



# МИРОВАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ.

### ЧАСТЬ I

Транзистор – одно из важнейших изобретений XX столетия, повлекшее за собой появление полупроводниковых приборов и микросхем. Эти устройства стали основой электронных систем и привели к проникновению электроники во все важнейшие для жизнедеятельности человека отрасли – энергетику, транспорт, связь, здравоохранение. Развитие микроэлектроники невозможно без постоянного совершенствования научного понимания свойств полупроводниковых материалов и приборов, а также технологических процессов, необходимых для изготовления современных изделий. И даже неискушенный потребитель не может не оценить "изобретательность" полупроводниковой промышленности. Возникают ли задачи масштабирования приборов и микросхем вплоть до нанометровых размеров, или увеличения производительности технологических операций, или ввода бизнес-модели предприятия, позволяющей успешно компенсировать высокие затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, полупроводниковая промышленность из года в год успешно находит их решение.

Электронная промышленность – стратегически важная современная отрасль во всех странах мира. На ее долю приходится ~3,5% мирового ВВП. Развитие этой отрасли невозможно без совершенствования ее элементной базы, основа которой – современные полупроводниковые изделия. Производители полупроводниковых приборов постоянно увеличивают капитальные затраты на развитие полупроводниковой промышленности, совершенствование технологии и оборудования, требуемых для производства будущих поколений приборов (табл.1) [1]. Это хорошо видно на примере динамики капитальных затрат, отчисляемых на развитие микросхем ДОЗУ, долгое время являвшихся основными компонентами, определяющими достигнутый уровень технологии (рис.1).

В качестве примера развития технологии и темпов обновления оборудования можно привести завод Building 323 фир-

В.Юдинцев

мы IBM в Ист-Фишбилле, который был отмечен традиционной ежегодной премией журнала Semiconductor International как лучший завод 2005 года [2]. Благодаря усовершенствованной АСУП производство микросхем на заводе не зависит от человеческого фактора. На заводе функционируют 12 междисциплинарных рабочих групп, каждая из которых отвечает за одну из ключевых платформ технология/оборудование. Каждая группа анализирует все составляющие потерь курируемой платформы и разрабатывает планы повышения производительности. В результате деятельности этих групп и эффективных методов управления технологическими процессами время цикла обработки сокращено более чем на 50% при увеличении производительности на 59%.

Специалисты предприятия освоили, аттестовали и нарастили производство разнообразных изделий с проектными нормами 180, 130, 90 и 65 нм\* (рис.2).

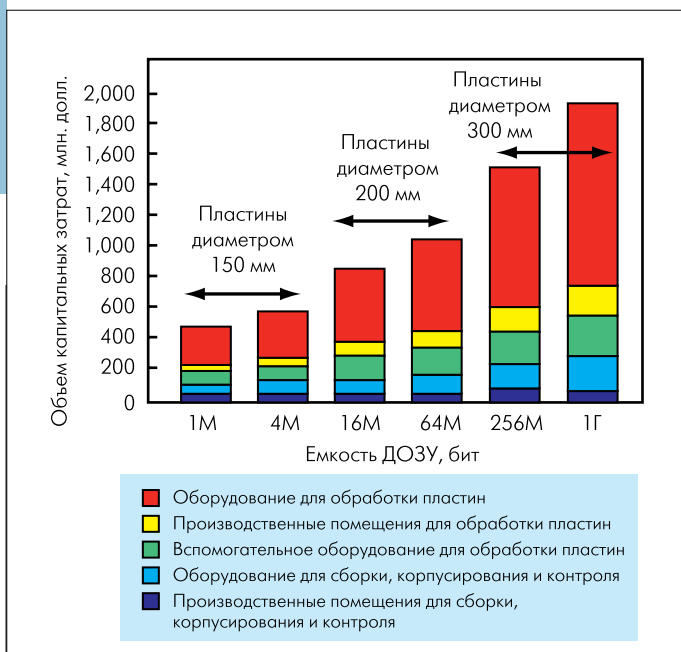


Рис. 1. Динамика капитальных затрат на развитие ДОЗУ

\*Промышленный выпуск изделий с проектными нормами 0,09 мкм был начат в 2003 году, который считается началом эры нанозлектроники.



