

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС*

Ржанов А. В., Свитаев К. К.

Какие бы критерии ни использовались для сравнительной оценки темпов прогресса в различных областях человеческой деятельности, полупроводниковая микроэлектроника безусловно должна быть отнесена к числу наиболее быстро и эффективно развивающихся научно-технических направлений.

Трудно назвать другое научно-техническое направление, которое было бы сравнимо с полупроводниковой микроэлектроникой по темпам возрастания глубины и масштабов воздействия на самые различные стороны жизни нашего общества. Достижения полупроводниковой микроэлектроники носят «всепроникающий характер».

Электронная промышленность во всех развитых странах существенно опережает другие отрасли как по относительным, так и по абсолютным темпам прироста производимой продукции, а также по темпам расширения и обновления собственной материально-технической базы. При этом авторы многочисленных аналитических обзоров современного состояния полупроводниковой микроэлектроники и прогнозов ее дальнейшего развития единодушны в предсказании устойчивости этого процесса на обозримое будущее. Все чаще в таких аналитических обзорах и прогнозах встречается утверждение, что уже сегодня уровень развития полупроводниковой микроэлектроники должен рассматриваться в качестве одной из важнейших характеристик военно-промышленного потенциала государства, а в дальнейшем значимость этой характеристики будет быстро возрастать.

Необходимо особо отметить, что в прогнозах, появившихся в последнее время в трудах европейских, американских и международных конференций по полупроводниковой микроэлектронике, единодушно предсказывается существенное возрастание числа специалистов, работающих в области микроэлектроники в развитых капиталистических странах. По оценке экспертов, в ближайшие 30—40 лет количество таких специалистов достигнет примерно 5 млн. человек, что составит около 20 % от общего числа ученых и инженеров в этих странах. Успехи Японии в соревновании со странами Запада по научно-техническому прогрессу наряду с другими факторами объясняются наиболее быстрыми темпами наращивания количества специалистов, способных охватить многочисленные проблемы полупроводниковой микроэлектроники, начиная от самых фундаментальных ее основ и вплоть до создания конкретных устройств для автоматизации технологических процессов, систем восприятия, хранения и обработки информации, систем управления и связи и т. д.

В настоящей статье мы попытались дать анализ развития полупроводниковой микроэлектроники в исторической перспективе. Наш анализ ни в коей мере не претендует на исчерпывающую полноту, его цель — отметить основные этапы станов-

* Микроэлектроника. 1982. Т. 11, вып. 6.

ления полупроводниковой микроэлектроники и определить некоторые тенденции ее дальнейшего развития и влияния на технический прогресс.

Начальный этап развития полупроводниковой электроники

Днем рождения полупроводниковой электроники, по-видимому, следует считать 7 мая 1895 г., поскольку фактически именно полупроводниковые свойства твердого тела были использованы А. С. Поповым для регистрации электромагнитных волн [1].

В первые годы нашего столетия было предложено несколько вариантов детекторов электромагнитных колебаний. В 1906—1908 гг. широкое распространение получили кристаллические детекторы, сердцем которых был контакт полупроводникового кристаллика с хорошо заточенной металлической проволокой.

Появление кристаллических детекторов привело к созданию детекторных радиоприемников, использовавшихся в усовершенствованном виде практически до конца 20-х годов. В 1923 г. О. В. Лосевым был создан новый тип детекторного приемника — кристадин [2].

Интересно отметить, что первые модели ламповых радиоприемников, созданные в Англии и Франции около 1915 г., строились в виде усилителей низкой частоты, присоединенных к детекторным приемникам. Однако в целом 20-е и 30-е годы нашего столетия стали периодами бурного развития «ламповой радиоэлектроники».

О полупроводниках почти забыли. Наука и техника того времени еще не были готовы к тому, чтобы понять и по достоинству оценить потенциальные возможности полупроводниковой электроники. Очень низким было качество полупроводниковых материалов. Работы в этом направлении проводились малыми силами и в плохих условиях. Понятия «полупроводниковая чистота» еще не существовало. Вопрос о широком развертывании работ, направленных на получение полупроводниковых монокристаллов высокого качества в промышленных масштабах, вообще не ставился.

И тем не менее именно в 20-е и 30-е годы нашего века в физических лабораториях всего мира начинается серьезное экспериментальное и теоретическое исследование свойств кристаллов. Создается квантовая теория твердого тела — фундамент всей современной полупроводниковой микроэлектроники.

Одним из пионеров этих исследований является А. Ф. Иоффе, приступивший к экспериментальному изучению электропроводности кристаллов в лаборатории Рентгена еще до начала первой мировой войны [3].

Интерес к полупроводникам существенно возрос в самом конце 30-х годов в связи с развитием в Англии работ по радиолокации.

Именно в этот период, по удачному выражению Я. А. Федотова, «полупроводниковые приборы, используемые в качестве нелинейных элементов, впервые проникли в «серьезную» радиоэлектронику».

Создание радиолокационных станций было, безусловно, важнейшей задачей. От успеха работ в этом направлении в значительной мере зависела возможность отражения Англией воздушного наступления фашистской Германии. Важность решаемой задачи потребовала самого серьезного отношения к созданию элементной базы радиолокационных установок. Наряду с форсированием создания необходимого набора

радиоламп были резко усилены исследования и разработки в области полупроводниковых материалов.

В США создаются монокристаллы германия достаточно высокого качества, а затем и монокристаллы кремния. Одновременно над электроникой впервые опустилась завеса секретности.

Роберт Оппенгеймер считал, что «выдающиеся научные открытия делаются не потому, что они полезны, а потому, что они оказались возможными». Вряд ли можно полностью согласиться с этим утверждением. Потребность в том или ином открытии, если можно так выразиться, наличие «социального заказа» на открытие существенно активизирует деятельность ученых и в значительной мере создает предпосылки, способствующие совершению открытия.

