

РЫНОК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ПЕРСПЕКТИВЫ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ЛИТОГРАФИИ

М.Макушин

Экономический кризис сильно ударил по промышленности полупроводникового оборудования, рынок которого упал до самого низкого с 1994 года уровня. Но сегодня, наконец, появились признаки выздоровления, и кремниевые заводы начали активнее пополнять инвестиции, истощенные за несколько прошедших кварталов. Правда, путь до полного восстановления рынка оборудования будет долгим. Лучше всего проблемы развития рынка полупроводникового оборудования видны на примере сегмента оборудования литографии. Во-первых, это оборудование, которое определяет достижимый технологический уровень формирования основной структуры микросхем. Оборудование дальнейшей технологической цепочки обработки полупроводниковых пластин подстраивается под его требования. Во-вторых, для этого сегмента рынка, как ни для какого другого, высвечивается дилемма: технически можно достичь предельно малых топологических норм, близких к физическим ограничениям используемых материалов, тогда как с экономической точки зрения целесообразность погони "за последним нанометром" определяется рентабельностью продукции при массово-поточном производстве. Так, что же происходит на рынке полупроводникового оборудования и в частности систем литографии?

ОБЩАЯ СИТУАЦИЯ НА РЫНКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

По данным корпорации Gartner, инвестиции в основное оборудование полупроводниковой промышленности в 2010 году достигнут 29,4 млрд. долл. (табл.1), что на 76,1% больше, чем в предшествующем году. Вслед за значительным сокращением капиталовложений в 2009 году в наступившем году по всем сегментам рынка ожидается существенный рост инвестиций. Наблюдавшееся во втором полугодии 2009 года и первом квартале 2010-го быстрое оздоровление полупроводни-

ковой промышленности неизбежно повлечет за собой возобновление роста отчислений на приобретение оборудования в первую очередь изготовителями NAND-схем флеш-памяти и кремниевыми заводами. В первом полугодии 2010 года рост капиталовложений будет достаточно динамичным, во втором – слегка замедлится, а в 2011-ом – снова ускорится.

Отмечается, что в 2010 году 77% отгрузок оборудования сборки и корпусирования полупроводниковых приборов придется на страны АТР. Крупнейшим потребителем этого оборудования в 2012 году станет КНР – 27% мирового рынка. Рынок установок автоматического тестирования в 2010 году впервые с 2006-го покажет положительный рост. Один из факторов роста этого сегмента – переход к производству DDR3 ДОЗУ. Наиболее крупные капиталовложения в оборудование автоматического тестирования ожидаются в АТР, где, согласно прогнозам компании Gartner, в 2014 году будет сосредоточено около 80% мирового рынка установок [1].

По данным Международной организации полупроводникового оборудования и материалов (SEMI), в 2009 году было закрыто 27 серийных заводов (в основном foundries), включая 11 заводов по обработке 200-мм пластин и один по обработке 300-мм пластин. В 2010 году будет закрыто 21 предприятие (итого – 48), в 2011-м – планируется закрыть еще четыре завода [2]. Вместе с тем, затраты на сооружение и оборудование полного цикла производства, по оценкам SEMI, в 2010 году составят 30,9 млрд. долл., что на 88% больше показателя 2009 года. В предшествующем прогнозе этот показатель составлял 65%. Такое расхождение объясняется ожидаемой "реанимацией" нескольких ранее замороженных проектов. Среди них ввод в строй заводов RFAB (компании Texas Instruments по производству аналоговых микросхем), Fab12 Phase 5 (TSMC, 28-нм микросхемы), Fab12A P3/4 (UMC), Line 16 (Samsung, микросхемы памяти) и завода корпорации IM Flash (совместное предприятие Intel и Micron Technology по производству флеш-памяти) в Сингапуре. Кроме того, может начаться сооружение новых предприятий компаний корпораций TSMC (Fab14 Phase 4), Flash Alliance (Fab5) и ряда других.

Следует отметить, что каждый из трех сегментов рынка оборудования, используемого на начальных этапах обработки пластин (литографии, осаждения пленок и травления) является высокомонополизированным рынком (правда, это относится и к другим сегментам рынка полупроводникового оборудования).

