

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА В РОССИИ

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

20 мая в Государственной думе РФ состоялось совещание межфракционного депутатского объединения "Наука и высокие технологии" совместно с Комитетом по образованию и науке и Комитетом по промышленности, строительству и наукоемким технологиям на тему "Состояние и перспективы развития полупроводниковой электроники в России". Председательствовал на совещании лауреат Нобелевской премии академик РАН Жорес Иванович Алферов. Среди выступавших — начальник управления радиоэлектронной промышленности и систем управления Федерального агентства по промышленности Ю.И. Борисов, председатель Федерального фонда развития электронной техники А.И. Сухопаров, вице-президент РАН А.Ф. Андреев, генеральный директор НПО "Интеграл" (Белоруссия) С.В. Емельянов, вице-президент Ассоциации производителей медицинской техники Л.В. Осипов, эксперт Государственной думы В.И. Бабкин, руководители ряда ведущих российских НИИ и институтов РАН — ЦНИИ машиностроения (В.И. Лукьященко), РНИИ КП (Н.С. Данилин), НИИ материаловедения (Ю.Ф. Козлов), Института физики полупроводников СО РАН (А.Л. Асеев), Института физики микроструктур (С.В. Гапонов), ректор Северо-Кавказского технического университета Б.М. Синельников. На совещании авторитетные специалисты обсуждали возможные пути оживления отечественной полупроводниковой электроники, рассказывали о возможностях своих предприятий. Однако красной нитью во многих выступлениях проходила мысль, точнее всего сформулированная А.И. Сухопаровым: "Наша неконкурентоспособность — это отношение государства к критическим технологическим отраслям".

Предлагаемая статья Ж.И. Алферова готовилась к этому совещанию. Мы сочли ее настолько показательной, что предлагаем вниманию читателей.

Ж.Алферов

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА РОССИЙСКОГО РЫНКА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

По данным Федерального фонда развития электронной техники РФ, объем рынка электронных систем России в 2003 г. составил около 20 млрд. долл. (по оценке ОАО "Электронинторг-С", совокупный рынок России и стран СНГ — порядка 30 млрд. долл. в 2003 году). Объем покупок импортных элементов современной полупроводниковой электроники в 2003 г. оценен Федеральным фондом развития электронной техники РФ в 2,2 млрд. долл., причем 0,7 млрд. долл. из них подтверждены результатами статистики Государственного таможенного комитета РФ. На долю интегральных схем приходится 1,6 млрд. долл., полупроводниковых приборов — 0,4 млрд. долл., приборов СВЧ-техники — 0,15 млрд. долл. Предприятия Российского агентства по системам управления (РАСУ), согласно отчетным данным, поставили потребителям электронные компоненты (в том числе полупроводниковой электроники) на сумму 230,7 млн. долл. Причем в последние годы наблюдается устойчивый рост емкости внутреннего рынка полупроводниковой электроники России — от 20% до 50% в год. По оценке Фонда, емкость внутреннего рынка России к 2005 г. может достигнуть 2,5 млрд. долл.

Согласно оценке объема и структуры российского рынка электроники компании "Электронинторг-С" [1, 2], в 2003 году доля рынка компьютерной электроники составляла 32%; промышленной электроники — 23%; телекоммуникационной электроники — 23%; бытовой электроники — 16%. На долю остальных сегментов рынка приходится 6%. Объем отечественного рынка полупроводниковых элементов в 2004 году оценен примерно в 1 млрд. долл., что составляет 1/250 мирового объема рынка полупроводников.

Компьютерный сегмент рынка практически целиком основан на импортных поставках персональных компьютеров, микропроцессорных схем и схем памяти. Производство отечественной элементной базы в этой области целиком определяется программой выпуска персональных компьютеров специального назначения серии "Багет", для которых ключевые элементы электроники производятся на технологической линии НИИ системных исследований (НИИСИ) РАН [3]. По данным НИИСИ РАН, объем производства микропроцессоров и СБИС в интересах заказчика в 2006–2010 годах не превысит 100 тыс. шт. в год.