В середине 40-х годов в связи с быстрым развитием электронного оборудования самолетов и ракет, а также в связи с началом работ по созданию электронных вычислительных машин перед разработчиками электронных систем впервые со всей остротой встали вопросы надежности и габаритов этих систем, а также энергетики больших электронных систем.

Вопрос о создании малогабаритных, маломощных и надежных твердотельных усилительных элементов стал весьма актуальным. В этом направлении начались интенсивные поисковые исследования, завершившиеся блестящим успехом в 1948 г., когда американскими физиками Шокли, Бардиным и Браттайном был создан транзистор.

Создание транзистора явилось результатом объединения трех основных компонент: многолетних и упорных исследований механизма электропроводности твердых тел, успехов полупроводникового материаловедения (в первую очередь успехов химии германия) и ... гениальной догадки.

Первые транзисторы были, естественно, весьма несовершенными приборами в отношении как рабочих характеристик, так и технологичности изготовления и надежности. Однако перспектива замены хрупкой и, несмотря на успехи в миниатюризации вакуумных электронных приборов, все еще довольно громоздкой электронной лампы значительно более малогабаритными твердотельными приборами, не требующими для своей работы ни высокого вакуума, ни достаточно мощных источников питания нити накала катода, ни высоковольтного анодного питания, оказалась столь вдохновляющей, что 50-е годы нашего столетия можно с полным правом назвать периодом полупроводниковой революции в электронике.

В результате интенсивных исследований и разработок, выполненных в эти годы, были существенно улучшены параметры транзисторов (повышение рабочих частот и мощностей, увеличение пробивных напряжений и т. п.), а также созданы новые типы полупроводниковых приборов (стабилитроны; параметрические, туннельные и лавиннопролетные диоды; полевые транзисторы и т. п.). Основным полупроводниковым материалом в эти годы был германий.

Уже первые опыты использования транзисторов и других полупроводниковых приборов в электронной аппаратуре показали, что применение этих приборов делает аппаратуру существенно надежнее и экономичнее, а также ведет к значительному снижению ее габаритов и веса. Эти на первый взгляд чисто количественные изменения характеристик электронной аппаратуры были столь значительными, что очень скоро привели к принципиальным качественным изменениям ее основных парамет-

ров. В результате для полупроводниковой электронной аппаратуры оказались открытыми новые, иногда совершенно неожиданные области применения. Постепенно полупроводниковая электронная аппаратура начинает проникать во все области человеческой деятельности (навигационная аппаратура и аппаратура для управления технологическими процессами, медицинская электроника и электромusикальные инструменты, бытовая электроника и т. д.). Особо следует отметить, что только создание полупроводниковых электронных приборов сделало реальным дальнейшее успешное развитие вычислительной техники.

Создалась ситуация, когда без применения электроники трудно стало ожидать прогресса в той или иной области науки и техники.

Именно этими обстоятельствами объясняется исключительно быстрый рост объема исследований в области полупроводниковой электроники, а также интенсивное строительство новых предприятий для производства полупроводниковых приборов в 50—60-е годы. Объем производства электронных ламп в эти же годы оставался примерно постоянным. В результате, например, в США к началу 70-х годов объем выпуска электронных ламп составлял менее 10 % от объема производства полупроводниковых приборов (рис. 1).

Начальный этап развития полупроводниковой электроники заканчивается в середине 60-х годов нашего столетия, когда на смену дискретным германиевым и кремниевым диодам и транзисторам начинают приходить кремниевые интегральные микросхемные схемы.

От дискретных полупроводниковых приборов к интегральным микросхемам

Создание транзистора, как отмечалось выше, явилось мощным стимулом для развертывания исследований в области физики полупроводников и технологии полупроводниковых приборов. В результате этих исследований уже в 50-е годы для физиков открылись огромные потенциальные возможности полупроводниковой электроники, а также принципиальные пути дальнейшей микроминиатюризации полупроводниковой электронной аппаратуры.

Однако стало совершенно ясным и другое: прогресс в области полупроводниковой электроники возможен только на базе принципиально новой технологии и потребует весьма значительных дополнительных капиталовложений.

Технический и технологический уровень электронной промышленности 50-х годов не мог обеспечить реализацию целого ряда требований полупроводниковой элек-

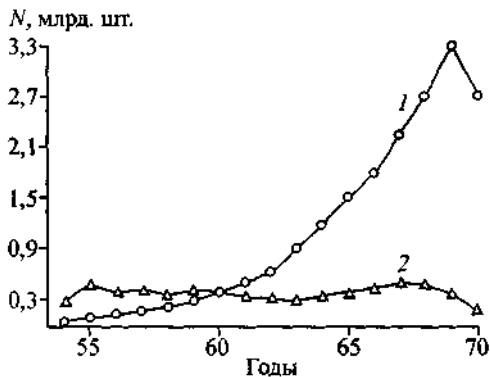


Рис. 1. Годовой объем выпуска (N) промышленностью США дискретных полупроводниковых приборов (1) и приемно-усилительных ламп (2) (по данным [4]).

троники. В результате многие идеи, появившиеся в полупроводниковой электронике в первые годы ее развития, были осуществлены далеко не сразу. Так, например, мысль о полевом транзисторе с изолированным затвором, высказанная еще в 1948 г., была практически реализована лишь в конце 60-х годов в результате развития пленочной технологии.

