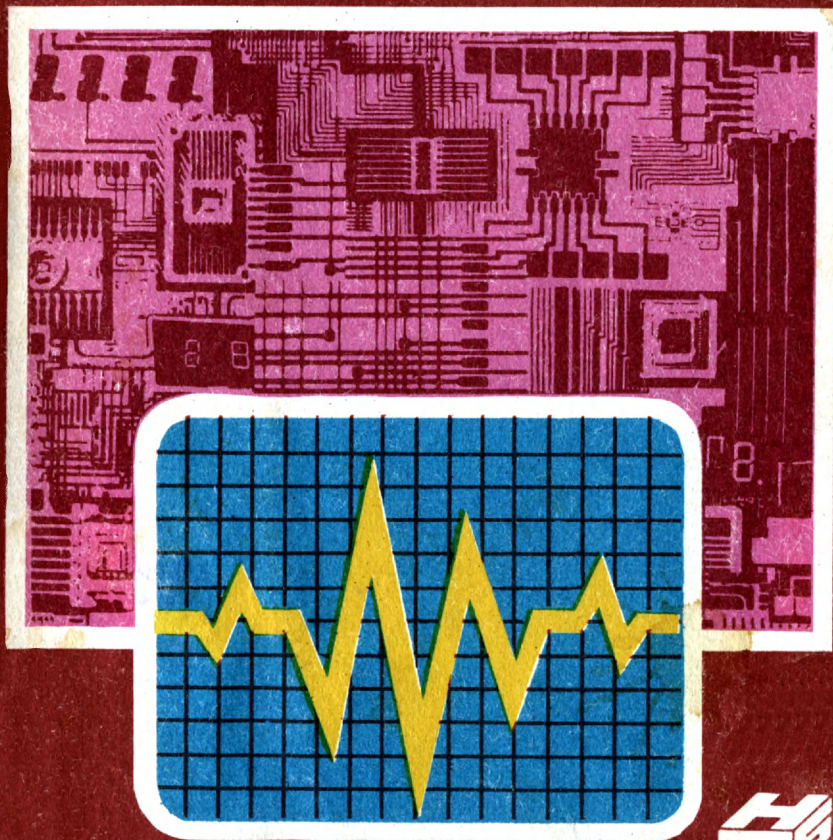


Я. А. ФЕДОТОВ

Инженер электронной техники



НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА ШКОЛЬНИКА

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА ШКОЛЬНИКА

Я.А. ФЕДОТОВ

Инженер электронной техники



МОСКВА .РАДИО И СВЯЗЬ. 1986

ББК 32.852
Ф 34
УДК 621.382

Федотов Я.А.

Ф 34 Инженер электронной техники.—2-е изд., доп.— М.: Радио и связь, 1986.—80 с.: ил. — (Научно-популярная библиотека школьника)

В популярной форме рассказано о значении электроники для научно-технического прогресса и о роли, которую играет в ней полупроводниковая электроника. На доступных школьнику примерах показана сложность этой области науки и техники, рассказано о современном радиоэлектронном предприятии и в чем заключается труд всего коллектива.

Книга будет интересна широкому кругу читателей: и юноше, выбирающему профессию, и студенту вуза, и специалисту смежных профессий, интересующемуся полупроводниковой электроникой.

Ф 2403000000-124
046 (01) -86 119-86

ББК 32.852

Р е ц е н з е н т: доктор техн. наук В.Н. Сретенский

Редакция литературы по электронной технике

Научно-популярное издание

ЯКОВ АНДРЕЕВИЧ ФЕДОТОВ

ИНЖЕНЕР ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Заведующий редакцией Ю. Н. Рысев

Редактор Г. Н. Астафуров

Художественный редактор Н. С. Шенин

Технический редактор И. Л. Ткаченко

Корректор Т. Г. Захарова

ИБ № 1059

Подписано в печать 22.05.86 Т-13917 Формат 84х108/32 Бумага офс.
№ 1 Гарнитура "Пресс-роман" Печать офсетная Усл. печ. л. 4,2 Усл.
кр.-отт. 17,325 Уч.-изд. л. 5,32 Тираж 70 000 экз. Изд. № 21399
Зак. № 925 Цена 25 к.

Издательство "Радио и связь". 101000, Москва, Почтамт, а/я 693

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома Государственного
комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
143200, г. Можайск, ул. Мира, 93

© Издательство "Радио и связь", 1986

ОТ АВТОРА

В период работы Государственных экзаменационных комиссий во многих вузах страны звучат слова: "...и присвоить квалификацию инженера электронной техники...".

В данном случае имеется в виду квалификация по различным специальностям. Рассказать о них всех в одной книге нелегко.

Полупроводниковая электроника. Полупроводники. Полупроводниковые приборы. Микроэлектроника. Электроника твердого тела. Все чаще и чаще приходится сталкиваться с этими понятиями, используемыми в электронной технике. Еще не так давно полупроводниковая электроника занимала в электронной технике весьма скромное место. Бурное развитие этого нового и перспективного направления вывело его сегодня практически на первое место. Полупроводниковая электроника, микроэлектроника, электроника твердого тела развиваются гигантскими темпами.

В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986 — 1990 годы и на период до 2000 года сказано: "Современный этап автоматизации опирается на революцию в электронно-вычислительной технике, электронизацию народного хозяйства. В годы пятилетки предусмотрено создание и освоение новых поколений ЭВМ всех классов — от супер-ЭВМ до персональных для школьного обучения. Общий выпуск средств вычислительной техники увеличится за пятилетие в 2,3 раза. Ставится задача широкой электронизации машин и оборудования, выпускаемых для всех отраслей. За такой техникой будущее".

Изделия электронной техники — полупроводниковые приборы, микросхемы, микропроцессоры составляют базу на основе которой создаются различные электронные системы автоматического управления, средства электронной вычислительной техники. Изделия полупроводниковой техники и микроэлектроники выпускаются электронной промышленностью в непрерывно растущих

объемах. Растут объемы производства, растет производительность труда, и тем не менее растет численность персонала, растут ассигнования на научные исследования. Растущей отрасли промышленности нужны все новые и новые кадры.

Многое, о чем будет говориться в брошюре, может относиться к деятельности любого инженера электронной техники. Но мы будем говорить в основном о тех специальностях, которые принято объединять понятием "полупроводниковые". Сюда входят такие специальности, как "Полупроводниковые и микроэлектронные приборы", "Полупроводники и диэлектрики" и частично "Технология специальных материалов электронной техники".

Итак, в этой книге пойдет речь об электронике и ее роли в техническом прогрессе, о полупроводниках и их месте в электронной технике, о задачах и проблемах, с которыми придется сталкиваться и рабочему, и технику, и инженеру электронной техники.

Если ты заканчиваешь десятилетку и выбираешь профессию, прочти эту брошюру: возможно, она поможет тебе сделать выбор. Если ты собираешься работать в электронной промышленности, пусть пока еще не инженером, тебе будет интересно и полезно узнать, в чем будет состоять твой труд. Сегодня ты — рабочий, завтра — техник, послезавтра — инженер. Это вполне естественный путь становления советского специалиста. И чем лучше ты будешь представлять себе свою профессию, чем более сознательно сделаешь выбор, тем больших успехов можно ожидать от твоей деятельности.

Стране нужны работники самых различных специальностей. Какой бы выбор ты ни сделал, твои старшие товарищи всегда одобряют его. Они с радостью встретят тебя и в аудиториях института, и в цехах завода.

Книга адресована не только юноше, обдумывающему житье. Можно надеяться, что она представит определенный интерес для широкого круга читателей. На предприятиях полупроводниковой электроники работают специалисты не только в области полупроводников. Специалистов в области химии и оптики могут заинтересовать проблемы, которыми живет его предприятие. Заинтересует она и потребителей изделий электронной техники. В настоящее время все в большей степени стираются границы между предприятиями, организациями и ведомствами, производящими изделия электронной техники и потребляющими их. Производители изделий электронной техники начинают сами выпускать электронную аппаратуру, а их потребителям в тех или иных случаях приходится обеспечивать себя этими изделиями самостоятельно.

Производство приборов полупроводниковой электроники отличается крайней сложностью, и все, что об этом рассказывается, подтверждается цифрами. Возможно, что любовь к своей профессии заставляет автора чуть-чуть чаще, чем было бы надо, прибегать к превосходной степени прилагательных. Да простят его за это специалисты смежных профессий, но автор действительно убежден в том, что крайняя сложность, чрезвычайно высокая точность технологии, трудность, а зачастую даже невозможность пооперационного контроля, выдвигают полупроводниковую электронику в ряд наиболее сложных отраслей техники.

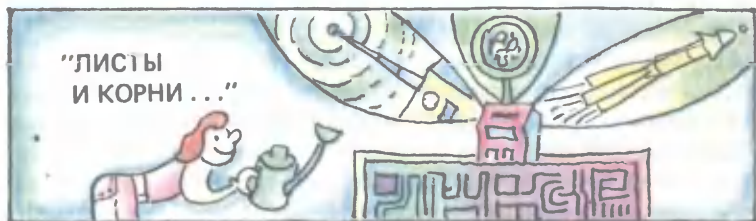
Именно об этом и хотелось бы рассказать в данной книге.

Тем же, кого интересует эта тема, автор рекомендует следующую литературу:

1. Федотов Я. А. Полупроводниковая электроника, год 2001-й. М.: Сов. радио, 1975.
2. Федотов Я. А. Встреча с микроэлектроникой. — М.: Знание, 1975.
3. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. — М.: Сов. радио, 1970.
4. Федотов Я. А. Полупроводниковая электроника. — В кн.: 80 лет радио/Под ред. А. Д. Фортушенко. — М.: Связь, 1975.
5. Яковлев А. С. Цель жизни. Записки авиаконструктора. — М.: Политиздат, 1970.
6. Семенов Н. Н. Объективность ученого и оценка открытий. — Наука и жизнь, 1972, № 2.
7. Стражева И. Леонардо да Винчи и механика полета. — Наука и жизнь, 1970, № 2.
8. Китайгородский А. Реникса. — М.: Молодая гвардия, 1967.
9. Азерников В. У начала пути. — Наука и жизнь, 1971, № 9.
10. Регирер Е. И. Развитие способностей исследователя. — М.: Наука, 1969.
11. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, т. 1. — М.: Мир, 1967.
12. Семенов Н. Н. Некоторые вопросы социологии науки. — Наука и жизнь, 1975, № 2, 3.
13. Федотов Я. А. Электроника и интеллект. — Минск: Высшая школа, 1985.
14. Федотов Я. А. Твердотельная электроника. — В кн.: 90 лет радио/Под ред. А. Д. Фортушенко. — М.: Радио и связь, 1985.



ГЛАВА 1 ТВОЯ ПРОФЕССИЯ



Вы помните, конечно, басню И.А. Крылова, утверждающую, что красивая зеленая листва обязана своим существованием непрерывной работе скрытых глубоко в земле корней. Современная наука, техника, промышленность представляет собой исключительно пышно развившееся дерево, и сегодня они уже немыслимы без электроники.

