

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2000

Возможное становится реальным:
изобретение интегральных схем

Дж.С. Килби

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2000 г.)

PACS number: 01.60.+q

Автобиография

Поскольку Нобелевский комитет пожелал ознакомиться с моим жизнеописанием, полагаю, я должен начать с самого начала.

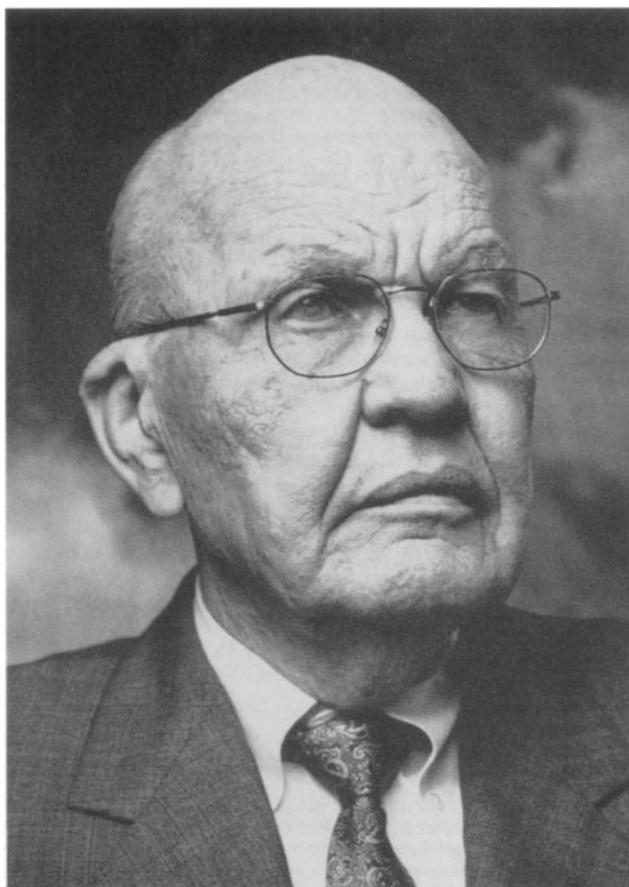
Я родился в 1923 г. в маленьком городке Грейт-Бенд (штат Канзас), который получил свое название потому, что он был построен в середине штата — там, где река Арканзас делает крутой поворот¹. Я вырос среди трудолюбивых потомков западных поселенцев Великих равнин.

Мой отец был управляющим небольшой электростанции, клиенты которой жили в малонаселенной сельской западной части штата Канзас. Когда я учился в школе, сильная зимняя буря повалила большую часть столбов, несущих телефонные провода и линии электропередачи. Отец тогда воспользовался радиолюбительской связью, чтобы установить контакт с районами, в которых клиенты оказались без телефона и электричества.

Отец просто старался сделать все возможное для поддержания своего дела и помощи людям, ну, а я был поражен тем, какой замечательной вещью является радиосвязь. Она пробудила мой интерес к электронике, и именно тогда я осознал, что это та область деятельности, которой я и хотел бы заниматься.

Я увлекался также и радиовещательными программами, особое удовольствие в 40-е годы доставляла мне джазовая музыка. Да и теперь в Далласе есть радиостанция, транслирующая джаз, и я всегда слушаю ее, если имею на это время.

После окончания средней школы я изучал электротехнику в Иллинойском университете. Большинство занятий было посвящено электроэнергетике, но мой давний интерес к электронике побуждал меня посещать



¹ Bend (англ.) — здесь излучина реки. (Примеч. ред.)

Дж.С. Килби (J.S. Kilby). Texas Instruments Inc., 12500 TI Boulevard, Dallas, TX, 75243–4136, USA

также лекции по электровакуумным приборам и радиофизике.

Я окончил университет в 1947 г. — за год до того, как компания Bell Labs объявила об изобретении транзистора. Это изобретение, с одной стороны, могло сделать

© The Nobel Foundation 2000

© Перевод на русский язык — Российская академия наук, "Успехи физических наук" 2002

бессмысленным мое изучение вакуумных приборов, а с другой, — открывало большие возможности для применения моих знаний в области физики.

Следуя своим интересам, сформировавшимся еще в Грейт-Бенд, я поступил на предприятие в Милуоки (штат Висконсин), изготавливающее детали для радиоприемников, телевизоров и слуховых аппаратов.

Работая в Милуоки, я стал посещать вечерние занятия в Висконсинском университете, чтобы получить степень магистра по специальности "электротехника". Работать и одновременно посещать занятия было трудно. Но я смог с этим справиться, и выигрыш стоил моих усилий.

В 1958 году мы с женой переехали в Даллас (штат Техас) и я начал работать в корпорации Texas Instruments (TI). TI была единственной компанией, которая предложила мне работу над миниатюризацией электронных устройств практически на полный рабочий день. Как оказалось, это было достойной целью.

Доказав возможность создания интегральных схем, я продолжал работать, возглавляя группы, создававшие первые системы для военного применения и первые встроенные интегральные схемы для компьютеров. Я руководил также группами, которые создали первый микрокалькулятор и термографический (тепловой) принтер, в дальнейшем использовавшийся в портативных терминалах ввода данных.