**Таблица 1. Прогноз капитальных затрат на развитие полупроводниковой промышленности**

Показатель	2005	2007	2008	2011	Среднегодовой прирост за 2005–2011 годы, %
Мировой валовой внутренний продукт (ВВП), млрд. долл.	36479	39260	40639,90	45021	3,5
Мировой объем продаж электронных систем, млрд. долл.	1261,703	1395,320	1450,886	1574,481	3,8
Мировой объем продаж полупроводниковых приборов, млрд. долл.	238,289	272,880	295,286	331,314	5,6
Капитальные затраты на развитие полупроводниковой промышленности, млрд. долл.					
в целом	47,197	57,144	54,603	58,560	3,7
на оборудование	34,141	43,673	43,796	48,539	6,0
обработки пластин	25,952	34,707	34,267	38,132	6,6
корпусирования и сборки	4,416	5,041	5,318	5,734	4,5
на автоматизированное контрольно-измерительное оборудование	3,773	3,925	4,211	4,671	3,6
прочие затраты	13,056	13,471	10,807	10,02	-4,3

Примечание. Объем продаж материалов для полупроводниковой промышленности за период с 2005 по 2011 год увеличится с 22 млрд. до 36 млрд. долларов.

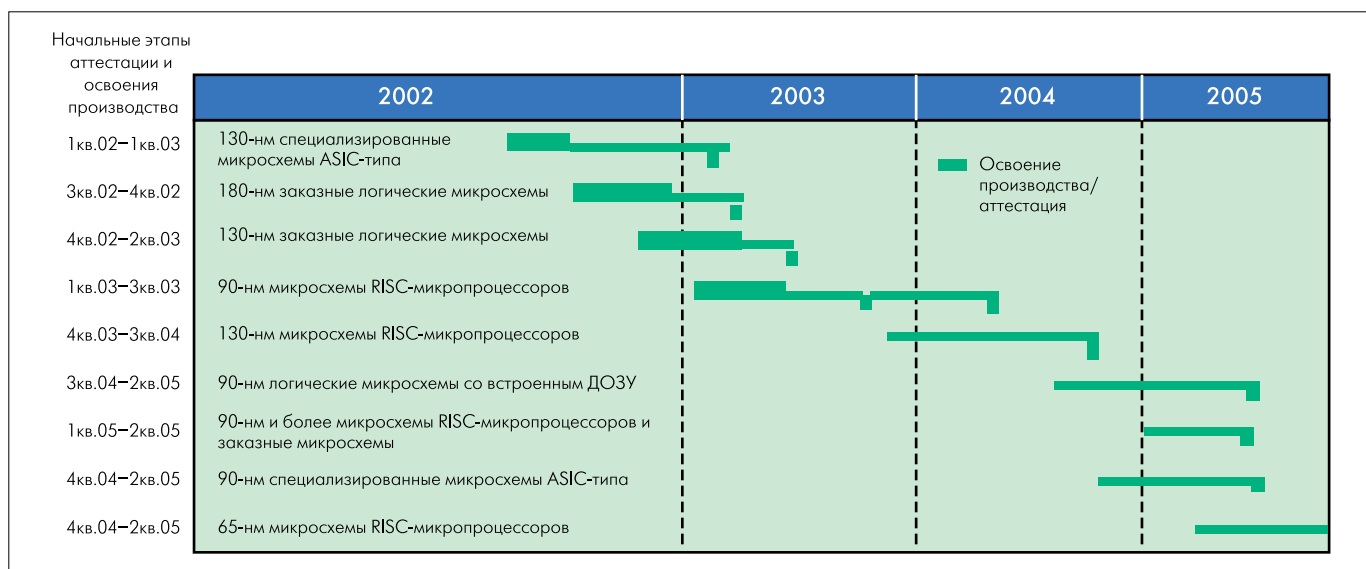
### КОМПАНИИ ВСЕХ СТРАН, ОБЪЕДИНЯЙТЕСЬ!