Электроника — это и вычислительная техника, и радиосвязь, и проводная связь, и навигация, и автоматика, и медицина, и, что самое главное, это огромное количество современных средств исследования. Ни микромир, ни макромир нельзя исследовать сегодня без электроники. От исследований космоса до наиболее тонких физических и биологических исследований — все основано на электронике. В науке буквально "шага шагнуть" нельзя без нее.

И это не удивительно. Мы вступили в такую фазу изучения природы, когда стало понятно, что электрические и магнитные силы и процессы действуют повсюду. Не только в физике, но и в биологии, проникая в глубь клеток, молекул ферментов, нервных процессов, мы начинаем постигать электрохимический характер процессов, протекающих в живом организме.

Таким образом, ни научный, ни технический прогресс уже немыслимы без электроники. Современный размах и степень проникновения электроники во все области науки, техники, народного хозяйства обязаны появлению в электронике полупроводников.

Именно полупроводники явились теми корнями, на которых развилось пышное дерево электроники. Это легко доказать.

Итак, что же было в электронике в "дополупроводниковый" период? Можно сказать — ничего... Поскольку в радиотехнике полупроводниковый детектор появился на несколько лет раньше радиолампы, можно считать, что полупроводники используются в электронике с самого ее появления, хотя термина *полупроводники* в его современном толковании еще не существовало.

Более того, открытие основных эффектов в полупроводниковых веществах, явившихся основой последующего развития полупроводниковой электроники, предшествовало открытию аналогичных эффектов в вакууме. Так, в 1873 г. было обнаружено, что столбик селена изменяет свое сопротивление при различной освещенности. В 1874 г. был открыт эффект односторонней проводимости контакта металлического острия с сульфидами некоторых металлов. В 1876 г. была обнаружена электродвижущая сила на концах селенового элемента при его освещении. Эти эффекты позже легли в основу создания фоторезисторов, полупроводниковых детекторов (диодов), первых точечных транзисторов, фотоэлементов и солнечных батарей.

В 1883 г. знаменитый изобретатель Эдисон обнаружил, что нить накаливания электрической лампочки "выбрасывает" в пространство электроны, способные переносить заряд через пустое пространство — вакуум. Сам Эдисон не обратил серьезного внимания на это открытие, считая это явление — эффект термоэлектронной эмиссии — совершенно бесполезным.

Только изобретение А. С. Поповым в 1895 г. радио привлекло интерес к названным выше эффектам. Можно считать, что в 1895 г. родилась электроника. В 1904 г. появился вакуумный диод, в 1906 — 1907 гг. — вакуумный триод. С этого времени электроника начинает развиваться как *вакуумная электроника*.

Использование полупроводников в электронике до 1948 г. было весьма ограниченным. С 1948 г., т. е. с момента изобретения У. Шокли, Дж. Бардином и У. Браттейном полупроводникового прибора — *транзистора*, началось "покорение" электроники полупроводниками.

Транзистор появился не случайно. Его появление, с одной стороны, было подготовлено большим объемом исследований в области физики полупроводников. (Здесь нельзя не упомянуть об огромном вкладе советских ученых, принадлежащих к школе, которую возглавлял Герой Социалистического Труда академик Абрам Федорович Иоффе.) С другой стороны, появление транзистора было неизбежно: он был совершенно необходим для дальнейшего развития электроники.

Транзистор — это полупроводниковый прибор, способный усиливать, генерировать и преобразовывать электрические колебания различных видов. Он пришел на смену радиолампе, которая около 50 лет почти безраздельно властвовала в электронике. Этот прибор является основой самого различного электронного оборудования — от сложнейших вычислительных и управляющих устройств до электронных часов; его не следует путать с транзисторным приемником, именуемым в быту "транзистором". Транзистор был и останется символом полупроводниковой электроники. Графический символ транзистора вы можете обнаружить на многих значках, книгах, плакатах и даже часах.

Приблизительно в начале 50-х годов заговорили о "транзисторизации" электронного оборудования, иными словами, о широкой замене в электронном оборудовании электронных ламп полупроводниковыми приборами — транзисторами. Транзисторные радиоприемники также явились детищем "транзисторизации". В "до-транзисторный" период электроники попытки создать малогабаритные переносные приемники практически были безуспешными. Переносные приемники, умещающиеся даже в жилетном кармане, переносные магнитофоны, электрофоны, телевизоры-малютки с размером по диагонали экрана 5—8 см — все это стало возможным только с появлением транзистора.

С особым нетерпением ожидали появления транзистора специалисты вычислительной техники и радиоэлектронного оборудования самолетов и ракет.

Так, в сконструированной в США первой электронной вычислительной машине (ЭВМ) использовалось 18 000 электронных ламп; она занимала помещение площадью 140 м², весила 30 т и потребляла 150 кВт электрической энергии. Практически вся эта энергия преобразовывалась в теплоту. Представьте себе помещение, где на каждом квадратном метре стоит по электрокамину мощностью в 1 кВт! Охлаждение этой ЭВМ было весьма серьезной проблемой, так как воздух, охлаждающий ЭВМ, необходимо было подвергать тщательной очистке. В противном случае пыль, содержащаяся в уличном воздухе, быстро вывела бы ЭВМ из строя.

Но главное было не в этом. Основной была проблема надежности. Электронные лампы имели срок службы порядка 500-1000 ч. За это время выходило из строя не менее 2 % ламп. Если в простейшей отечественной машине (например, "Урал") использовалось около 1000 ламп, то за 1000 ч работы в ней выходило из строя 20 ламп. Считая отказы распределенными во времени равномерно, получаем, что среднее время безотказной работы составляет 50 ч.

При 10 000 ламп среднее время безотказной работы должно сократиться до 5 ч. Приблизительно через каждые 5 ч надо будет

искать вышедшую из строя лампу (среди 10 000!), заменять ее и проверять машину с помощью контрольного задания... И вот уже снова выход из строя, и снова ремонт... Усложнение задач, решаемых ЭВМ, вызывало реальную потребность в машинах с числом ламп, измеряемым уже не десятками, а сотнями тысяч!

А основной причиной низкой надежности являлась нить накала — тоненький проволочный волосок, нагревающий катод электронной лампы до температуры около 1000°C . Незначительное уменьшение толщины нити накала в одном из сечений приводит к повышенному разогреву. При повышенной температуре металл нити испаряется в этом месте более интенсивно. Сечение нити еще более уменьшается, распыление металла становится более интенсивным. В результате нить обрывается или, как обычно говорим, "перегорает", хотя речь здесь совершенно не о горении. Катод выходит из строя. У электронных ламп с так называемым косвенным подогревом катода выход из строя может наступить еще раньше из-за потери катодом эмиссионных свойств.

Существуют электронные приборы и без нити накала. Их называют лампами с холодным катодом. Однако, по надежности эти приборы не превосходят уже известные нам электронные лампы, и, кроме того, они имеют довольно ограниченные области применения.

Проблема надежности очень важна не только для вычислительной техники, но и для оборудования самолетов или ракет. Возможность ремонта в полете практически исключается, а отказ, например, навигационного оборудования может привести к катастрофе. Бортовое оборудование работает в тяжелых условиях механических нагрузок (удары, вибрации, ускорения) и при резких изменениях температуры (вспомните, что за бортом самолета, летящего на высоте 10 км, температура даже летом составляет около -50°C !).

Огромное значение имеют размеры и масса бортового оборудования, количество потребляемой электроэнергии. Каждый лишний килограмм оборудования увеличивает полетную массу самолета приблизительно на 5 кг. Это объясняется необходимостью дополнительного запаса горючего, усиления конструкции.

Что это такое, можно понять, если прочесть книгу "Цель жизни" знаменитого авиаконструктора А.С. Яковлева. Во время Великой Отечественной войны борьба шла буквально за каждый килограмм полетной массы истребителя. Полетная масса — это и скорость и маневренность, и потолок самолета...

Облегчив массу самолета Як-3 на 300 кг по сравнению с самолетом Як-1, А. С. Яковлев добился с новым мотором ВК-107 ско-

рости, превышающей 700 км/ч. В результате Як-3 массой 2,65 т. легко сбивал немецкие истребители Me-109 массой более 3 т. и ФВ-190 массой около 4 т.

Еще один пример. В конце войны США имели самолет-бомбардировщик В-29, прозванный "летающей сверхкрепостью". Этот самолет имел скорость 600 км/ч, полетную массу около 54 т. На нем размещалось около 1000 кг электронного оборудования. Уменьшив массу этого оборудования в 10 раз (именно такие результаты дает применение транзисторов), полетную массу можно было бы уменьшить на 4500 кг.

Если безопасность полетов самолета еще как-то можно было обеспечить перегрузкой его оборудованием, надежность — дублированием наиболее важных устройств, то в ракетной технике все, оказывается, значительно сложнее. В ламповом варианте весь комплекс телеметрической, управляющей и связной электронной аппаратуры, не говоря уже о бортовых ЭВМ, рассчитывающих траекторию и дающих команду на ее коррекцию, на ракете разместить было невозможно, так как каждый килограмм оборудования увеличивал массу ракеты уже на 40—50 кг. Можно представить себе, сколько электронного оборудования размещается на ракете, если учесть, что стоимость его составляет до 70 % стоимости ракеты.

Только появление транзистора с его высокой надежностью, малой потребляемой мощностью, малыми размерами позволило решить те задачи, которые не могли быть решены с помощью электронных ламп.

Развитие полупроводниковой электроники привело к появлению качественно нового и с каждым годом все более совершенного электронного оборудования, проникающего во все сферы человеческой деятельности.

На фирме "Сименс" (ФРГ) около 15 лет назад была создана ЭВМ, предназначенная для работы приблизительно со 100 абонентами, расположенными в самых различных городах, удаленных даже на несколько тысяч километров. Вся ЭВМ занимает зал площадью около 200 м². Однако большая часть этой площади была отведена под устройства долговременной памяти на магнитных лентах, магнитных барабанах и дисках, а также абонентские устройства, устройства ввода и вывода информации и др. Что же касается "электронного мозга" системы, т.е. собственно вычислительного устройства, то оно занимает объем около двух платяных шкафов и содержит свыше полумиллиона (!) полупроводниковых приборов — диодов и транзисторов. Ниже мы увидим, что современ-

менные средства позволяют создать такое количество транзисторов на кристалле кремния площадью менее 1 см^2

Развитие электроники привело к появлению новой ее области — микроэлектроники. Достижения физики твердого тела и особенно физики полупроводников дают возможность микроэлектронике создавать на основе групповой технологии функциональные блоки и узлы, связанные конструктивно, технологически и электрически. Появляется совершенно новый класс электронных устройств — интегральные микросхемы. Интегральные микросхемы характеризуются степенью интеграции — числом простейших элементов в ней. На одной полупроводниковой пластине (кристалле) интегральной микросхемы может содержаться до 10 000 элементов и более.