В 1970 году я на время покинул TI, чтобы заняться совсем другими делами. Одна из проблем, над которой я работал в то время, была связана с использованием кремниевой технологии для превращения солнечной энергии в электрическую.

С 1978 по 1984 гг. я работал в основном на факультете электротехники в Texas Agricultural and Mechanical University в качестве почетного профессора. "Почетным" я выглядел только со стороны, в действительности профессорские обязанности не отнимали у меня слишком много времени. Зато у меня было время для научных исследований, работы со студентами и коллегами над различными проектами.

Формально в 80-е годы я ушел из TI, но при этом продолжал и сейчас продолжаю активно сотрудничать с этой компанией.

На протяжении моей карьеры я был удостоен Национальной медали за научные заслуги² и включен в число изобретателей, представленных в Национальной галерее славы (National Inventors Hall of Fame). Я испытываю некоторое смущение, видя свое имя рядом с именами таких выдающихся деятелей, как Генри Форд, Томас Эдисон или братья Райт, и глубоко признателен за эти и другие почетные награды.

Присуждение Нобелевской премии по физике было для меня абсолютно неожиданным, но очень приятным сюрпризом. Я узнал о своем награждении рано утром, когда собирался выпить чашку кофе.

Весьма приятно было узнать, что Нобелевский комитет оценил и прикладную физику, тогда как ранее премии присуждались в основном за фундаментальные исследования. С моей точки зрения имеется некий симбиоз, основанный на использовании результатов фундаментальных исследований для создания новых инструмен-

тов, которые, в свою очередь, позволяют получить совершенно новые фундаментальные результаты. Интегральные схемы — прекрасный пример такого симбиоза. Независимо от того, являются ли исследования прикладными или фундаментальными, мы все, как сказал Исаак Ньютон, "стоим на плечах гигантов". Я благодарен тем первопроходцам, которые были до меня, и восхищаюсь теми, кто следует за мной.

Присуждение Нобелевской премии по физике за работу сорокалетней давности — это, судя по всему, уникальный случай. Как я отметил в своей лекции, к моменту изобретения мною интегральных схем уже было предпринято много попыток решить проблему миниатюризации другими способами. Человечество в конце концов решило бы эту проблему, но именно мне довелось оказаться первым человеком, владеющим в нужный момент времени плодотворной идеей и необходимыми ресурсами.

Я хочу назвать еще одного человека, оказавшегося "в нужное время в нужном месте", а именно, Роберта Нойса (Robert Noyce), — моего современника, работавшего в Fairchild Semiconductor. Несмотря на то, что каждый из нас шел своим собственным путем, мы интенсивно работали вместе над внедрением интегральных схем в промышленность и получением коммерческого успеха. Если бы он был жив, я уверен, мы разделили бы честь этой награды.

Теперь, когда я на пенсии, я лишь время от времени консультирую различные промышленные или государственные проекты, в основном в области полупроводников. Я также являюсь членом совета директоров одной-двух компаний.

Меня часто спрашивают, чем я больше всего горжусь. Конечно, интегральные схемы занимают первое место в списке моих приоритетов. Я очень горжусь также моей замечательной семьей. У меня две дочери и пять внуков, так что можно сказать, что семейство Килби специализируется на девочках.

Я достиг того возраста, когда молодые люди часто обращаются ко мне за советом. Я могу с полной уверенностью сказать, что электроника — действительно замечательное поле деятельности, и я продолжаю получать от нее удовольствие. Эта область быстро развивается, и возможностей для открытий впереди столько же, сколько их было, когда я окончил школу. Мой совет — выбирайте это направление и начинайте работать.

PACS numbers: 01.30.Bb, 85.30.-z, 85.40.-e

Нобелевская лекция

Благодарю вас за дружеское представление и приветствие. Для меня большая честь разделить Нобелевскую премию по физике и выступить сегодня перед вами. Название моего сегодняшнего доклада — "Возможное становится реальным: изобретение интегральных схем".

В 1958 году, когда я изобрел интегральную схему, электроника уже была весьма перспективной областью. Однако в то время никто, и я в том числе, не мог вообразить, что удастся сделать людям с помощью этих интегральных схем.

² Джек Килби был награжден этой медалью в 1969 г. с формулировкой "За оригинальные идеи и важный вклад в создание и применение интегральных схем". (Примеч. перев.)

Чарльз Таунс (Charles Townes) получил Нобелевскую премию за работы в области технологии лазеров, и он так описал свои ощущения: "Это примерно то же, что сказал бобер кролику, когда они смотрели на дамбу Гувера³: "Нет, это не я ее построил, однако она основана на моей идее". Я сейчас чувствую то же самое.

По своей сути интегральные схемы, как, впрочем, и все электронные устройства, предназначены для управления потоками электронов с целью заставить электричество выполнить сложную работу. Укращением электричества была занята длинная шеренга ученых — от Вильяма Гильберта (William Gilbert), который 400 лет тому назад ввел в обращение само это слово, до Томаса Эдисона, создавшего в восьмидесяти годах XIX века один из первых промышленных электрических генераторов.