Упрощение сложности новых производственных процессов играет решающую роль в обеспечении жизнеспособности будущих технологий микроэлектроники. Но из-за резкого роста затрат на освоение новой технологии микросхем по мере их масштабирования (табл.2) решение все нарастающих проблем полупроводниковой промышленности в первую очередь требует объединения усилий и финансов различных производителей (в том числе и различных отраслей промышленности) [4]. Пример такого объединения – образованный компанией IBM альянс Common Platform (совместная платформа) [3–5]. В его состав вошли компании IBM, Chartered Semiconductor Manufacturing и Samsung Electronics, а также партнеры по альянсу совместных разработок – Infineon Technologies и Freescale Semiconductor. Недавно к альянсу присоединилась фирма STMicroelectronics. Цель компаний, входящих в платформу, – освоить к 2010 году 32-нм КМОП-технологии с использованием затворного диэлектрика с высокой диэлектрической постоянной (высоким  $k$ ), металлического затвора, напряженного кремния и диэлектри-

ка со сверхнизким  $k$  при формировании межсоединений. Кроме того, планируется освоить второе поколение установок иммерсионной литографии, создать высококачественные аналоговые блоки цифровых средств связи и отработать технологию ВЧ КМОП-схем и встроенных ДОЗУ.

Производить 32-нм микросхемы должен завод Building 323. Компания IBM планирует начать квалификационные испытания микросхем в конце 2009 года. Фирмы Chartered и Samsung приступят к производству изделий с 32-нм проектными нормами на квартал позже.

Другой пример – объединение усилий "междисциплинарных" компаний IBM и известного химического концерна BASF (Германия), заключивших соглашение на проведение совместных исследований специальных материалов, необходимых для создания 32-нм микросхем [6]. Работы будут проводиться на заводе в Йорктаун Хайтс (США) и на предприятии BASF в Людвигшафене (Германия). Этот союз не случаен. Переход к новому уровню проектных норм требует освоения новых материалов и технологических процессов (табл.3) [7]. А концерн BASF имеет многолет-



**Рис.2. График освоения производства микросхем по мере масштабирования топологических норм**

**Таблица 2. Затраты на НИОКР, проектирование и производство микросхем с топологическими нормами 45 и 32 нм (источники: газета EE Times, компании Synopsys и VLSI Research)**

Процесс	Затраты, млрд. долл.	
	45 нм	32 нм
Производство	3	5–10
НИОКР в области технологии	2,4	3
Проектирование	0,02–0,05	0,075
Стоимость шаблонов	0,09	–

ний опыт разработки химических реагентов для полупроводниковой и нанотехнологии.

Концерн BASF также присоединился к программе европейского Межуниверситетского Центра Микроэлектроники (Interuniversity Microelectronics Center – IMEC), цель которой – разработка и выпуск на рынок к 2010 году мощных растворов и усовершенствованных металлических слоев для полупроводникового производства микросхем с 32-нм топологическими нормами [8].

**450-мм ЗАВОДЫ: БЫТЬ ИЛИ НЕ БЫТЬ?**

В 2003 году в начале освоения промышленного производства микросхем с проектными нормами 90 нм существовало лишь несколько производственных линий по обработке пластин диаметром 300 мм. Но к концу 2005 года уже около 30 заводов работали с пластинами такого диаметра. Производительность их составляла 10 тыс.–30 тыс. пластин в месяц.

В последнее время активно обсуждается вопрос перехода к обработке пластин диаметром 450 мм. Согласно Международной программе развития технологии полупроводниковых приборов (International Technology Roadmap for Semiconductors – ITRS) 2005 года, обработка 450-мм пластин должна начаться в 2012–2014 годы. Чтобы обеспечить выполнение этого плана, на конференции Semicon West 2007 Международная производственная инициатива, предложенная консорциумом Sematech (International Sematech Manufacturing Initiative – ISMI), представила новую научно-исследовательскую программу перехода к производству микросхем на 450-мм пластинах – 450mm [9]. Цель ее – гарантировать эксплуатационную готовность 450-мм кремниевых пластин; обеспечить разработку общих руководящих документов и стандартов 450-мм завода; подгото-

вить опытный испытательный стенд для тестирования 450-мм оборудования, в том числе и таких элементов и устройств, как кристаллодержатели, загрузочные порты, модули и др. Новая программа 450mm не отменяет ранее принятый ISMI проект 300mmPrime (300P), нацеленный на повышение производительности производства и сокращение длительности рабочего цикла 300-мм оборудования. Обе программы проводятся параллельно и предусматривают обеспечение совместимости установок двух типов. Большая часть мер, направленных на сокращение длительности рабочего цикла, которые разрабатываются по программе 300mmPrime, как ожидается, будут полезны и для 450-мм производства [10]. Программа 300P – ступенька для перехода к обработке 450-мм пластин, позволяющая снизить риски такого перехода. Конечные цели ISMI: снижение на 30% стоимости производства в пересчете на единицу площади пластины и сокращение длительности цикла на 50% [11].