В сегменте оборудования литографии в 2009 году по-прежнему лидировала корпорация ASML, на долю которой приходилось 51% отгрузок в натуральном выражении. За ней следовали Nikon (39%) и Canon (9%). В 2008 году эти показатели составляли 43, 29 и 28%, соответственно. Как видно, произошло значительное увеличение рыночных долей корпораций ASML и Nikon за счет сокращения доли Canon. Отмечается, что для сегмента литографического оборудования характерен сдвиг к увеличению отгрузок иммерсионных систем (37% в натуральном выражении в 2009 году, по сравнению с 22% в 2008-м). Несмотря на увеличение отгрузок иммерсионных систем с их значительно более высокими средними продажными ценами (СПЦ) в сравнении с традиционными системами литографии, доля общих доходов от продажи систем литографии на рынке полупроводникового оборудования начальных этапов обработки в 2009 году составила 19% против 22% в предыдущем году. Это говорит о том, что изготовители микросхем экономят на закупке литографического оборудования с тем, чтобы позволить себе начальные инвестиции в иммерсионные системы, а также опровергает тезис о том, что доля систем литографии в оборудовании начальных этапов обработки пластин растет до неприемлемого уровня [3].

На рынке оборудования осаждения пленок по итогам 2009 года лидировала компания Applied Materials, контролирующая 49% его продаж. За ней, по данным международного инвестиционного банка Barclays Capital, следовали компании Tokyo Electron (17%), Novellus (16%) и прочие (19%). В 2008 году доли компаний Applied Materials и Tokyo Electron составляли 49 и 17%, соответственно, компании Novellus – 14%, прочие – 20%. Эти показатели не учитывают отгрузки установок химического осаждения из паровой фазы (ХОПФ) и осаждения методом разложения металлоорганических соединений (МОСVD). Отмечается многолетнее сокращение удельного веса ХОПФ систем на рынке оборудования осаждения и тенденция к доминированию систем плазменного (PVD) и

электрохимического (ECD) осаждения, удельный вес которых растет. Увеличение доли ECD-систем связано с инвестициями в технологию формирования сквозных отверстий через кремний (Through Silicon Vias, TSV) и переходом к использованию медных межсоединений. Сокращение же удельного веса ХОПФ оборудования обусловлено усилением конкуренции между различными изготовителями как в области цен, так и в области производительности систем.

В 2010 году доли компаний Novellus и Applied Materials на рынке ХОПФ-оборудования не изменятся, в области PVD может увеличиться доля компании Novellus за счет роста закупок у нее систем Samsung Electronics поставщиками микросхем памяти. Основной тенденцией 2010 году станет неразбериха в базе заказчиков – слишком противоречивы у них намерения и потребности. При этом Novellus по-прежнему будет оказывать минимальное влияние на тайваньских изготовителей ДОЗУ [4].

На рынке оборудования травления в 2009 году лидером по-прежнему являлась корпорация Lam Research, доля которой составляла 41%. За ней следовали компании Tokyo Electron (28%), Applied Materials (17%), Hitachi (8%) и прочие (6%). В 2008 году Lam Research, Tokyo Electron и Applied Materials контролировали те же доли рынка, на Hitachi и прочие фирмы приходилось 7% и 8% соответственно. Примечательно то, что Lam Research и Applied Materials не поставляли оборудование травления корпорации Intel, но тем не менее сохранили свои позиции на рынке. По оценкам банка Barclays Capital, изменение предпочтений заказчиков в ближайшее время может привести к тому, что доля компании Lam на рынке оборудования травления увеличится до 52–54%. Этому может способствовать и переход от травления металлов к травлению диэлектриков (в результате выигрывают компании Lam Research и Tokyo Electron) и кремния (выигрывают Lam Research и AMAT) [5].

ЛИТОГРАФИЯ НА РАСПУТЬЕ: ТЕХНОЛОГИЯ И РАДА БЫ ВЗЛЕТЕТЬ, ДА ЗАТРАТЫ НЕ ПУСКАЮТ...

Объем продаж литографических систем в 2009 году вследствие экономического кризиса сократился на 51%, в 2010-м ожидается его увеличение на 114% (рис.1). При этом наблюдается рост их СПЦ: в 2008 году цена увеличилась на 29,4%, в