Развитие электронной индустрии явилось непосредственным следствием изобретения вакуумной лампы (рис. 1). Эти лампы, иногда называемые электронными, управляют потоками электронов в вакууме. Сначала их использовали для усиления сигналов в радиоприемниках и других звуковых устройствах, в результате чего уже в 1920-е годы радиовещание получило широкое распространение. В дальнейшем область применения электронных ламп постоянно расширялась, и в 1939 г. вакуумная лампа была впервые использована в качестве переключателя (триггера) в вычислительных машинах.



Рис. 1. Вакуумная лампа.

К концу Второй мировой войны стало ясно, что в ближайшее время высокая стоимость, большие размеры и низкая надежность вакуумных ламп станут препятствием для широкого применения электронных систем в коммерческих и военных целях. Эскадренный миноносец,

³ Дамба Гувера (Hoover Dam) — крупнейшая в США плотина на реке Колорадо высотой около 250 м. (Примеч. перев.)

построенный в 1937 г., имел на борту 60 вакуумных ламп. Бомбардировщик В-29, оснащенный, по-видимому, наиболее сложной по тем временам электронной системой, имел всего лишь около 300 вакуумных ламп. Почти все эти лампы были однофункциональными.

В то время интегрирование функций не было приоритетной задачей. Однако электронные системы быстро усложнялись. В системах послевоенных эсминцев 1952 г. постройки использовалось уже более 3200 электронных ламп, а компьютер ENIAC⁴ 1946 года был просто ламповым монстром. Он содержал более 17000 ламп, весил около 60000 фунтов, занимал 16200 кубических футов и потреблял 174 киловатта — эквивалент 233 лошадиных сил. На протяжении многих лет он был самым быстрым компьютером в мире.

Вакуумные лампы, очевидно, не способны были обеспечить дальнейший прогресс вычислительной техники. Новые системы, которые можно было разработать на основе имеющихся технологий, оказались бы слишком громоздкими и тяжелыми, потребляли бы слишком много энергии и нагревались бы так, что с ними нельзя было бы работать. И, поскольку все компоненты таких устройств пришлось бы собирать из десятков или сотен тысяч отдельных элементов, они были бы ненадежными и весьма сложными в управлении [1].

К середине 1950-х эти проблемы были ясны многим представителям промышленности, а многие ученые уже начали искать их решение. Главную роль в становлении электроники играла возможность ее применения в военных целях. Поэтому я считаю очень важной Нобелевскую премию мира: она отдает дань уважения людям, борющимся за мир во всем мире, когда электроника будет использоваться на благо человечества, а не для его уничтожения.

Как бы то ни было, военные и космические ведомства США первыми осознали необходимость уменьшения размеров электронных схем и оказали поддержку соответствующим проектам. Большинство проектов было направлено на миниатюризацию отдельных компонентов, и поэтому вся программа получила название программы миниатюризации. Все проекты имели общую цель: построение полностью интегрированных электронных схем.

Т.Р. Рейд как-то заметил, что создание электронной схемы схоже с построением предложения [2]. Оба объекта содержат набор стандартных элементов, каждый из которых выполняет свою собственную функцию: предложение состоит из существительных, глаголов и прилагательных, а электронная схема — из резисторов, конденсаторов, транзисторов и диодов (рис. 2). Используя различные соединения этих элементов, можно создавать фразы или схемы, которые решают различные задачи. За многие годы сформировались свои собственные способы изготовления каждого элемента.

Большой шаг вперед был сделан в 1948 г., когда фирма Bell Labs рассекретила транзистор. С появлением твердотельных компонентов конкуренция в области создания миниатюрных электронных схем обострилась.

⁴ Electronic Numerical Integrator and Computer — первая в мире мощная многоцелевая электронная вычислительная машина. Она была создана в одном из подразделений Пенсильванского университета в рамках секретного оборонного проекта США, известного под названием Project PX. (Примеч. перев.)

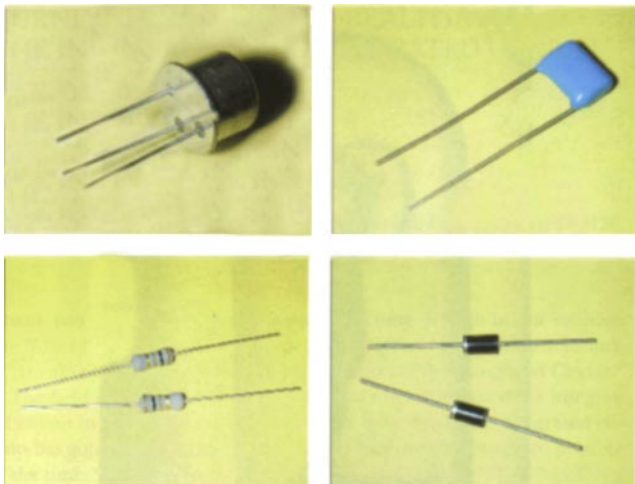


Рис. 2. Компоненты электронных схем.

Работа транзистора основана на возможности почти свободного движения электронов в кристаллических твердых телах, называемых полупроводниками. Полупроводники, например, кремний или германий, имеют электрические свойства, промежуточные между проводниками и изоляторами — отсюда и их название.

