

# РАЗВИТИЕ ТРАНЗИСТОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОТ ТОЧЕЧНОГО К НАНОТРАНЗИСТОРУ!

Транзистору исполняется 60 лет. Сегодня транзистор – самое массовое изделие в мире. Микроэлектроника, в основе которой лежат транзисторные структуры, достигла впечатляющих успехов. Поставляемые ежегодно на рынок изделия микроэлектроники содержат примерно  $10^{20}$  транзисторов. Это сопоставимо с числом звезд, которые можно увидеть на небе, или с числом электронов в кубическом сантиметре полупроводника. При этом расстояние между двумя транзисторами составляет одну десятитысячную толщины человеческого волоса. Скорость переключения транзистора достигает  $\sim 10^{-12}$  с. В пересчете на число переключений в 1 с человеку, пользующемуся бытовым выключателем, понадобилось бы для их выполнения примерно 25 000 лет, или 250 веков! Цена формирования транзистора в микросхеме компании Intel сопоставима с ценой печатания в книге типографского знака, например запятой. Подобных сравнений можно привести множество. Ясно, что такие впечатляющие успехи связаны с достоинствами технологии производства интегральных микросхем. Вспомним некоторые вехи в истории становления и развития транзистора.

## "ПЛОХИЕ" ПРОВОДНИКИ

Начало развитию современной полупроводниковой техники и микроэлектроники положили опыты немецкого физика, члена Берлинской Академии наук Томаса И. Зеебека и самоучки, члена Лондонского королевского общества, члена Петербургской Академии наук Майкла Фарадея. Первый в 1821 году открыл явление термоэлектричества в паре медь–висмут, а также в материалах, содержащих теллур. А Фарадей в 1833 году обнаружил явление уменьшения сопротивления сульфи-

А.Щука, д.т.н.

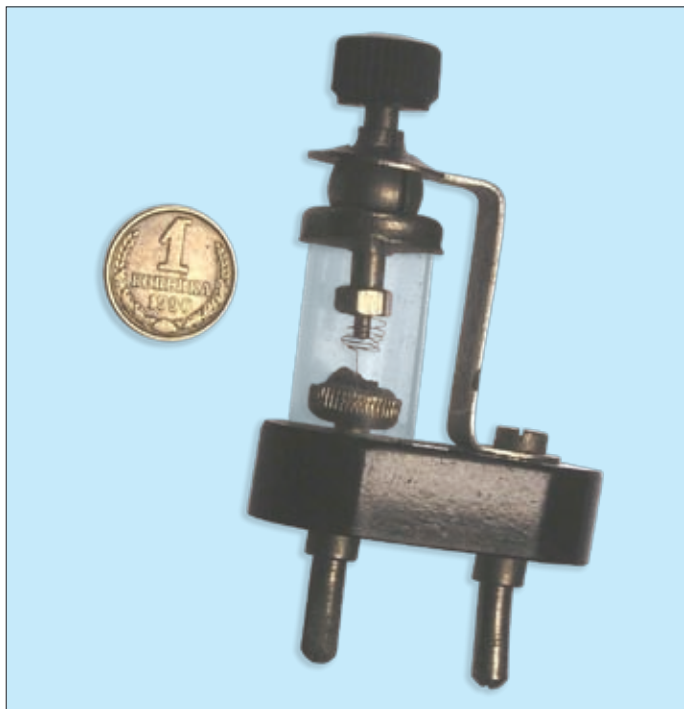
да серебра при нагреве, но не смог его объяснить. Сопротивление известных в то время проводников электрического тока с повышением температуры увеличивалось. И проводники с выявленным Фарадеем эффектом называли "плохими".

Прошло 40 лет. У.Смит открыл явление уменьшения сопротивления селена при его освещении светом. Такое поведение "плохого" проводника тоже никто объяснить не сумел. Год спустя член Берлинской Академии наук, впоследствии лауреат Нобелевской премии, Карл Ф.Браун обнаружил одностороннюю проводимость у некоторых сульфидов металлов. Его опыты по выпрямлению переменного тока в месте контакта свинца и пирита (минерал класса сульфидов) также не нашли объяснения. Зависимость тока от напряжения на контакте не подчинялась закону Ома!

Но эти явления существовали, и начались попытки их практического применения. В 1876 году У.Адамсон и Р.Дей изготовили первый фотоэлемент с запирающим слоем, генерирующий ток без внешнего электрического источника питания. Параллельно продолжались исследования новых эффектов. Член Национальной академии наук США Эдвин Г.Холл в 1879 году открыл гальваномагнитный эффект в проводнике с током, помещенном в магнитное поле. Теоретики тех лет могли объяснить поведение электронов в металлах. А вот для поведения "плохих" проводников в магнитном поле объяснений не было.

Впервые явление возбуждения тока в "плохом" проводнике было использовано в электросвязи. Изобретатель телефона А.Белл построил "фотофон", преобразующий звуковые волны в колебания отраженного луча света. В качестве приемника излучения Белл использовал селеновый фотоэлемент, в котором в зависимости от интенсивности освещения возбуждались звуковые колебания.

Первые исследователи выделили "плохие" проводники в один класс и назвали их полупроводниками. К ним стали относить материалы с удельной проводимостью в интервале от  $10^6$  до  $10^{12}$  Ом·см. В те далекие годы исследователи полупроводников имели дело с далеко не чистыми материалами, не существовало и элементарной теории их строения. Так, эффект выпрямления электрического тока в месте контакта ме-



**Рис. 1. Промышленный детектор на кристалле галенита (PbS)**

талла с полупроводником сначала считали термическим явлением. И только в 1906 году Г.Пирс доказал электрическую природу выпрямления тока. Его работы натолкнули исследователей на идею использования эффекта выпрямления тока для детектирования сигналов. Эта задача настоятельно требовала решения в связи с развитием радиосистем связи. В первых детекторах радиоволн использовались точечные контакты полупроводника (карбида кремния, теллура, цинкового халькопирита, галенита и др.) с металлическим острием (рис.1). Исследователи окончательно установили электрическую природу явления выпрямления тока, однако дать картину физических явлений в контакте металл-полупроводник никто не смог. Полупроводниковые кристаллические детекторы выпрямляли радиочастотные сигналы, но не усиливали их.

В начале XX века стали бурно развиваться электровакуумные приборы, которые могли и детектировать электромагнитные волны, и усиливать их. Наряду с интенсивными исследованиями в области вакуумной электроники шел поиск теоретического объяснения загадок полупроводников. На эти же годы приходится развитие и становление квантовой механики. Экспериментаторы выявили множество явлений, требующих объяснений. И теоретики не могли долго оставаться в стороне.

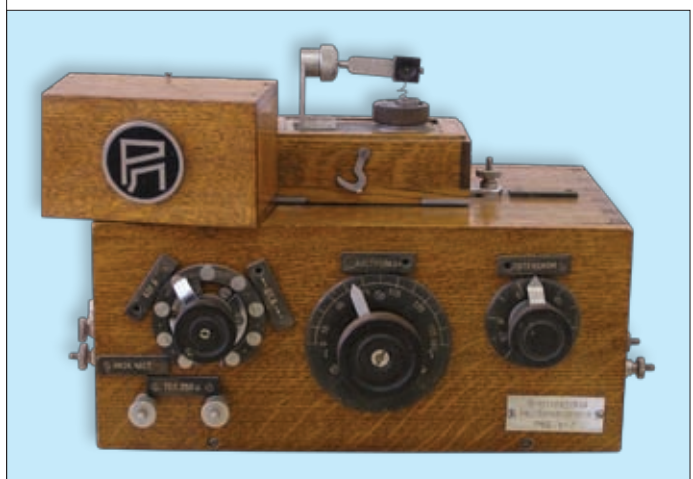
Эксперименты же продолжались. В 1952 году наш соотечественник О.В.Лосев, изучая свойства кристаллического детектора, обнаружил падающий участок в его вольт-амперной характеристике. Лосеву впервые удалось создать детектор, способный детектировать и генерировать электромагнитные колебания, так называемый кристадин Лосева (рис.2). Он же первым открыл новое явление – свечение кристаллов карборунда при прохождении тока через точечный контакт. Ученый

объяснил это явление существованием некоторого "активного слоя" в детектирующем контакте. Вот если бы он назвал такой детектирующий контакт p-n-переходом!