Компании-поставщики полупроводникового технологического оборудования, которые только приходят в себя после затруднений, связанных с переходом промышленности к работе с 300-мм пластинами, заявляют, что новый переход к пластинам большего диаметра может разорить их. Опасения поставщиков оборудования основаны на опыте перехода к 300-мм пластинам, когда стоимость НИОКР по разработке оборудования возросла в девять раз по сравнению с затратами на создание 200-мм установок, а вместо прогнозирувавшегося высокого спроса на новое оборудование неожиданно наступил резкий застой. Обещанный объем инвестиций так и остался на бумаге, а поставщики оказались практически один на один со всеми проблемами, связанными с разработкой и внедрением весьма дорогостоящего оборудования. Если издержки производства промышленных установок для обработки 450-мм пластин также увеличатся в девять раз, затраты производителей на выпуск такого оборудования превысят 100 млрд. долл. [12]. Маловероятно, что они смогут осилить разработку такого оборудования, даже если удастся снизить затраты до 20 млрд. долл. Разработка 450-мм оборудования потребует решения многих технических проблем, таких как увеличение толщины пластин, устранение их коробления и возникновение дефектов в результате термообработки. К тому же, многие поставщики технологического оборудования – это малые и средние фир-

**Таблица 3. Материалы, используемые на этапах масштабирования**

Элементы/процесс	Изменения при переходе на новый топологический уровень						
	180 нм	130 нм	90 нм	65 нм	45 нм	32 нм	22 нм
Диаметр пластины, мм	200	200/300	300	300	300	300	300
Литография	KrF-источник		ArF-источник	Иммерсионная, ArF-источник.		С применением жесткого УФ-излучения (вакуумная)	
Межсоединения	Al			Cu			
Изолирующий слой	SiO <sub>2</sub>			Низкий к диэлектрик			
Канал	Si			Напряженный Si			
Электрод затвора	Поликремний			Металл			
Затворный диэлектрик	SiO <sub>2</sub>			Высокий к диэлектрик			



мы с ограниченным бюджетом, которые не в состоянии окупить разработку 450-мм установок.

Серьезной проблемой является и получение прибыли на инвестированный капитал. Считается, что полупроводниковой промышленности потребуется 30 лет для того, чтобы окупить колоссальные инвестиции в освоение производства микросхем на 300-мм пластинах [13]. По мнению специалистов компании Applied Materials, срок окупаемости 450-мм технологии может превысить срок жизни предприятия. Поэтому отношение к переходу к 450-мм пластинам очень неоднозначное. Наиболее активными сторонниками скорейшего внедрения новой технологии являются представители так называемой "большой четверки" производителей микросхем – Intel, Samsung Electronics, Toshiba и Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. (TSMC). По итогам третьего квартала 2007 года, объем продаж этих компаний на рынке полупроводниковых приборов составил 21 млрд. долл., или 80% общего объема продаж в 35 млрд. долл. Правда, лишь Intel, Samsung и, возможно, TSMC объявили, что готовы начать строительство 450-мм заводов в соответствии с планом ITRS. О возможности перехода к 450-мм технологии заявили фирмы IBM, Chartered, Powerchip, Qimonda, Promos, Elpida, Nanya, UMC, Micron, SMIC. По оценкам компании VLSI Research, переход к следующему поколению пластин может состояться не ранее 2020–2025 годов. Ряд изготовителей полупроводникового оборудования и приборов во главе с компанией Applied Materials, по мнению которой повышение эффективности существующих технологий более рационально с точки зрения снижения затрат, чем экстенсивное увеличение площади пластин, и вовсе сомневаются в целесообразности такого перехода, считая, что пластины диаметром 300 мм – конечный вариант пластин большого размера.