Электрические характеристики полупроводников можно изменять с помощью легирования, т.е. выверенного добавления примесей в заранее установленные области [3]. Примесь одного типа, внесенная в некоторую область образца из чистого кремния, создает в ней электроны, а примесь другого типа, наоборот, забирает электроны и создает дырки в другой области образца. И в том, и в другом случае проводимость исходного материала увеличивается.

Полупроводник, проводимость которого осуществляется свободными электронами, носит название материала n-типа. Полупроводник, в котором имеется проводимость за счет недостатка электронов, называют материалом p-типа. Простейший транзистор представляет собой "сэндвич" из этих материалов, обычно заключенный в керамический корпус (рис. 3).

Как и многие другие области техники, технология изготовления транзисторов постоянно прогрессировала. Первые транзисторы назывались точечными и по современным стандартам были весьма примитивными, но именно они обеспечили начальный прорыв.

В дальнейшем была развита технология изготовления транзисторов на p-n-переходах методом вытягива-

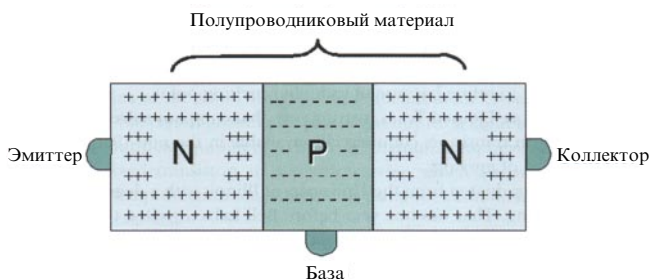


Рис. 3. Схема транзистора.

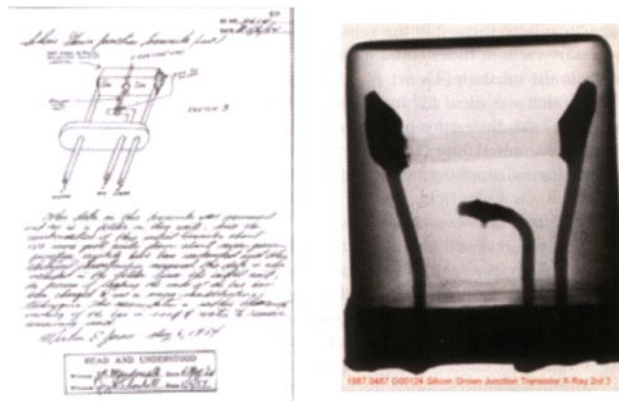


Рис. 4. Транзистор на p-n-переходе.

ния из расплава. Об этом транзисторе, схематически изображенном на рис. 3, 4, я еще буду говорить в этой лекции позже. Для изготовления такого транзистора выращивают монокристалл германия, причем легирование кристалла производится в процессе его роста.

Кристалл вытягивают из расплава, содержащего примеси n-типа, и затем в расплавленный германий добавляют примеси p-типа. Затем опять добавляют примеси n-типа. В результате получается кристалл n-типа со встроенным тонким слоем материала p-типа. Наконец, кристалл разрезается на маленькие блоки, каждый из которых представляет собой отдельный p-n-транзистор.

Последующие усовершенствования позволили получать основанные на p-n-переходах транзисторы с диффузионным распределением примесей, сплавные плоскостные транзисторы, транзисторы с поверхностным барьером и, наконец, мезатранзисторы и транзисторы планарного типа.

Самые первые транзисторы были сделаны из германия. Но кремний оказался более перспективным, так как мог работать при более высоких температурах, имел более высокое напряжение пробоя и позволял регулировать мощность. Проблема тогда состояла в том, что получать чистый кремний было труднее из-за его более высокой температуры плавления. Незадолго до моего прихода в Texas Instruments, компания уже разрешила эту проблему, а в середине 1950-х производство кремниевых транзисторов стало коммерчески выгодным. Но я забегаю вперед.

В 1947 году я закончил Иллинойский университет по специальности "инженер-электрик". Это было за год до того, как фирма Bell Labs рассекретила транзистор. Таким образом, начало моей карьеры пришлось на весьма увлекательное время. Хотя я посещал некоторые лекции по электронным вакуумным приборам, формально я получил образование по электротехнике.

К счастью, я занимался также радиофизикой, так как понимал, что это может оказаться более полезным, чем умение подключить трехфазный трансформатор! Оглядываясь назад, я радуюсь тому, что ходил на лекции по физике.

Я хотел заниматься электроникой частично из-за моего детского интереса. Мой отец был управляющим электростанции, обслуживающей большой сельский район в штате Канзас, и он использовал любительское

радио в своей работе. Мне это казалось очень интересным.

Когда я был подростком, во время зимней бури клиенты моего отца остались без электричества, и я увидел как радио и — шире — электроника в целом может воздействовать на судьбы людей, обеспечивая передачу информации, давая им возможность связи и сохраняя у них надежду.

После окончания университета, меня взяли на работу в Centralab — предприятие по производству электронных деталей для радиоприемников, телевизоров и слуховых аппаратов, расположенное в Милуоки. Это предприятие было весьма удачным для меня местом работы, так как там изготавливали гибридные схемы — раннюю реализацию принципов миниатюризации.