В электронных наручных часах работает свыше 1000 транзисторов, т. е. больше, чем было ламп в первых ЭВМ "Урал", требовавших для своего размещения не один десяток квадратных метров...

Полупроводниковая электроника обеспечила не только быстрый рост показателей вычислительной техники, но и рост объемов ее производства и потребления. Так, в США в середине 50-х годов было около 1000 компьютеров, в середине 60-х годов, когда появились первые интегральные микросхемы, компьютеров было уже 20 000, в основном на дискретных транзисторах, в конце 1976 г. — 220 000, среди них 40 % средних и больших и 60 % микрокомпьютеров, к 1980 г. ожидалось 750 000 компьютеров и 10 млн. микропроцессоров, но микропроцессоров оказалось в 20 раз больше.

Предполагается, что увеличение вычислительной мощности за 50 лет к 2000 г. составит около 12 порядков.

Освоение космоса, создание надежных орбитальных станций, транспортных кораблей, производящих автоматическую стыковку, были также невозможны без широкого применения современных радиоэлектронных устройств.

Можно уверенно сказать, что космические исследования и ракетная техника стоят на трех китах: ракетном горючем, жаростойких сплавах, полупроводниковой электронике.

Итак, полупроводниковая электроника открыла нам двери в вычислительную технику, в космос, дала возможность создавать сложнейшее электронное оборудование. Вот где корни современной электроники.

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА?



Инженер электронной техники... А что такое *электронная техника*? Какие задачи стоят перед специалистом этой квалификации? Ни в одном словаре мы не найдем определения этого понятия. Квалификация, специализация, специальность — все это термины, связанные со структурой тех или иных отраслей промышленности, их ведомственной подчиненностью и т. д.

В широком смысле под *электронной техникой* можно было бы понимать всю технику, в основе принципов действия которой лежат электронные процессы. С этой точки зрения электронная вычислительная техника должна бы быть отнесена к категории электронной техники. Но будет ли в действительности инженер электронной техники создавать вычислительные машины? Вероятно, нет... А радиоприемники, телевизоры, радиостанции, устройства автоматики? Вероятно, тоже нет... Для этих целей вузы готовят инженеров других специальностей.

Инженер электронной техники создает различные изделия, которые входят в состав любого радиоэлектронного аппарата или системы. К ним относятся: электронные лампы, электронно-лучевые приборы (кинескопы, осциллографические трубки и т. п.), сверхвысокочастотные электровакуумные приборы (магнетроны, клистроны и т. п.), резисторы, конденсаторы, полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы), интегральные микросхемы. Номенклатура изделий электронной техники насчитывает сегодня несколько миллионов типонаименований. Потребляет эти изделия несколько десятков тысяч предприятий.

То, что сейчас принято понимать под *электронной техникой*, представляет собой своеобразную промышленность "электронных строительных материалов". Электронная промышленность создает те "кирпичики", из которых в дальнейшем будут собираться самые различные электронные устройства. Эту "строительную" аналогию можно продолжить. В строительстве мы все чаще отказываемся от кирпича и переходим к панелям и блокам. На улицах городов

можно видеть машины, везущие целые стены с окнами и дверями, со стеклами и замками и даже целые блоки и узлы с трубами, оборудованием и облицовкой. Аналогичная тенденция наблюдается и в электронике. "Кирпичики", из которых строят электронные устройства, тоже становятся все крупнее. "Безликий" кирпич, из которого строили жилой дом, и печь, и уникальные сооружения уступают место блоку, имеющему конкретное и часто очень узкое назначение. Аналогично "укрупняются" и приобретают узкое конкретное назначение и элементы электронной техники. Мы еще вернемся к этому вопросу, рассматривая проблемы интегральной электроники и микроэлектроники.

Мы уже установили, что электронная техника создает так называемые неделимые элементы, из которых состоит любое электронное оборудование.

С этой точки зрения изделия электронной техники можно считать "атомами" электроники. ("Атомос" — по-гречески "неделимый", "нераздробимый").

Неделимый элемент электронной техники может состоять из нескольких тысяч транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и т. п.; он может представлять собой и одиночный диод или транзистор. В том и другом случаях главное состоит в том, что для потребителя изделия электронной техники не расчленяются на отдельные детали, не ремонтируются, не переделываются. Они используются такими, какими поступили от поставщика — предприятия электронной промышленности.

В какой-то степени работникам электронной промышленности приходится заниматься и некоторыми специальными материалами, перечень которых исключительно широк: различные металлы и сплавы (вольфрам, молибден, ковар, платинит, медь, алюминий и др.), полупроводниковые материалы, электровакуумные стекла различного состава, специальные виды керамики, магнитные материалы, включая ферриты, диэлектрические материалы, органические и неорганические материалы, люминофоры, технологические материалы, т. е. материалы, используемые в технологических процессах, но не входящие в изделие (кислоты, щелочи, фоточувствительные материалы и т. п.), лаки, смолы и пластмассы, используемые для защиты изделий от внешней среды.

В электронной технике используется свыше 20 000 наименований материалов, которые охватывают около 90 % периодической системы элементов Д. И. Менделеева.

Полупроводниковые материалы для нас наиболее интересны, ибо они составляют основу полупроводниковой электроники. В

этой отрасли инженер электронной техники — это специалист, имеющий хорошую подготовку в областях физики электронных процессов в твердом теле и электронного материаловедения. Комплекс этих знаний дает ему возможность создавать и исследовать сложнейшие изделия современной полупроводниковой электроники, являющиеся краеугольными камнями практически любого электронного устройства.

Создание современного сложного полупроводникового устройства состоит из двух частей. Сначала необходимо понять, как будут работать то или иное устройство, тот или иной прибор, а затем представить себе, как они будут выглядеть, какую иметь структуру.

Полупроводниковые структуры крайне сложны. Зачастую проходит не один год, пока появляются технические средства, позволяющие реализовать задуманное в объеме кристалла полупроводника. Поэтому, предлагая, что *сделать*, приходится одновременно рекомендовать, *как сделать*. Этот вопрос мы будем еще рассматривать с различных сторон, а сейчас подчеркнем только, что в полупроводниковой электронике речь всегда идет о комплексе знаний, причем довольно широком.

Итак, знать, что делать, т. е. видеть всю задачу в целом и знать, как делать, — обязательные условия подготовки инженера электронной техники вообще и специалиста в области полупроводниковой электроники в особенности.

А как делится объем работ между специалистами по материалам и по изготовлению изделий полупроводниковой электроники? Статистика показывает, что из 100 специалистов в области полупроводников 95 занимаются разработкой, исследованием или производством полупроводниковых приборов или устройств и только 5 — материаловедческими проблемами. Многие материалы уже сегодня синтезируются или преобразуются в ходе производства из них изделий (приборов). "Чистое" материаловедение достаточно больших и однородных объемов полупроводниковых материалов перестает быть интересным. Интерес представляет главным образом наиболее трудный случай: изучение неоднородных сложных полупроводниковых структур, в которых изменение типа и величины проводимости происходит в микроскопических объемах. А такие неоднородные микроструктуры представляют собой не что иное, как полупроводниковые структуры, являющиеся частью полупроводникового прибора или устройства.

Таким образом, овладеть полупроводниковой электроникой — это значит:

знать физику электронных процессов в сложных полупроводниковых структурах;

знать физико-химические основы получения таких сложных структур;

уметь исследовать эти структуры.

Что касается размеров структур, то к этому вопросу мы еще будем возвращаться неоднократно.

Итак, сделаем вывод: полупроводниковая электроника — это электрофизика и материаловедение сложных микроскопических полупроводниковых структур. Инженер электронной техники, работающий в области полупроводниковой электроники, — это специалист, способный создавать и исследовать полупроводниковые микроструктуры, являющиеся основой, "корнями" современной электроники.

Но это только первое приближение. Познакомившись с проблемами микроэлектроники, мы увидим, что полупроводниковая структура представляет собой пластинку кристаллического вещества, например кремния, площадью в несколько десятков квадратных миллиметров, на которой сосредоточены тысячи транзисторов, образующих сложное электрическое устройство.



Вы помните, конечно, сказ Н. С. Лескова о том, как тульские оружейники подковали блоху из "чистой аглицкой стали" Вот что говорил об этом "руководитель группы", тульский оружейник косой Левша:

— Если бы, — говорит, — был лучше мелкоскоп, который в пять миллионов увеличивает, так вы изволили бы, — говорит, — увидеть, что на каждой подковке мастерово имя выставлено: какой русский мастер ту подковку делал.

— И твое имя тут есть? — спросил государь.

— Никак нет, — отвечает Левша, — моего одного и нет.

— Почему же?

— А потому, — говорит, — что я мельче этих подковак работал: я гвоздики выковывал, которыми подковки забиты, — там уже никакой мелкоскоп взять не может.

Государь спросил:

— Где же ваш мелкоскоп, с которым вы могли произвести это удивление?

А Левша ответил:

— Мы люди бедные и по бедности своей мелкоскопа не имеем, а у нас так глаз пристрелявши”.

Надо сказать, что мы сейчас находимся приблизительно в положении Левши. В полупроводниковой электронике под ”мелкоскопом” выполняется наиболее ”грубая” часть работы, например присоединение выводов к готовым структурам. Выводы эти (проволочки из алюминия или золота толщиной от 20—30 до 8 мкм) привариваются к контактными площадкам — тонким металлическим пленкам, нанесенным на поверхность полупроводника. Толщина этих пленок обычно не более 1 мкм, а площадь 20×20 или 40×40 мкм². Эти пленки осуществляют контакты с микрообластями. Сами же микрообласти, составляющие полупроводниковые структуры, сильно отличаются электрофизическими свойствами.

Изменение свойств полупроводника достигается обычно введением в его кристаллическую решетку на место ”собственных” атомов полупроводника строго контролируемых количеств тех или иных примесных атомов бора, фосфора, сурьмы, мышьяка и др. При этом количество посторонних, случайных, неконтролируемых примесей должно быть менее не только тысячных, но и сотых долей процента и даже меньше. Впрочем, о количествах и процентах позже мы поговорим более подробно.

Каковы же форма и размеры этих областей с перестроенной кристаллической структурой? На поверхности кристалла области могут иметь вид, например, чередующихся полос шириной 1—3 мкм и длиной до 100—150 мкм.

Глубина этих полос, образующих своеобразную гребенку, измеряется десятками и даже сотыми долями микрометра. Такие размеры невозможно ни наблюдать, ни контролировать непосредственно, тем более без разрушения структуры. Основным средством контроля является здесь измерение электрофизических параметров структур, по которым делают заключение о толщинах тех или иных слоев.

В этом случае мы вынуждены работать ”без мелкоскопа”. Точность получения слоев той или иной толщины достигается при соблюдении технологических режимов: точности установки и поддержания температуры, шлифовки и полировки полупроводниковых пластин, механической установки и перемещения подвижных час-

тей тех или иных механизмов и т. д. Ниже мы рассмотрим конкретные цифры, характеризующие точность работы оборудования в полупроводниковой электронике. Сейчас же оценим общие размеры транзисторной структуры, или активной области транзистора.