Развитие полупроводниковой электроники потребовало прежде всего получения сверхчистых полупроводниковых веществ с содержанием нежелательных или неконтролируемых примесей, не превышающим в некоторых случаях 10^{-7} – 10^{-8} %. Содержание «вредных» примесей в химических реактивах и некоторых конструкционных материалах, используемых в полупроводниковой технологии, не должно было превышать, как правило, 10^{-4} – 10^{-5} %. Таких требований к чистоте материалов ранее не представляла ни одна отрасль науки или техники.

Несмотря на многочисленные трудности, в результате совместных усилий химиков, физиков и технологов в течение 5–10 лет был создан необходимый набор сверхчистых полупроводниковых и конструкционных материалов, а также вспомогательных реактивов.

Второй проблемой, решения которой требовало развитие полупроводниковой электроники, была проблема создания «чистого» и прецизионного технологического оборудования. Требование высокой точности всех технологических процессов полупроводниковой электроники (диффузионные процессы, нанесение электродов и т. п.) стало совершенно очевидным и естественным после того, как было теоретически и экспериментально показано, что необходимые рабочие параметры полупроводниковых приборов (например, их частотные характеристики) могут быть получены лишь при том условии, что размеры рабочих элементов полупроводниковых приборов и расстояния между ними будут сделаны исключительно малыми (от десятков микрон до десятых долей микрона).

Наконец, третья серьезнейшая проблема, с которой столкнулась полупроводниковая электроника, это «проблема поверхности». По мере того как размеры полупроводниковых приборов становились все меньше и меньше, совершенно очевидным становилось решающее влияние, которое оказывает на характеристики этих приборов состояние их поверхности. В 50-е годы было выполнено большое число исследований, посвященных изучению влияния состояния поверхности германия и кремния на свойства полупроводниковых приборов, изготавливаемых из этих материалов, а также изучению специфических электронных процессов на поверхности германия и кремния. Важнейшим результатом этих исследований явилось создание физической теории поверхности полупроводника и открытие уникальных с точки зрения полупроводниковой электроники свойств межфазной границы кремний — пленка термической двуокиси кремния (система Si — SiO₂).

В результате совместных усилий химиков, физиков, инженеров и организаторов производства к началу 60-х годов была создана фактически новая электронная промышленность, располагающая необходимым набором сверхчистых веществ, новым технологическим оборудованием, «чистыми» технологическими помещениями и кадрами специалистов, осознавшими огромные потенциальные возможности полупроводниковой электроники и способными обеспечить дальнейший прогресс в этой области.

Основным полупроводниковым материалом в 60-е годы становится кремний. Качество монокристаллического кремния постепенно приближается к качеству монокристаллического германия. Соотношение объемов выпуска германиевых и кремниевых транзисторов решительно изменяется в пользу кремниевых приборов (рис. 2).

Необходимо особо отметить, что массовый характер производства компонент радиоэлектронной аппаратуры всегда побуждал специалистов, работавших в электронной промышленности, стремиться к разработке групповой технологии изготовления этих компонент. Естественно, что именно подход, основанный на максимальном применении групповых технологических операций, был использован и при разработке промышленной технологии производства полупроводниковых приборов. Эффективность этого подхода в области полупроводниковой электроники в сочетании с достижениями физики полупроводников и химии сверхчистых материалов превзошла все ожидания: его результатом явилась сначала разработка планарно-эпитаксиальной технологии дискретных полупроводниковых приборов, а затем и кремниевых интегральных микросхем.

Характеризуя ситуацию, сложившуюся к середине 60-х годов, д-р К. Л. Хоган, один из ведущих специалистов фирмы «Моторола» (США), писал: «Никто пока не может сказать, куда приведет наш путь, по которому мы идем, используя эту новую технологию (технологию производства кремниевых интегральных микросхем). Однако представляется очевидным, что мы находимся на грани грандиозной технической революции в области построения радиоэлектронных систем, революции, которая стала возможной после того, как человечество расширило свои знания по полупроводниковым материалам» [5].

Нам хочется особо подчеркнуть коллективный характер творческого труда ученых и инженеров, в результате которого созданы кремниевые интегральные микросхемы. Не имеет смысла даже пытаться точно установить, кто и когда впервые выдвинул идею их создания. Так как $p-n$ -переход обладает емкостью, а полупроводниковые материалы имеют заметное сопротивление, то у исследователей, работавших в области транзисторной электроники, в первые же годы после изобретения транзистора уже возникали мысли о возможности создания законченной электронной схемы на основе полупроводникового монокристалла. Однако конкретные идеи в этом направлении инженеры начали разрабатывать лишь в начале 60-х годов, опираясь на успехи групповой технологии производства полупроводниковых приборов.

Промышленный выпуск кремниевых интегральных схем был начат в США в середине 60-х годов (рис. 3).

Как и предполагалось, основными потребителями интегральных схем (ИС) стали разработчики вычислительной техники, в интересах которых и создавались первые ИС. Однако очень скоро в эффективности замены дискретных полупроводниковых

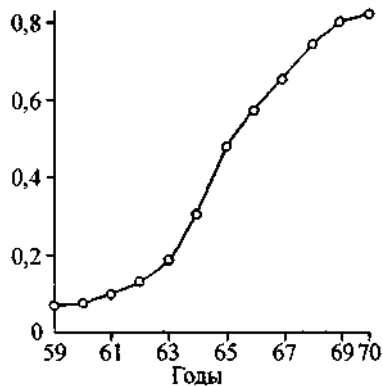


Рис. 2. Относительная доля кремниевых транзисторов в годовом выпуске транзистора в США в 60-е годы (по данным [4]).