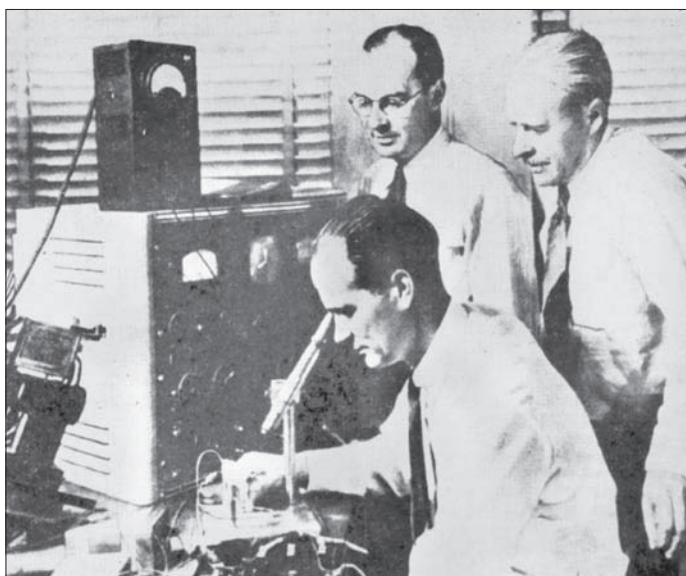
А тут и теория подросла. В 1926 году австрийский физик лауреат Нобелевской премии, иностранный член АН СССР и многих других академий Эрвин Шредингер предложил теорию поведения микрочастиц – волновую механику. С ее помощью началось формирование представлений об электронных ансамблях, зонной теории, валентности и т.п. Блестящие идеи Альберта Эйнштейна, Макса Планка, Нильса Бора и других ученых формировали квантовую механику, теорию поля, физику твердого тела и другие смежные научные дисциплины.

Одна из первых удовлетворительных теорий полупроводников была построена членом Лондонского королевского общества Аланом Х.Вильсоном. Он предложил зонную теорию, согласно которой энергетические состояния электронов в твердом теле формировали непрерывные зоны. Сложившееся в те годы представление о структуре твердого тела привело к введению понятия "дырки" – положительно заряженных носителей, которые вели себя подобно электронам, характеризовались подвижностью и определяли плотность тока. Термин "дырочная проводимость" впервые ввел советский физик член-корреспондент АН СССР Яков Френкель. Немецким физиком Вальтером Шоттки экспериментально были выявлены полупроводники двух типов – "избыточные" и "дефектные". К избыточным он отнес окислы металлов с отрицательным значением Холловского напряжения. Ныне их называют полупроводниками n-типа. Дефектными были названы полупроводники с положительным значением напряжения Холла (p-тип). Таким образом, в 1930-е годы удалось разгадать три из четырех загадок "плохих" проводников. Осталось объяснить физическую природу выпрямления тока в контакте металл-полупроводник.

К этому времени удалось экспериментально получить слиток кремния, проводимость которого с одной стороны была электронной (p-типа), а с другой – дырочной (n-типа). Вехой в истории науки стал 1935 год, когда сотрудник фирмы Bell



**Рис.2. Кристадин Лосева**



**Рис.3. Создатели первого транзистора: У.Браттейн (сидит), Д.Бардин и В.Шокли**

Telephone Labs Рассел Оль вырезал из середины такого слитка образец, содержащий р-п-переход — основу современных дискретных диодов, транзисторов и сверхбольших интегральных микросхем. В конце 1930-х годов советский физик академик украинской Академии наук Александр Сергеевич Давыдов, член Лондонского королевского общества физик Невилл Ф.Мотт и немецкий физик Вальтер Шоттки независимо друг от друга показали, что вблизи границы полупроводниковых материалов электронного и дырочного типов проводимостей формируется область, обедненная носителями заряда. Ток через р-п-переход свободно проходит лишь в одном направлении, а сопротивление его зависит от направления тока. А.Давыдов обратил внимание на роль, которую играют в выпрямлении тока неосновные носители — дырки в полупроводнике с электронной проводимостью и электроны в дырочном типе полупроводника. Разработанная теория выпрямления тока в области контакта материалов разного типа проводимости получила блестящее экспериментальное подтверждение. Таким образом, была решена последняя загадка "плохих" проводников.

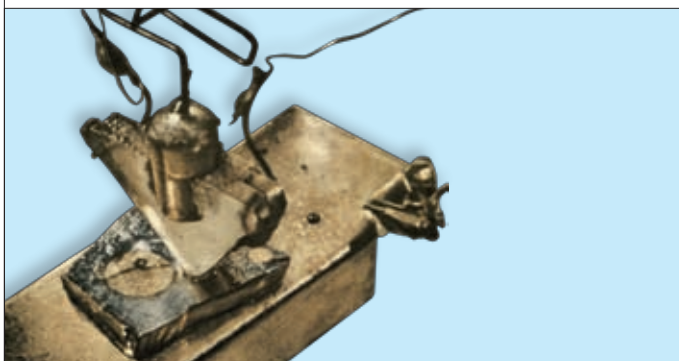
### ПЕРВАЯ ТРАНЗИСТОРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

Развитие радиолокации в 30–40-е годы прошлого века ставило перед промышленностью задачу создания мощных источников высокочастотной энергии, детекторов СВЧ-диапазона. Появились первые ламповые электронно-вычислительные машины, отличавшиеся крайне низкой надежностью. Технология получения чистых полупроводниковых монокристаллов р- и п-типов, а также формирования р-п-переходов позволила создать полупроводниковые детекторы, превосходящие по своим параметрам ламповые аналоги. Но требовался и полупроводниковый усилитель электрических сигналов, подобный усилительной лампе. А электроника всегда чутко реагировала на требования времени.

Первая попытка создания полупроводникового усилителя относится к 1925 году, когда профессор Лейпцигского университета Юлиус Лилиенфельд запатентовал устройство усиления электрических колебаний, выполненное на основе пленки сульфида меди. Затем немецкие физики Р.Хильш и Р.Поль в конце 1930-х годов на монокристалле бромида галлия создали прибор для управления током. Но эти приборы не нашли практического применения. В 1938–1939 годы американские физики, сотрудники фирмы Bell Telephone Labs, Вильям Шокли и Алан Холден пытались получить усилительный эффект путем изменения сопротивления угольных контактов к германию, на которые оказывалось давление с помощью кварцевого кристалла. Попытка тоже оказалась неудачной, но Шокли не сдавался. Он попытался создать полевою структуру путем нанесения пленок кремния и германия на изоляторы. Получить полевой эффект не удалось.

Научный сотрудник компании Bell Telephone Labs Джон Бардин объяснил неудачу Шокли присутствием в полевой структуре зарядов на поверхности полупроводника. Именно Бардин разработал теорию поверхностных состояний. Исследователи фирмы ставили задачу получения усилительного эффекта путем управления током обратно смещенного точечного контакта к поверхности полупроводника. Это оказалось возможным благодаря эффекту образования инверсионного слоя на поверхности полупроводника. Изменяя напряжение управляющего электрода, можно было бы управлять толщиной инверсионного слоя и, таким образом, изменять ток через точечный контакт. В зависимости от типа проводимости полупроводника управляющий сигнал имел определенную полярность, а ток, проходящий через точечный контакт, — определенное направление.