Несмотря на повышенное внимание, уделяемое проблемам освоения 450-мм производства, продолжается ввод в строй заводов по обработке как 300-мм, так и 200-мм пластин. По данным исследовательской компании The Information Network, в 2007 году в мире должны были запустить девять новых 300-мм заводов и еще 17 заводов – в 2008 году. Увеличат свои производственные мощности в 2008 году 55 заводов по обработке 300-мм пластин. В результате число ежемесячно поступающих на обработку пластин (2,1 млн.) увеличится на 680 тыс., т.е. производительность 300-мм заводов возрастет на 32% [14]. Согласно оценкам Международной промышленной полупроводниковой ассоциации SEMI, в результате появления 26 новых заводов по обработке 300-мм пластин в мире будут действовать 73 таких предприятия, и их общая производительность к концу 2008 года превысит 6,2 млн. пластин в год. Затраты на строительство 300-мм завода в 2008 году, по прогнозам SEMI, возрастут на 40% и достигнут рекордного уровня в 10 млрд. долл. Наибольшие суммы на строительство 300-мм заводов отчисляют компании Тайваня и Японии – 30 и 20% от общих мировых затрат, соответственно. Третье место занимает Китай – 16%

[15]. Вполне возможно, что в эру 450-мм пластин сохранится большое число заводов по обработке 300-мм пластин.

## НОВЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕГМЕНТАЦИИ РЫНКА

Существуют различные методы сегментации рынка технологического оборудования: по технологическому назначению (например, установки литографии), по регионам или по профилю компаний, закупающих оборудование. В последнее время поставщики оборудования стали уделять больше внимания конечному назначению изделия заказчика, поскольку его потребности в основном определяются областью применения выпускаемой им продукции. Действительно, ведь именно конкретные области применения электронных устройств определяют направления развития технологического оборудования. С учетом растущей потребности в таких данных, компания VLSI Research сформировала базу данных продажи оборудования в зависимости от специализации заказчика [16]. Категории заказчиков распределились следующим образом:

- полупроводниковые кремниевые заводы/субподрядчики (ПЗ/С). Эта категория заказчиков приобретает технологическое оборудование (заводы), а также тестовое и сборочное оборудование (субподрядчики);
- вертикально интегрированные фирмы (IDM), ведущие разработку, проектирование, производство и маркетинг схем памяти;
- IDM, выпускающие системы на кристалле (System-on-Chip – SoC). Эта категория подразделяется на подтипы в зависимости от применения SoC: вычислительная техника, системы связи, бытовая техника и другие;
- фирмы, выпускающие аналоговые схемы, дискретные и прочие полупроводниковые приборы.

Анализ рынка полупроводниковых приборов в 2006 году показал, что самыми крупными покупателями технологического оборудования были IDM, производящие схемы памяти. На их долю в стоимостном выражении пришлось 40% продаж новых системы. Доля IDM, выпускающих SoC, составила 33%, ПЗ/С – 20%, изготовителей аналоговых схем, дискретных и прочих полупроводниковых приборов – 6%. В 2006 году интегрированные фирмы, выпускающие схемы памяти, приобрели 43% представленного на рынке оборудования для обработки пластин (установки литографии, ионной имплантации, химической механической полировки, осаждения, травления и очистки и др.). Кроме того, они закупили треть оборудования тестирования, включая автоматизированные тестовые системы, диагностическое оборудование, средства транспортировки материалов и деталей, средства АСУП и ПО. По объему закупок сборочного оборудования IDM схем памяти уступили только кремниевым заводам и субподрядчикам.

Эти данные показывают, что в 2006 году главным двигателем роста выпуска полупроводникового оборудования были схемы памяти, тогда как в 2001 году крупнейшими покупателями стали IDM, выпускающие SoC. В 2002–2004 годы доля про-