Предприятие Centralab разработало также устройства, получившие со временем название "толсто-плочные гибридные схемы". В процессе их изготовления серебряная краска наносилась на керамическую подложку или другую основу и таким образом получался проводник, а для получения резисторов использовалась типографская угольная краска. Маленькие конденсаторы вкрапливали в подложку, а большие конденсаторы просто прикрепляли. Вакуумные лампы вставлялись в специальные гнезда или припаивались непосредственно к подложке [4].

Centralab было для меня идеальным местом и в другом отношении. Я работал в составе маленькой группы и поэтому имел возможность наблюдать за всем процессом, начиная от разработки и производства, до поступления в продажу. В начале мои обязанности включали проектирование и окончательную инженерную реализацию усилителей слуховых аппаратов и пассивных схем для телевизоров.

Так как это было новое поле деятельности, изобретать было легко. Почти все, что заимствовалось из предшествующих разработок, здесь оказывалось новым и вполне могло патентоваться. В этот период я получил около дюжины патентов, наиболее полезные из которых были связаны с разработкой конденсаторов на основе впервые полученных восстановленных титанатов и техникой автоматической подгонки параметров резистора в процессе шлифовки.

В 1951 году фирма Bell Labs провела свой первый симпозиум по транзисторам и начала продавать лицензии на транзисторную технологию за \$25 000. В это время в Centralab заинтересовались производством транзисторов и купили лицензию.

У меня было ощущение, что транзистор указывает путь в будущее, и я хотел в этом участвовать. После изучения вопроса и подготовки, включающей и симпозиумы в Bell Labs, я возглавил группу из трех человек, задачей которой было изготовление транзисторов и их использование в продукции Centralab.

Мы сконструировали печь с водородной атмосферой и оборудование для вытягивания и зонной чистки кристаллов. По тем временам это была довольно сложная аппаратура, а сегодня подобный способ выращивания полупроводниковых кристаллов, в принципе, можно реализовать с помощью стандартного набора, который каждый может купить для своего ребенка.

Мы использовали нашу новую аппаратуру для изготовления германиевых сплавных приборов. Бескорпусные транзисторы монтировались в пластиковую

оболочку, что уже было новостью. Изоляция от окружающей среды достигалась путем использования керамической подложки, являющейся частью герметического корпуса.

В 1957 г. предприятие Centralab установило специальное оборудование для изготовления и поставки небольших партий усилителей для слуховых аппаратов и некоторых других устройств. Их производство стало даже доходным. Однако было очевидно, что скоро потребуются большие затраты, в основном для военного рынка, который становился перспективным. Военных интересовали кремниевые устройства, производство которых требовало дополнительных вложений.

В 1958 г. я решил поменять работу и стал искать новое место. Я вел переговоры с несколькими компаниями, в процессе которых обнаружил, что в компании IBM стали развивать технологию, схожую с используемой мною в Centralab при работе с толстыми пленками. Я считал, что специалисты компании совершили принципиальную ошибку, выбрав слишком маленькую подложку. Большой интерес проявила и компания Motorola, предложившая мне работать над моими собственными идеями по миниатюризации, однако неполный рабочий день.

Наибольшую заинтересованность проявила фирма Texas Instruments, предложившая мне работу над миниатюризацией на условиях полной занятости.

Я начал работать в TI в мае 1958 г., и в текущем году отпуск мне не полагался. Поэтому я работал в период массовых отпусков, когда 90 % сотрудников отдыхали. Я был предоставлен своим мыслям и своему воображению [5].

К тому времени я уже проанализировал информацию о ранних попытках миниатюризации. Основная масса существующих транзисторов не годилась для использования в интегральных схемах, так как их электроды находились на разных поверхностях, и не было реальной возможности их соединить.

В начале 1950-х годов англичанин Джеф Даммер (Geoff Dummer) из Royal Radar Establishment выдвинул идею, что всю электронику можно сделать в виде единого блока. При этом говорилось об использовании слоев, работающих в качестве усилителя, сопротивления и т.п. Электрические соединения можно было бы тогда реализовать простым вырезанием площадок в различных слоях [5]. Это было замечательное предложение. Однако Даммер не указал никакого способа, как все это сделать.

В 1956 г. Даммер подписал небольшой контракт с некой британской фирмой на создание подобного устройства. У них ничего не получилось, в частности потому, что они работали с технологией транзистора на р-п-переходе, упоминавшейся мной ранее, и затем пытались связать различные слои.

Хотя Даммер потерпел неудачу, он был на правильном пути. Объемное сопротивление самого полупроводника, и емкость р-п-перехода, создаваемого внутри него, можно было скомбинировать с транзисторами и создать завершенную схему из одного и того же материала.

Моя заслуга в том, что я взял эту идею и превратил ее в реальность.

Мои обязанности в TI изначально не были точно определены, и я мог выбрать собственный подход к

проблеме миниатюризации. Компания выпускала транзисторы, резисторы и конденсаторы. Я полагал, что стоит попробовать изготавливать все эти элементы из полупроводников, поскольку компания имела возможность производить дешевые полупроводниковые материалы.

Эта идея отличалась от всех прочих попыток того времени, в которых использовались три основных подхода.