Таблица 1 Прогноз капиталовложений в полупроводниковое оборудование (рост по отношению к предыдущему году) на период 2009–2014 год

| Показатель | Капиталовложения, млрд. долл. (рост по отношению к предыдущему году, %) | | | | | |
|---|---|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| | 2009 г. | 2010 г. | 2011 г. | 2012 г. | 2013 г. | 2014 г. |
| Затраты на капитальное оборудование, в том числе | 16,677 (-46,6) | 29,373 (76,1) | 36,413 (24,0) | 42,920 (17,9) | 35,694 (-16,8) | 35,966 (0,8) |
| оборудование заводов по обработке пластин | 12,977 (-46,4) | 22,925 (76,7) | 28,793 (25,6) | 34,351 (19,3) | 29,177 (-15,1) | 28,582 (-2,0) |
| оборудование сборки и корпусирования, | 2,383 (-40,4) | 4,182 (75,5) | 5,013 (19,9) | 5,716 (14,0) | 4,336 (-24,2) | 4,977 (14,8) |
| оборудование автоматического тестирования | 1,318 (-46,1) | 2,266 (72,0) | 2,607 (15,0) | 2,852 (9,4) | 2,182 (-23,5) | 2,407 (10,3) |
| Прочие затраты | 9,258 (-30,8) | 11,057 (19,4) | 14,878 (34,6) | 18,979 (27,6) | 18,473 (-2,7) | 16,988 (-8,0) |
| Общие капиталовложения в полупроводниковую промышленность | 25,935 (-41,1) | 40,430 (55,9) | 51,292 (26,9) | 61,899 (20,7) | 54,168 (-12,5) | 52,953 (-2,2) |



Рис. 1. Динамика рынка систем литографии

2009 году рост слегка замедлился до 25,3%, а в 2010 году он снова "подпрыгнет" и составит 38,9%. Это объясняется увеличением доли иммерсионных систем в общем объеме продаж оборудования литографии, о чем было сказано ранее.

На конференции Международного общества по оптической технике, посвященной новейшей технологии микролитографии (SPIE Advanced Microlithography 2010) отмечалось, что полупроводниковая отрасль стоит на распутье. Существующая технология будет пригодна дольше, чем ожидалось ранее. Но в ближайшем будущем у нее могут возникнуть серьезные конкуренты. В частности, на разработку источников излучения, работающих в предельной УФ-области (EUV-системы), в ходе долгосрочных НИОКР уже затрачены значительные средства. Но по-прежнему этот вид литографии не может считаться зрелой технологией с возможностью быстрого освоения промышленностью. Из-за этого ряд фирм отказались от работ в этой области и переключились на другие направления.

Разработка методов литографии следующего поколения (Next Generation Lithography, NGL) ведется более 10 лет. Наиболее перспективными считаются: EUV-литография, бесшаблонная электронно-лучевая (Maskless Lithography, ML2), наноимпринтинг (Nanoimprinting) и направленная самосборка (Directional Self Assembly). Перспективность наноимпринтинга заключается в возможности близкого расположения микрообъективов, что позволяет формировать 45-нм структуры логических микросхем, 32-нм контакты схем памяти и многоуровневые изоляторы, впечатанные в сквозные отверстия диаметром до 100 нм. Недостаток этой технологии – относительно малая точность совмещения и низкая производительность. К тому же, наноимпринтинг, как и ML2, по-прежнему остается на стадии НИОКР. Четвертый кандидат в NGL, направленная самосборка, рассматривается как наиболее перспективная технология, но и она пока не попадает в число финалистов разработок ближнесрочной перспективы.

С другой стороны, освоение 193-нм иммерсионной литографии и постоянное отставание от графиков окончательной

доработки и коммерциализации EUV-литографии и других NGL-технологий существенно расширяют сроки освоения 193-нм иммерсионной технологии. В результате в качестве основных конкурентов на среднесрочную перспективу рассматриваются 193-нм иммерсионная литография и EUV-литография, поэтому основное внимание целесообразно уделить им.

Иммерсионная литография, по сути, появилась на последней стадии развития проекционной (оптической) литографии. Ее суть заключается в том, что между шаблоном и кремниевой пластиной в качестве дополнительной среды вводится жидкость (очищенная вода). Применение воды обусловлено ее более высоким, по сравнению с воздухом, коэффициентом преломления, что позволяет добиться увеличения разрешающей способности оптической литографии без изменения длины волны источника излучения. Ранее ожидалось, что предельное разрешение иммерсионной литографии составит 40 нм, и для получения меньших топологических норм потребуются технологии следующего поколения. Теперь же, из-за постоянных задержек с освоением этих технологий разработчики микрочипов полагаются на метод двойного формирования рисунка и рассчитывают использовать иммерсионную литографию для получения топологических норм менее 20 нм.

Большинство ведущих компаний развивают различные формы этого метода. Среди них можно выделить метод двойного экспонирования (double exposure), двойного формирования рисунка (double patterning) и двойного формирования рисунка со спейсерами (spacer double patterning).