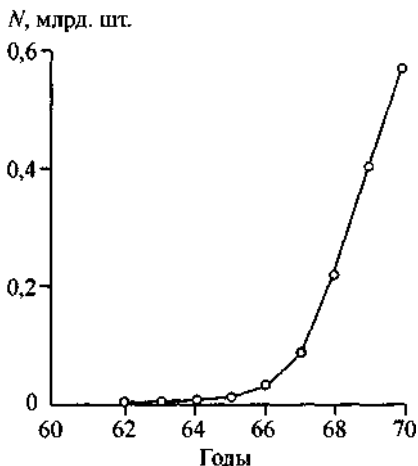


Рис. 3. Годовой объем выпуска (N) интегральных микросхем промышленностью США в 60-е годы (по данным [4]).

с более тщательной проработкой схемных решений (по сравнению со схемами на основе дискретных полупроводниковых приборов) с высокой надежностью межэлементных соединений, создаваемых методами вакуумного напыления и фотолитографии, а также с весьма низкими уровнями эксплуатационных токов и напряжений.

Но самое главное заключалось в том, что к этому времени ни у кого из специалистов, работающих в области полупроводниковой электроники, не было сомнений в том, что степень интеграции в кремниевых микросхемах может быть существенно увеличена. Считалось реальным достижение степени интеграции в несколько десятков тысяч элементов. Делались и более смелые прогнозы. Наступала эра больших интегральных схем. Родилась полупроводниковая интегральная микроэлектроника.

Полупроводниковый элемент памяти и микроЭВМ

После того как в конце 60-х годов был создан полевой транзистор с изолированным затвором (МОП-транзистор), существенно возрос интерес исследователей к особенностям электронных и физико-химических процессов в структурах металл — диэлектрик — полупроводник (МДП-система).

Важнейшими результатами этих исследований явились разработка технологии МДП-интегральных схем (МОП-технология, в дальнейшем и К/МОП-технология) и создание полупроводниковых элементов памяти на основе МДП-структур с двойным диэлектриком. Развитие исследований в этой области привело к созданию полупроводниковых запоминающих устройств большой емкости, была также показана возможность создания запоминающих устройств со стиранием информации ультрафиолетовым излучением и электрически-перепрограммируемых запоминающих устройств с произвольной выборкой информации.

приборов интегральными микросхемами (езде, где это только возможно) убедились работчики любой электронной аппаратуры.

Такая ситуация позволила фирме «Моторола» уже в середине 60-х годов провозгласить лозунг: «Те, кто сегодня проектируют радиоэлектронную аппаратуру, не используя интегральные схемы, находятся вне основного направления работ американской технологии» [5].

К концу 60-х годов обычной считалась степень интеграции, при которой на одной пластине кремния диаметром около 30 мм изготавливалось от 25 до 250 интегральных микросхем, содержащих от 10 до 30 элементов (диодов, транзисторов, конденсаторов) каждая. Надежность таких интегральных схем приближалась к надежности дискретных полупроводниковых приборов. Это было связано

Как ни стремительно развитие полупроводниковой электроники, потребовалось ~5 лет, чтобы интегральные схемы на основе МДП-структур получили достаточное развитие и заслуженное признание. В январе 1973 г. журнал «Electronics» (США) писал: «При весьма скромном начале (2 млн. дол. в 1970 г.) объем производства МОП ИС растет столь стремительными темпами, что в настоящее время между МОП и ТТЛ ИС идет конкурентная борьба за ведущее положение на рынке сбыта интегральных схем. МОП ИС, которые некогда были лишь заказными схемами, выпускаемыми несколькими специализированными фирмами в ограниченном объеме, быстро превратились в стандартные изделия с высокой конкурентной способностью, и в настоящее время их выпуск осваивается многими крупными и мелкими полупроводниковыми фирмами». И далее: «Если стандартные МОП ИС представляют собой наиболее растущую часть ИС, то среди них наибольший прирост приходится на долю запоминающих устройств...».

Подлинным триумфом больших интегральных схем на основе МДП-структур явилось создание на базе таких схем в начале 1972 г. микроЭВМ, сердцем которых был микропроцессор.

Первые микроЭВМ представляли собой нечто среднее между набором кристаллов для электронной счетной машины и миниЭВМ. Однако, по существу, уже первые микропроцессоры были вполне законченными устройствами обработки информации, выполнявшими те же функции, что и центральные процессоры вычислительной системы любого размера. Микропроцессор имеет три основных отличия от обычного процессора: микропроцессор изготавливается целиком как одна большая интегральная схема (или как несколько, но немного, таких схем); микропроцессор обладает сравнимым быстродействием с миниЭВМ или большими ЭВМ (в начале 70-х годов малое их быстродействие было платой за возможность изготовления микропроцессора в виде одной БИС); микропроцессор является дешевым устройством.

Кроме микропроцессора для создания работоспособной микроЭВМ, естественно, требовались оперативное ЗУ (ОЗУ) для хранения данных, постоянное ЗУ (ПЗУ) — для хранения программ, а также схемы управления оборудованием ввода—вывода информации. Первые микроЭВМ, созданные в начале 70-х годов, занимали одну или несколько печатных плат обычного размера.

Необходимо особо подчеркнуть важность полупроводниковых запоминающих

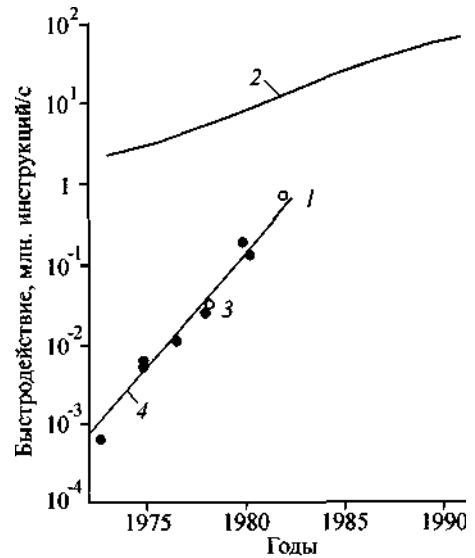


Рис. 4. Однокристалльный микрокомпьютер «Bellmac-32» (1) по быстродействию приближается к большим ЭВМ (2). Экстраполяция двух растущих с разной скоростью зависимостей показывает, что они пересекутся еще в нынешнем столетии [6]; 3 — «Bellmac-8»; 4 — микропроцессоры.