Эксперименты начал Уолтер Браттейн, исследователь фирмы Bell Telephone Labs. Он разместил точечный металлический контакт на поверхности пластины германия n-типа, погруженной в электролит. Браттейну удалось получить усиление на низких частотах. Совместные эксперименты Браттейна и Бардина показали, что если на электролит подать постоянное смещение, происходит анодное травление германия. При этом на поверхности германия образуется окисная пленка. Было решено использовать эту пленку вместо элект-



**Рис.4. Первый транзистор — точечный**

тролита. Взяв другую пластину германия, экспериментаторы окислили ее, смыли электролит и нанесли золотой контакт. И вновь они получили усиление тока, но при этом обнаружили, что изменение управляющего напряжения вызывает протекание тока в противоположном ожидаемому направлении. Выяснилось также, что поскольку вода смыла слой окисла, золотой контакт соприкасался непосредственно с германием. Ученые поняли, что у управляющего электрода не было инверсионного слоя, а электрод сам инжектировал избыточные носители. Носители протекали по точечному контакту (коллектору) и увеличивали ток в цепи. Поскольку контакт германия с золотом был получен случайно, результаты эксперимента были доложены членам исследовательской группы.

Бардин разработал конструкцию усилителя, а Браттейн тут же ее реализовал (рис.3). Прибор заработал сразу! Он имел два p-n-перехода, формируемых двумя металлическими усиками, которые контактировали с бруском поликристаллического германия, и был твердотельным аналогом электронной лампы (рис.4).

Коэффициент усиления прибора составлял ~100. Его максимальная частота была равна верхней границе звуковых частот. Имени у него еще не было. Сотрудники фирмы Bell Labs назвали его transistor. Название – синтез двух понятий: **transconductance** – крутизна вольт-амперной характеристики, известный параметр электронной лампы, и **transresistance** – переходное сопротивление, характеризующее полупроводник. Шел декабрь 1947 года.

Изобретение хранилось в строгом секрете. И только 1 июля 1948 года газета New York Times на предпоследней странице в колонке "Новости радио" сообщила: "Вчера фирма Bell Telephone Labs впервые продемонстрировала изобретенный ею прибор под названием "транзистор", который в некоторых случаях можно использовать в радиотехнике вместо электронных ламп. Прибор работал в радиоприемнике, схема которого не содержала обычных ламп. Было также показано его применение в телефонной системе и в телевизионном устройстве, управляемом с помощью приемника, расположенного этажом ниже. В каждом из этих случаев транзистор использовался в качестве усилителя, хотя фирма заявляет, что он может применяться и как генератор, способный создавать и передавать электромагнитные волны. Транзистор в виде небольшого металлического цилиндра длиной около 13 мм не содержит полости, из которой откачан воздух, сетки, анода или стеклянного корпуса, предохраняющего от попадания в прибор воздуха. Он начинает работу мгновенно, без задержки на разогрев, так как, в отличие от радиолампы, не требуется его накала. Рабочие элементы прибора состоят всего лишь из двух тонких проволочек, подходящих к куску твердого полупроводникового материала величиной с булавочную головку, припаянного к металлическому основанию. Материал, помещенный на металлическое основание,



**Создатель первого отечественного транзистора**  
**Александр Викторович Красилов**

усиливает ток, подводимый к нему по одной проволочке. Другая проволочка отводит усиленный ток". Эта новость потрясла научную общественность во всем мире.

А что же в СССР, передовой научной державе, способной ответить на любой вызов в области науки и техники? Аналогичные исследования велись в отраслевых и академических институтах страны. Авторами первого точечного отечественного транзистора были Александр Викторович Красилов и его дипломница Сусанна Гукасовна Мадоян. А.В.Красилов был в то время научным руководителем ряда научно-исследовательских работ в НИИ-160 (ныне – НИИ "Исток"), а студентка Московского химико-технологического института им. Менделеева С.Г.Мадоян выполняла дипломную работу по теме "Точечный транзистор". Лабораторный образец работал не больше часа, а затем требовал новой настройки. Это было в феврале 1949 года. Лабораторные образцы германиевых транзисторов были разработаны также в ФИАНе (Б.М.Вулом, А.В.Ржановым, В.С.Вавиловым и др.), в ЛФТИ (В.М.Тучкевичем, Д.Н.Наследовым и др.), в ИРЭ АН СССР (С.Г.Калашниковым).

Спустя год после первой публикации о транзисторе фирма Bell Telephone Labs наводнила ученый мир статьями и докладами, убедив военное ведомство не засекречивать прибор. Промышленности нужен был надежный транзистор, а не капризная в работе и настройке конструкция с проволочными усиками. В 1950 году Дж.Бардин и У.Браттэйн получили патент на точечноконтактный транзистор, а В.Шокли в 1951 году – на плоскостной прибор. Патенты посыпались, как из рога изобилия. Фирма Bell Telephone Labs в том же 1951 году выпустила плоскостной транзистор Шокли. Контролировать примеси еще не умели, и получить два одинаковых по характеристикам транзистора было трудно.

В 1954 году Б.Пфан изобрел технологию зонной очистки, позволившую удалять ненужные примеси полупроводника и

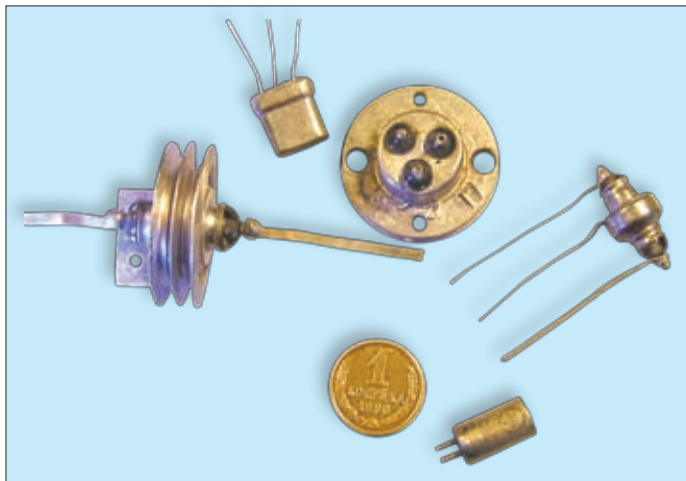


**Рис.5. Разработчики первых отечественных транзисторов: А.В.Красилов, Я.А.Федотов, С.Г.Мадоян, Н.А.Пенин, Ф.А.Щиголь. МИРЭА, 1997 год**

равномерно распределять нужные. Появилась возможность формировать сплавные р-п-переходы и начать промышленный выпуск транзисторов.

В 1953 году в СССР был создан первый НИИ полупроводникового приборостроения – НИИ-35, впоследствии названный НИИ полупроводниковой электроники, а затем НИИ "Пульсар". Лаборатория А.В.Красилова была переведена в НИИ-35. В этой лаборатории С.Г.Мадоян были получены первые сплавные германиевые транзисторы. Работы по развитию этого направления, расширению частотного предела и повышению отдаваемой мощности проводились в тесном сотрудничестве НИИ-35 с лабораторией С.Г.Калашникова в ЦНИИ-108 Министерства обороны. В этой лаборатории плодотворно трудились Н.А.Пенин, К.В.Якунина, Г.А.Кубецкий и другие видные ученые страны (рис.5). Тогда же в НИИ-160 (ныне НИИ "Исток") молодые специалисты Ф.А.Щиголь и Н.Н.Спиро ежедневно выпускали первые промышленные образцы точечных германиевых транзисторов типа С1-С4, а в НИИ-35 под руководством М.М.Самохвалова разрабатывалась групповая технология вплавления-диффузии примеси для получения тонкой базы ВЧ-транзисторов (рис.6).

В НИИ "Пульсар" в начале 50-х годов были созданы первые в СССР промышленные образцы точечных германиевых транзисторов П1, П2, П3. Их промышленный выпуск был освоен на ЛОЭП "Светлана" (Я.А.Кацман). Дискретные транзис-



**Рис.6. Первые отечественные промышленные транзисторы**

торы становились неотъемлемой частью аппаратуры различного промышленного и военного назначения, вошли в бытовую технику – так называемые транзисторные приемники, или просто "транзисторы", слуховые аппараты. Были разработаны плоскостные транзисторы на базе сплавной и диффузионной технологий. По сплавно-диффузионной технологии были изготовлены транзисторы типа П-401, которые использовались в передающей аппаратуре первого в мире спутника Земли (1954 год).