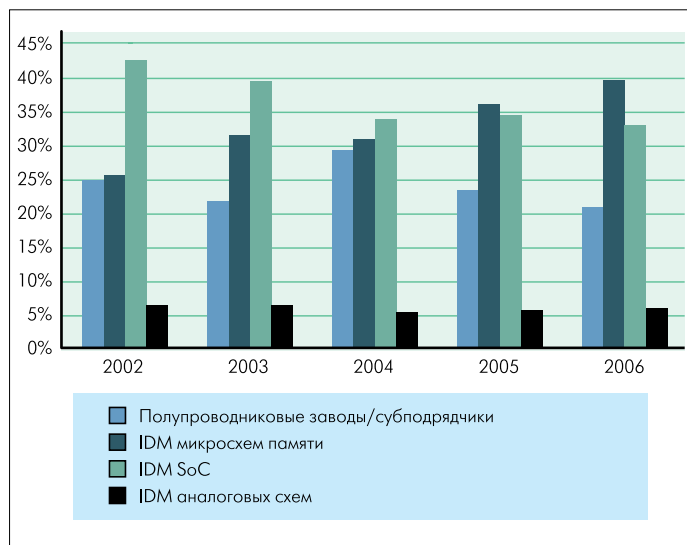


даж оборудования для изготовителей SoC составляла ~40%. В 2005 году в связи с ростом спроса на флэш-память NAND-типа лидерами по закупке технологического оборудования стали IDM, выпускающие схемы памяти (рис.3).

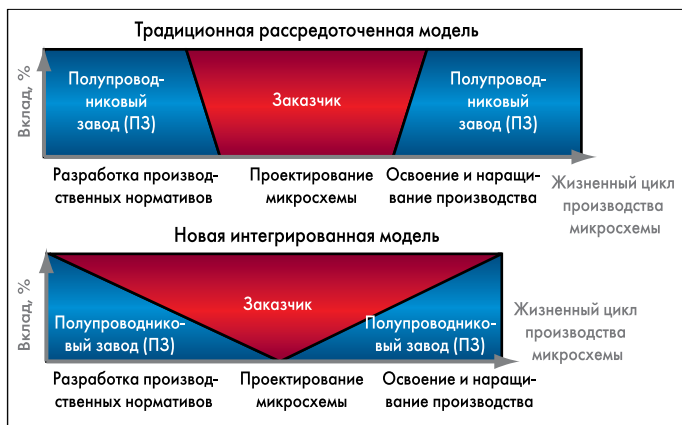
Существенных изменений структуры заказчиков полупроводникового оборудования не предвидится, по крайней мере, до 2009 года. По-прежнему, крупнейшими инвесторами в новое оборудование останутся IDM схем памяти и SoC. Они просто вынуждены будут закупать оборудование, с тем чтобы выполнять требования соответствующих разделов программы ITRS. Доля продаж оборудования для ПЗ/С, по-видимому, будет близка к 20% общего объема продаж оборудования, и эта категория потребителей останется важным стимулятором наращивания производства технологического оборудования.

### ПРОБЛЕМЫ КРЕМНИЕВЫХ ЗАВОДОВ

Кремниевые заводы сегодня – неотъемлемая часть всей цепи поставок полупроводниковых приборов и позитивно влияют на жизнеспособность всей полупроводниковой промышленности. Для дальнейшего развития кремниевых заводов важно предотвратить преобразование изначально уникального изделия в стандартный, массовый товар (дешевый и общедоступный). А это требует новой модели взаимоотношений между ПЗ и заказчиком (рис.4), предусматривающей одновременное проектирование и определение требуемого технологического оборудования на ранней стадии разработки изделия заказчика. Для успешного развития такого сотрудничества, особенно при проектировании изделий с нанометровыми технологическими нормами, необходим гораздо больший, чем сейчас, обмен информацией, включающей данные о проектных нормах и SPICE-программу ПЗ., а также оптимизация конструкции и технологических процессов. Уровень доверия между сторонами должен быть высоким, и при этом необходимо обеспечить защиту информации. Такая модель сотрудничества предоставляет заказчикам большие возможности для



**Рис.3. Структура продаж полупроводникового оборудования по основным потребителям**



**Рис.4. Сравнение методов взаимоотношений между заводом и заказчиком**

достижения требуемого соотношения стоимость–рабочие характеристики и своевременного выхода на рынок. Для оптимизации конструкции и обеспечения максимального выхода годных разработчикам уже на ранних этапах проектирования необходима информация, касающаяся влияния вариации режимов производства на разброс параметров изделия, т.е. проектировать следует с учетом требований технологии изготовления изделия и сборки (design-for-manufacturing – DFM). Для успешной реализации DFM при проектировании конкретной схемы необходима соответствующая экосистема, в которую входят средства САПР, IP-блоки, библиотеки и сервисные услуги, совместимые с возможностями завода. Такая экосистема гарантирует возможность использования данных кремниевого завода при проектировании схемы любой конструкции независимо от применяемых IP-блоков, собственной или сторонней разработки.

