

НАНОТЕХНОЛОГИИ – ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В РОССИИ



Ж.И. Алферов,
вице-президент РАН,
лауреат Нобелевской премии

Вторая половина XX столетия характеризуется развитием таких направлений электроники как полупроводниковая электроника и микроэлектроника. Это привело к качественно новому изменению мировой экономики, основанной на новых информационных технологиях, ставшей локомотивом экономического и социального развития многих стран. Изменилась социальная структура общества во многих передовых странах, прежде всего, благодаря развитию электроники. Если посмотреть на положение стран так называемого «золотого миллиарда», то их экономическое благосостояние базируется на наукоемких технологиях, на экономике, построенной на высоких технологиях. Первое место среди них занимают информационные технологии и полупроводниковая электроника.

В 50-е годы XX века произошли значимые события. Прежде всего нужно назвать открытие Дж. Бардина, У. Шокли и У. Браттейна, удостоенное Нобелевской премии за открытие транзистора. Но по-настоящему драматические изменения произошли в 1959 г., когда два американских инженера, Нойс и Килби, одновременно и независимо друг от друга запатентовали открытие. Инженер Килби построил первую интегральную схему на кремнии. В первой кремниевой интегральной схеме площадью примерно такой же, как и нынешние интегральные схемы, было два транзистора, RC-цепочка и это был усилитель. Тем не менее, это было революционное изменение в полупроводниковой технологии. Благодаря этому открытию ученые перешли от схемных решений, в том числе и от микросхем, когда отдельные элементы были дискретными и соединялись друг с другом, к использованию полупроводниковых кристаллов как активных элементов — транзис-

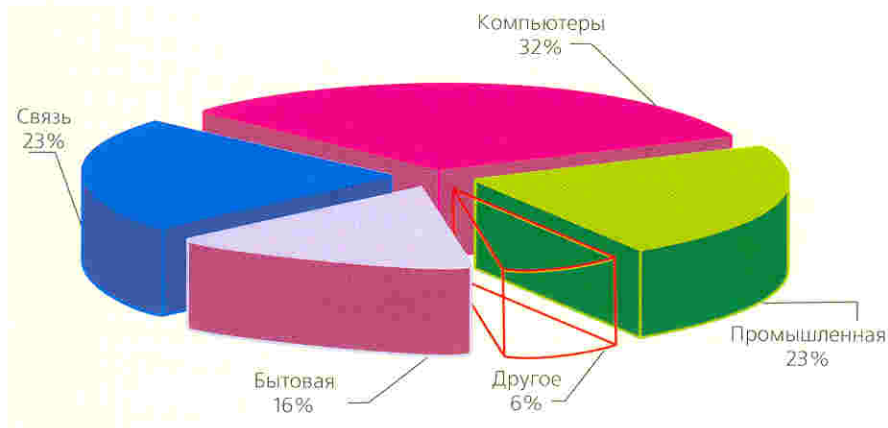


Рис. 1. Структура отечественного рынка электроники в 2001 г.

торов и как пассивных элементов — RC-схем. Именно на этих первых интегральных схемах, в сущности, построена вся микроэлектроника, которая развивалась после этого более полувека, и ее история полна драматическими событиями.

Если посмотреть ретроспективно на развитие полупроводниковой электроники второй половины XX века, оно осуществлялось на кремневых интегральных схемах, составивших основу развития кремниевой микроэлектроники, и на полупроводниковых гетероструктурах, ставших основой сверхбыстрой и оптической электроники. В этом отношении последний год XX столетия и присуждение Нобелевской премии именно за эти работы, на самом деле, не случайны. Таким образом, Шведская академия наук отметила те изменения, которые произошли в технологиях,

прежде всего, в информационных технологиях. На торжественной церемонии награждения все новые лауреаты были названы основателями современной информационной техники и развития новых технологий.

Эксперименты и предложения по предсказанию сверхрешеток, которые развивались нами и многими нашими учеными, среди которых хотелось бы отметить работу академика М. Келдыша, опередили почти на 10 лет работы японских ученых. Это научное предвидение сегодня играет очень важную роль.