Активная область транзистора представляет собой тот объем полупроводникового материала, в котором осуществляются все основные физические процессы, определяющие работу транзистора. Обычно размеры активной области составляют проценты или даже доли процента объема кристалла, на котором она выполнена. Сам кристалл имеет форму квадрата со стороной 0,5–1,0 мм. Бывают, конечно, кристаллы и другой формы, например прямоугольные, треугольные или круглые.

Размеры кристаллов в большинстве случаев (не считая кристаллов для достаточно мощных приборов) определяются удобством обращения с ними. Кристаллы со стороной менее 0,5 мм было бы трудно захватывать с помощью пинцета или вакуумного присоса, переносить, устанавливать в машинах, механизмах и приспособлениях при технологической обработке.

В принципе активные области современных, например сверхвысокочастотных, транзисторов настолько малы, что для их изготовления было бы достаточно (по размерам, разумеется...) шайб, нарезанных из человеческого волоса (толщина человеческого волоса составляет около 80 мкм). Это не фантастика и даже не взгляд в будущее. Транзисторы с такими размерами активных структур находятся в серийном производстве. Что же касается последних достижений в этой области, то сегодня на кристаллах площадью 40–50 мм² удается создавать электронные устройства, насчитывающие до 1 млн. транзисторов.

Инструментом в данном случае чаще всего является электронный луч — тонкий (менее 1 мкм в диаметре) пучок электронов, разогнанных в электрическом поле до высоких энергий.

В настоящее время плотность размещения диодов и транзисторов на поверхности кристалла составляет около 500 на 1 мм² (т. е. около 50 000 на 1 см²). В соответствии с ближайшими прогнозами в системах памяти ЭВМ на кристалле площадью 50 мм² можно будет записать в двоичном коде до 50 000 ед. информации. На 1 см² это будет составлять 1 млн. ед. информации. Для ее записи потребуется несколько миллионов элементов, аналогичных транзистору. Для сравнения укажем, что кристалл устройства памяти емкостью 1 Кбит (т. е. на 1000 ед. информации в двоичной системе) содержит около 7 тыс. транзисторов, а на 4 Кбит — 28 тыс. транзисторов. Запоминающее устройство емкостью 1 Мбит содержит уже до 4 млн. транзисторов.

Другой случай рассмотрим на примере прибора телевизионной техники. На телестудии изображение преобразуется в электрический сигнал с помощью передающих электронно-лучевых вакуумных приборов. В зависимости от конструкции и принципа действия они могут иметь различные названия. Один из типов таких передающих телевизионных трубок называется *видикомом*. Важнейшей деталью видикона является фотомишень, на которую проецируется изображение с помощью оптической системы. Различная степень освещенности отдельных участков фотомишени приводит к появлению на ней потенциального рельефа, который считается строка за строкой с обратной стороны фотомишени тонким электронным лучом.

Серьезной проблемой является получение высокой чувствительности видиконов, т. е. их способности воспринимать слабые световые сигналы. Другими словами, хотелось бы иметь возможность вести телевизионные передачи при естественном (иногда и вечернем) освещении, не прибегая к помощи мощных прожекторов.

За последние годы в видиконах начинают применять фотомишени из кремния. В этом случае чувствительным элементом фотомишени являются кремниевые фотодиоды. Чтобы получить достаточную разрешающую способность, т. е. иметь возможность передавать мелкие детали изображения, элементы фотомишени должны быть меньше воспроизводимых элементов изображения. Удовлетворить требованиям телевизионных стандартов удастся только в том случае, если на такой мишени площадью 1 см^2 будет размещено около 1 млн. фотодиодов. Однако главное не в том, что на 1 см^2 умещается количество обычных фотодиодов, выпускаемых каким-либо цехом завода за год, а в том, что количество негодных, бракованных фотодиодов должно составлять не более одной сотой доли процента.

На заводе, выпускающем обычные фотодиоды, брак может составлять 10–30 %. Чтобы выполнить годовую программу в 1 млн. фотодиодов, завод делает их несколько больше, например 1 млн. 250 тыс. В ходе контроля и проверок 250 тыс. диодов бракуется, а 1 млн. поступает на склад готовой продукции.

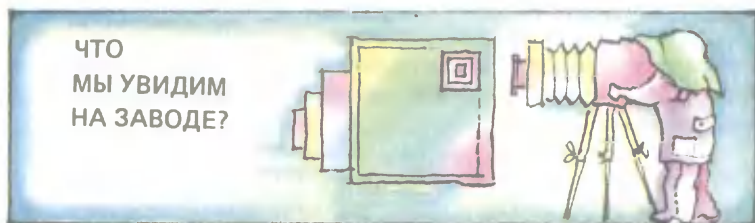
В фотомишени видикона весь миллион диодов делают за один цикл на одной пластине кремния. Испорченный диод нельзя вынуть и заменить годным. Более того, даже проверить все диоды один за другим вряд ли возможно. Во-первых, не так легко подсоединиться к диоду, диаметр которого составляет 5–7 мкм. Во-вторых, сложно измерить токи в 10^{-14} А , характеризующие работоспособность диода, а в-третьих, если даже на одно измерение (включая подключение к столь малому диоду) тратить всего 1 с, то на проверку всех

диодов мишени уйдет не менее 10 сут непрерывной работы или месяц работы по 8 ч в день!

Но ставить в видикон фотомишень, содержащую некачественные диоды, тоже нельзя. Неработоспособные диоды будут проявлять себя в виде белых или черных пятен на изображении. В цветном телевидении эти пятна будут цветными. Это еще более неприятно, так как цветовой контраст может быть значительно сильнее контраста яркости в черно-белом изображении. Значит, и здесь основная задача заключается не в том, чтобы проверить и отбраковать, а в том, чтобы сделать ненужной операцию отбраковки, стараться работать без ошибок и дефектов. Тем не менее ошибки будут, и чем сложнее изделие, тем больше их можно ожидать.

Сделать такую фотомишень — нелегкая задача... Хорошо, если годной окажется каждая десятая. Поэтому и стоят телевизионные трубки с такими мишенями иногда дороже автомобиля.

Вот почему главное в нашей работе состоит в том, чтобы весь технологический процесс, точность оборудования, условия производства исключали возможность появления дефекта! Здесь важна не только техника, но и организация производства, слаженная и четкая работа всего коллектива предприятия. Непременным залогом успеха является и высокая культура производства.



Завод — это сложный "производственный организм". Это и помещения, и оборудование, и технологические процессы, и, что самое главное, люди. Ведь о людях-то мы, собственно, и начали говорить. И если мы все больше и больше переходим к вопросам техники, то это лишь потому, что на этих примерах мы хотим показать, какие же требования предъявляет современное производство изделий полупроводниковой электроники к специалистам: уровню их подготовки, умению управлять этим производством.

Оборудование полупроводникового производства по точности относится к категории прецизионного, а в ряде случаев просто не имеет аналогов ни в какой другой отрасли промышленности.

Производство полупроводниковых приборов начинается с подготовки пластин. Слитки полупроводникового материала режутся на диски (пластины) диаметром от 25 до 120 мм и толщиной несколько десятых долей миллиметра. Подобных пластин, например, американская промышленность в неделю использует более миллиона. В дальнейшем эти пластины подвергаются механической обработке: шлифовке и полировке.

Такие полупроводники, как германий или кремний, обладают очень высокой твердостью и хрупкостью, и их обработка представляет собой весьма сложную задачу, конкурирующую с самыми сложными задачами оптической промышленности: точность обработки здесь приблизительно та же, что и при обработке стекла, а материалы более "трудные". Чистота обработки поверхности должна соответствовать самому высшему — четырнадцатому — классу. Допустимые величины микронеровностей должны составлять при этом всего лишь сотые доли микрометра.

Это требование, само по себе жесткое, дополняется другими, не менее жесткими требованиями: плоскостности, т. е. высокой степени приближения к идеальной плоскости; плоскопараллельности верхней и нижней поверхностей и отсутствия "нарушенных слоев". Последнего требования оптическая промышленность не знает вообще. "Нарушенные слои", структура которых была изменена в процессе шлифовки и полировки, располагаются у самой поверхности. При создании полупроводниковых приборов работа ведется в первую очередь в приповерхностных слоях. Отсюда возникает требование минимальных нарушений в них.

Именно в приповерхностные слои мы вводим строго дозированные количества примесей, перестраиваем необходимым образом их структуру, создаем в них нужные нам области. Микротрещины, микросдвиги в кристаллической решетке и другие нарушения структуры, вызванные механической обработкой, не позволяют выполнить все приборы с одинаковой структурой, приводят к повышенному браку.

Обычно эталоном точности считают часовую промышленность. Однако точности часовой промышленности на много порядков ниже точностей, например, авиационного моторостроения. Точность обработки полупроводниковых пластин для наиболее ответственных изделий полупроводниковой электроники превышает точности, принятые не только в специальном машиностроении, но и в оптике.

Также не имеет себе равных точность проведения термических процессов полупроводниковой электроники. Где еще можно найти термическое оборудование, способное устанавливать и поддерживать температуру с точностью $0,5-0,25^{\circ}\text{C}$ на уровне $1200-1300^{\circ}\text{C}$? Пожалуй, необходимо такое оборудование только в электронной промышленности. Наиболее сложными, точными и ответственными являются так называемые *фотолитографические процессы*. Фотолитографию называют еще и фотогравировкой. Применяется она не только в полупроводниковой электронике. Однако только здесь фотолитографические процессы требуют наиболее высоко-точного оборудования, достигающего предельных для современных оптики и механики точностей.

Кто хотя бы немного знаком с фотографией, тот легко поймет суть процессов фотолитографии. Поверхность полупроводниковой пластины покрывается диэлектрической или металлической пленкой. В определенных местах пленку следует удалить. Форма и размеры этих "окон" в пленке будут определять форму и размеры полупроводниковых структур или металлических контактов к этим структурам.

Наиболее удобным способом удаления пленки с определенных участков является травление, т. е. химическое растворение ее на тех участках, с которых она должна быть удалена. Для этого поступают следующим образом. На диэлектрическую или металлическую пленку наносят тонкий слой специального светочувствительного лака — *фоторезиста*. На специальном фотонегативе (*фотошаблоне*) в виде черных и белых полей изображен рисунок, который должен быть перенесен на обрабатываемую пленку. Фотошаблон накладывается на слой фоторезиста. Затем фоторезист освещается (*экспонируется*) через фотошаблон ультрафиолетовыми лучами. Под их действием фоторезист полимеризуется и превращается в стойкую пленку, защищающую металл или диэлектрик от воздействия травящего вещества. В тех же местах, где на фотошаблоне были черные поля, защищающие фоторезист от ультрафиолетового излучения, он легко удаляется и металл или диэлектрик остается открытым для дальнейшей обработки (воздействия травящего вещества и т. п.). Таким образом рисунок фотошаблона переносится на поверхность полупроводниковой пластины.