Для реализации такой системы на заводе необходимы квалифицированные специалисты в области проектирования, способные обеспечить совместимость IP-блоков внешних источников с технологическими возможностями завода. При таком подходе кремниевые заводы могут сыграть важную роль в упрощении конструкции и сокращении сроков освоения производства, что, несомненно, выгодно заказчику. Установление тесных контактов на ранней стадии сотрудничества позволяет инженерам кремниевого завода при разработке технологического маршрута лучше понять и учесть требования заказчика к стоимости, потребляемой мощности, характеристикам и качеству изделия, а заказчику – понять требования к прибору с точки зрения технологии изготовления и своевременного освоения производства. Наконец, заводы могут предложить заказчику вертикально интегрированную технологию, включая средства проектирования, обработки пластин, сборки и тестирования конечного изделия, и обеспечить своевременную поставку изделий на рынок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. LaPedus M. Down year seen for fab-tool makers in '08. [www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=202200675](http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=202200675)



2. **Yario J.** 2005 Top Fab: IBM. Semiconductor International, 12.01.2005.
3. **LaPedus M.** IBM, partners tip 32-nm pact. – [www.eetimes.com/showArticle.jhtml;jsessionid=QJTTYLFE RXF5QQSNDLOSKH0CJUNN2JVN?articleID=199701185](http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml;jsessionid=QJTTYLFE RXF5QQSNDLOSKH0CJUNN2JVN?articleID=199701185)
4. **LaPedus M.** Costs cast ICs into Darwinian struggle. – [www.eetimes.com/news/semi/showArticle.jhtml;jsessionid=01BZ1Y512D0YUQSNDLOSKH0CJUNN2JVN?articleID=198701495](http://www.eetimes.com/news/semi/showArticle.jhtml;jsessionid=01BZ1Y512D0YUQSNDLOSKH0CJUNN2JVN?articleID=198701495)
5. **Taylor C.** IBM, Chartered extend efforts to 32-nm CMOS. – Electronic News 26.02.2007 – [www.spweekly.com/issue923.pdf](http://www.spweekly.com/issue923.pdf) A.S.
6. **Mutschler A.** IBM, BASF to develop chemicals, materials for 32-nm. – Electronic News, 22.06.2007.
7. **Iwai H.** Semiconductor Manufacturing Technology in the 21st Century. – International Symposium on VLSI Technology, Systems, and Applications. April 2006, p.1–17.
8. **Ch. Hammerschmidt.** BASF joins IMEC's 32-nm chemicals research program. [www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=202300823](http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=202300823)
9. **LaPedus M.** Sematech launches 450-mm fab program. [www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=2011001735](http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=2011001735)
10. **Singer P.** Transitioning to 450 mm Wafers. Semiconductor International. – 07.01.2006.
11. **Lammers D.** NGF Plan Seeks Reduced First Wafer Delay/ – Semiconductor International, 07.01.2006.– [www.semiconductro.net](http://www.semiconductro.net)
12. **LaPedus M.** Sematech 450-mm plan riles fab tool makers. [www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=201200239](http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=201200239)
13. **LaPedus M.** Soaring tool costs to delay 450-mm fabs. [www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=169400259](http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=169400259)
14. **A-F Pele.** 26 new 300-mm fabs to operate by 2008. – [www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=201201955](http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=201201955)
15. 300-mm fab capacity to double . – [www.eetimes.com/showArticle.jhtml;jsessionid=UXQ0WMVEIUAXGQSNDLOSKH0CJUNN2JVN?articleID=201301688](http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml;jsessionid=UXQ0WMVEIUAXGQSNDLOSKH0CJUNN2JVN?articleID=201301688)
16. **Jebens A.** Another Way to Evaluate Market Segmentation.– Semiconductor International, 09.01.2007. – [www.semiconductro.net](http://www.semiconductro.net)