Метод двойного экспонирования предусматривает экспонирование первого набора линий, с последующим переносом зоны экспозиции до проведения других этапов технологического процесса в смежную область и экспонирование второго комплекта линий. Этот метод выполняется быстрее, чем метод двойного формирования рисунка. Основной недостаток – необходимость применения нелинейного резиста, химические свойства которого позволяли бы поглощать слабое излучение соседней зоны экспонирования без формирования рисунка.

Метод двойного формирования рисунка требует двукратного экспонирования. На первом этапе выполняются операции экспонирования половины линий, травления и дальнейших этапов технологического процесса. Затем на пластину наносится еще один слой резиста, и в промежутках между первым набором линий экспонируется вторая половина рисунка. Этот подход достаточно дорог и длителен, но с технической точки зрения он сравнительно прост, хотя и требует точности совмещения ~2 нм.

Двойное формирование рисунка со спейсерами – результат развития метода двойного формирования рисунка. Спейсер – тонкий слой, осаждаемый или формируемый в результате реакции на боковых стенках начального рисунка элементов. Сначала

осаждается слой материала, на котором с помощью однократного экспонирования создается начальный рисунок элементов критических размеров. Затем поверх них осаждается материал спейсера, который затем стравливается с горизонтальных поверхностей подложки и остается лишь на вертикальных боковых стенках начального рисунка. Метод включает процессы низкотемпературного осаждения слоев окисла и химико-механической полировки для изготовления спейсеров. Применение спейсеров позволяет вводить элементы топологии с размерами, равными толщине слоя спейсера. При этом, поскольку спейсер располагается с двух боковых сторон элемента, плотность элементов в два раза выше, чем в первоначальном рисунке.

Однако применение подобных методов иммерсионной литографии может привести к дополнительным затратам и их нерентабельности (рис.2). Следует отметить, что на рисунке отражены прогнозы SPIE, сделанные в 2007 году. И если со сложностью и длительностью цикла они оправдались, то относительно затрат – нет. Ранее предполагалось, что EUV-системы не будут дороже иммерсионных систем, тогда как сейчас перед разработчиками стоит задача снижение их стоимости до уровня иммерсионных систем.

С тем, чтобы издержки производства микросхем при использовании двойного формирования рисунка не возрастали в два раза, поставщики 193-нм иммерсионных систем, такие как ASML и Nikon, соревнуются друг с другом в создании систем с повышенной производительностью. ASML рассчитывала поставить первую подобную машину (NXT:1950i) в апреле или мае 2009 года, однако из-за ряда проблем ее выпуск отложен. Аналогичная ситуация с системой S620D корпорации Nikon. Правда, обе компании обещают в ближайшее время представить полные спецификации своих схем. Аналитики полагают, что появление этих машин позволит изготовителям микросхем использовать оптическую литографию в "глубокой суб-30-нм зоне".

EUV-литография, на развитие которой уже затрачено миллиарды долларов, продолжает потреблять деньги как бездонная бочка. На пути освоения технологии стоят три основные проблемы: мощность источников излучения крайнего ультрафиолетового диапазона, наличие требуемых фоторезистов и бездефектных шаблонов. Но и стоимость EUV-систем впечатляет: цена опытной установки компании ASML составляет ~90 млн. долл. А по некоторым оценкам, стоимость полностью готового для производства EUV-оборудования будет превышать 100 млн. долл.

Разработка технологии EUV-литографии была начата консорциумом EUV LLC под руководством корпорации Intel еще в 1997 году. Коммерциализировать ее планировалось в 2005 году на топологическом уровне 90 нм, но отрасль ждет этого до сих пор. Компания Samsung считает, что такая задача вполне выполнима в 2012 году, но большинство отраслевых аналитиков называют даты ближе к 2015 году.