Обрабатываемые пластины обычно имеют диаметр от 70 до 120 мм. После того как на пластине будет одновременно изготовлено большое количество приборов, ее разрезают на отдельные кристаллы. Если один полупроводниковый прибор размещается на кристалле размером $1 \times 1 \text{ мм}^2$, то на всем поле пластины может разместиться от 5 до 10 тыс. приборов.

В то же время структура одиночного прибора может состоять из десятков и даже сотен отдельных элементов, размеры которых не превышают нескольких микрометров. Если на одной пластине одновременно изготавливается около 10 000 транзисторов, а каждый транзистор состоит из 500 элементов (весьма возможный случай...), то на одну пластину мы одновременно с помощью методов фотолитографии "впечатываем" около 5 млн. элементов.

Процесс фотолитографии повторяется при производстве полупроводниковых приборов несколько раз. При этом каждый раз последующий рисунок должен быть точно "впечатан" в предыдущий. Например, серию квадратов со стороной 7 мкм следует "впечатать" в серию квадратов со стороной 12 мкм. Зазор между сторонами квадратов при этом будет составлять в идеальном случае 2,5 мкм. И так должны быть "впечатаны" один в другой все 5 млн. элементов. Незначительное смещение фотошаблона при наложении на пластину или небольшой поворот его приведут к тому, что структуры окажутся сдвинутыми, перекрывающимися. Прибор с такой структурой работать не будет.

Возможность точного совмещения второго фотошаблона с рисунком, нанесенным с помощью первого, будет зависеть в первую очередь от точности изготовления самих фотошаблонов. Все 5 млн. элементов одного фотошаблона должны точно совмещаться с 5 млн. элементов другого. Для изготовления таких фотошаблонов необходимо оптико-механическое оборудование, точность работы которого составляла бы десятые доли микрометра.

Не поработав с таким оборудованием, трудно себе представить, насколько высокими являются эти требования. Можно лишь сказать, что до появления сверхточных фотолитографических процессов полупроводниковой электроники оптико-механического оборудования такой точности просто не было. Оно было создано специально для полупроводниковой электроники ценою больших усилий, и совершенствование его продолжается непрерывно.

Не менее трудным оказывается сам процесс совмещения и "впечатывания" рисунков один в другой. Совмещая фотошаблон с полупроводниковой пластиной, следует оставлять между ними некоторый зазор, позволяющий свободно перемещать совмещаемые предметы. После совмещения фотошаблон надо плотно прижать к пластине и провести экспонирование.

В настоящее время размеры элементов рисунка, а также расстояние между ними доведены до 1–2 мкм; при этом необходимая точность совмещения измеряется десятными долями микрометра. Можно случайно сдвинуть шаблон на такую величину, прижимая его к пластине после совмещения. Поэтому установки, на которых

проводятся совмещение и экспонирование, должны работать очень точно.

Есть и еще одна сложность. Длина волны ультрафиолетового излучения, используемого для экспонирования, составляет около 0,4 мкм. Размер элемента становится соизмерим с длиной волны. Лучи света, проходя сквозь столь узкие отверстия, отклоняются. Фотошаблон начинает действовать как дифракционная решетка. Если фотошаблон не будет достаточно плотно прилегать к слою фоторезиста, то мы не получим "черных" незасвеченных полей на фоторезисте при малой их величине: лучи света, проходящие через соседние светлые участки, будут искривляться за счет дифракции и засвечивать фоторезист под темным участком фотошаблона.

Это предъявляет очень жесткие требования к поверхности обрабатываемых кремниевых пластин и к плоскостности фотопластин, используемых для изготовления фотошаблонов. Допустимые отклонения от плоскостности не должны здесь превышать десятых долей микрометра. Чтобы получать изображения малых размеров, пришлось создавать специальные фотопластины и оптику с высокой разрешающей способностью.

Кто знаком с фотокинотехникой, тот, возможно, знает, что разрешающая способность определяется по числу линий, которые могут быть различимо нанесены на участке в 1 мм. В обычной фотокинопрактике мы пользуемся фотоматериалами и оптикой, имеющими разрешающую способность порядка 50–60 линий на 1 мм. Оптика и фотопластины для фотолитографии имеют разрешающую способность порядка 1000–1500 линий на 1 мм.

Сложности, однако, на этом не кончаются. Если размеры элементов составляют 1–2 мкм, то любая пылинка таких же размеров, попавшая в эмульсию фотопластины, в фоторезист или вообще между полупроводниковой пластиной и фотошаблоном, приведет к искажению изображения в этом месте. Отсюда возникают почти фантастические требования к борьбе с пылью в помещениях, где проводятся фотолитографические процессы и изготавливаются фотошаблоны.

Пыль — серьезный враг полупроводникового производства, и борьбе с ней всегда уделялось много внимания. В объеме 1 м³ обычного городского воздуха содержится около 50 млн. пылинок. В зеленых зонах их содержание в 1 м³ воздуха падает до 2 млн.

Наиболее жесткие условия запыленности, зафиксированные для полупроводниковой промышленности стандартами США, составляли еще недавно 3500 пылинок на 1 м³ (класс 100). Но уже сегодня эти нормы пересмотрены. Считается, что при изготовлении наиболее сложных полупроводниковых изделий больших интег-

ральных микросхем (БИС) запыленность воздуха в основных помещениях не должна превышать 3000 пылинок на 1 м^3 , а на рабочем месте возле обрабатываемой пластины должна быть на уровне 30 пылинок на 1 м^3 . Только при этих условиях удастся получить приемлемое соотношение между браком и годными изделиями.

Зачем это нужно? Если в помещении запыленность достигает 50 000 пылинок на 1 м^3 , то на поверхности 1 см^2 за 1 ч оседает около 40 пылинок размером в несколько микрометров и значительно большее (несколько сотен) количество пылинок размером 0,5 мкм и менее. Таким образом, на каждые 2 мм^2 обрабатываемой пластины придется не менее одной пылинки размером 1–3 мкм и пять–десять пылинок размером 0,3–0,5 мкм. Этого вполне достаточно, чтобы получить 100 %-ный брак.

Насколько сложно создать условия обеспыленности, необходимые для современного производства, может показать следующий пример. Даже в состоянии покоя человек каждую минуту создает до 100 000 пылинок. При энергичных движениях число создаваемых пылинок возрастет до 1 000 000 и более. Если в помещении площадью 100 м^2 без людей в 1 м^3 воздуха насчитывается 10 000 пылинок, то при наличии 12 человек запыленность возрастет до 3,5 млн. пылинок в 1 м^3 .

Необходимая степень обеспыленности достигается в основном изоляцией помещений от внешней среды, тщательной обработкой входящих в эти помещения людей, отказом от использования "пылящих" материалов и одежды (в первую очередь одежды из хлопчато-бумажных тканей) и, что самое главное, усиленным обменом воздуха, пропускаемого через специальные пылеулавливающие фильтры. Полный обмен воздуха в наиболее чистых помещениях должен происходить до 300 раз в час. Только таким образом удастся создавать и поддерживать необходимые условия производства.

Однако быстрорастущие требования к условиям производства, связанные с повышением уровня интеграции, требуют, чтобы производственные процессы осуществлялись в герметизированном объеме в строго контролируемой среде и были изолированы от управляющего ими оператора.

Существенное значение имеет также поддержание заданных температуры и влажности, поэтому большинство процессов производства изделий полупроводниковой электроники осуществляется при строго контролируемых температуре, влажности и запыленности. Наиболее ответственные процессы проводятся в специальных ящиках-скафандрах, внутри которых создается микроклимат.

В них подается тщательно осушенный и обеспыленный воздух или инертный газ.

Что же касается стабильности температуры в помещениях, где работает прецизионное оптико-механическое оборудование, то точность ее поддержания должна составлять $0,2-0,3^{\circ}\text{C}$. При больших колебаниях температуры температурное расширение деталей оборудования может привести к недопустимым отклонениям.

В полупроводниковом производстве используются газы очень высокой степени очистки. В них могут содержаться лишь тысячные доли процента кислорода, а содержание влаги должно быть таким, чтобы роса выпала только при температуре -70°C .

Тщательной очистке подвергается и вода, используемая для промывки полупроводниковых элементов. Все это является неотъемлемым условием технологических процессов полупроводниковой электроники. Это общее требование технологии. А что же такое технология? Этот вопрос следует рассмотреть отдельно.



Нередко бывает, что терминологические нюансы приводят к путанице понятий, к неправильному пониманию вещей. Так, кстати, часто бывает и с понятием *технология* в полупроводниковой электронике. Во многих старых отраслях промышленности это слово имеет совсем не тот смысл, который вкладывается в него в полупроводниковой электронике.

В машиностроении машину создает инженер-конструктор. Сначала при воплощении первого образца ее основные детали и узлы, вычерченные конструкторами, делают, как это часто называют, "на скорую руку". Основное требование к ним — соответствие чертежам, а как они сделаны (выточены, отштампованы, отлиты), не имеет значения. Когда же испытания машины успешно завершены и встал вопрос о серийном производстве, прототипом машины начинают заниматься технологи. Их задача решить, как проще и с

наименьшими затратами средств и труда осуществить изготовление деталей, сборку машины и ее наладку. Дальнейшие задачи технолога сводятся к наблюдению за процессом изготовления и его усовершенствованию.

В радиоэлектронике инженер-схемотехник разрабатывает схему электронного устройства и собирает его макет. Ему важно убедиться, что устройство действительно обладает заданными электрическими характеристиками и выполняет все функции, которые на него возложены. После этого макет передается конструкторам. Они ищут конструктивные решения: определяют конструкцию шасси и панелей, расположение приборов и органов управления устройством, взаимное расположение и компоновку деталей и элементов, способы отвода теплоты, амортизацию, обеспечивающую устойчивость к ударам и вибрациям, и т. п. А затем, как и в машиностроении, технологи решают вопрос о том, как организовать массовое производство этой аппаратуры с минимальными затратами труда и средств.

Обратим внимание, что в первом случае инженер создавал конструкцию машины в целом и составляющие ее детали. Во втором случае инженер пользовался уже готовыми деталями (транзисторами, диодами, резисторами, конденсаторами и т. п.) и создавал из них необходимое устройство. Конструктор и технолог завершали труд инженера-разработчика.

Совсем иначе обстоит дело в полупроводниковой электронике. Полупроводниковый прибор или интегральная микросхема представляют собой единый кристалл полупроводникового вещества. В нем практически нет самостоятельных элементов (если не считать корпуса, но корпус служит арматурой и не является обязательным для полупроводникового прибора).

Итак, полупроводниковый прибор (включим в это понятие и изделия микроэлектроники) — это единая деталь, прошедшая ряд операций обработки, в результате которых она стала обладать сложными свойствами (часто соответствующими свойствам целой электронной схемы). В чем же заключаются эти операции?