В 90-е годы на ряде российских предприятий, по предложению Международного центра по информатике и электронике, были организованы лицензионные производства средств вычислительной и телекоммуникационной техники в информационно-безопасном исполнении. Они предназначались, прежде всего, органам государственной власти. При этом под гарантии Правительства РФ были получены иностранные кредиты в объеме около 90 млн. долл. Были созданы высокотехнологические цеха и участки, позволяющие про-



Таблица 1. Предельные оценки стоимости электронного оборудования и полупроводниковых элементов (управляемые тиристоры, биполярные транзисторы с изолированным затвором, электронные драйверы, снабберы и др.), необходимых для реализации современного уровня энергосбережения в различных отраслях промышленности.*

Область применения устройств электроники	Установленные мощности, ГВт	Стоимость устройств, млн. долл.	Стоимость полупроводниковых приборов в их составе, млн. долл.
Преобразователи для собственных нужд генерирующих электростанций	12	1200	400
Подстанции для экспорта электроэнергии за рубеж	18	1580	546
Промышленность в целом	76	7650	2296
Топливная промышленность	—	1690	505
Черная металлургия	—	1070	321
Цветная металлургия	—	1 380	413
Химия и нефтехимия	—	918	273
Машиностроение и металлообработка	—	1 080	344
Связь	5	3900	1 300
Железнодорожный и городской электрический транспорт	10	490	195
Автомобильный транспорт	—	310	103
Жилищно-коммунальное хозяйство	29	2940	980
Освещение	—	2400	800
Обогрев и бытовая электроника	—	540	180
Итого, млн. долл.	—	18100	5820

* Диапазон удельной стоимости устройств электроники принят 0,08–2,0 долл./Вт при обратной зависимости стоимости подлежащих установке устройств от их мощности.

изводить практически все компоненты вычислительной и телекоммуникационной техники (кроме СБИС), выполнять их тестирование и сборку. За короткий срок (2–3 года) современное производство освоили АО "Московский завод "САМ" (серверы на базе RISC и INTEL-платформ, мощность производства – 2 тыс. шт. в год), ФГУП НПО "Марс" в Ульяновске (персональные компьютеры и создаваемые на их основе АСУ специального назначения – 100 тыс. шт. в год), ФГУП "Калугаприбор" в Калуге (учрежденческие АТС – 250 тыс. номеров в год).

Однако эти производства полностью зависели от импортных поставок комплектующих, прежде всего СБИС. Высокая стоимость комплектующих и необходимость дополнительных работ по обеспечению безопасности информации, включая входной контроль покупных изделий, не позволили достичь полной проектной мощности созданных лицензионных производств.

По данным ФГУП НПО "Марс", в случае работы этого предприятия на полную проектную мощность, только ему одному бы требовалось примерно 3 млн. микросхем тридцати наименований для АСУ и ПК и примерно 1 млн. микросхем десяти наименований для аппаратуры передачи данных по технологии АТМ. Отметим, что в соответствии с ФЦП "Электронная Россия" в части Министерства РФ по связи и информатизации, государственные капитальные вложения на 2004 г. должны составить 461,4 млн. руб. (около 16 млн. долл.), включая приобретение вычислительной техники и телекоммуникационного оборудования.

Важный потенциальный сегмент потребления электронных систем и компонентов связан с развитием финансовой и банковской систем, в том числе электронной защитой вкладов и наличных средств. Не менее значимая доля рынка сопряжена с планируемым Правительством РФ введением с 2006 г. электронных паспортов для граждан России. Только для этих целей потребность в полупроводниковых элементах можно оценить в 100 млн. долл.

Рынок телекоммуникационного оборудования, в особенности сегмент беспроводной связи, является наиболее быстрорастущим. Как и компьютерный, этот сегмент рынка развивается также в основном за счет импортных поставок. Ожидается, что модернизация те-

лекоммуникационных сетей проводной связи в России в ближайшие 10 лет потребует до 35 млрд. долл. (данные компании "Электронинторг-С").