Первая группа исследователей полагала, что основная проблема состоит в сборке деталей, изготовленных по отдельности и что, изготовив все детали одинакового размера и формы, они смогут автоматизировать процесс сборки. Вторая группа считала, что путь к успеху лежит через тонкие пленки. Это был более современный вариант технологии толстых пленок, использовавшийся в Centralab. В обеих технологиях применялись обычные транзисторы, которые соединялись с другими элементами.

Третья группа ратовала за более радикальный подход. Эти исследователи полагали, что современный уровень знания свойств материалов вполне достаточен для создания совершенно новых структур, способных выполнять все функции электронных схем. Кристалл кварца, который может выполнять функции как индуктивности, так и емкости, был их излюбленным примером устройства такого рода [6].

Мне было ясно, что одна из основных проблем микроминиатюризации обусловлена тем, что в рамках любого существовавшего тогда подхода предполагалось использовать различные материалы и различные технологии изготовления. Я начал обдумывать возможности уменьшения числа как тех, так и других.

Было очевидно, что и транзисторы, и диоды можно изготавливать из полупроводниковых материалов. Отдельные — или закрепленные поодиночке — резисторы и конденсаторы тоже можно делать из полупроводников. Однако это будет довольно дорого, и никогда они не будут работать так же хорошо как лучшие компоненты, изготовленные при помощи обычных технологий и из привычных материалов. Например, нитрид титана более пригоден для резисторов, а конденсаторы лучше делать из тефлона.

Поскольку все компоненты *можно было* изготовить из материала одного типа, то следовало рассмотреть возможность создать их непосредственно в *одном образце* этого материала. Соединив элементы должным образом, можно было получить завершенную электрическую схему.

24 июля 1958 г. я сформулировал в своем лабораторном журнале "Идею Монолита" (the Monolithic Idea), как ее в дальнейшем стали называть. В этой записи утверждалось, что элементы схемы, такие как резисторы, конденсаторы, распределенные конденсаторы и транзисторы, могут быть интегрированы в одну микросхему (chip) при условии, что они будут сделаны из одного материала (рис. 5).

Я быстро набросал конструкцию триггерной схемы, все элементы которой должны были изготавливаться из кремния. Резисторы использовали объемное сопротивление кремния, а конденсаторами были емкости р-п-переходов [7].

Я показал проект своему непосредственному начальнику Уиллису Адкоку (Willis Adcock) после его возвра-

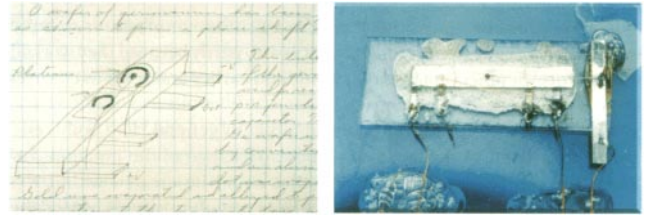


Рис. 5. Первая интегральная схема и ее описание в лабораторном журнале.

щения из отпуска. Он проявил искренний интерес, но не без доли скептицизма. Он потребовал доказательств того, что схема, изготовленная целиком из полупроводниковых материалов, будет работать.

Поэтому я начал с того, что построил схему из отдельных кремниевых элементов, начав с корпусного транзистора на р-п-переходе. Я сделал резисторы, нарезав маленькие стерженьки из кремния, и стравил их до нужного размера. Конденсаторы были вырезаны из кремниевых пластин для мощных транзисторов с диффузионным распределением примесей, которые были металлизированы с обеих сторон.

Собранное устройство было продемонстрировано Адкоку 28 августа 1958 г. К счастью, испытания подтвердили, что все элементы схемы действительно можно изготовить из полупроводниковых материалов.

Разумеется, это еще не была интегральная схема, поскольку я собрал ее из отдельных элементов. И я сразу же приступил к разработке действительно интегральной структуры.

В то время в TI успешно разрабатывались транзисторы на р-п-переходах и начиналась серьезная работа над структурами с диффузионным распределением примесей. Мощный кремниевый транзистор со сплавным эмиттером, а также несколько слаботочных германиевых приборов уже были в производстве. Эмиттерный и базовый контакты напылялись через металлические маски. Мезаструктуры вытравливались вручную с помощью масок из парафина.

Я получил несколько таких пластин, уже с диффузионным распределением примесей и с контактами в нужном месте. Выбрав схему, я смог отобрать две структуры, в которых можно было использовать имеющиеся на пластине контакты.

Первая схема, которую я попытался изготовить, была схема генератора с фазовым сдвигом — популярный в то время объект для демонстрации работы линейных схем. Техники Пат Харбрехт (Pat Harbrecht) и Том Ярган (Tom Yeargan) разрезали пластины на бруски размером приблизительно $0,12 \times 0,4$ дюйма. Соединение с объемными резисторами обеспечивалось металлическими контактами, припаянными к задней стороне брусков.

Парафин наносился вручную, чтобы закрыть мезаструктуры — одну для транзистора и другую, большую, для области с диффузионным распределением примесей, образующей распределенную резистивно-емкостную цепочку.

12 сентября 1958 г. было завершено изготовление первых трех генераторов этого типа. Когда было приложено напряжение, в первом из контуров возникла генерация на частоте 1,3 МГц.