В начале 1960-х годов был создан второй полупроводниковый институт – НИИ-311 (сегодня НИИ "Сапфир"). Он специализировался в области создания полупроводниковых диодов.

Первая транзисторная революция, о которой так много говорили физики, свершилась! Мир вплотную подошел к порогу второй транзисторной революции.

## ВТОРАЯ ТРАНЗИСТОРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

Прошло всего семь месяцев со дня изобретения, а транзисторная теория уже существенно преобразилась. Разработчики пришли к более глубокому пониманию транзисторного эффекта, написали о нем статьи, подали заявки на патенты. Гордон Тил на фирме Bell Telephone Labs создал установку для выращивания легированных требуемыми примесями кристаллов. Ему удалось, меняя примесь в процессе выращивания слитка р-типа, получить тонкий слой германия п-типа и снова перейти к материалу с проводимостью р-типа. Был выращен многослойный кристалл, который разрезался на несколько стерженьков с р-п-р-структурой. После присоединения золотых проволочек к каждой из трех областей структуры формировался транзистор. Эти приборы характеризовались небольшими шумами и большей выходной мощностью, чем их точечные предшественники.

В 1952 году на фирме General Electric была разработана технология изготовления плоскостных транзисторов путем вплавления индиевых таблеток с противоположных сторон тонкой германиевой пластинки. Прибор получил название сплавного транзистора.

Транзисторы начали производить различные фирмы. Встал вопрос о физическом стандарте. Необходимо было определить тип корпуса, расстояние между выводами, рабочие характеристики устройств. Стандарт был разработан в 1953 году, когда военные изменили свое мнение о транзисторах как о приборах сугубо гражданского назначения.

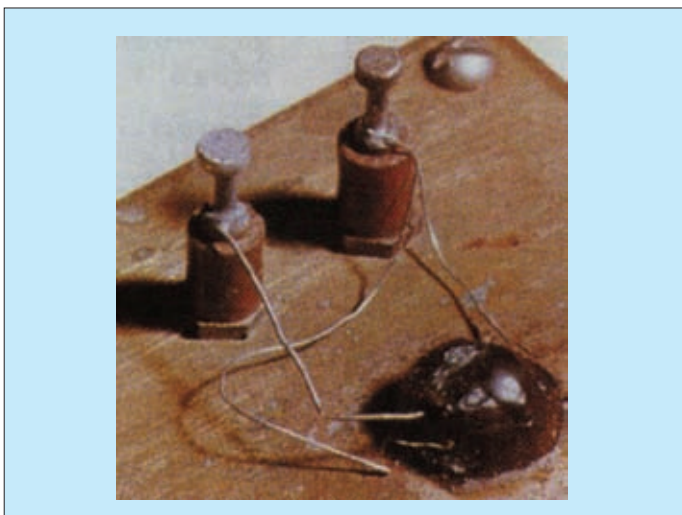
Каждый год радовал новыми типами полупроводниковых структур. Появились однопереходный транзистор, управляемый кремниевый выпрямитель, высокочастотный туннельный диод, точечные светодиоды.

Начало второй транзисторной революции положили молодые энергичные ученые, сотрудники Шокли: Ю.Клайнер, Д.Ласт, В.Гринич, Д.Герни, Ш.Робертс, Д.Бланк, Г.Мур и Р.Нойс, образовавшие компанию Fairchild Semiconductor. Первый их при-



**Рис.7. Первый планарный транзистор типа “бычий глаз”, положивший начало второй транзисторной революции**

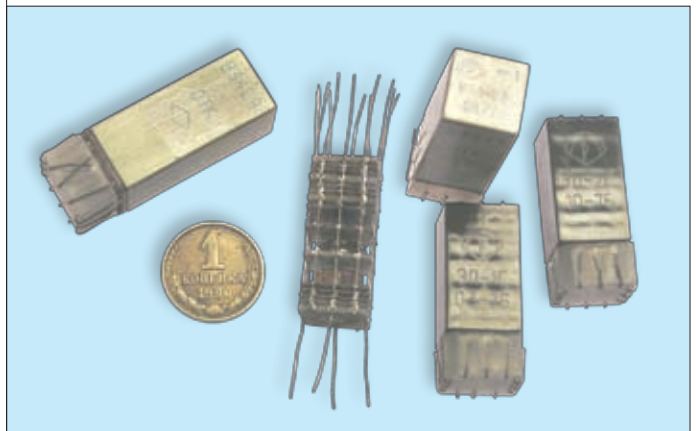
бор, изготовленный методом диффузии, был меза-транзистор. Его форма напоминала плоскогорье, и он мог работать на гигагерцевых частотах. Специалистами компании Fairchild с помощью разработанного планарного процесса формирования плоских структур был создан кремниевый интегральный планарный транзистор. Согласно этому процессу, область эмиттера создавалась путем диффузии примеси в базовую область, имеющую форму слезы. А базовая область в свою очередь формировалась в результате диффузии примеси другого типа в подложку, служащую коллектором (рис.7). Таким образом, впервые был отработан планарный процесс, основанный на использовании кремниевой подложки, формируемой поверх нее маски на основе диоксида кремния и операций диффузии. Именно кремний лег в основу всей микроэлектроники. Прежде всего потому, что он дешевле германия и в земной коре его более 27% по массе. К тому же на поверхности кремния можно получать естественный окисел — диоксид кремния, в котором легко формировать маску, требуемую для получения элементов прибора. Легируя кремний примесями через окна в окисле, специалисты фирмы сумели локально менять его проводимость. С помощью планарного процесса удалось создать прочные и надежные плоскостные транзисторы (рис.8). Формирование контактов к трем транзисторным областям осуществлялось не приваркой вручную



**Рис.8. Первый плоский транзистор**

проволочных выводов, а путем нанесения на открытые области эмиттера, базы и коллектора металлических электродов. Надо сказать, что при всех достоинствах этой технологии, характеристики транзисторов имели большой разброс, прежде всего из-за разброса параметров исходного материала.

В июне 1960 года сотрудники фирмы Bell Telephone Labs разработали новый технологический процесс, основанный на создании транзисторных структур в эпитаксиальном слое, выращенном на монокристаллической кремниевой подложке. В этом случае характеристики приборов уже не зависели от материала подложки. Это позволяло изготавливать транзисторы с тонкой областью базы и низким сопротивлением коллектора на достаточно толстой прочной подложке. Такие приборы могли работать на высоких частотах с большой выходной мощностью.

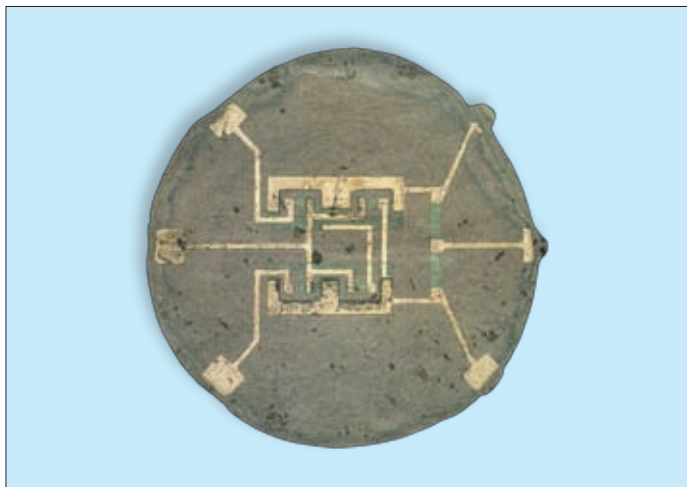


**Рис.9. Первые попытки интеграции твердотельных приборов: этажерки**

Исследования в области полупроводников не успевали за потребностями промышленности. Объем выпускаемых транзисторов рос, но насытить рынок не удавалось. Одной из причин был весьма трудоемкий способ сборки транзисторных структур. Только в компьютерах тех лет насчитывалось свыше 25 тыс. транзисторов и еще около 100 тыс. диодов. Спрос на компьютеры рос, а технология производства и сборки транзисторов была очень трудоемкой. Ведь каждая транзисторная структура требовала приварки выводов и герметизации в корпус. Разработанная высокопроизводительная групповая технология производства транзисторных структур упиралась в технологию штучного корпусирования транзисторов!