Рынок промышленной электроники также развивается весьма динамично. Его потенциал на ближайшие годы оценивается в десятки миллиардов долларов. Это подтверждается, в частности, оценкой потенциального рынка сбыта устройств электроники потребителям электроэнергии, исходя из мировых тенденций развития энергосберегающих технологий, проведенной ОАО "Силовая электроника Сибири" и Новосибирским государственным техническим университетом на основе данных РАО "ЕЭС России" (табл. 1). Из таблицы следует, что возможная емкость рынка устройств промышленной (силовой) электроники, при реализации программ энергосбережения в России, составляет 18,1 млрд. долл., а емкость рынка силовых полупроводниковых приборов – 5,8 млрд. долл. Причем данная оценка не учитывает фактор роста генерирующих мощностей в ближайшие годы, а также затраты на электронные устройства при реконструкции и ремонте объектов энергетики.

В силу геополитического и внутреннего положения России современные электронные системы приобретают особую важность при решении задач силовых ведомств страны, а также Российского авиационно-космического агентства и Российского агентства по обычным вооружениям. По опубликованным данным ФГУП "Рособоронэкспорт" [4], портфель заказов по экспорту вооружений в 2003 г. превышает 15 млрд. долл. Долю электронных систем и компонентов можно оценить в размере 5–10% от указанного объема (0,8–1,5 млрд. долл.). Соответственно, доля полупроводниковых элементов составит 100 млн. долл. Очевидно, что это – оценка по нижнему пределу, поскольку задачи, стоящие перед силовыми ведомствами России, весьма многообразны и не сводятся к экспортным поставкам.

Российский рынок электронных систем и полупроводниковых компонентов имеет несомненный потенциал развития, связанный с реализацией программ энергосбережения, оснащением современными АСУ ТП и средствами диагностирования и учета предприятий Министерства путей сообщения, Министерства по атомной энергии, нефте- и газовой промышленности и других отраслей. Особое значение приобретают программы применения новейших электронных систем при решении задач силовых ведомств России. Крупные сегменты рынка электроники связаны с охраной здоровья населения, программой информатизации общества, включая введение современных систем банковского и финансового учета, защиту финансовых средств и введение электронных паспортов граж-

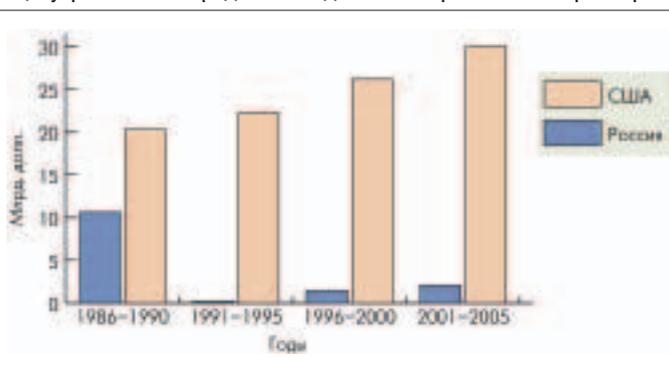


Рис. 1. Объемы финансирования НИОКР в США и России

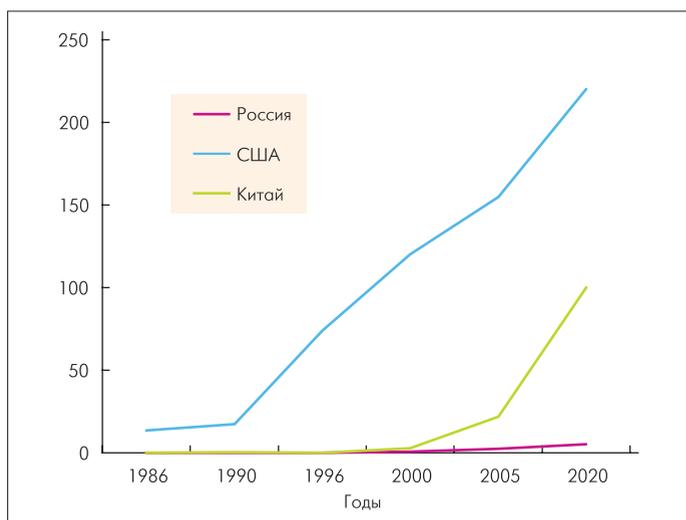


Рис.2. Производство электронной техники на душу населения

дан. Все это позволяет оценить потенциал российского рынка полупроводниковых элементов в несколько миллиардов долларов ежегодно.

СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОНИКИ В РОССИИ И В МИРЕ

Развитию микроэлектроники в СССР уделяли необходимое внимание лишь до 1985 года. К тому времени отставание от США составляло 1,5–2 года. Эта цифра относится к производству, в разработках новых изделий микроэлектроники отставания практически не было.* Начиная с 1986 года объемы финансирования НИОКР стали резко сокращаться что, естественно, повлекло прогрессирующее отставание от ведущих стран, таких как США и Япония (рис.1–3). В то же время там, где электроника усиленно поддерживается государством, например в Китае, наблюдается совершенно иная ситуация (рис. 2). Более того, КНР ставит задачу через пять лет стать мировым лидером по производству интегральных схем, а в дальнейшем – и законодателем в области разработок. Ожидается, что через четыре года китайская электронная промышленность будет обеспечивать около 30% мировой потребности в интегральных схемах. Правительство этой страны постоянно поддерживает национальный приоритет электроники в исследовательских центрах, ежегодно технические университеты выпускают 450 тысяч инженеров. Естественно, электроника выступает в роли локомотива научно-технической революции и выводит другие отрасли на все новые и новые рубежи.

Доля полупроводниковых компонентов в электронной аппаратуре непрерывно растет – с 5% в 1960 году до 20% в 2000 году. В то же время, уровень технологии в России (0,8–1 мкм) позволяет на современном уровне выпускать фактически только аналоговые ИС и дискретные полупроводниковые приборы (рис.4.). Необходимо отметить, что, несмотря на большой общемировой объем производства изделий с технологическим уровнем 0,8–1,0 мкм, основная прибыль образуется при производстве изделий по 0,1–0,5-мкм технологиям. Именно здесь лежит все многообразие интегральных схем. Это полностью подтверждает оценку Миннауки РФ – 40% мирового рынка высоких технологий сегодня контролируется США.

* Данное утверждение, на наш взгляд, идеализирует ситуацию в СССР и во многом может быть отнесено лишь к выпуску опытных партий микроэлектронных изделий. Причем их показатели надежности зачастую уступали зарубежным аналогам на 2–3 порядка (например, см.: Бурцев В.С. О необходимости создания суперЭВМ в России. – Сб. Параллелизм вычислительных процессов и развитие архитектуры суперЭВМ. – М.: ИВВС РАН, 1997). Уже тогда многие отечественные микропроцессоры проектировались методом прямого копирования зарубежных аналогов (компаний Intel, DEC, Texas Instruments и др.). Подобных примеров немало. – Прим. ред.

Доля России составляет меньше 0,5%. Причем в США ученых и инженеров-разработчиков всего в два раза больше, чем у нас.

На развитие производства и повышение конкурентоспособности электронной техники направлены усилия правительств всех передовых индустриальных стран – США, Японии, Германии, Англии, Франции, Китая, Южной Кореи, Тайваня. Это не удивительно, поскольку 1 доллар вложений в электронику превращается в 100 долларов в конечном продукте. Один килограмм изделий микроэлектроники по стоимости эквивалентен 110 тоннам нефти. Уровень рентабельности данной отрасли – 40%; среднемировой срок окупаемости вложений – 2–3 года; а темпы ее роста в 3 раза выше темпов роста ВВП. Одно рабочее место в электронике дает четыре рабочих места в других отраслях.

Бурное развитие микроэлектронных технологий – это результат крупных капиталовложений. Именно целевые инвестиции позволяют ведущим американским, японским, европейским, южнокорейским, тайваньским полупроводниковым компаниям выбрасывать на рынок все новые и новые изделия микроэлектроники и построенные на их основе телекоммуникационные, компьютерные, автомобильные, бытовые и другие системы и устройства, прочно завоевывающие рынки высоких технологий. С некоторым отставанием это происходит и в Китае, который успешно развивает электронную промышленность как за счет собственных средств, так и за счет привлечения инвестиций ведущих зарубежных фирм (Motorola, NEC, Phillips и др.). В результате КНР уже превзошел технологический уровень 0,25 мкм.