Электроника — самая динамичная отрасль экономики в мире и для большинства стран является стратегической отраслью. Среднегодовые темпы роста составляют более 7% в год. Отрасли промышленности, связанные с электроникой, отрасли промыш-

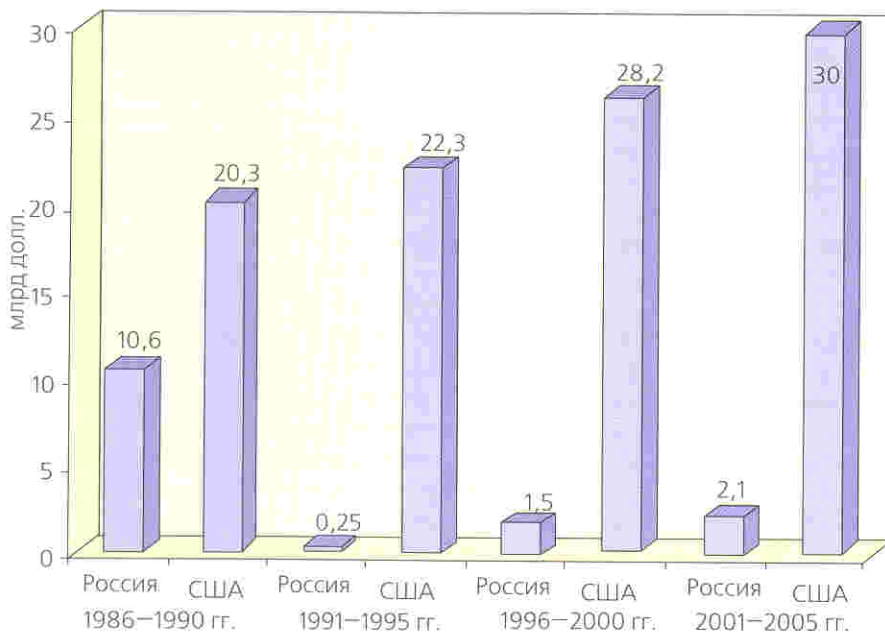


Рис. 2. Объемы финансирования НИОКР

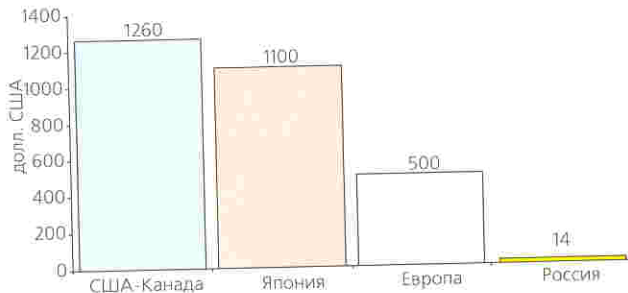


Рис. 3. Производство электронной техники на душу населения

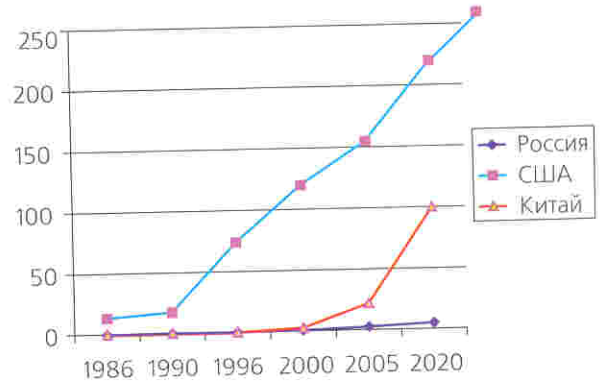


Рис. 4. Общие объемы производства ИЭТ (млрд долл.)

ленности, которые используют электронные изделия, производят продукции на 15 трл долл.