Было предложено два решения этой технологической задачи. Одно из них заключалось в креплении транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и индуктивностей на отдельных платах, которые затем монтировались в модули. Получалась своеобразная этажерка, на каждой полке которой находился определенный элемент электрической схемы (рис.9). Этот путь оказался тупиковым.

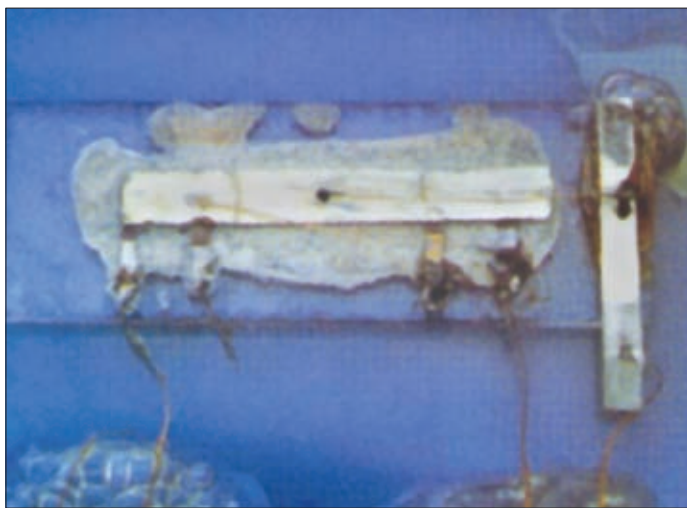
Вместе с тем, ряд разработчиков транзисторных структур не видели смысла в разделении пластины на отдельные кристаллы с транзисторами, которые после корпусирования



**Рис. 10. Первая промышленная интегральная схема: триггер**

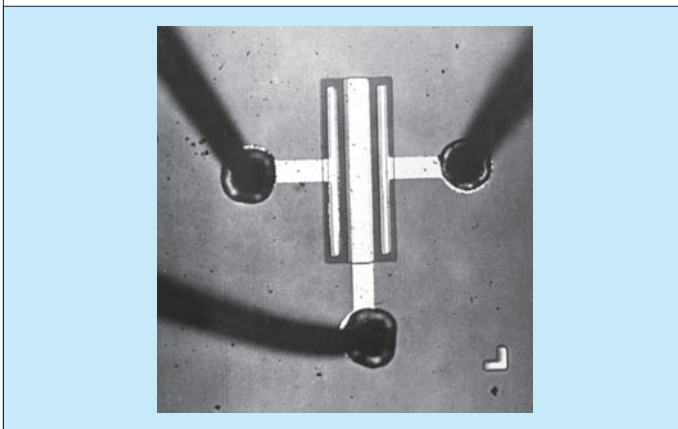
устанавливались в создаваемые электронные схемы. А не проще и не технологичней соединять транзисторы в единую схему прямо на пластине? Двое ученых независимо друг от друга дали положительный ответ на этот вопрос. Джек Сент-Клер Килби, занимаясь на фирме Texas Instruments вопросами миниатюризации, в том числе разработкой микромодулей для средств связи военного назначения, стал автором концепции создания на одной полупроводниковой пластине транзисторов, резисторов (используя омические свойства кремния) и конденсаторов (на базе обратно смещенных р-п-переходов). Сначала Килби изготовил макет на дискретных элементах, соединенных золотыми проволочками. В начале 1959 года на кристалле монокристаллического германия ему удалось сформировать схему триггера (рис.10). Килби подал заявку на патент на создание "твердотельной схемы" (Solid-State Circuit). В 2000 году он был удостоен Нобелевской премии по физике за основополагающие работы в области информационных и коммуникационных технологий.

В это же время научный руководитель компании Fairchild Semiconductor Роберт Н. Нойс искал способы формирования на полупроводниковом кристалле интегрированных диффузионных или напыленных резисторов. Он исследовал методы



**Рис. 11. Первая твердотельная схема**

изоляции приборов на кристалле с помощью обратнo смещенных р-п-переходов и соединения элементов друг с другом путем осаждения металлических контактов через окна в окисной пленке и нанесения металла на ее поверхность, т.е. способы создания интегральных схем (Integrated Circuits). 25 апреля 1961 года Р.Нойсу (впоследствии – один из основателей корпорации Intel) был выдан первый патент на интегральную схему. Компания Texas Instruments заимствовала метод осаждения металлических межсоединений, предложенный Р.Нойсом, и уже в марте 1960 года выпустила первую интегральную схему, предназначенную для военной аппаратуры (рис.11). К концу 1961 года фирма поставила ВВС США небольшой компьютер с полупроводниковым запоминающим устройством емкостью в несколько сот бит. Фирма Fairchild к концу 1961 года также стала выпускать коммерческие интегральные схемы в достаточных объемах. Появилась возможность объединения транзисторов, диодов, резисторов и конденсаторов на одном кристалле, другими словами, появилась возможность интеграции всей элементной базы радиотехнических устройств того времени.



**Рис. 12. Первый планарный МОП-транзистор**

1961 год дал старт многолетней гонке в области создания кремниевых интегральных схем, их широкому применению во всех отраслях человеческой деятельности. Справедливости ради упомянем о Джеффри В.А. Даммере, сотруднике Британского королевского радиолокационного управления, который еще в 1952 году на одной из конференций по электронным компонентам заявил: "С появлением транзистора и дальнейшим развитием работ в области полупроводников электронное оборудование будет представлять собой твердый блок, не содержащий соединительных проводов."

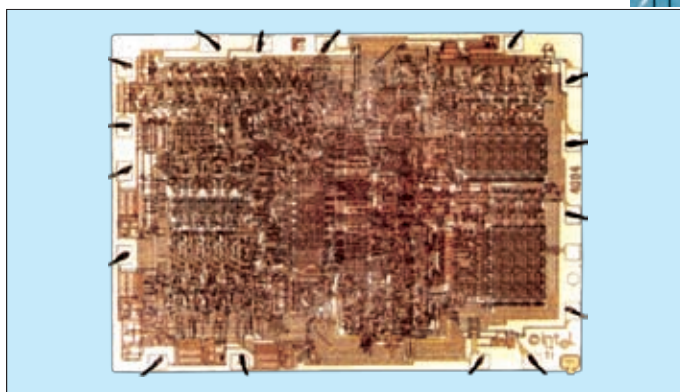
Блок будет состоять из слоев изолирующих, проводящих, выпрямляющих и усиливающих материалов, в которых определенные участки вырезаны таким образом, что могут выполнять электрические функции". Трудно понять, что имел в виду Даммер – микромодули или интегральные схемы.

Таким образом, новый этап в развитии микроэлектроники открыли пионерские работы Джека Килби и Роберта Нойса. Исследования начали разворачиваться лавинообразно.

В погону за место на рынке и прибылью включилось множество фирм. В начале 1963 года появились интегральные схемы на базе МОП-транзисторов (рис.12), резкий рост производства которых начался в конце 1960-х годов. К 1965 году интегральные схемы выпускали и продавали более 25 фирм. Многие компании обосновались в Кремниевой Долине (шт. Калифорния). Интересные разработки появлялись и в других странах. Так, интегральные схемы с инъекционной логикой были созданы одновременно в отделении фирмы IBM в ФРГ и на фирме Philips в Нидерландах.

В 1968 году Р.Нойс и Г.Мур покинули фирму Fairchild Semiconductor и образовали компанию Intel, которая сначала прославилась созданием МОП-транзистора с плавающим затвором, нашедшим широкое применение в стираемых репрограммируемых постоянных запоминающих устройствах (СРПЗУ). Затем специалистами компании была разработана первая в мире микросхема микропроцессора (рис.13). И с тех пор Intel – лидер в области производства этих схем с высокими параметрами.