Представление об объемах вложений в развитие технологий можно составить на примере корпорации Intel – мирового законодателя мод в области микропроцессоров. Только на программу освоения 0,13-мкм технологии и перехода к кремниевым пластинам диаметром 300 мм Intel в 2000 году потратил 7,5 млрд. долл. Это позволило компании с 2002 года массово выпускать микропроцессор Pentium 4 с минимальными размерами элементов 0,13 мкм и степенью интеграции порядка 50 млн. транзисторов на кристалле. По разработанной фирмой Intel технологии 0,065 мкм (65 нм) с 2005 г. планируется выпуск изделий со степенью интеграции свыше 100 млн. транзисторов – это уже сверхсложная микропроцессорная техника, применение которой в вычислительной технике, системах управления дает новое качество конечных изделий.

В целом же объем капитальных вложений в мировую полупроводниковую промышленность в 2003 году составил 29,7 млрд. долл., в 2004 году он достигнет 37,5 млрд. долл. В 2002 году в мире было запущено 28 фабрик, в 2003 году – 26 (из них 10 – с технологиями уровня 0,09–0,15 мкм). В 2004 году ожидается ввод в строй 22 фабрик, в 2005 году – 21 (все – под технологии уровня менее 0,1 мкм и 300-мм пластины). В 2005 году планируется начать внедрение в производство кремниевых пластин диаметром 450 мм.

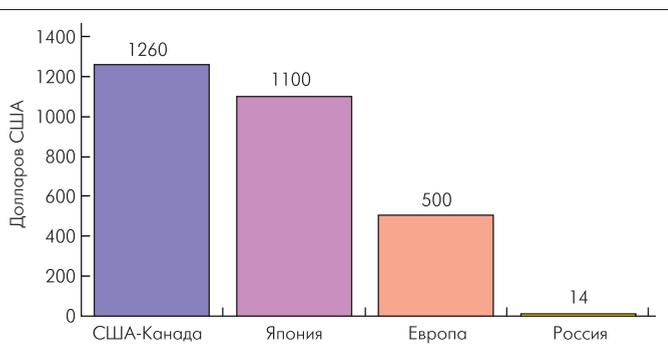


Рис.3. Общие объемы производства изделий электронной техники

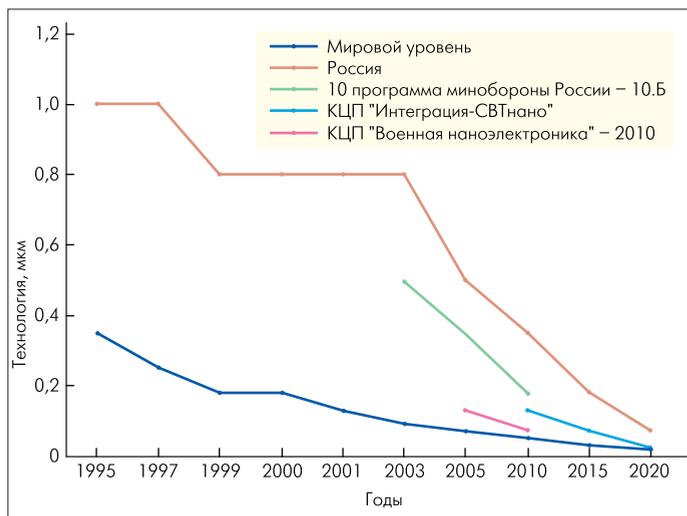


Рис.4. Динамика минимальных размеров элементов в России и США

В России сложилась совершенно иная ситуация. Финансирование электронной компонентной базы в рамках Федеральной целевой программы "Национальная технологическая база" (ФЦП НТБ) позволяет лишь частично проводить НИОКР, но не реализовывать проекты по созданию современных производств микроэлектроники. Следует отметить, что даже в этой программе финансирование подпрограмм в разделе "микроэлектронные технологии" основывается на остаточном принципе, что не позволяет добиться существенного прорыва в исследованиях и разработках современных технологий – т.е. создать промышленные технологии и производства. Причем касается это даже тех направлений, в которых наши специалисты добились успехов, соответствующих мировому уровню в исследованиях. В частности, таких, как технологии создания полупроводниковых приборов на GaAs-гетероструктурах; структур "кремний на изоляторе"; приборов и устройств микросистемной техники, где на одной подложке представлены и механические устройства, и система управления; полимерной электроники (приборы отображения информации, различные видеомодули) и ИС управления на основе органических полупроводников.