Как уже говорилось, основной их смысл сводится к перестройке кристаллической структуры в отдельных областях кристалла, причем в областях микроскопических. Это мы и называем *полупроводниковой структурой*.

Машиностроение построено на формообразовании. Металлу, из которого изготавливаются детали, придают ту или иную форму. Полупроводниковая электроника построена на структурообразовании. Форма кристалла не имеет существенного значения.

В процессе создания полупроводникового прибора функции разработчика, конструктора и технолога выполняет один человек.

Он должен знать, *что делать* (рассчитать структуру) и *как это сделать* (т. е. владеть всем арсеналом технических средств, позволяющих реализовать результаты своих расчетов). Зачастую при этом вопрос, *как сделать*, стоит на первом месте.

Конструкция прибора определяется часто теми техническими возможностями и средствами структурообразования, которыми мы располагаем. Конечно, между тем, *что делать* и *как делать*, всегда есть "обратная связь", но все же в машиностроении на первом месте стоит форма детали, а на втором — способ ее изготовления.

В полупроводниковой электронике лишь в общих чертах известно, что должна представлять собой структура. Разработчик прибора, зная арсенал технических средств и их возможности, выбирает необходимый способ изготовления или комплекс процессов, которые в значительной мере определяют форму и размеры тех или иных областей структуры.

Этот комплекс процессов, в результате которых создается сложная полупроводниковая структура, и называют в полупроводниковой электронике *технологией*, а специалиста, создателя полупроводникового прибора, совмещающего в одном лице инженера-схемотехника, конструктора и технолога, называют *технологом*. Итак, технолог — это инженер, создающий полупроводниковый прибор, знающий теорию и умеющий практически делать полупроводниковые приборы.

В машиностроении разработчиком машины является конструктор. Создать машину — значит создать комплект чертежей. В полупроводниковой электронике разработчиком прибора является технолог. Создать прибор — значит создать комплект технологической документации.

И в полупроводниковой промышленности есть технологи, которые не создают новых приборов, а "заведуют" выпуском и усовершенствованием уже созданных приборов, но главное не в этом. Главное, что в полупроводниковой промышленности технолог хорошо владеет точнейшим оборудованием, легко оперирует долями микрометра и микроскопическими количествами примесей, буквально "выдергивает" из кристаллической решетки одни атомы и заменяет их другими.

Таким образом, в электронной технике технолог — это специалист, владеющий техникой микроразмеров и микроколичеств. Технология же — это самый сложный физический эксперимент по перестройке кристаллической структуры вещества в микроскопических объемах. Технология полупроводниковой электроники использует множество процессов и видов оборудования в самых

различных сочетаниях. Однако основой основ современной технологии полупроводниковой электроники является и останется, вероятно, на ближайшие 10—15 лет так называемая *планарная технология*¹ в ее модификациях и разновидностях.



Важнейшая задача в организации полупроводникового производства (повторим высказанное ранее положение) — построить его так, чтобы весь технологический процесс, точность оборудования, условия производства исключали возможность появления дефекта. И здесь основная роль отводится людям. Только в руках людей, хорошо овладевших техникой, она способна творить чудеса.

Большая сложность полупроводникового производства, исключительная точность оборудования требуют от персонала высокого уровня технической подготовки. Малейшие, казалось бы, совсем несущественные для неискушенного человека отступления от технологического процесса, требований гигиены производства приводят к появлению явных или скрытых (что во много раз хуже) дефектов. Эта особенность полупроводникового производства требует от персонала не только технической грамотности и культуры, но и высокой сознательности.

Инженер на производстве — это и руководитель, и воспитатель. Инженер электронной техники должен уделять воспитательной работе с персоналом во много раз больше внимания, чем инженер любой другой отрасли. Только в этом залог бездефектного выпуска продукции. Дефект — это брак. Брак — это потери. Потери —

¹ Планарная технология — это совокупность наиболее распространенных в настоящее время технологических приемов изготовления полупроводниковых приборов и микроэлектронных устройств. Она получила свое название потому, что весь прибор изготавливается на одной поверхности кристалла. В планарную технологию входят процессы фотолитографии, диффузии и др.

это нарушение экономики производства. Потери от брака можно выражать в штуках или в рублях. Если предположить, что потери от брака в денежном выражении составляют 50 %, то это значит, что в каждом рубле стоимости нашей продукции 50 коп. потерь.

Не только сложность, малые размеры и высокие точности отличают полупроводниковое производство от машиностроения. Машина может состоять из сотен или даже тысяч деталей. Если одна из них окажется дефектной, то ее можно обнаружить, изъять, заменить на годную. В брак пойдет единственная деталь, стоимость которой составляет незначительную часть от стоимости всей машины.

Полупроводниковый прибор — это одна очень сложная деталь, и изготавливается она в результате десятков и сотен операций. Ошибка на любой из этих операций, по чьей бы вине она не произошла, — это брак. Прибор не будет работать, и мы не сможем уже ничего изъять, заменить, поправить.

Сложность производства проявляется, таким образом, прежде всего в повышенном проценте потерь от брака. Если в машиностроении потери от брака могут составлять доли процента, то в полупроводниковой промышленности они исчисляются десятками процентов. При больших объемах производства за этими цифрами вырастают десятки и сотни миллионов рублей. В чем причины этих потерь? Как с ними бороться?

Первая причина — несовершенство используемых материалов. Микроскопические неоднородности, которые мы не можем даже проконтролировать, могут попадать в те или иные рабочие области прибора и приводить к нарушению его работы. Следует улучшать свойства материалов, совершенствовать методы их контроля, хотя стоимость материалов при этом будет возрастать. Вероятно, применение новых, более дорогих материалов окажется оправданным только в том случае, когда повышение расходов на материал окупится снижением потерь от брака. С этой причиной брака персоналу бороться труднее всего. Его возможности ограничены проверкой соответствия качества материалов нормам технических условий.

Вторая причина — недостаточная точность работы технологического оборудования. Оборудование имеет какую-то предельную точность, определяющую какой-то минимальный, считающийся допустимым процент брака. Однако в ходе работы оборудование разлаживается, появляются все большие и большие отклонения. Если за работой оборудования не установить самого жесткого контроля, если его периодически не настраивать и не настраивать, то процент брака будет постоянно возрастать, и это будет лежать целиком на совести персонала.

Третья причина — случайные отклонения от норм технологического процесса, обусловленные ошибками персонала (невнимательность, небрежность и т. п.). Воспитательная работа может весьма существенно снизить потери по этой причине. В принципе же надо стараться максимально исключать этот фактор за счет широкой автоматизации технологических процессов.

Четвертая (и далеко не последняя) причина — несовершенство самого технологического процесса, поэтому постоянное совершенствование его (замена старых методов более новыми и прогрессивными), являющееся законом развития любого производства, имеет особо важное значение для производства полупроводниковых приборов.

Если внимательно оценить специфику полупроводникового производства, учесть высокие потери от брака в этой отрасли, учесть, что потери от брака находятся в прямой связи с уровнем подготовки персонала, то станет ясно, что экономические проблемы полупроводниковой промышленности предъявляют к персоналу исключительно высокие требования.

Есть у этого производства и еще одна специфическая черта — это жесткие требования к надежности изделий. Для обеспечения запуска и полета космических кораблей используются десятки и сотни тысяч полупроводниковых приборов. Разве можно допустить, чтобы выход из строя нескольких полупроводниковых приборов ценою в 2—3 руб. привел к срыву космического эксперимента стоимостью не в один миллион рублей? Однако никакие формы контроля готовой продукции не могут в полной мере обеспечить высокую надежность полупроводниковых приборов. Она закладывается только в ходе изготовления этих приборов, в ходе технологических процессов. Небольшая ошибка персонала, нарушение инструкций и предписаний, казалось бы, совсем несущественные и никем не замеченные, — а в прибор уже внесен скрытый дефект, который проявится через несколько месяцев или даже лет, причем в самый ответственный момент...

Эта особенность также выдвигает особые требования к персоналу. Экономика и надежность — это в общем-то, как выясняется, две стороны одного и того же вопроса: четкой организации производственных процессов.

Таким образом, полупроводниковое производство характеризуется:

повышенным процентом инженерно-технических работников (ИТР) по сравнению с другими отраслями;

высоким уровнем профессиональной подготовки ИТР и особенно хорошими знаниями физического и физико-химического циклов;

высокой общеобразовательной подготовкой рабочих кадров, позволяющей осваивать сложные технологические процессы и оборудование;

высокими знаниями ИТР в области экономики и организации производства;

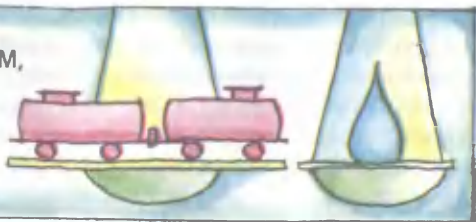
сознательной дисциплиной всего персонала (как ИТР, так и рабочих) — залогом обеспечения высоких экономических показателей производства и высокой надежности выпускаемой продукции.

К перечисленным выше характеристикам следовало бы добавить еще одну, являющуюся в какой-то степени производной от них, — постоянное повышение квалификации, техническую учебу в каждом звене (от рабочего до командира производства), потому что полупроводниковое производство является не только сложным, но и быстро развивающимся. Из года в год в этой отрасли сохраняются высокие темпы роста объемов производства, которых не знают другие отрасли.

Было бы ошибкой считать, что возрастание вдвое объемов производства сопровождается пропорциональным увеличением производственных площадей и численности персонала. Опыт работы отечественной промышленности показывает, что объемы производства растут значительно быстрее, чем численность персонала и производственные площади, а это значит, что производительность труда предприятий электронной техники непрерывно и существенно возрастает. Обеспечить этот рост может только думающий, сознательный персонал.

В то же время с каждым годом в строй вступают новые корпуса, новые заводы. Тысячи молодых людей, выпускников школ, приходят на производство. Обучить их, привить им уважение к своей профессии, воспитать в них сознательное отношение к порученному делу — благородная задача инженера электронной техники.

ГОМЕОПАТОВ НАМ,
КОНЕЧНО,
НЕ ДОГНАТЬ



Где-то на грани XVIII и XIX столетий врачи разделились на гомеопатов и аллопатов. Лозунг гомеопатов: "Подобное излечивается подобным". Их "генеральная доктрина" в основном сводится к следующему: если какое-то вещество в больших количествах или концентрациях может вызвать эффект, аналогичный симптомам той или иной болезни, то в очень малых концентрациях и количествах оно может служить лекарством против этой же болезни. Исходя из этого в качестве лекарств гомеопаты применяют сильно разведенные вещества. У них есть системы разведений: десятичная (десятичная) и центимальная (сотенная).