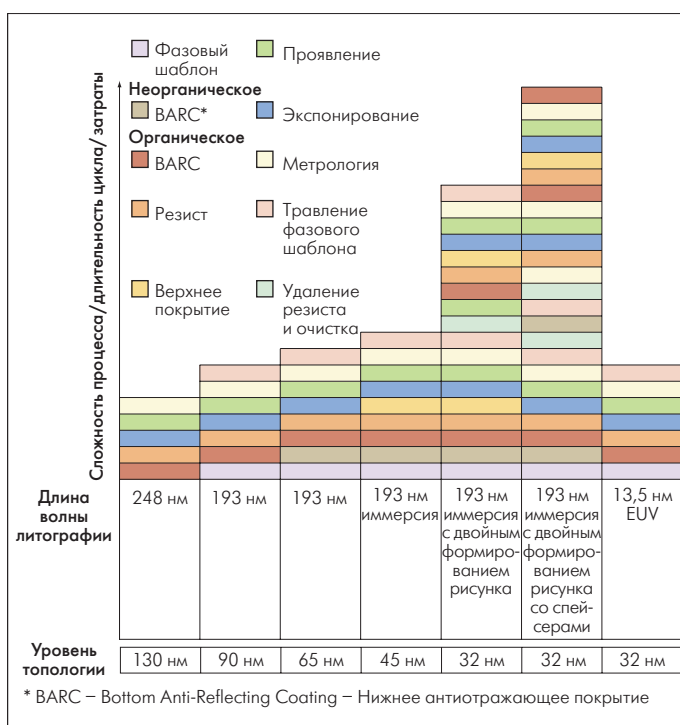


Рис.2. Характеристики производственного процесса в зависимости от топологии микросхемы

Основное отличие систем EUV-литографии от современных стандартных средств литографии – использование источника излучения на длине волны 13,5 нм. Процесс проводится в многозеркальной вакуумной камере, оптические элементы которой, по существу, являются бездефектными зеркалами, отражающими излучение в результате межслойной интерференции. Процесс доведения характеристик EUV-систем до уровня, пригодного для выпуска их на рынок, оказался медленным. Например, для достижения производительности по обработке 100 пластин, мощность источника EUV-излучения должна составлять 100 Вт в непрерывном режиме работы. До последнего времени с этим были проблемы. Однако, в конце апреля 2010 года компания Gigaphoton (Япония) – один из основных поставщиков источников излучения для литографического оборудования – объявила о достижении рекордного значения выходной мощности источника EUV-излучения – 104 Вт. Это удалось добиться в рамках проводимой японским технологическим консорциумом по разработке систем EUV-литографии (Extreme Ultraviolet Lithography System Development Association of Japan, EUVA) программы создания источника излучения на лазере, возбуждаемом плазмой (Laser Produced Plasma Light Source Development Program for EUV Lithography). В ходе этой работы для улучшения эффективности системы было предложено использовать оловянные мишени и газовые CO₂-лазеры. Остатки органических веществ удаляются с помощью магнитного поля. Система EUV-литографии с источником излучения мощностью более 100 Вт по стоимости владения окажется сопоставимой с системой иммерсионной литографии с двойным формированием ри-

сунка. Очевидно, это приведет к усилению поддержки EUV-литографии промышленностью, ускорит достижение дальнейших прорывов в области мощности источников излучения и позволит удовлетворить будущие требования, предъявляемые к системам формирования рисунка. Предполагается, что производство источников излучения требуемой высокой мощности начнется в 2011 году [6].

В области резистов также наблюдается прогресс. До сих пор не существовало подходящих для выполнения EUV-литографии резистов. На 22 Международной конференции по микропроцессам и нанотехнологии (International Microprocesses and Nanotechnology Conference), состоявшейся 19 ноября 2009 года в Саппоро (Япония), корпорация Toshiba заявила о разработке EUV-резиста и проверке его пригодности для изготовления микросхем с 20-нм топологическими нормами. Ожидается, что новый резист решит проблемы производства микросхем 20-нм поколения, которые для современных литографических систем с использованием ArF лазера, излучающего в области дальнего УФ-излучения, оказались "не по зубам".

Для получения молекулярного полимерного резиста специалисты компании Toshiba использовали одну из производных труксена (truxene [8]), звездообразная структура которых позволяет получить устойчивый, низкомолекулярный, более высококачественный и надежный, чем применяемые сегодня полимеры, резист. Производная труксена была успешно использована в качестве негативного резиста для формирования тестового шаблона с линиями шириной 22 нм. При этом стойкость к травлению была на 40% больше, чем у стандартного полимерного резиста – полигидроксистирила (рис.3 в папке рисунки – рис.4).

Сейчас усилия разработчиков направлены на улучшение характеристик молекулярного резиста с тем, чтобы его можно было использовать при производстве микросхем с 2х-нм проектными нормами, которое, согласно Дорожной карте развития полупроводниковой техники, планируется на 2013 год [7].