Чтобы продемонстрировать возможность создания цифровых схем, аналогичным способом был изготовлен триггер. Он был испытан 19 сентября.

В начале октября мы приступили к разработке новой германиевой интегральной триггерной схемы. Это была первая схема, которая должна была быть создана "с нуля", полностью в одном куске полупроводника. Были использованы объемные резисторы, конденсаторы на р-п-переходах и меза-транзисторы. Изготовление первых работающих образцов было завершено в начале 1959 г. и уже в марте они были представлены на публичной презентации идеологии "монолитных твердотельных схем".

Вскоре после этого, Роберт Нойс (Robert Noyce) из Fairchild Semiconductor продемонстрировал преимущества планарного процесса роста с металлической разводкой по окислу. Некоторые другие, в частности сотрудники компании Westinghouse, также внесли свой вклад в становление интегральных схем.

Сейчас в это трудно поверить, но в 1959 г., когда мы начали пропагандировать наши достижения, а компания Fairchild рекламировала нововведения Нойса, эти идеи весьма активно критиковались.

Тогда не было очевидно, что концепция монолитного полупроводника окажется более продуктивной, чем другие идеи, упомянутые мною выше. Гордон Мур (Gordon Moore), Р. Нойс, некоторые другие, и я в том числе, в течение последующих пяти лет устраивали технические демонстрации на специализированных конференциях, обсуждая и доказывая достоинства различных систем миниатюризации.

Имелось три главных возражения [5]. Например, считалось, что практический выход пригодных изделий будет столь низким, что новая технология никогда не будет выгодной. Надо помнить, что в то время менее 10% всех изготавливаемых транзисторов работали должным образом.

Другая группа утверждала, что мы используем неподходящие материалы, поскольку лучшие резисторы и транзисторы делались тогда отнюдь не из полупроводников. Кроме того, истинные "транзисторщики" не хотели видеть на микросхеме свои элегантные устройства вперемешку с остальной "дребеденью". Эти сомнения было трудно опаривать, так как по сути своей они были обоснованными.

Наконец, многие сотрудники больших компаний, полагали, что если полупроводниковая технология окажется успешной, то проектировщики схем во всем мире останутся без работы. В действительности, конечно, занятость проектировщиков только возросла с течением времени, но их работа стала совсем другой, чем в эпоху транзисторов.

Ситуация в корне изменилась благодаря двум приоритетным военным программам 1960-х годов — подготовки полета космического корабля "Аполлон" на Луну и разработки ракеты "Минитмен". Использование интегральных схем в этих программах сослужило хорошую службу.

В 1964 г. несколько предприимчивых компаний стали использовать интегральные схемы в коммерческих изделиях. Чтобы помочь популяризации интегральных схем, я принял участие в работе группы TI, разрабатывающей первый микрокалькулятор (рис. 6).



Рис. 6. Портативный калькулятор.

Digital Equipment Corporation также была в числе первых потребителей интегральных схем, и к концу 60-х большинство инженеров признали их право на существование.

Когда наши идеи получили признание, к разработке интегральных схем подключились сотни, а затем и тысячи лучших инженеров мира.

В этой лекции я говорю, в основном, об обстановке, непосредственно предшествовавшей и сопутствующей изобретению интегральных схем.

Успехи интегральной электроники, достигнутые в последующие 40 лет, значительно превзошли все, что было достигнуто ранее, на протяжении 400 лет, прошедших после того, как Вильям Гильберт впервые употребил слово "электричество".

Благодаря работе сотен тысяч лучших инженеров мира, были найдены не только новые применения интегральных схем, но были значительно улучшены и методы их изготовления. Были предложены новые производственные процессы, разработаны более эффективные и надежные транзисторы, созданы сложные технологии компьютерного проектирования интегральных схем. Прогресс в этой области был весьма быстрым.

Если первые простейшие чипы состояли из десятка элементов, то к 1970 г. микросхемы включали до 10 тысяч элементов, а сегодня — до ста миллионов. Этот прогресс сопровождался быстрым уменьшением стоимости электронных устройств [8] (рис. 7).

В 1958 г. один транзистор стоил около \$10. Сегодня приблизительно за ту же цену можно купить микросхему

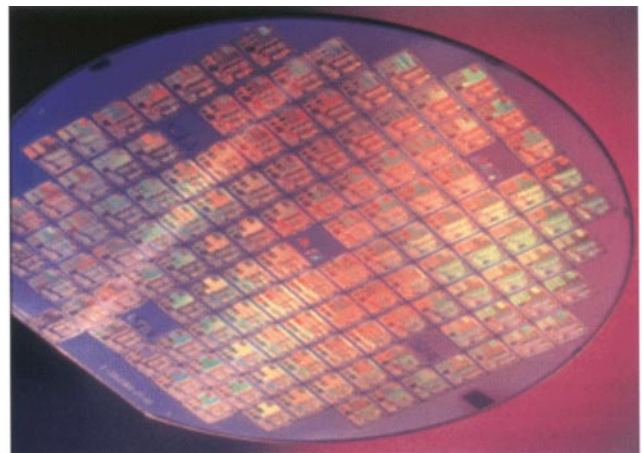


Рис. 7. Увеличение числа интегральных схем на пластине.