В Советском Союзе микроэлектроника также развивалась невиданными темпами. В начале 60-х годов прошлого века руководство страны осознало, что без микроэлектроники страна безнадежно отстанет как в области технического перевооружения промышленности, так и в обеспечении высокого военного потенциала. На первом этапе в рамках Министерства электронной промышленности, возглавляемого А.И.Шокиным, полупроводниковая технология развивалась путем копирования и воспроизведения американского опыта, т.е. на основе так называемой "обратной инженерии". Не без труда добывались образцы кремниевых интегральных схем, которые копировались и воспроизводились на отечественных предприятиях. Это относилось не только к разработкам интегральных схем, но и к компьютерной технике. Такая стратегия имела свои достоинства, поскольку позволяла выигрывать время на разработку определенного типа интегральной схемы. Однако были очевидны и недостатки, связанные с повторением тупиковых путей развития.



**Рис.13. Микропроцессор Intel 4004, содержащий 2300 транзисторов, 1971 год**

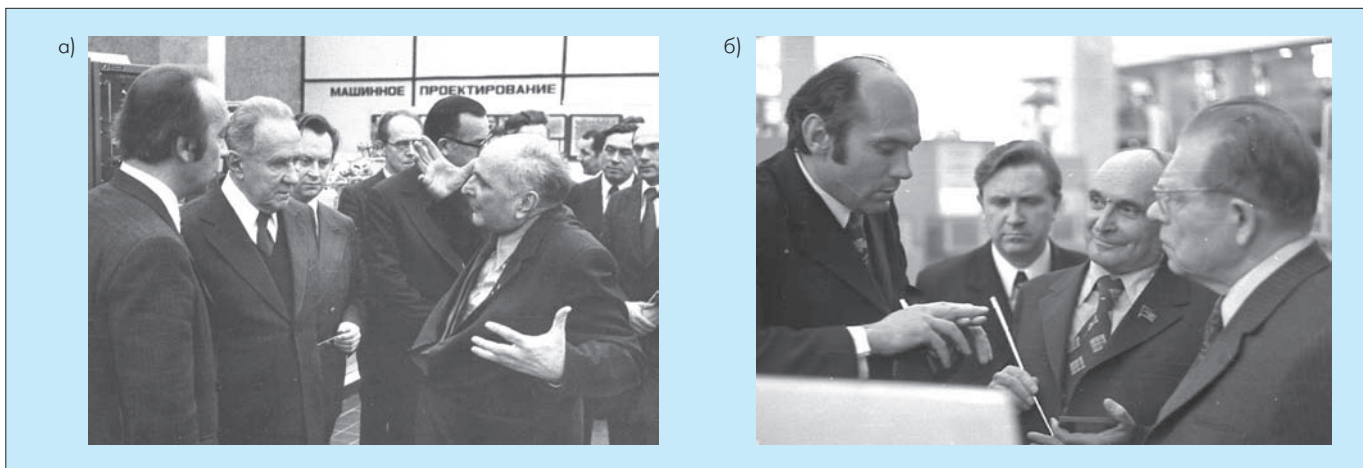
Тем не менее, микроэлектроника в Советском Союзе развивалась стремительно, и страна в этой области отставала только от США. Аналогом Кремниевой Долины США стал Зеленоград. На рубеже 70–80-х годов прошлого столетия отечественная микроэлектроника была близка по своим научным достижениям и техническим возможностям к статусу мирового лидера. Во многом такой результат был достигнут благодаря А.И.Шокину и его умению убедить правительство в необходимости всемерной поддержки отрасли. С этой целью А.И.Шокин организовывал научно-практические конференции и масштабные выставки по электронике, где и проводил "ликбез" для правительства, решал вопросы финансирования и материального обеспечения отрасли (рис.14).

Таким образом, свершилась и вторая транзисторная революция, которую ждали разработчики электронной аппаратуры!

Грядет ли третья транзисторная революция?

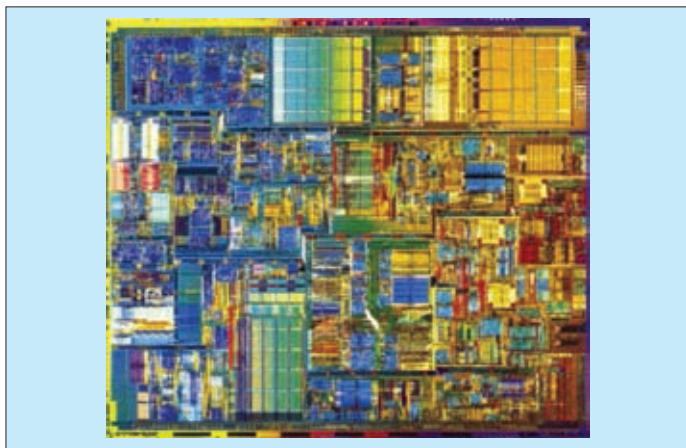
### **ТРЕТЬЯ ТРАНЗИСТОРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ**

В традиционной микроэлектронике существует замечательная тенденция, впервые описанная в 1964 году Гордоном Муром и получившая название закона Мура, – число транзисторов на кристалле удваивается каждые 24 месяца. Представив в виде графика рост производительности микросхем запоми-



**Рис.14. Картинки с отраслевых выставок по электронике в ЦНИИ "Электроника" (фото М.С. Лихачева). Министр А.И.Шокин убеждает Председателя Совета Министров СССР А.Н.Косыгина в необходимости закупки нового оборудования (а); Министр обороны СССР Маршал Д.Ф.Устинов вникает в тонкости работы фотоповторителя (б)**

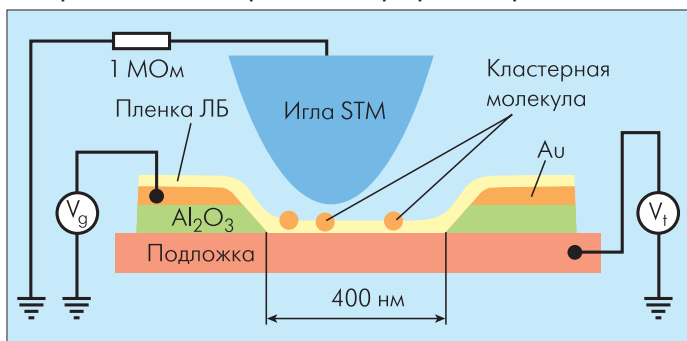




**Рис. 15. Микросхема Intel Pentium. 40 млн. транзисторов. 2000 год**

нающих устройств, Мур обнаружил, что новые модели микросхем появляются через более или менее одинаковые периоды (18–24 месяца) после выпуска их предшественников. По сегодняшний день этот закон не нарушается, и имеются все основания полагать, что в ближайшие 10 лет он будет выполняться. Динамика уменьшения топологической нормы выглядит так: 2,0 мкм – 1,0 – 0,8 – 0,6 – 0,35 – 0,25 – 0,18 мкм. Каждый шаг на этом пути сопровождался разработкой новых технологических процессов и серьезными капиталовложениями в производство. В 1995 году в развитие микроэлектроники в мире было вложено около 40 млрд. долл., что составляло четверть объема продаж ее продукции. В 2005 году объем продаж изделий микроэлектроники только в США превысил 200 млрд. долл.

В США проводятся несколько крупных программ в области микроэлектроники, в том числе программа Стратегической компьютерной инициативы (ASCI), программы Управления перспективных исследований МО (DARPA) [6] и др. В Европе создана программа "Развитие микроэлектроники европейского назначения". В Японии существуют межфирменные программы, проводимые при поддержке государства, а также государственный проект "Суперперспективные программы электроники". Программа фирм Южной Кореи предусматривает развитие производственной базы микроэлектроники. Резко стартовали Китай и Вьетнам, где проводятся программы расширения импорта технологических процессов с целью быстрого выхода в мировые экспортеры интегральных схем.



**Рис. 16. Схема одноэлектронного транзистора на основе единичной кластерной молекулы**

В России объем производства упал и продолжает падать. Объем продаж электронных приборов в России не обеспечивает окупаемости вложений!