устройств на основе МДП-структур с двойным диэлектриком, сохраняющих информацию при отключенном питании. Управляющие микроЭВМ с их использованием весьма перспективны. Именно использование таких постоянных ЗУ, а затем перепрограммируемых ЗУ позволяет применять микроЭВМ для управления множеством «не слишком быстрых» систем с помощью программ, заранее записанных в память микроЭВМ.

Первые же управляющие микроЭВМ нашли столь многочисленные применения, что их выпуск стал быстро расти, а электронная промышленность получила четкий социальный заказ по совершенствованию микроЭВМ в части их дальнейшей миниатюризации и повышения быстродействия.

Выполнения этого социального заказа не пришлось ждать слишком долго. Усилия, затраченные исследователями и разработчиками на развитие технологии кремниевых интегральных схем, и создание все более совершенного технологического оборудования, а также накопленный к этому времени опыт проектирования интегральных схем быстро приносили плоды. Уже в 1978 г. была создана микроЭВМ на одной большой интегральной схеме. На одном кристалле этой микроЭВМ разместились центральный процессор, память с произвольной выборкой (ЗУПВ), постоянная память (ПЗУ), синхронизатор и схемы ввода — вывода. Степень интеграции к концу 70-х годов, например в схемах памяти с произвольной выборкой (ЗУПВ), превысила

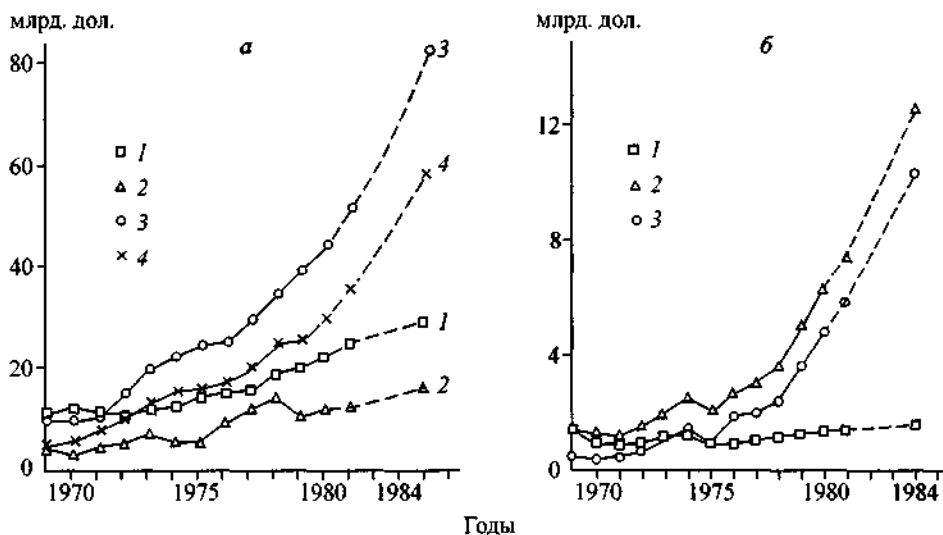


Рис. 5. а — годовой объем закупок электронного оборудования в США в 70-е годы (в млрд. дол.). По данным журнала «Electronics» [7—17]: 1 — закупки федерального правительства; 2 — продажа бытовой электронной аппаратуры; 3 — продажа электронной аппаратуры промышленным предприятиям; 4 — объем продажи промышленным предприятиям систем для обработки данных (ЭВМ и сопутствующее оборудование); б — годовой объем закупок основных компонентов электронного оборудования. По данным журнала «Electronics» [7—17]: 1 — электровакуумные приборы (включая электронно-лучевые трубки и кинескопы цветного изображения); 2 — полупроводниковые приборы (включая интегральные схемы); 3 — только интегральные схемы.

100 тыс. схемных элементов на одном кристалле. Что же касается быстродействия микроЭВМ, то прогресс в этой области оказался столь значительным (в основном благодаря применению К/МОП-технологии с двойными карманами и использованию оптимальных схмотехнических решений), что в настоящее время быстродействие микроЭВМ составляет ~1 млн. операций в 1 с. (см. рис. 4).

Если попытаться подвести главный итог развитию полупроводниковой электроники в 70-е годы, то, по-видимому, можно утверждать, что таким итогом явилось создание программируемых и перепрограммируемых электронных систем (микроЭВМ или микросистем) управления, перспективы применения которых (от оптимального, с точки зрения экономии горючего, управления автомобильным двигателем до управления работой человеческого сердца) в настоящее время даже трудно себе представить. Главной движущей силой прогресса полупроводниковой электроники в эти годы было развитие технологии кремниевых интегральных схем, и в первую очередь развитие комплементарной МОП-технологии.

Определенное представление о темпах развития электронной промышленности в 70-е годы дает анализ рынков сбыта электронной аппаратуры в США (рис. 5).

Полупроводниковая электроника в 80-е годы

Ясно намечившиеся в последние годы тенденции повышения уровня производства путем использования промышленных роботов ставят перед полупроводниковой электроникой две почти очевидные задачи: снабдить роботы искусственным интеллектом и оснастить их сенсорными системами, способными обеспечить адекватные реакции робота на изменения внешних условий.