К сожалению, у нас нет современных микроэлектронных производств и мы не можем выпускать передовую микроэлектронную технику. Хотя имеются определенные научно-технические заделы, благодаря которым наши ученые и разработчики способны решить эту задачу. Но для этого нужна государственная поддержка в поэтапном, ускоренном создании новейших производств микроэлектроники.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ УФ -И ЭУФ-ЛИТОГРАФИИ

Современные технологии стремительно прогрессируют (табл.2). Ключевым звеном в технологическом процессе является литографическое оборудование. Оно включает в себя источник УФ-излучения (эксимерный лазер), оптическую систему переноса изображения, систему позиционирования, сканирования и совмещения маски и фотошаблона.

Основные успехи в области субмикронной литографии связаны с применением эксимерных лазеров с длинами волн 248 и 193 нм. Мировым лидером по производству литографического оборудования является нидерландская компания ASM Lithography. Выпускаемая этой

компанией литографическая установка TWTNSCAN AT: 1200B, оснащенная 20-Вт ArF-эксимерным лазером с рабочей длиной волны 193 нм, обеспечивает пространственное разрешение 80 нм на пластинах диаметром 300 мм.

Использование УФ-излучения позволило достичь минимальных размеров элементов 0,1 мкм. Фундаментальным препятствием на пути их дальнейшего уменьшения является дифракционное искажение изображения на оптической системе и масках литографической установки. Возможности увеличения диаметров линз практически исчерпаны как экономически (стоимость высокоапертурных линз), так и технологически. Поэтому основные мировые производители СБИС ведут работы в области корректировки изображения маски дополнительными прямоугольниками, благодаря которым распределение освещенности на подложке соответствует желаемому, несмотря на дифракцию излучения. Другое решение заключается в применении так называемых фазосдвигающих фотошаблонов. На их поверхность селективно наносятся материалы, которые перекрывают пучки, приводящие к вызванной дифракцией размытости изображения.

Оба этих метода заметно усложняют конструкцию масок, что приводит к существенному браку при их производстве (от 30 до 50%) и удорожанию конечного продукта. Причем помимо высокой стоимости шаблонов возникают и чисто технические проблемы их изготовления. Крайне сложен расчет корректирующих элементов: например, расчет 22–25 масок с коррекцией изображения для процессора, построенного по технологии 90 нм, уже требует более 200 Гбит данных. Непросто достичь и высокой точности изготовления масок.

В рамках УФ-литографии перспективно уменьшение длины волны излучения, в частности – переход к длине волны 157 нм (излучение эксимерного F₂-лазера). Однако возможности и этой технологии для перехода к размерам элементов нанометрового диапазона также ограничены (см. табл.2).

Кардинальный переход, к которому реально готово мировое сообщество, связан с освоением диапазона экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ, EUV) с длиной волны 13 нм. В США, учитывая практическую важность создания технологии ЭУФ-литографии, а также высокую стоимость и сложность разработки, в сентябре 1997 года для решения этой проблемы была создана так называемая Виртуальная национальная лаборатория (VNL). Она объединяет ряд национальных лабораторий Министерства энергетики (Берклевскую, Ливерморскую, Сандийскую), а также частные компании, такие как Intel, Motorola, Advanced Micro Devices. Уже в марте 1999 года компания Motorola с помощью этой технологии смогла получить рисунки с пространственным разрешением до 30 нм. В 2000 г. в Ливерморской национальной лаборатории был изготовлен первый вариант установки совмещения и экспонирования (так называемого степпера). Сейчас там уже достигнута стадия выпуска малой серии.