Что дают вложения в электронику? 1 доллар дает 100 долл. в конечном продукте. Уровень рентабельности электронной промышленности — 40%. Среднемировой срок окупаемости вложений в электронику — 2—3 года. Темпы роста в три раза выше темпов роста ВВП. Одно рабочее место в электронике дает четыре в других отраслях. Один килограмм изделий микроэлектроники по стоимости эквивалентен стоимости 110 тонн нефти. Это килограмм изделий, имеющих электронные компоненты, а если вы возьмете электронные компоненты, такие, например, как лазерную гетероструктуру, то там один грамм эквивалентен по стоимости 10 тоннам нефти.

Технология сегодня бурно развивается. Первая интегральная схема — два транзистора и RC-цепочка. 2000 г. — это 43 млн транзисторов, а в 2014 г. будет 4,3 млрд транзисторов в одной интегральной схеме. В 2000 г. скорость канала — 10 гигабит в секунду. Определяя прогноз на 2014 г. эту цифру нужно умножить на 1000—10 000.

Демонстрация бурного развития микроэлектроники за прошедшие годы — это крайне интересно и занимательно. В микропроцессорах стоимость одного мегагерца в 1970 г. составляла 7 тыс. 600 долл., а в 2000 г. — 16 центов. Стоимость посылки при скорости передачи в гигабитах в секунду составляла 150 тыс. долл. в 1970 г. и 12 центов — сегодня.

Взгляните на мировой рынок электронной промышленности. Стоимость материалов для производства полупроводников составляет 20 млрд долл., полупроводникового производственного оборудования — 30 млрд, полупроводниковых компонентов — 205 млрд долл., электронного оборудования — более триллиона долларов и отраслей промышленности, связанных с электроникой, — 15 трл долл. Хочется отметить, что 65% валового национального продукта Соединенных Штатов Америки определяются

промышленностью, связанной с электроникой, основанной на использовании электронных компонентов.

Сегодня производство электронной техники на душу населения составляет 1 тыс. 260 долл. в США и Канаде и 14 долл. — в России.

Сегодня российский рынок электронных компонентов не превышает 2 млрд долл. Основная часть, конечно, — это полупроводники.

Объемы финансирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Соединенных Штатов Америки и России отличаются в десятки, если не сотни раз.

Рассматривая объемы производства электронных компонентов трех стран — России, США и Китая, следует отметить, что за последние несколько лет резко повысился уровень Китая, а Россия, в общем, находится на бесконечно низком уровне.

Когда шла речь о технологическом прогрессе в микроэлектронике, в кремниевой микроэлектронике, я называл цифры, характеризующие, сколько было электронных компонент на заре ее развития, и как этот процесс развивается в настоящее время. Для кремниевой микроэлектроники связано это, прежде всего, с развитием фотолитографии. Прогноз развития микроэлектроники определяется литографией. В первых интегральных схемах Нойса и Килби топологический размер составлял доли миллиметра. Сегодня он составляет одну десятую микрона. При этом прогноз оказался, вообще говоря, слишком пессимистичным. Практика показала 9 лет ускорения в уменьшении основного топологического размера для кремниевых микроэлектронных схем.

Все развитие кремниевой микроэлектроники было связано, прежде всего, с прогрессом технологии. Основные активные компоненты — полевой транзистор и биполярный транзистор — физически остались такими же, как были открыты в 1947 г., а вот технология совершила гигантский прогресс. И когда сегодня очень много говорится о