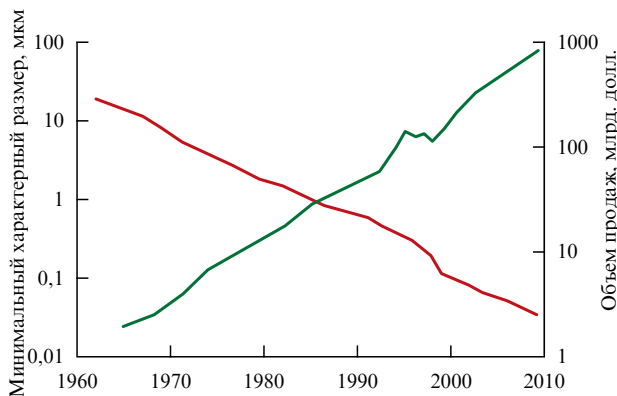


Рис. 8. Размеры уменьшаются, цены снижаются, рынок растет.

с более чем ста миллионами транзисторов. Цена будет почти наверняка уменьшаться и в будущем. Это уменьшение стоимости в сто миллионов раз значительно расширило область применения электроники (рис. 8).

Сегодня мощный персональный компьютер стоит менее \$1000. И он гораздо более эффективен, чем миллион 10-долларовых калькуляторов образца 1960-х годов.

Хотя интегральные схемы широко используются для военных целей, еще большее их количество применяется для улучшения жизни каждого человека [9]. Благодаря использованию интегральных схем, автомобили стали безопаснее и теперь выпускают в атмосферу меньшее количество вредных веществ. Радио и телевидение охватило практически весь мир, а сотни миллионов людей объединены сетью Интернет. Беспроволочная связь обеспечивает обмен информацией между людьми, как бы далеко друг от друга они не находились.

Я уверен, что впереди нас ждут еще более впечатляющие достижения.

Сегодня для включения/выключения транзистора необходимо приблизительно 1000 электронов. Ожидается, что к 2010 г. эту же операцию смогут выполнять всего 100 электронов. В прогнозе на 2010 г. предполагается появление материалов с большой диэлектрической постоянной.

Если этого и не произойдет, то просто в результате дальнейшей миниатюризации можно предсказать уменьшение количества необходимых электронов до десяти к 2010 г. и до одного электрона на транзистор к 2020 г. Это

значение, разумеется, является естественным физическим пределом.

Ряд подходов, инициированных подобными затруднениями, предполагают использование, среди прочего, "квантовых клеточных автоматов" (quantum-cellular automata) и молекулярных переключателей [10]. Многие полагают, что когда будут достигнуты эти нанометровые масштабы, химически созданные структуры заменят сегодняшние рисованные и вытравленные.

Я не знаю, как все это произойдет в действительности. Но абсолютно уверен, что инженеры во всех уголках мира продолжают совершенствовать интегральные схемы, а другие работают над системами, которые придут им на смену.

Я понимаю их чувства. В 1958 г. моя цель была простой: уменьшить стоимость и упростить сборку устройств, уменьшить их размеры и сделать их более надежными. Хотя я не чувствую себя ответственным за всю последующую деятельность в указанном направлении, я глубоко удовлетворен тем, что был свидетелем эволюции интегральных схем.

Я счастлив, что немного способствовал практической реализации человеческих творческих способностей.

Перевела с английского И.П. Ипатова
Научная редакция перевода Р.А. Суриса

Список литературы

1. Murphy B T, Haggan D E, Troutman W W "From circuit miniaturization to the scalable IC" *Proc. IEEE* **88** (5) 691 (2000)
2. Reid T R *The Chip: How Two Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution* (New York: Simon and Schuster, 1984)
3. Kilby J S "Silicon FEB techniques", *Solid /State Design* (July 1964)
4. Roup R R, Kilby J S, US Patent 2, 841, 508, issued July 1959
5. Kilby J S "Invention of the integrated circuit" *IEEE Trans. Electron Dev.* **ED-23** (7) 648 (1976)
6. "Molecular dendritic approach", WADD Technology Notes Westinghouse Electric Corp. Reports (February and July 1960)
7. Kilby J S "Semiconductor solid circuits", Presented at American Rocket Society 14th Annual Meeting (November 1959)
8. Nishi Y, Doering R (Eds) *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology* (New York: Marcel Dekker, 2000)
9. Doering R "Societal implications of scaling to nanoelectronics", in *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology: NSET Workshop Report* (Eds M C Roco, W S Bainbridge) (Arlington: NSET, 2001) p. 68
10. Jasinski J, Petroff P "Applications nanodevices, nanoelectronics, and nanosensors", in *Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report* (Eds M C Roco, S Williams, P Alivisatos) (Baltimore, MD: WTEC, Loyola College in Maryland, 1999) Ch. 6, p. 77

От редакции

Редакция журнала *Успехи физических наук* публикует переводы всех Нобелевских лекций по физике и иногда — Нобелевских лекций по химии. К сожалению, эти публикации происходят с существенным запозданием. Дело в том, что журнал *УФН* имеет право публиковать эти переводы только после выхода лекций на английском языке и официального поступления соответствующих материалов в редакцию журнала *УФН* от Нобелевского комитета.