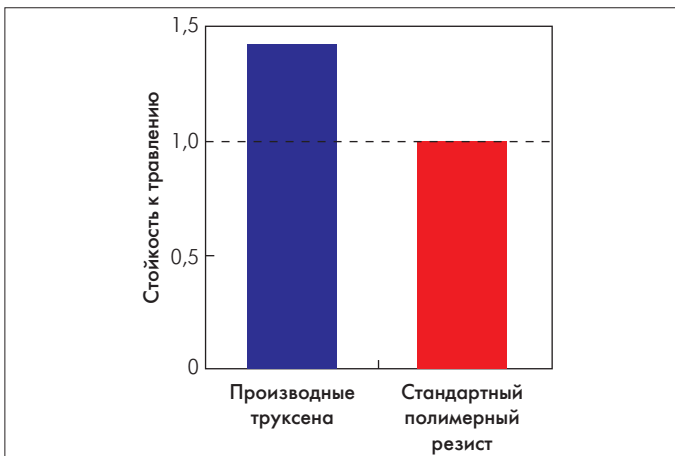


Рис.3. Стойкость производных труксена и стандартных резистов к травлению

Таблица 2. Оценка дополнительных затрат на EUV-литографию

| Средство системы | Наличие реализованного поставщиком решения | Финансирование оценочной стоимости серийного решения | Дата доступности серийного решения |
|--|--|--|------------------------------------|
| Полнопольный производственный сканер | + | + | 2012 год |
| Источник излучения | + | + | 2011 год |
| Резист | + | + | 2011 год |
| Средство контроля подложки шаблона | | + | 2013 год ? |
| Средство контроля заготовки шаблона со слоем резиста | + | Требуется более 50 млн. долл. | 2013 год ? |
| Средство анализа дефектов | - | Требуется более 50 млн. долл. | 2013 год ? |
| Средство контроля шаблона | - | Требуется более 100 млн. долл. | 2013 год ? |
| Метрология шаблонов | - | Требуется более 200 млн. долл. | 2013 год ? |

Пожалуй, сегодня главной проблемой EUV-литографии стала метрология. Если изготовители микросхем не смогут контролировать бездефектность EUV-шаблонов, эта литография вряд ли будет "иметь место". Для решения проблемы консорциум SEMATECH (в который входят, в частности, компании IBM, Intel, Samsung и TSMC) сформировал альянс по разработке инструментальных средств метрологии. Общая оценка ожидаемых затрат – более 400 млн. долл. или два-три года работы (табл.2). Некоторые эксперты при этом полагают, что на многих начальных повторяющихся операциях обнаружение дефектов EUV-шаблонов, используемых в массово-поточном производстве, можно применять системы метрологии зеркального отображения (AIMS, aerial imaging metrology system). Для контроля заготовок шаблонов со слоем резиста и контроля рисунка микросхемы можно обойтись существующими оптическими инструментальными средствами. Однако SEMATECH утверждает, что современные инструментальные средства метрологии малочувствительны и не способны обнаруживать дефекты EUV-шаблонов, поэтому необходимо разработать актинические системы, работающие на той же длине волны, что и EUV (13,5 нм).

Разрыв между EUV метрологией и требованиями EUV-литографии в целом возник из-за того, что вопросы метрологии в первые годы не являлись ключевыми для разработчиков. Такая проблема "курицы и яйца" – что нужно сначала? Сформировавшийся разрыв предполагается преодолеть до 2015 году в три этапа. На первом этапе, который должен закончиться в 2011 году созданием опытного образца системы метрологии, основное внимание будет уделено разработке средств контроля заготовок шаблонов со слоем резиста. На втором этапе, заканчивающемся в 2013 году, предполагается разработать перспективные системы метрологии, а на третьем, к 2015 году –