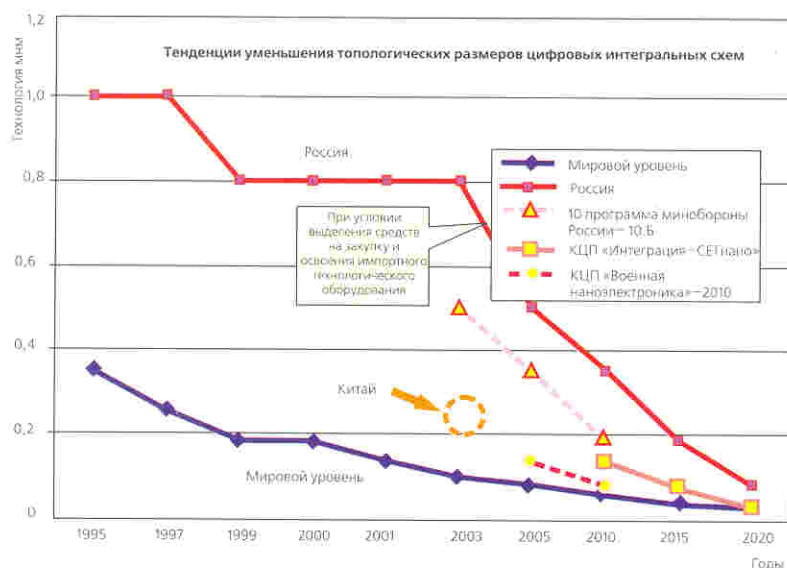


Рис. 5. Перспективы развития электроники

Таблица 1

Применение устройств электроники

№	Область применения устройств электроники	Величина установленных мощностей, кВт	Стоимость необходимых к установке устройств электроники, млн долл.	Стоимость полупроводниковых приборов в составе устройств электроники,
1	Преобразователи для снижения затрат на собственные нужды генерирующих электростанций	1,2—10 ⁷	1200	400
2	Подстанции для экспорта электроэнергии за рубеж	1,8—10 ⁷	1 580	546
3	Промышленность в целом	7,6—10 ⁷	7650	2296
3.1	Топливная промышленность		1 690	505
3.2	Черная металлургия		1 070	321
3.3	Цветная металлургия		1 380	413
3.4	Химия и нефтехимия		918	273
3.5	Машиностроение и металлообработка		1 080	344
4	Связь	5,0·10 ⁶	3900	1 300
5	Железнодорожный и городской электрический транспорт	1,0·10 ⁷	490	195
6	Автомобильный транспорт		310	103
7	Жилищно-коммунальное хозяйство	2,9·10 ⁷	2940	980
7.1	Освещение		2400	800
7.2	Обогрев и бытовая электроника		540	180
	Итого		18100	5820

Таблица 2

Прогноз тенденций уменьшения минимальных топологических размеров цифровых интегральных схем на период до 2020 г.

	Годы									
	1995	1997	1999	2000	2001	2003	2005	2010	2015	2020
Мировые достижения в промышленном производстве										
Мин. размер мкм	0,35	0,25	0,18	0,18	0,13	0,09	0,07	0,05	0,03	0,02
Российские достижения										
Мин. размер мкм	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5 0,35	0,35 0,25	0,18 0,13	0,07
Отсутствие необходимого государственного финансирования на развитие микроэлектроники и обеспечение технологическим оборудованием и материалами с 1990 по 2000 гг.						Возможный вариант развития при выделении необходимого финансирования на закупку зарубежного технологического оборудования и материалов				
Закупка микроэлектроники Минобороны США										
Мин. размер мкм	1,0			0,5		0,35	0,25	0,18	0,13	0,09

Таблица 3

Прогнозы параметров ультрабольших интегральных схем

Годы / Параметры	1999	2001	2003	2006	2009	2012	2015-2020
Минимальные размеры, нм	180	150	130	90	70	50	10
Емкость памяти на чипе, бит (экспериментальные образцы)	1Г		4Г	16Г	64Г	256Г	
Емкость памяти на чипе, бит (производство)	256 М	1Г	1Г	4Г	16Г	64Г	
Транзисторов / см ²	6.2 М	10М	18М	39 М	84 М	180 М	1Г
Частота на чипе, МГц	500-1250	600-1500	700-2100	900-3500	1200-6000	1500-10000	5000-30000
Максимальная рассеиваемая мощность (радиатором), Вт	90	10	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	

нанотехнологии, практически технология кремниевой микроэлектроники переходит от одной десятой микрона в нанометровый диапазон, потому что 13 нм — это будущее и не такое отдаленное, а 45, 60, 70 нм — это то, что сегодня осваивается в опытном производстве. От этого произойдут, наверняка, почти существенные физические изменения, потому что в этом случае могут начать работать уже квантово-размерные явления и эффекты.