С позиций сегодняшнего дня эти задачи не кажутся неразрешимыми. Действительно, все предшествующее развитие полупроводниковой электроники подготовило ее к началу 80-х годов к вступлению в эру сверхбольших (сверхБИС) и сверхбыстродействующих (или сверхскоростных — сверхСИС) интегральных схем с субмикронными размерами элементов. Именно такие сверхБИС и сверхСИС, вероятно, и станут основой микросистем, способных взять на себя функции управления отдельными экземплярами или целыми коллективами промышленных роботов, выполняя функции индивидуального или коллективного интеллекта, получающего сигналы об изменении внешних условий от некоторой сенсорной системы. Кроме того, успехи полупроводниковой интегральной оптоэлектроники и тензотехники позволяют надеяться на то, что и сенсорные системы, необходимые роботу, могут быть созданы на основе технологии интегральных схем в достаточно короткие сроки.

Таким образом, современное состояние человеческого общества создает самые благоприятные перспективы для развития полупроводниковой микроэлектроники. Действительно, во-первых, стало общепризнанным, что развитие полупроводниковой электроники необходимо человечеству для повышения производительности живого труда и улучшение условий жизни, а во-вторых, дальнейшее развитие полупроводниковой электроники является вполне реальным на основе того научно-технического задела, который уже создан к настоящему времени или создается сегодня.

Каковы же эти, уже созданные, научно-технические заделы и какие проблемы в области полупроводниковой электроники стоят перед нами сегодня?

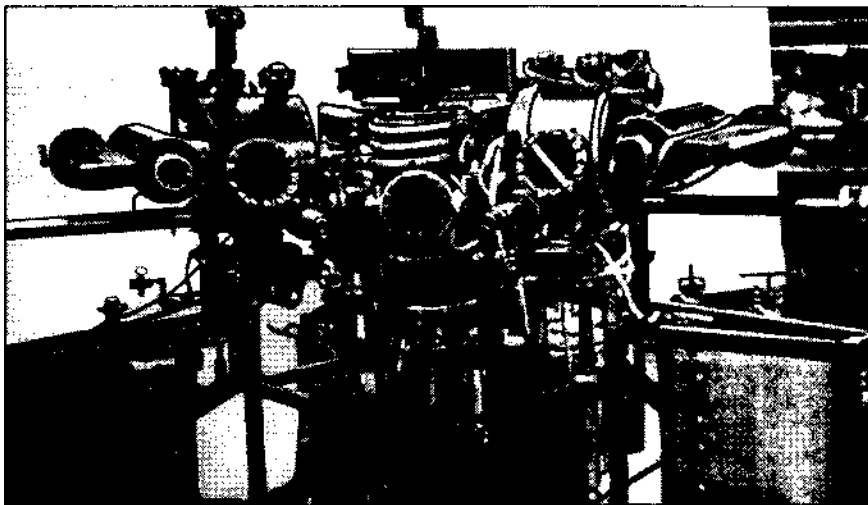


Рис. 6. Внешний вид одного из вариантов технологической сверхвысоковакуумной установки для выращивания тонких пленок методом эпитаксии из молекулярных пучков. Установка снабжена комплексом аналитических устройств для контроля и регулирования процессов роста.

По существу и уже полученные результаты и проблемные вопросы, стоящие сегодня перед специалистами, работающими в области электроники твердого тела, относятся к весьма своеобразному образованию, представляющему собой синтез физики и химии твердого тела с новейшими достижениями в области техники получения остросфокусированных и управляемых электронных, ионных и молекулярных пучков, для обозначения которого в последнее время все чаще употребляется термин «атомная инженерия».

С технической или технологической точки зрения основная задача атомной инженерии состоит в том, чтобы поместить заданное количество атомов нужного сорта в заданное место на поверхности или в приповерхностной области твердого тела (кристаллического или аморфного) или «модифицировать» структуру заданной области твердого тела.

С точки зрения физики и химии твердого тела основная проблематика атомной инженерии связана с изучением структуры и весьма специфических свойств поверхности твердого тела на атомарном уровне (включая поверхностные химические реакции), а также изучением свойств тонких и сверхтонких слоев вещества вплоть до свойств квазидвумерных систем.

Уже созданные и непрерывно совершенствуемые установки ионного легирования, ионно-плазменного травления, эпитаксии из молекулярных пучков, электронной и ионной литографии, а также системы для комплексного исследования структуры и химического состава приповерхностных слоев твердого тела, включающие ожеспектрометры, масс-спектрометры вторичных ионов, установки для наблюдения дифракции быстрых и медленных электронов и т. п., являются, по существу, инструментами атомной инженерии. Однако очень многое в этом направлении еще предстоит сделать (см. рис. 6—9).