В десятичной системе степень разведения соответствует степени числа 10, в сотенной системе — степени числа 100. Так, шестая десятичная степень разведения представляет одну часть лекарства на миллион частей растворителя (обычно спирта). Ту же самую концентрацию дает и третья сотенная (100^3) степень разведения. Говорят, что гомеопаты с "особой любовью" прибегают к 18–30-центимальным разведениям, что соответствует единице с 36–60 нулями в знаменателе дроби...

О таких цифрах как-то даже неудобно говорить всерьез, проводить подсчеты, на сколько морей или океанов воды придется одна молекула растворяемого вещества... В этой области мы вряд ли сможем конкурировать с гомеопатами. Да и есть ли в этом необходимость? Но мы увидим сейчас на вполне конкретных примерах, что мы действительно работаем в области примерно до десятого десятичного (пятого центимального) разведения...

Итак, наша задача сейчас сводится к тому, чтобы показать, что полупроводниковая техника является действительно техникой микроскопических количеств. Поговорим о некоторых величинах, характеризующих чистые и сверхчистые вещества. Начнем с воды, тем более, что в полупроводниковом производстве она применяется исключительно широко. Нам известно, что молекулы кислот, щелочей, солей в воде диссоциируют, распадаются на положительные и отрицательные ионы — катионы и анионы.

Обычная природная вода имеет весьма высокое содержание растворенных в ней веществ. Если такую воду использовать для промывки полупроводниковых кристаллов, то ионы могут собираться поверхностью кристалла и "портить" его свойства. Воду необходимо освободить от ионов — деионизовать. Это осуществляется пропусканием воды через колонны, наполненные крупинками специальных активных смол, которые носят название *ионообменных*. Есть смолы, удерживающие анионы, есть смолы, удерживающие катионы. Их так и называют: *анионитные* и *катионитные*.

Допустим, что вода прошла очистку. А как определить, остались ли в ней ионы и сколько их? Очень просто. Вода с ионами в ней — это электролит. Чем больше ионов, тем выше электропроводность электролита. По величине электропроводности можно определить содержание в воде растворенных веществ. Измеряется обычно удельная проводимость (или удельное сопротивление), т. е. проводимость (или сопротивление) кубика вещества (в данном случае воды), сторона которого равна 1 см.

На первый взгляд вода, полностью освобожденная от ионов растворенных в ней веществ, должна обладать бесконечным сопротивлением, т. е. стать диэлектриком. Однако на практике этого не происходит. Даже самая чистая вода сохраняет свойство проводить электрический ток, причем при комнатной температуре ее удельное сопротивление не превышает 17 МОм · см.

За счет чего это происходит? Дело в том, что и отдельные молекулы воды диссоциируют, распадаясь на ионы водорода H^+ и ионы OH^- . Эти-то ионы и определяют способность воды проводить электрический ток. Очистить воду от них нам уже не удастся. Это значило бы очистить воду от самой себя. Если мы удалим из воды эти ионы, то будут диссоциировать новые молекулы. При данной температуре в воде будет вполне определенное количество диссоциировавших молекул. Именно этим количеством и определяется при комнатной температуре граничное значение удельного сопротивления деионизованной воды 17 МОм · см.

Аналогично выглядят процессы и в кристаллах полупроводника. Аналогия эта, конечно, не совсем точная, но она поможет нам понять смысл некоторых эффектов.

Электропроводность полупроводников тоже в очень сильной степени определяется наличием в них примесей. Правда, эти примеси не создают подвижных ионов, перемещающихся в кристалле. Подвижными носителями заряда в кристалле являются *электроны*. Очищая полупроводник от примесей, мы также сможем контролировать его чистоту по величине его электрической проводимости (или сопротивления). И так же, как в случае с водой, здесь можно обнаружить некоторый порог. Абсолютно чистый полупроводник

становится диэлектриком только при температуре абсолютного нуля. При повышенной температуре (например, комнатной) под действием тепловых колебаний кристаллической решетки отдельные валентные связи между атомами, образованные электронами, разрываются. Электроны, "вырвавшиеся" из связей, приобретают способность перемещаться в кристалле и переносить электрический ток. Исходя из этих соображений электропроводность полупроводников разделяют обычно на две составляющие: *примесную* и *собственную*.

Чем чище полупроводник, тем меньше в нем доля примесей электропроводности. С увеличением степени очистки мы можем достичь такого положения, при котором примесная проводимость станет неразличимой на фоне собственной проводимости. Дальнейшая очистка будет уже бессмысленной. При данной температуре мы не сможем увидеть разницу между более чистым и менее чистым полупроводниками.

Содержание примесей обычно оценивается по их концентрации, т. е. числом атомов примеси, содержащимся в 1 см^3 исследуемого вещества. Чтобы оценить разумный и возможный пределы очистки вещества, необходимо знать, какова же в нем концентрация носителей заряда, создаваемая тепловым возбуждением валентных связей. Иными словами, надо знать, какова же собственная концентрация носителей заряда.

Обычно один атом примеси дает единичный подвижный заряд. Значит, концентрацию примесей можно оценивать по концентрации носителей заряда.

В таком широко распространенном и хорошо изученном полупроводнике, как германий, при комнатной температуре и полном отсутствии примесей концентрация носителей заряда, способных принимать участие в процессе электропроводности, составляет около 10^{13} носителей на 1 см^3 . Следовательно, концентрация примесей порядка 10^{12} атомов на 1 см^3 уже не будет нами различаться на фоне собственной проводимости. В то же время концентрация примесей около 10^{13} атомов на 1 см^3 примерно вдвое увеличит содержание носителей заряда в полупроводнике. Вдвое изменится и его удельная проводимость. Это значит, что концентрация примесей, которую мы можем уверенно различать в таком полупроводнике, как германий, лежит в пределах $10^{12} - 10^{13}$ атомов на 1 см^3 .

Само по себе это число нам может ничего не говорить. Важно знать, сколько же атомов основного вещества, т. е. германия, содержится в 1 см^3 ? Эта величина составляет 10^{22} атомов в 1 см^3 . Таким образом, мы можем уверенно различать содержание примесей,

составляющих всего лишь 10^{-9} от содержания основного вещества.

Попробуем сделать эту величину более наглядной. Примем, что объем одной капли жидкости составляет $0,1 \text{ см}^3$. Итак, одна капля на 10^9 капель — это 10^8 см^3 , или 10^5 л , или 100 м^3 , или 100 т . Объем железнодорожной цистерны — около 50 т . Другими словами, мы "ощущаем" и можем обнаруживать примеси в германии, соответствующие капле на две железнодорожные цистерны.

Заметим, кстати, что человек за 70—80 лет жизни выпивает около одной цистерны воды. Выходит, что по нормам полупроводниковой чистоты одной капли достаточно, чтобы загрязнить норму питьевой воды одного человека на всю его жизнь!

Поскольку чистый германий будет характеризоваться в 10 раз меньшей концентрацией примесей (10^{12} атомов на 1 см^3), то можно сказать, что мы умеем очищать германий до концентрации примесей, соответствующей одной капле на 20 железнодорожных цистерн. Это, конечно, не 30-е и даже не 18-е центимальное разведение гомеопатов, но цифра, во всяком случае, внушительная. Германий очищают до такой степени уже скоро 30 лет, т. е. это далеко не последнее слово техники.

Самым распространенным материалом полупроводниковой электроники является кремний. Если германий стал широко применяться с 50-х годов, то широкое применение кремния началось лет на 10 позднее. Тем не менее сейчас мировое потребление кремния уже существенно превышает потребление германия.

Кремний имеет собственную концентрацию носителей при комнатной температуре, на три порядка более низкую, чем германий. Это значит, что в кремнии примеси могут быть различимы на уровне одной капли на 2000 цистерн, а в чистом кремнии примесей должно быть не более одной капли на 20 000 цистерн. Подобная степень чистоты кремния пока еще не достигнута, поскольку в ней пока не ощущают острой необходимости. Это, пожалуй, главная причина. Кроме того, достичь этой степени чистоты мешают высокие температуры плавления и повышенная химическая активность кремния. По содержанию примесей сегодня степень чистоты кремния находится на уровне степени чистоты германия. Вот что такое чистота современных материалов электронной техники...

В то же время очистить полупроводниковый материал — это только часть дела. Надо придать этому материалу необходимые свойства, что достигается введением в очищенный полупроводниковый материал строго заданных количеств вполне определенных примесей. Этими примесями могут быть бор, фосфор, сурьма, галлий, медь, золото, висмут, мышьяк, алюминий и некоторые другие элементы. Чтобы не внести в материал вместе с легирующей

примесью нежелательных загрязнений, эту легирующую примесь необходимо тщательно очистить.

Какие степени легирования являются наиболее распространенными и реальными в полупроводниковой электронике? В различных областях и в различных приборах встречаются концентрации в диапазоне $10^{20} - 10^{14}$ атомов на 1 см^3 . Соответственно это составляет от одного до одной миллионной доли процента. В таком диапазоне содержание примесей может изменяться внутри одного прибора в тонком приповерхностном слое, не превышающем 10–15 мкм. Заметим также, что часто важным бывает не просто значение концентрации в том или ином объеме, а закон изменения концентрации в тонком, порядка 0,1 мкм, слое.

Как обеспечить строго заданный закон распределения таких незначительных количеств примесей в поистине микроскопических объемах? И как проконтролировать результаты? Вот это и есть технология полупроводниковой электроники, в том числе и микроэлектроники.



В последнее время много говорят о микроэлектронике и интегральной электронике. И бывает, что высказываются так: "Эра полупроводников миновала. Наступила эра микроэлектроники". Со второй частью этого "изречения" нельзя не согласиться. А все высказывание в целом, и особенно первая его часть, в принципе неверно. Здесь в основу положена неправильная посылка, что-де полупроводники — сами по себе, а микроэлектроника — сама по себе. На самом же деле микроэлектроника — это самые молодые "листья" и побеги все того же дерева полупроводниковой электроники, и питается она от тех же самых корней. Появление и развитие микроэлектроники неразрывно связаны с развитием техники полупроводниковых приборов.

К микроэлектронике (или интегральной электронике) электроника шла двумя путями. Первый путь вел от потребителей

полупроводниковых приборов разработчиков электронной аппаратуры. В технике изготовления электронной аппаратуры давно уже появился метод *печатного монтажа*. На плату из изоляционного материала наносится слой металлической фольги. Тем или иным способом этой фольге придается форма токоведущих дорожек, исполняющих роль соединительных проводов. Раньше процесс сборки аппаратуры состоял в укреплении на шасси (панели) деталей и элементов и затем соединении этих деталей кусками провода с помощью пайки. В печатном монтаже детали припаиваются к отдельным точкам на плате, уже соединенным между собой токоведущими дорожками.