В последние годы Институтом физики микроструктур в Нижнем Новгороде внесен существенный вклад в развитие литографии.

Несколько слов о втором направлении гетероструктуры. Оно базировалось на развитии тех-

нологии эпитаксиального выращивания полупроводниковых гетероструктур, представляющих собой новый класс материалов, в которых мы управляем всеми основными свойствами. Если до эпохи гетероструктур мы имели материалы, созданные природой, и в лабораториях мы просто их повторяли, то эпоха гетероструктур привела к созданию материалов, синтезированных человеком, когда их свойства определяются, вообще говоря, той задумкой и теми новыми принципами, которые реализованы в технологии получения гетероструктур.

Основными технологическими методами здесь стали жидкостная эпитаксия, молекуляр-

ная эпитаксия, позволяющие не только выращивать новые гетероструктуры, но и контролировать полностью их свойства в процессе роста, и так называемая мосгидридная эпитаксия, которая дает те же самые технологические возможности, что и молекулярная, хотя не предоставляет возможности контроля параметров в процессе изготовления.

Очень важной для развития гетероструктур стала возможность использования квантово-размерных явлений и управление спектром электронов в этих кристаллах, когда в так называемых двойных гетероструктурах при определенных условиях используется двумерный, одномерный или нульмерный электронный газ. Таким образом мы получаем возможность создания искусственных атомов.

Это возможность дала очень много для электроники. Возникновение сверхбыстрой электроники связано с биполярными гетеротранзисторами и с так называемыми транзисторами на высокой электронной подвижности, которая существенным образом изменила скорости всех электронных компонентов и сегодня является основным компонентом и в космической связи, и в мобильных телефонах, и во многом другом.

В нашей российской лаборатории выращиваются искусственные атомы и их ансамбли в гетероструктурах, которые позволили создавать принципиально новые типы полупроводниковых лазеров.

Лазеры на двойных гетероструктурах позволили сегодня получить коэффициент полезного действия лазеров, равный 74% от розетки в когерентное излучение. Это самый высокоэффективный преобразователь электрической энергии в световую.

Сегодняшний рынок лазерных диодов и его предсказание на ближайшее будущее демонстрируют, что к 2010 г. практически основным типом лазеров будут только полупроводниковые.

У нас часто говорится о том, что электронные рынки поделены навсегда, и что России не удастся войти в мировой рынок электронной техники. Здесь наглядно показано, как менялось соотношение долей мирового рынка электронных компонентов, начиная, если мне не изменяет память, где-то с середины 70-х гг. В начале 70-х гг. Соединенные Штаты Америки были основным производителем полупроводниковых электронных компонентов.

В начале 80-х гг. практически стало два основных производителя полупроводниковых электронных компонентов — это Соединенные Штаты Америки и Япония, а затем — страны Юго-Восточной Азии, далее — европейские страны. Если сегодня посмотреть на то, как поделены мировые

рынки по объемам производства полупроводниковых электронных компонентов, то это — примерно четыре равные части — Соединенные Штаты, Япония, страны Юго-Восточной Азии в основном, и страны Европы, доля которой несколько меньше остальных.

Несколько слов о полупроводниковой промышленности Китая. Сегодня Китай бурно развивает эту отрасль промышленности. В 2002 г. производство полупроводниковых компонентов составило 15 млрд долл. В 2010 г. — 23,4 млрд долл. В 2010 г. в Китае электронной продукции будет выпущено на сумму в 242 млрд долл., что составляет почти 10% валового национального продукта. Этот прорыв произошел буквально за последние десять-пятнадцать лет.

В мире планируется строительство новых заводов в ближайшие пять лет. Я хотел бы обратить внимание на данные, которые относятся к различным странам мира. При этом необходимо отметить, что сегодня наиболее бурно развивающимися предприятиями микроэлектронной, кремниевой промышленности являются предприятия, выпускающие 300-миллиметровые кремниевые подложки. Практически каждые десять лет в мировой электронной промышленности происходила смена размера кремниевых подложек, на которых изготавливаются кремниевые интегральные схемы. С шести дюймов через десять лет перешли на восемь дюймов. И сейчас, после десятилетнего срока развития восьмидюймовых, 200-миллиметровых кремниевых подложек происходит массовый переход на изготовление 300-миллиметровых.