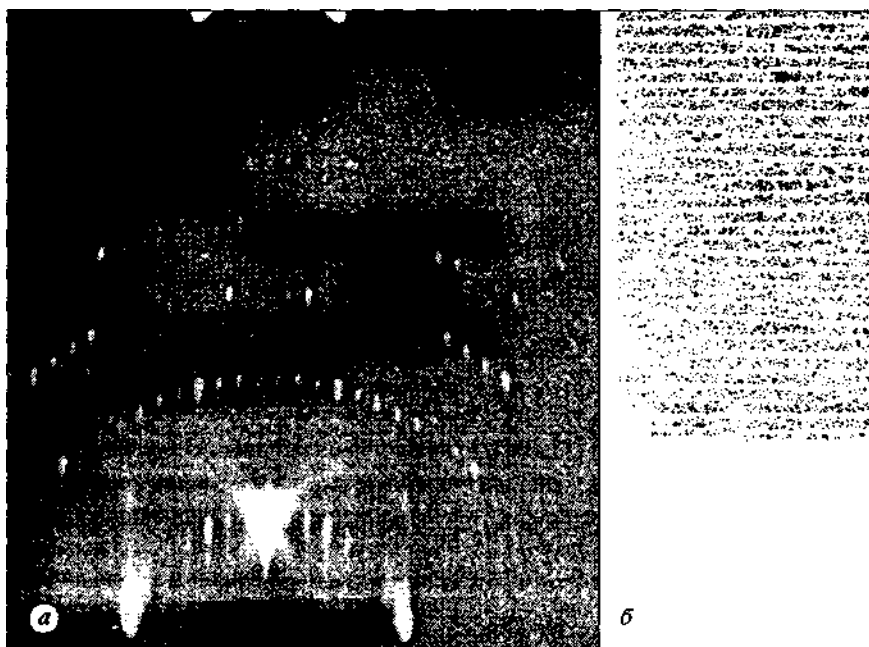


Рис. 1. *a* — картина дифракции быстрых электронов от поверхности Si (III) перед эпитаксией. Наличие сверхструктурных рефлексов с уменьшенным в 7 раз периодом свидетельствует об атомарной чистоте поверхности кремния (по данным работ [18, 19]); *б* — микрорельеф атомарно-чистой поверхности Si (III), прошедшей предэпитаксиальную подготовку (7x7). Отчетливо видна система стоков для адсорбированных атомов, которая сформирована в виде ступеней высотой $\sim 20 \text{ \AA}$ с интервалом $\sim 500 \text{ \AA}$ (оттенение золотом. Увел. 50 000) (по данным [18, 19]).

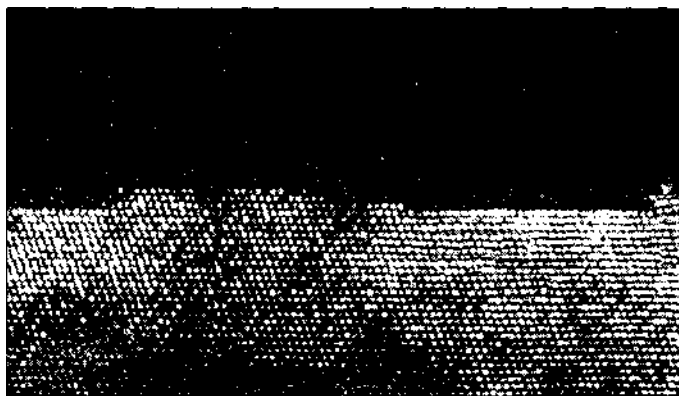


Рис. 8. Изображение атомного строения границы раздела полупроводник — диэлектрик в системе германий — окисел. Наблюдаются атомарно-гладкие участки, а также ступени высотой в одно и несколько межплоскостных расстояний. Заметны субангстремные смещения атомов, находящихся на краях ступеней. Высокоразрешающая электронная микроскопия при боковом сечении объекта. Увел. 5 000 000 (по данным [20]).

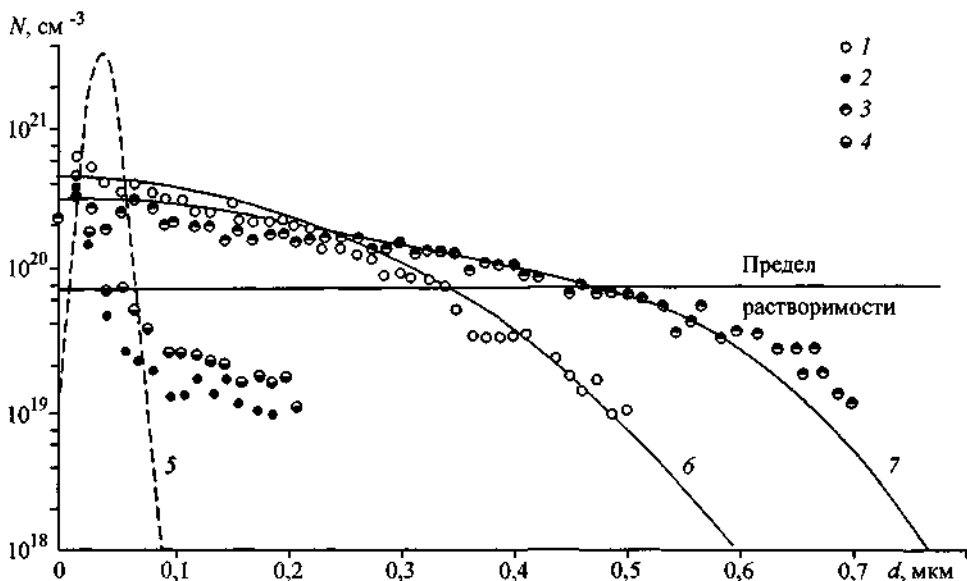


Рис. 9. Полученные методом обратного рассеяния ионов галлия «профили» распределения атомов сурьмы в кремнии, после отжига с помощью электронной пушки: 1, 3 — общее содержание атомов сурьмы; 2, 4 — концентрация атомов сурьмы, не находящихся в узлах решетки кремния; 1, 2 — отжиг одним импульсом; 3, 4 — отжиг тремя импульсами (в обоих случаях плотность энергии 2 Дж/см², длительность импульса — 500 нс, энергия электронов — 10 кэВ); 5 — расчетный «профиль» примеси после имплантации (теория ЛШШ, $E = 60$ кэВ, $\Phi = 1 \cdot 10^{16}$ см⁻²); 6, 7 — теоретические кривые, рассчитанные в рамках модели плавления приповерхностного слоя при импульсном отжиге (по данным [21]).

Кроме того, важно ясно сознавать, что проблема создания сверхБИС и сверхСИС с субмикронными размерами элементов неизбежно потребует вовлечения в технологию полупроводниковой электроники новых классов веществ (например, замены традиционных фоторезистов электронными и ионными резистами), а также создания нового поколения сверхпрецизионного технологического оборудования.