Степень интеграции микросхем к 2000 году составила ~40 млн. транзисторов на кристалле (рис.15), а площадь кристалла увеличилась до 2,8 см<sup>2</sup> (примерно 7 мкм<sup>2</sup> для одного транзистора). Сегодня в мире более 100 заводов выпускают интегральные схемы с топологическими нормами 1,0–1,5 мкм, примерно 80 предприятий производят микросхемы с топологическими нормами 0,6–0,8 мкм, 25 – с нормами 0,5 мкм, 14 – с 0,35-мкм нормами и два – с топологической нормой 0,25 мкм. Уже работает завод, на котором освоено производство микросхем с 0,17-мкм топологическими нормами, на подходе – 0,12 мкм! А в лабораторных условиях ведется разработка технологий с 0,07-мкм топологическими нормами!

Это прорыв транзисторных структур в субмикронный диапазон. Характеристики элементов таких размеров уже достигают порога фундаментальных ограничений известных физических процессов, протекающих в транзисторе. Что же дальше? Одни специалисты, считая, что традиционные кремниевые структуры уже бесперспективны, ищут решения в хорошо забытых конструкциях (например, транзисторов с проникаемой базой, в которых, как и в вакуумных триодах, используется вольфрамовая сетка, встроенная в объем GaAs, а также транзисторов на горячих электронах), реализуемых на новых материалах с помощью новой технологии. Ряд исследователей разрабатывают нанотранзисторы, на базе которых предположительно будут построены наносхемы.

А часть исследователей развивают принципиально новые идеи создания одноэлектронных транзисторов, работающих по принципу "один обработанный электрон – один бит информации" и обеспечивающих сверхнизкие значения потребляемой мощности и рабочего напряжения, а также чрезвычайно высокую плотность размещения элементов электронных функциональных схем. При переходе к наномасштабам на первый план выходят квантовые свойства электрона, который может быть представлен волной, описываемой соответствующей волновой функцией. В результате электрон при столкновении с потенциальным барьером (формируемым диэлектриком) преодолевает его (туннелирует), даже если полная энергия электрона меньше потенциальной энергии барьера. Первоначально граница раздела между проводящей линией, по которой распространяются электроны, и диэлектриком (барьером) электрически нейтральна. При приложении к проводящей линии напряжения на границе раздела накапливается заряд. Накопление продолжается до тех пор, пока значение заряда не окажется достаточным для отрыва и туннелирования через барьер одного электрона. Процесс накопления заряда и отрыва электрона от границы раздела проводящей области и диэлектрика определяется балансом сил ку-

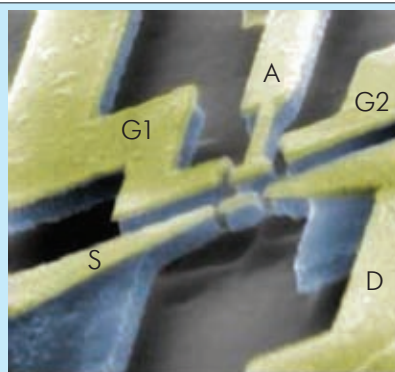
лоновского взаимодействия этого электрона с другими подвижными и неподвижными зарядами в металле. После туннелирования система возвращается в первоначальное состояние. При сохранении внешнего приложенного напряжения процесс повторяется. Таким образом, в такой структуре происходит перенос заряда одного электрона. На основе квантового явления, получившего название "туннельный эффект", и построен резонансный туннельный транзистор, представляющий собой двухбарьерную структуру на квантовых ямах. Потенциал ям и соответствующие резонансные условия контролируются третьим электродом. Частота переключения таких транзисторов достигает  $10^{12}$  Гц, что в 100–1000 раз выше, чем у лучших кремниевых транзисторов современных интегральных микросхем.

Электрон, проникший в область между барьерами (прозрачность каждого отдельного барьера для электрона мала), задерживается в ней, многократно отражаясь от барьеров. При достижении энергией электронов в потенциальной яме определенного дискретного уровня возникает резонанс, и вероятность туннелирования двойного барьера существенно возрастает. Одновременно при резонансе благодаря интерференции волн во внутренней области гасится волна, отражающаяся от двойного барьера. В результате волна (электрон), упавшая извне на двойной барьер, полностью проходит его. Ширина резонансной линии зависит от параметров квантово-размерной структуры. Туннелирование индивидуальных электронов можно контролировать потенциалом, приложенным к электроду, расположенному в середине двойного барьера. Исследователям удалось получить структуры, вольт-амперная характеристика которых имела участок отрицательного динамического сопротивления. Получены и структуры с логическими уровнями, формируемыми в результате кинетически неравновесного состояния электронов. На базе резонансных туннельных транзисторов могут быть созданы сверхминиатюрные сверхбыстродействующие интегральные схемы. Пока их нет.

Разработан действующий макет молекулярного одноэлектронного транзистора с металлическим затвором, который управляет туннелированием единичного электрона, поступающего с иглы сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) через расположенную на подложке кластерную молекулу (рис.16). Уже созданы цифровые и аналоговые схемы, в которых используются такие одноэлектронные транзисторы.

Разрабатываются транзисторы на основе переноса и регистрации электронных спинов.

Предложена идея и разработано устройство "механического" транзистора, способного "поштучно" передавать электроны из одной цепи в другую. На проводники такого "транзистора" (G1 и G2, рис.17) от генератора, сформированного на одной с ним подложке, подается регулируемое по частоте переменное напряжение. Роль транзисторного "перехо-



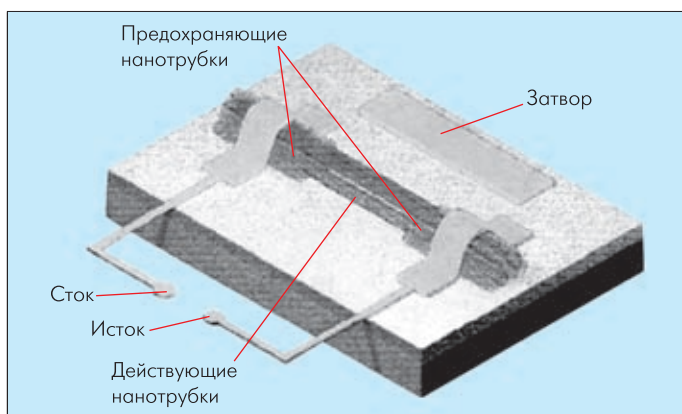
**Рис. 17. Фотография механического "транзистора", полученная с помощью электронного микроскопа**

да" играет один из двух молоточков на конце механического маятника А. Контакты с обеих сторон молоточка, выполненные с точностью до 10 нм, служат истоком (S) и стоком (D). Расстояние между ними – 300 нм. Переменный ток приводит маятник в действие. Маятник изолирован от всех контактов (G1, G2, S, D) и заземлен. Молоточек, находящийся между контактами генератора и участвующий в создании колебательных движений, с ними не соприкасается. Колебаясь, маятник ударяет молоточком в контакт S – исток. В результате туннельного эффекта в молоточек поступает один электрон. Удар молоточка в сток пересылает электрон дальше по цепи. И так до бесконечности.

При комнатной температуре и напряжении между стоком и истоком 1 В (маятник раскачивается напряжением 3 В) за один размах переносилось порядка 500 электронов. Подбрав оптимальную частоту генерации и значение напряжения, приложенного к "переходу", удалось создать условия для переноса лишь одного электрона. Но температурная зависимость эффекта переноса электрона оказалась достаточно высокой. Снижение рабочей температуры "транзистора" до 4К остановило прибор. Механическая жесткость маятника увеличилась, и он перестал колебаться. Тем не менее, перспективы у такого "транзистора" хорошие. Прежде всего потому, что такое устройство, вернее даже массив таких устройств, относительно легко создать на современном этапе развития полупроводниковой литографии (все контакты, а также сам маятник могут выполняться с помощью промышленной технологии).