В Европе, около Дрездена, появилось первое предприятие «Инфинеон». Четыре новых предприятия планируются на ближайшие годы. В целом во всем мире насчитывается более 30 новых предприятий на 300-миллиметровых подложках, причем особую активность в этом проявляет Китай. Из 13 планируемых предприятий более половины будет построено в Китае.

У нас бытует мнение, что современная микроэлектроника в промышленности очень дорогая. Действительно стоимость предприятия по выпуску кремниевых подложек размером 300-миллиметров нормального объема производства — **два с половиной миллиарда долларов**. Окупаемость его происходит за **шесть-семь лет**. Сегодня именно эти предприятия являются основой развития полупроводниковой электроники. Поэтому чрезвычайно важно, что выход России из той сложившейся сырьевой ловушки может произойти только посредством покупки самого современного на сегодняшний день полупроводникового производства сверхбольших интегральных схем на 300-миллиметровых подложках с основным топологическим

размером 0,1 микрона и полупроводникового производства современной оптоэлектроники и сверхбыстрых компонент гетероструктур.

В случае, если мы будем идти поэтапно и говорить, что сегодня мы технологически находимся на уровне середины восьмидесятых годов, и нам нужно сначала освоить размеры 0,6—0,5, перейти на размеры 0,35, то мы, на самом деле, обрекаем себя на полное отставание. Сегодня, я думаю, не нужно говорить о том, что без полупроводниковых электронных компонентов Россия не может быть современной державой, она не может развивать практически все наукоемкие технологии. А для того, чтобы выйти из этого тупика, необходимо ориентироваться на современный уровень. После того, как мы выйдем на современный уровень, мы сможем использовать тот огромный кадровый потенциал, который еще сохранили. В четырех центрах России сосредоточен огромный научно-образовательный и кадровый потенциал в этой области. Это — Санкт-Петербург, Зеленоград, Новосибирск (Академгородок) и Нижний Новгород.

А что касается электронной промышленности, то она находится на устаревшем технологическом уровне. Я пришел к выводу, всю свою жизнь занимаясь полупроводниковыми электронными компонентами, что из всех существующих отраслей промышленности, несмотря на бурное развитие биотехнологий, появление биочипов сохранит востребованность довольно долго. Именно современная и, прежде всего, полупроводниковая электроника, которую можно сегодня называть нанoeлектроникой, поскольку переход на наноразмеры

в гетероструктурах произошел уже давно, а переход на наноразмеры в кремниевой микроэлектронике происходит сегодня, то именно эта отрасль промышленности является самым мощным потребителем научных исследований, в том числе и фундаментальных, и, безусловно, прикладных, научных исследований.

Электронная промышленность является потребителем исследований физики конденсированного состояния, химии, материаловедения, биотехнологии. Она является потребителем знаний в таких областях, как физика, как ядерная физика, физическая электроника, поскольку именно на них основана наиболее серьезная диагностика полупроводниковых структур.

Поэтому без нормального развития этой отрасли промышленности в стране, накопленный за многие десятилетия огромный научный, образовательный, кадровый потенциал будет работать на Запад, что и происходит сегодня. Мы все прекрасно понимаем, наука — интернациональна, и мы никогда от этого не будем отказываться. Сегодня в электронной промышленности ситуация лучше, чем в советские времена, потому что в советское время благодаря работе комиссии КОКОМ, которая многим хорошо знакома, мы вынуждены были изобретать велосипед, мы вынуждены были делать абсолютно все сами. Сегодня мы можем многое купить. И нужно использовать такую возможность для того, чтобы эта основная компонента современной наукоемкой отрасли промышленности стала и двигателем экономики, и двигателем положительных социальных изменений в стране, и двигателями потребителей науки.