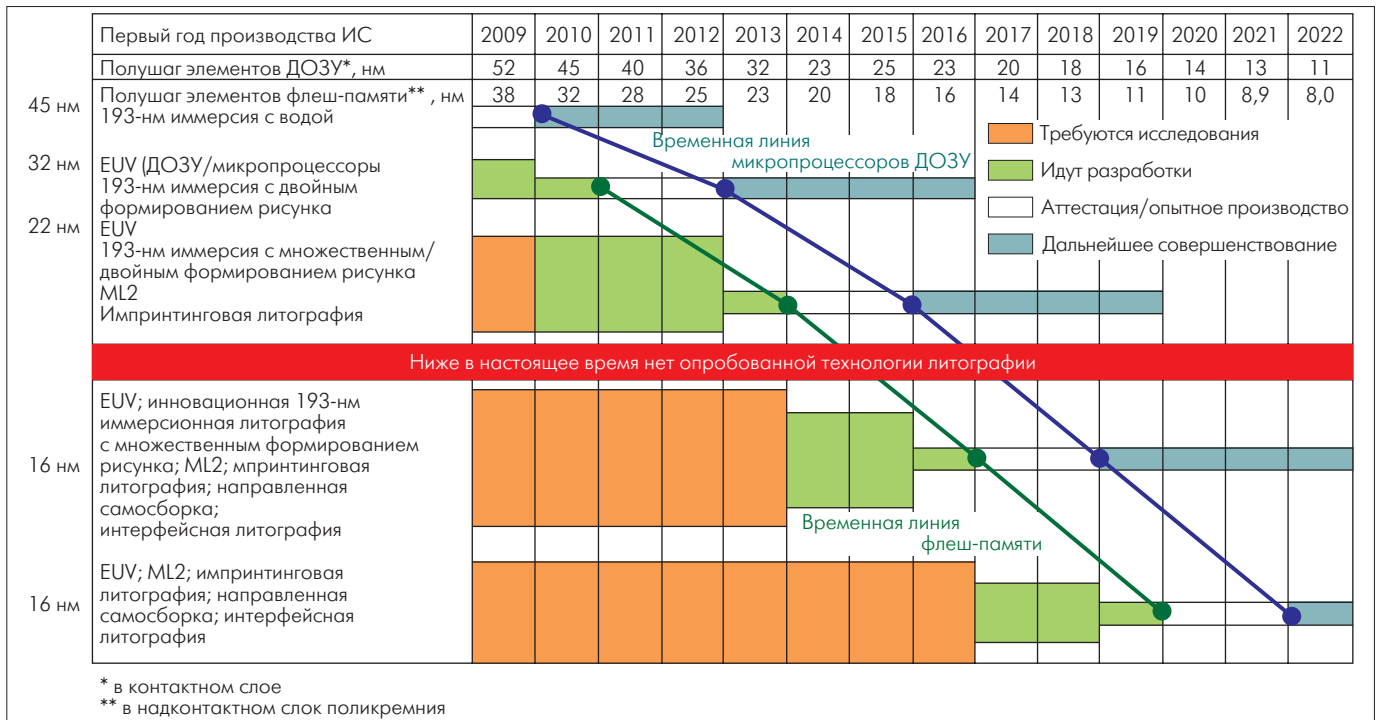


Рис.4. Динамика развития систем литографии в соответствии с международной дорожной картой (ITRS). В качестве предела технологических решений в области литографии приняты 22-нм проектные нормы

средства контроля готового шаблона. (где-то здесь можно поместить вставку под номером 1)

У экономического аспекта этой проблемы есть еще одна сторона – позиция поставщиков инструментальных средств. Затраты на разработку растут, а рентабельность инвестиций весьма сомнительна. Так, затраты на НИОКР по разработке средств актинового контроля шаблона маски составляют ~100 млн. долл., затраты на используемые материалы и компоненты – 5–10 млн. долл. В приобретении метрологических средств заинтересованы около 12 крупнейших изготовителей микросхем. Поэтому для получения достойной прибыли их изготовителям придется продавать свои машины по премиальным ценам*. Соответственно, цена EUV-системы контроля на одну установку литографии может достигать 40 млн. долл. (и это не включая стоимость других устройств, таких как системы контроля заготовки шаблона со слоем резиста, анализа дефектов и т.п.). Сам же EUV-сканер может стоить 100 млн. – 130 млн. долл. [8].

Таким образом, ситуация неоднозначна. Некоторые критики EUV-литографии призывают отказаться от нее "всем миром и сразу" и искать другие пути совершенствования технологий литографии. Тем не менее, сторонники EUV-литографии поддерживают ее и не видят ей альтернатив, считая, что иначе эпохе закона Мура придет конец, и что традиционная оптическая литография дальнейшему омоложению не подлежит.

* Более высокая цена товара или услуги благодаря наличию уникальных особенностей, либо благодаря интересу потребителей к данной торговой марке в сравнении с ценой сходных товаров/услуг, установленной конкурентами.

ЕСТЬ ЛИ ЖИЗНЬ НА МАРСЕ, НЕТ ЛИ ЖИЗНИ НА МАРСЕ... НАУКЕ НЕИЗВЕСТНО

На последней конференции SPIE много говорилось как о технических, так и экономических трудностях освоения NGL-технологий. Среди многих выводов конференции можно отметить следующие:

- теоретически возможности формирования элементов размером на менее 22 нм с помощью фотолитографии существуют, но опробованных технологичных решений пока нет (рис.4 в папке это рис3);
- рост затрат на разработку и эксплуатацию новых процессов может сделать их нерентабельными, поэтому больше внимания следует уделять альтернативным решениям;