В Европе координатором работ в области ЭУФ-литографии выступает фирма ASM Lithography, которая в дальнейшем и будет изготавливать степперы. Она же отвечает за выбор источника излуче-

Таблица 2. Прогноз тенденций уменьшения топологических размеров элементов СБИС на период до 2020 года

Параметр	1999	2001	2003	2006	2009	2012	2015–2020
Минимальные размеры, нм	180	150	130	90	70	50	10
Емкость памяти на чипе, Гбит (экспериментальные/серийные образцы)	1/256 Мбит	– /1	4/1	16/4	64/16	256/64	Нет данных
Плотность транзисторов, млрд./см ²	6,2	10	18	39	84	180	1000
Допустимая частота, ГГц	0,5–1,25	0,6–1,5	0,7–2,1	0,90–3,5	1,2–6	1,5–10	5–30
Максимальная рассеиваемая мощность (радиатором), Вт	90	110	130	160	170	175	250–500
Размер чипа, мм ²	400	445	560	820	1120	1580	–
Число уровней соединений	6–7	7	13	20	22–25	20–25	–

ния. Над оптической системой степперов работает компания Carl Zeiss. Изготовление и испытания первого степпера должны закончиться в 2004 году, опытной партии – в 2005 году, а в 2007 году начаться их производство. Предполагается, что Европа будет очень незначительно отставать в области проекционной литографии от США. Подобные исследования активно проводятся и в Японии. Существует национальная программа EUVL Research Program at ASET, в которую включены многие исследовательские группы. Планы создания полной технологии ЭУФ-литографии практически совпадают с планами США. Следует отметить, что зарубежные фирмы массово привлекают к данным работам российских ученых, которые, без преувеличения, занимают ведущее положение в разработке техники и технологии ЭУФ-литографии.

В России же технология субмикронной микроэлектроники осталась на уровне середины 80-х годов. Чтобы выйти на передовой мировой уровень в области создания СБИС, единственно возможный вариант для России (из-за 20 лет отсутствия эволюции этой технологии в стране) – закупка современного завода по производству чипов с технологией 0,1–0,13 мкм. Этот шаг, во-первых, позволит наладить производство СБИС, современных уже на данный момент. Кроме того, наши технологи и разработчики напрямую смогут приобщиться к самым передовым технологиям в области производства чипов. Наконец, это даст мощный толчок для развития национальных исследований в области нанотехнологий. Ведь не секрет, что из-за физической невозможности создания наноструктур в России многие научные идеи и разработки отечественные ученые вынуждены реализовывать в западных фирмах. В результате интеллектуальную собственность теряют и эти ученые, и Россия.

Отметим, что при наличии современного завода в стране параллельно с реальным производством СБИС можно будет проводить на-

учно-технологические работы по созданию фазовых масок и по использованию иммерсионных веществ с целью уменьшения минимальных топологических размеров элементов ИС со стандартных 0,10–0,13 до 0,07–0,09 мкм. Сейчас силами ИФМ РАН, ФТИ им. Иоффе РАН, ТРИНИТИ, НИИИС и некоторых других институтов успешно развивается ЭУФ-литография, позволяющая снизить топологические размеры до 0,04–0,01 мкм. В частности, в ИФМ РАН, многие годы участвующем в зарубежных проектах, с 2003 года ведутся работы по созданию макета литографа. Благодаря появлению небольших денег удалось объединить российских исследователей, находящихся в России и за рубежом, которые сейчас трудятся над литографом малой производительности для спецпроизводства. В случае приобретения передового микроэлектронного завода можно будет начать разработку собственного литографа, который впоследствии заменит штатный. По нашим оценкам, данная работа при соответствующем финансировании (100–150 млн. долл. в год) займет 5 лет. Объединение этих технологий может обеспечить России до середины 21 века ведущие позиции в мире в области производства больших и сверхбольших интегральных схем.

Продолжение следует.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курляндский А., Орлов С. Взгляд на российский рынок электроники. – Живая электроника России, 2002, с. 10–14.
2. Курляндский А., Орлов С. Этот безумный, безумный рынок полупроводников. – Живая электроника России, 2004, с.23–27.
3. 0,35-мкм КМОП-процесс в России – в 2004 году. Рассказывают академики РАН Е.П.Велихов, К.А.Валиев, В.Б.Бетелин. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, №3, с.5–9.
4. Независимое военное обозрение, № 41 (356), 21–27 ноября 2003.