Целый ряд особых проблем возникает в связи с необходимостью создания полупроводниковых сенсорных систем.

Наиболее сложной из этих проблем является, по-видимому, проблема создания «полупроводникового глаза», который, согласно имеющимся сегодня представлениям, должен представлять собой матричное фотоприемное устройство, содержащее около 10^6 фоточувствительных элементов в сочетании со схемами считывания и предварительной обработки фотосигналов.

Требование столь высокой степени интеграции в сочетании с требованием высокой фоточувствительности ставит перед специалистами в области интегральной оптоэлектроники весьма серьезные задачи. Кроме того, не исключено, что окажется выгодным или необходимым существенное расширение спектральной области чувствительности «полупроводникового глаза» в сторону инфракрасного диапазона длин волн. В этом случае перед исследователями и разработчиками встанут дополнитель-

ные проблемы, связанные, например, с созданием гетероструктур, представляющих собой сочетание узкозонных полупроводниковых материалов, являющихся собственно датчиками фотосигналов в инфракрасной области спектра, и широкозонных материалов, обеспечивающих оптимальные условия для считывания и предварительной обработки фотосигналов.

Весьма интересные проблемы могут возникнуть также при использовании в качестве первичных датчиков сенсорных систем молекул биополимеров, «привитых» непосредственно на вход интегральной схемы, осуществляющей прием и обработку сигналов, вырабатываемых биополимером. Не окажемся ли мы в 80-е годы свидетелями синтеза атомной инженерии твердого тела и молекулярной биоинженерии?

Перед полупроводниковой электроникой в 80-е годы будут стоять, конечно, и весьма прозаические, но от этого ничуть не менее важные проблемы: проблема корпусирования новых «плотноупакованных» сверхБИС и сверхСИС, проблема оборудования для контроля параметров сверхБИС и сверхСИС в процессе их изготовления, испытаний и эксплуатации и т. п.

Наконец, в 80-е годы будут продолжаться работы, направленные на создание больших сверхбыстродействующих интегральных схем на арсениде галлия и, возможно, некоторых других соединений типа $A_{III}B_{V}$. Однако кремний, по-видимому, еще надолго, если не навсегда, останется основным материалом при производстве интегральных схем широкого применения.

В целом у нас есть все основания считать, что полупроводниковая электроника и микроэлектроника, в частности, далеко еще не достигли апогея в своем развитии.

Физика твердого тела уже сейчас предлагает целый ряд новых принципов решения задач восприятия, передачи, обработки и хранения информации, реализация которых требует дальнейшего совершенствования технологии. В то же время весь накопленный опыт развития свидетельствует о двусторонности взаимодействия фундаментальной науки и технологии, так что развитие последней приведет к появлению еще более новых и неожиданных физических идей и принципов. Потребности дальнейшего совершенствования средств вычислительной техники и автоматизированных систем управления, в том числе и технологическими процессами, необходимость исключения тяжелого ручного труда, задачи автоматизации научных исследований — эти и целый ряд других требований эпохи НТР являются надежными гарантиями дальнейшего ускоренного развития микроэлектроники. С другой стороны, нет сомнений в том, что прогресс микроэлектроники откроет новые возможности для решения самых ответственных и трудных задач.

Литература

1. Попов А. С. Ж. русск. физ.-хим. о-ва, 1895, т. 27, часть физич., отд. 1, вып. 8.
2. Лосев О. В. У истоков полупроводниковой техники (сб. основных работ О. В. Лосева). Л.: Наука, 1972.
3. Соминский М. С. Абрам Федорович Иоффе. М.-Л.: Наука, 1965.
4. Федотов Я. А. Полупроводниковая электроника и прогресс современной техники. — В кн.: Фотолитография и оптика. М.: Сов. радио, Техника-Берлин, 1974.
5. Интегральные схемы. Принципы конструирования и производства. Пер. с англ./ Под ред. Колесова А. А. М.: Сов. радио, 1968.

6. Электроника (пер. с англ.), 1981, т. 54, № 20.
7. Электроника (пер. с англ.), 1971, т. 44, № 1.
8. Электроника (пер. с англ.), 1972, т. 45, № 1.
9. Электроника (пер. с англ.), 1973, т. 46, № 1.
10. Электроника (пер. с англ.), 1974, т. 47, № 1.
11. Электроника (пер. с англ.), 1975, т. 48, № 1.
12. Электроника (пер. с англ.), 1976, т. 49, № 1.
13. Электроника (пер. с англ.), 1977, т. 50, № 1.
14. Электроника (пер. с англ.), 1978, т. 51, № 1.
15. Электроника (пер. с англ.), 1979, т. 52, № 1.
16. Электроника (пер. с англ.), 1980, т. 53, № 1.
17. Электроника (пер. с англ.), 1981, т. 54, № 1.
18. *Пчеляков О. П., Блюмкина Ю. А., Стенин С. И., Соколов Л. В., Архипенко А. В., Ламин М. А.* Поверхность. Физика, химия, механика, 1982, № 1, с. 147.
19. *Торопов А. И., Кантер Б. З., Карасев В. Ю., Пинтус С. М., Стенин С. И.* Поверхность. Физика, химия, механика, 1982, № 1, с. 110.
20. *Pasemann M., Pchelyakov O. P.* Phys. Stat. Sol. (a), 1982.
21. *Dvurechenskii A. V., Grörschel R., Igonina N. M., Kashnikov B. P., Komolova N. I.* Phys. St. Sol. (a), 1982, v. 71, № 2.

Институт физики полупроводников
СО АН СССР

Поступила в редакцию
13.V.1982