Каково отношение ведущих изготовителей изделий микроэлектроники к EUV-литографии? Компания Samsung, самая оптимистичная в этом плане, предполагает приступить к использованию EUV-литографии в 2012 году, начав с производства ДОЗУ, а не флэш-памяти NAND-типа, которая наравне с ДОЗУ стала "двигателем" масштабирования микросхем. Такое решение компания объясняет тем, что ДОЗУ нельзя рассматривать как обычную двухмерную структуру: у нее в три раза больше критических слоев, чем у флэш-памяти NAND-типа, и поэтому использование EUV-литографии первоначально для производства ДОЗУ сможет стимулировать освоение этой технологии отраслью. По сравнению с ДОЗУ флэш-память NAND-типа можно рассматривать как "одномерную" структуру, и поставщики микросхем с проектными нормами 2x nm могут использовать метод двойного формирования рисунка со спейсерами 193-нм иммерсионной литографии.

Изготовители логических микросхем, такие как Intel, могут отложить свой переход на EUV-литографию, так как проектные нормы для логики менее жесткие, чем для схем памяти. С точки зрения масштабирования микросхем корпорация Intel на полшага отстает от ведущих изготовителей ДОЗУ и NAND-флэш, рассчитывая использовать 193-нм литографию для изготовления схем с проектными нормами до 15 нм. Для 11-нм норм корпорация планирует сочетать традиционный сканер с EUV- или ML2 литографией, в зависимости от того, какая из них будет готова для серийного производства (см. рис.4).

Кремниевые заводы, в частности, крупнейший из них – TSMC – еще не отдали предпочтения какой-либо новейшей технологии – EUV, ML2 или 193-нм иммерсионной литографии с двойным формированием рисунка.

В связи с неясностью относительно последовательности и преемственности применения различных видов литографии изготовители рассматривают схемы, позволяющие обойтись без NGL. Инновационные подходы предусматривают "этажирование" существующих приборов в трехмерные конфигурации с использованием сквозных отверстий через кремний, а также освоение таких структур, как FinFET, и графеновых транзисторов. Однако, как и NGL, вся эта экзотика по большей части пока представляет собой "бумажные тигры". (Здесь бы хорошо поместить в подвале на две полосы материал вставки под номером 2)

Как и в полупроводниковой отрасли, перспективы развития промышленности полупроводникового оборудования достаточно неопределенны. Переход на меньшие топологические нормы все больше зависит не от физических возможностей используемых материалов, а от экономических соображений, в том числе от реального соответствия выпускаемой по новым топологиям продукции с потребностями рынка, определяемыми пользовательскими предпочтениями. Существует вероятность того, что микросхемы с топологическими нормами менее 22 нм еще долго останутся в стенах лабораторий. Соответственно, возрастет длительность цикла присутствия на рынке каждого нового поколения полупроводниковых приборов. Для изготовителей инструментальных средств будет все труднее выживать в условиях, когда их заказчиками фактически станут 10–20 ведущих производителей микросхем. Соответственно, в отрасли идут процессы консолидации и степень монополизации рынка полупроводникового оборудования увеличивается [9].

Для России существуют хорошие возможности закупки по приемлемым ценам современного оборудования, рассчитанного на производство приборов с нормами до 65–45 нм. Однако, необходимо формирование внутреннего рынка "хай-тека" с участием государства, а также четкое представление для чего оно закупается – на какие рынки конечного потребления и с какой продукции, следует вы-

ходить, каковы ожидаемый объем продаж, срок выхода на рентабельность и окупаемости оборудования?

ЛИТЕРАТУРА

1. **Clarke P.** Semiconductor capex to grow 76% in 2010, says Gartner. EE Times, 03/08/2010
2. **LaPedus M.** SEMI boosts capex forecast. EE Times, 03/03/2010
3. **LaPedus M.** ASML extends share lead in litho. EE Times. 04/26/2010
4. **LaPedus M.** Applied rules in deposition equipment. EE Times, 04/26/2010
5. **LaPedus M.** Lam Research: The etch king.– EE Times, 04/26/2010.
6. **LaPedus M.** Group claims EUV light source record.– EE Times, 04/26/2010.
7. **Clarke P.** Toshiba claims EUV photoresist breakthrough for 20-nm era.– EE Times, 11/17/2009.
8. Toshiba develops molecular photoresist technology for EUV lithography. The world's first application in 20nm generation.– Toshiba's press release, Nov17, 2009.
9. **Макушин М.** Мировой рынок микроэлектроники после кризиса: новые реалии и старые проблемы. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2010, №2, с.