С прикладной точки зрения, "механический транзистор" привлекателен для космической электроники, где радиоактивное излучение вносит большие помехи, вызывая спонтанные переходы в полупроводниковых материалах. Маятнику такое излучение не страшно. Механический одноэлектронный "транзистор" весьма перспективен для применения в обычной вычислительной технике. Никаких утечек, никаких тепловых шумов.

Новые идеи транзисторостроения связывают с появлением наноматериалов, в первую очередь углеродных нанотрубок. Транзисторы на нанотрубках (рис.18) выгодно отличают-



**Рис. 18. Схема нанотранзистора на углеродной нанотрубке**

ся от всех вышерассмотренных типов приборов меньшими размерами и энергопотреблением.

Процесс изменения в логической цепи состояния "0" или "1" в микроэлектронике, как правило, обеспечивается "переносом" через р-п-переход транзистора порядка 100 тысяч электронов. Для передачи одного бита информации такой подход выглядит несколько расточительным. К тому же, часть из этих сотен тысяч электронов создаст тепловой шум, другая часть, из-за туннельного эффекта, вообще "улетает" через подложку, не выполнив полезной работы. Еще одна часть просто рассеивается в окружающее пространство. Все перечисленные недостатки, как и многие другие, неотъемлемы для современных микроэлектронных устройств.

Ожидается, что при переходе к транзисторной наноэлектронике электрические свойства транзисторных структур существенно улучшатся. В этом случае даже один электрон сможет перенести один бит информации. Но при этом резко возрастают трудности реализации, связанные с проблемой "тирании межсоединений". И процесс обработки и хранения информации может быть основан на использовании волновых свойств электрона и перемещении единичного электрона за счет туннельного эффекта с учетом направления его спина.

Но это не все. Некоторые свойства электрона еще не реализованы в информационных системах. Впереди – пикоэлектроника...

Вспоминаются слова великого русского философа В.И. Ленина: "...электрон так же неисчерпаем, как и атом...". ○

Тематический выпуск, посвященный двадцатилетию транзистора. – Electronics, 1968, vol.41, №4.

Электроника: прошлое, настоящее, будущее./Под ред. чл.-корр. АН СССР В.И. Сифорова. – М.: Мир, 1980.

Тематический выпуск, посвященный двадцатилетию транзистора. – Электронная промышленность, 1998, №3–4.

Вестник. 90-летию со дня рождения основателя электронной промышленности А.И. Шокина посвящается. – Электронная промышленность, 1999, №3.

**Щука А.А.** Микроэлектроника вчера и сегодня.— В кн.: Электроника. Учебное пособие/Под ред. проф. А.С. Сигова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005.

**Викулов И., Кичаева Н.** GaN-технология. Новый этап развития СВЧ-микросхем. –ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №4, с.80–85.



"Американцы настолько законопослушны, что готовы платить за соблюдение Закона Мура"

*В.Перминов.*

Не желая отступить от великого принципа Закона Мура, корпорация Intel объявила об открытии первого из четырех кремниевых заводов с технологическим процессом, обеспечивающим разрешение в 45 нм. Первенцем стала фабрика Fab 32 в Чандлере (шт. Аризона), ориентированная на 300-мм пластины. Инвестиции Intel в это предприятие составили 3 млрд. долл. Фабрика будет производить новые "45-нм" процессоры Intel, включая семейство Penryn. Intel предполагает выпустить первый процессор по 45-нм технологии для серверов и рабочих станций уже к 12 ноября этого года.

Отметим, что Fab 32 – это уже шестая кремниевая фабрика компании Intel, работающая с 300-мм пластинами. Площадь ее чистых комнат составляет 17,1 тыс. м<sup>2</sup>, а общая площадь – почти 100 тыс. м<sup>2</sup>. На предприятии работают более 1000 сотрудников. Представители Intel подчеркивают, что Fab 32 – это одно из наиболее экологически чистых электронных предприятий. Так, на 15% снижено тепловыделение, в замкнутом цикле удается сохранить более 70% воды.

Фабрика Fab 32 в Аризоне – это только начало. Следующим 45-нм предприятием станет завод "D1D" в Хиллсборо (шт. Орегон), запуск которого должен состояться через несколько месяцев. Третья 45-нм фабрика – это действующее вот уже 27 лет предприятие Fab 11X, расположенное в Рио Ранчо (шт. Нью-Мексико). В его переоснащение под 45-нм технологию Intel вложит 1–1,5 млрд. долл. с тем, чтобы уже во второй половине 2008 года оно начало работать по новой технологии. Intel также инвестирует 3,5 млрд. долл. в свой израильский завод Fab 28 в Кириат Гат, который начнет выдавать на гора в первой половине 2008 года.

Новый технологический процесс Intel с разрешением 45-нм предполагает формирование транзисторов с металлическим затвором и оксидом гафния (обладающего высокой диэлектрической проницаемостью) в качестве подзатворного диэлектрика. В рамках 65-нм процесса Intel толщину традиционного подзатворного диэлектрика SiO<sub>2</sub> удалось снизить до 1,2 нм (примерно пять моноатомных слоев). Однако дальнейшее его утончение влечет чрезмерное возрастание токов утечки через подзатворный диэлектрик со всеми вытекающими последствиями, в том числе – к паразитному нагреву. Выходом является использование диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью, что позволяет увеличить толщину подзатворного диэлектрика, сохраняя управляющее напряжение таким же, как и у транзистора с SiO<sub>2</sub> под затвором. В качестве материала для таких диэлектриков используют соединения гафния – оксид гафния или (реже) силицид. Однако при этом возникает новая проблема – на оксиде гафния невозможно сформировать поликремниевый затвор. Да и с металличе-

скими затворами поверх этого материала все непросто. Поэтому немало сил было потрачено на разработку структуры металлических затворов, которые можно формировать поверх диэлектрика на основе соединений гафния.

По словам автора одноименного закона и одного из основателей Intel Гордона Мура, "Применение диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью вкупе с металлами в затворах – это крупнейшее изменение в технологии транзисторов с тех пор, как в конце 1960-х годов были предложены поликремниевые затворы". Эта технология позволяет радикально снизить токи утечки транзисторов, что открывает перед разработчиками и производителями захватывающие перспективы. Новая технология позволяет примерно вдвое увеличить плотность транзисторов на кристалле по сравнению с 65-нм процессом. Необходимая для переключения 45-нм транзистора мощность снижена примерно на 30%. Применение медных межсоединений и новых подзатворных диэлектриков увеличит производительность и снизит энергопотребление. Все это позволяет увеличить быстродействие процессоров, создавать более интегрированные СБИС, что неизбежно скажется на архитектуре процессоров и компьютеров, уменьшит их размеры, энергопотребление, уровень шумов и цену.

Немаловажно, что для формирования 45-нм элементов Intel использует сухой (не иммерсионный) фотолитографический процесс с источником с длиной волны 193 нм. Это означает выигрыш в себестоимости производства приборов по сравнению с иммерсионной фотолитографией, которую собираются использовать в своих 45-нм технологиях другие члены 45-нм клуба – компании IBM и AMD.

В отличие от Intel, IBM не собирается строить новые заводы для 45-нм технологии. Голубой гигант предполагает встроить новое 45-нм технологическое оборудование в свои уже существующие производственные линии, с минимальными изменениями в оборудовании и процессах, и за этот счет снизить себестоимость 45-нм технологии. Первым таким производством, переоснащаемым под 45-нм технологию, станет линия в Ист Фишкилл (шт. Нью-Йорк), которая уже в 2008 приступит к выпуску новой 45-нм продукции. По мнению руководства компании, именно экономически рентабельный переход на новую технологию – залог успеха полупроводникового производства.

Представители корпорации AMD также заявляют о намерении приступить к выпуску продукции по 45-нм технологии в середине 2008 года – заметим, примерно через полтора года после того, как эта компания промышленно освоила 65-нм процесс.

Таким образом, ведущие производители-разработчики технологий, не успев насладиться прелестями 65-нм процесса, уже внедряют 45-нм технологии. Ибо Закон Мура жил, жив и будет жить!

*И.Шахнович*

*По материалам Electronic News*