являются 10–20 ведущих изготовителей ИС. Соответственно, в отрасли идут процессы консолидации, и степень монополизации рынка полупроводникового оборудования увеличивается [8].

Для России существуют хорошие возможности закупки

достаточно современного оборудования с топологиями до 65–45 нм по приемлемым ценам. Однако необходимо формирование внутреннего рынка "хай-тека" с участием государства, а также четкое представление, для чего (на какие рынки конечного потребления и с какой продукцией выходить, каков возможный объем продаж, срок выхода на рентабельность и окупаемости оборудования) оно закупается [7–8].

Те авторы, которые пишут о том, что освоение уровней технологии 20 нм и менее позволит существенно увеличить быстродействие микропроцессоров и создать самую передовую ЭКБ, вероятнее всего мало читают настоящую техническую литературу и слабо представляют тенденцию развития микроэлектроники. Суть заключается в том, что уменьшение размеров элементов в массовом производстве нужно, прежде всего, для получения наибольших экономических выгод, а не для повышения быстродействия формируемой приборной структуры. Поэтому первыми кандидатами на массовое производство являются СБИС памяти – в них напрямую реализуется экономическая эффективность перехода на малые размеры элементов [9]. С микропроцессорами СБИС дело сложнее – быстродействие отдельных транзисторов внутри кристалла уже сейчас ~10 ГГц, а общее быстродействие процессора ~2 ГГц. Такое снижение быстродействия обусловлено потерями в линиях связи, и повышение быстродействия не может быть обеспечено за счет уменьшения размеров элементов. Основное технологическое решение сейчас просматривается в применении в кристаллах СБИС оптических каналов передачи ин-

* FinFET – полевой МОП-транзистор с двумя изолированными затворами, созданный на КНИ-подложке, у которого затвор расположен на двух, трех или четырех сторонах канала или окружает канал, формируя таким образом структуру двойного затвора. Эти приборы получили название «finfets» из-за того, что форма области истока/стока напоминает спин-

ной плавник рыбы на поверхности кремния. FinFET приборы обладают значительно меньшим временем переключения и большей плотностью тока, чем широко распространенная КМОП-технология.

** Graphene – графен, планарный слой sp²-связанных атомов углерода. Графены являются двумерными аналогами трехмерного графита.

формации, то есть совместное применение классической электроники и фотоники. Американцы уже долгие годы реализуют программу "Электроны и фотоны могут совместно работать на кремнии".

Второй подход – схмотехнический, когда повышение быстродействия достигается за счет изменения архитектуры – многоядерные процессоры. На этом пути можно более эффективно увеличить быстродействие микропроцессора, нежели при продвижении технологии вниз по шкале размеров. Анализ показывает, что разумные предельные быстродействия МП СБИС можно получить при уровнях технологии 65 – 45 нм. Задачи создания СВЧ СБИС на частотные диапазоны 100 ГГц и более решаются в рамках технологий гетероструктур с квантовыми ямами. Для таких приборов в ИС ВЧ ПЭ РАН используется электроннолучевая технология формирования топологии [10, 11]. Подобных приборов для решения задач обеспечения создания специальной аппаратуры и стратегических систем требуется ограниченное количество. Как показывает опыт, прямая электроннолучевая литография является во многих случаях экономически более выгодной, нежели фотолитография. Наибольший экономи-

ческий и технический эффект можно получить от применения комбинированной литографии (проекционная литография плюс электронно-лучевая), что было продемонстрировано еще в 1985 году [12]. Это направление не потеряло своей актуальности и сейчас [13].

ОСНОВНОЙ ВЫВОД

Исходя из вышесказанного, в России нет необходимости освоения массового производства СБИС памяти на уровне технологии 22 нм и ниже, а следовательно, "нанолитографы" собственной разработки ей не нужны, тем более, что разработанные к настоящему времени прототипы "EUV-наносканеров" имеют поле кристалла 0,82×0,82 мм (!!!) и не имеют систем прецизионного автоматического совмещения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. **Mark LaPedus.** ASML extends share lead in litho. – EE Times., 2010, 04, 26
2. **Mark LaPedus.** Chip makers will require deep pockets, not to mention patience and a backup plan. Lithography's generation gap. – EE Times, 2010, 04, 05.
3. **Mark LaPedus.** Group claims EUV light source record. – EE Times, 2010, 04, 26.
4. **Clarke P.** Toshiba claims EUV photoresist breakthrough

for 20-nm era. – EE Times, 2009, №11, 17.

5. **Toshiba develops molecular photoresist technology for EUV lithography.** The world's first application in 20nm generation. – Toshiba's press release, 2009, 11,17.

6. **Mark LaPedus.** EUV camp drops ball on metrology. – EE Times, 2010, 04, 26.

7. **Макушин М.** Рынок полупроводникового оборудования перспективы и экономические аспекты развития литографии. – Электроника: НТБ, 2010, №2.

8. **Макушин М.** Мировой рынок микроэлектроники после кризиса: новые реалии и старые проблемы. – Электроника: НТБ, 2010, №1.

9. **Авдониин Б., Мартынов В.** Электроника вчера, сегодня, завтра. Очерки по истории, технике, экономике. – М.:Изд-во «Мысль», 2010.

10. **Василевский И. и Мокеров В.** – Микроэлектроника, 2005, т. 34, №2.

11. **Мокеров В. и др.** – ЖЭТФ, 2007, 132, вып. 1.

12. **Мартынов В.В.** Выбор многографического метода в производстве СБИС. – Электронная промышленность, 1988, №4.

13. **Мартынов В.В., Жигунова И.Г., Переверзев Е.Л.** Практическое применение ЭЛЛ для производства заказных СБИС. – Электронная пром., 1988, №4.