Уменьшались размеры деталей и элементов, уменьшались длина и ширина токоведущих дорожек. Первой появилась, вероятнее всего, мысль заменить детали — резисторы — электрическим сопротивлением самих токоведущих дорожек. Вместо резисторов стали применять узкие токоведущие дорожки, напыленные из сплава никеля и хрома. Затем таким же образом пришли к идее изготовления тонкопленочных конденсаторов. В необходимом месте токоведущую дорожку расширяли, обрывали, наносили на нее слой диэлектрика (например, монооксида кремния) и продолжали токоведущую дорожку, напыляя ее на слой диэлектрика. В разрыв дорожки оказывалась, таким образом, вставленной электрическая емкость — конденсатор. Появились и варианты: *тонкопленочные* и *толстопленочные методы* изготовления этих так называемых *пассивных компонентов*. В то же время изготовить пленочными методами *активные компоненты* — диоды, транзисторы — и до сих пор не удалось, если не считать некоторых лабораторных опытов.

Поскольку корпус диода или транзистора в десятки и сотни раз увеличивает объем прибора по сравнению с объемом кристалла, было решено запаивать активные элементы в схему без корпуса, в виде отдельных кристаллов. Необходимая изоляция таких кристаллов от воздействия внешней среды (свет, влага, различные загрязнения) осуществляется в этом случае путем герметизации всей схемы в специальном корпусе.

Так появились гибридная микроэлектроника и бескорпусные приборы. Гибридными данные схемы называются потому, что в них используются пленочные пассивные элементы и дискретные бескорпусные полупроводниковые приборы.

Разработчики полупроводниковых приборов шли к микроэлектронике своим путем. Первые полупроводниковые приборы имели относительно большие размеры кристаллов и работали только на низких частотах: существенно сказывались пролетные времена и паразитные емкости. Борьба за расширение частотного диапа-

зона приводила к уменьшению размеров активной области прибора. Так, расстояние между эмиттером и коллектором, время преодоления которого носителями заряда (пролетное время) в первую очередь определяют частотные свойства, уменьшилось с 50–60 мкм на первых образцах транзисторов до 0,1–0,05 мкм на современных самых высокочастотных транзисторах.

Уменьшились размеры активной структуры не только в глубину кристалла, но и по его поверхности. Площадь активной структуры транзистора ГТЗ 11, например, составляет всего 9000 мкм², а объем активной части 40 · 10⁻⁶. В то же время размеры кристалла существенно не изменились. Если 15–20 лет назад использовались квадратные кристаллы 1,5×1,5 мм², то в настоящее время минимальные размеры их составляют около 0,5×0,5 мм². Уменьшить размеры кристалла до размеров активной области полупроводникового прибора оказывается невозможным. С кристаллами таких размеров (со стороной менее 0,1 мм) нельзя манипулировать, особенно в ходе крупносерийного массового производства.

В результате в названном выше транзисторе ГТЗ11 активная область занимает всего 2 % площади кристалла и около 0,15 % его объема. (Отношение же объема корпуса к объему активной части составляет 6 · 10⁶!) Становится ясным, что полупроводниковый материал в данном случае используется далеко не лучшим образом.

Только при изготовлении кристаллов в отходы при резке, шлифовке и полировке уходит более 50 % полупроводникового материала. Так как процент брака в полупроводниковом производстве бывает тоже очень высок, то в готовые годные изделия обычно попадает не более 10 % используемого материала. И в то же время всего 0,15 % этих единиц процентов используется с пользой! В результате можно считать, что коэффициент использования полупроводниковых материалов при изготовлении дискретных полупроводниковых приборов составляет 0,1 % и менее! А полупроводниковые материалы могут стоить дороже золота, и часто в несколько раз! Даже экономическая сторона проблемы должна была бы заставить задуматься разработчика полупроводниковых приборов: а целесообразно ли мы используем полупроводниковые кристаллы?

Проблема миниатюризации электронного оборудования и увеличения плотности монтажа, т. е. числа деталей в 1 см³, все время наталкивала на ту же мысль. Вполне естественно, что мысль об изготовлении нескольких полупроводниковых приборов на одном кристалле буквально "витала в воздухе". Для ее практической реализации не хватало только технических средств, позволяющих получать на одном кристалле приборы с достаточно воспроизводимыми характеристиками.

Появление примерно в 1959 г. так называемой планарной технологии оказалось именно тем долгожданным техническим решением, которое позволило изготавливать на одном полупроводниковом кристалле целую схему, состоящую из десятков диодов и транзисторов и необходимых пассивных элементов.

Возникали здесь, естественно, и свои сложности, связанные в первую очередь с обеспечением электрической изоляции друг от друга отдельных компонентов, изготовленных на одном кристалле. Но проблема в целом была успешно решена: плотность монтажа возросла, коэффициент полезного использования кристалла тоже.

Так появились интегральные микросхемы, которые раньше называли монолитными или твердыми схемами. Теперь их называют полупроводниковыми. Это название представляется не очень удачным: какие интегральные схемы сегодня не полупроводниковые?

Итак, микроэлектроника и интегральная электроника... В чем разница между этими понятиями и что у них общего?

Микроэлектроника — понятие чисто количественное. По международному определению, микроэлектроника начинается тогда, когда плотность монтажа превышает пять элементов (диод, транзистор, резистор, конденсатор и др.) на 1 см^2 . На этом рубеже кончается миниатюризация электронного оборудования и начинается микроминиатюризация.

Интегральная электроника — это понятие уже не количественное, а качественное. Оно не связано с "плотностью упаковки". Определяющим фактором здесь является принцип изготовления.

Раньше каждый вид изделия электронной техники изготавливался на своем, специализированном предприятии. С разных концов страны эти изделия поступали на предприятие, занимающееся сборкой аппаратуры. Изготовление изделий электронной техники и изготовление аппаратуры из них были, таким образом, разнесены во времени и пространстве. В интегральной электронике изготовление деталей и схемы, состоящей из этих деталей, "проинтегрировано" в общих технологических процессах в стенах одного предприятия. Более того, в этих же процессах оказывается "проинтегрированным" и изготовление некоторых материалов. Так, полупроводниковые пленки могут получаться разложением галогенидов полупроводниковых веществ, металлические пленки — разложением металлорганических соединений.

Если методами интегральной электроники изготовить, например, мощный усилительный каскад, то плотность упаковки в нем может оказаться меньше трех деталей на 1 см^2 и его уже нельзя формально рассматривать как микроэлектронное устройство. В то же время практически все микроэлектронные устройства изго-

товляются методами интегральной электроники, и эти два понятия оказываются совпадающими. Таким образом, в основе микроэлектроники (или интегральной электроники, что будет точнее) лежат все та же планарная технология, все те же полупроводниковые структуры и тонкие пленки металлов и диэлектриков, все те же физические процессы в твердом теле, в сложных полупроводниковых структурах.

Однако должна же быть какая-то специфика? Бесспорно, да. Вопросы применения полупроводниковых приборов для работы в сфере интегральной электроники нужно знать лучше, так как делать придется уже не одиночные (дискретные) приборы, а довольно сложные устройства, включающие десятки, сотни и даже десятки тысяч полупроводниковых приборов, взаимодействие которых обеспечивает выполнение функциональных задач, возложенных на это устройство.

Другими словами, когда изделием электронной техники стал уже не отдельный (дискретный) полупроводниковый прибор, а совокупность таких приборов, образующая некоторую схему, то от разработчика такого изделия потребовалось уже и знание схемотехники. Под *схемотехникой* мы в данном случае понимаем совокупность знаний, позволяющих проектировать те или иные электронные устройства с полупроводниковыми приборами: усилители, генераторы, импульсные устройства, узлы электронной логики средств вычислительной техники или устройств памяти для ЭВМ и др.

Инженер электронной техники должен, таким образом, хорошо знать принципы построения схем в радиотехнике, автоматике, вычислительной технике, ибо изделие микроэлектроники — это электронная схема! Интегральная микросхема и отдельные (дискретные) приборы соотносятся примерно так, как иероглифы и буквы в алфавите или как крупные строительные блоки и кирпичи...

Где в первую очередь должны применяться интегральные микросхемы? Очевидно, там, где один и тот же блок повторяется наиболее часто и в больших количествах. Прежде всего это имеет место в вычислительной технике. Электронная вычислительная машина более чем на 50 % может состоять из 100—200 тыс. блоков всего 10—15 наименований: триггеров, схем совпадения, инверторов и др. На языке вычислительной техники такие блоки называют комбинацией слов И, ИЛИ, НЕ.

С этой точки зрения подготовить себя для работы в области микроэлектроники — значит разобраться в принципах современной вычислительной техники, например в основах булевой алгебры, созданной Джорджем Булем, отцом известной писательницы Этель Лириан Войнич... Это далеко не так сложно, как кажется на пер-

вый взгляд, тем более, что разобраться-то достаточно лишь в азах этой науки...

Современная ЭВМ — очень сложная система, состоящая из большого количества взаимодействующих звеньев. Каждое крупное звено можно разбить на более мелкие, вплоть до элементов, которые можно назвать неделимыми. Эти неделимые элементы поступают в готовом виде, не подлежат разборке, не ремонтируются при возникновении дефектов.

В первом поколении ЭВМ, созданных в 1945—1947 гг., активным неделимым элементом была радиолампа. Уже в 1948 г. появился транзистор, и в 1949 г. в США построен имитатор морского артиллерийского боя на первых точечных транзисторах. Первенец второго поколения ЭВМ появился, таким образом, незначительно позже первенца первого поколения.

Пассивными неделимыми элементами в этих поколениях ЭВМ оставались все те же резисторы и конденсаторы. Во втором поколении они лишь несколько уменьшились в размерах, так как уменьшились рабочие токи, напряжения, рассеиваемые мощности.

Интегральная электроника привела к появлению ЭВМ третьего поколения, неделимый элемент которого представляет собой уже электронную схему, выполняющую некоторые конкретные функции вычислительной техники. Сколько эквивалентных диодов, транзисторов и других элементов будет включать в себя такая схема, зависит от многих факторов: области использования, унификации данного элемента, его стоимости, сложности в изготовлении и т. п. Говоря о числе эквивалентных диодов и транзисторов в интегральной микросхеме, мы судим об уровне интеграции: об интегральных микросхемах среднего уровня интеграции, о больших интегральных микросхемах (БИС) и сверхбольших интегральных микросхемах (СБИС).

Чем выше уровень интеграции, тем сложнее интегральная микросхема. Сегодня есть уже довольно сложные портативные вычислительные устройства, у которых вся электронная часть представлена единственной микросхемой, насчитывающей тысячи транзисторов. Сделать эту микросхему специалист по вычислительной технике не может, так как не располагает знаниями в области электронного материаловедения, не имеет физико-химической подготовки, не владеет техническими средствами. Короче говоря, он знает, что блоху надо подковать, но не знает, как к этому делу подступиться. Инженеру же электронной техники, овладевшему азами вычислительной техники, эта задача не предвещает трудностей, особенно если он будет работать в тесном контакте со специалистом по вычислительной технике.

Аналогичное положение складывается не только в вычислительной технике, которую мы использовали в качестве наиболее типичного примера, но и в радиолокации, связи, автоматике, бытовой электронике и т. п. Везде мало-помалу начинают разрабатываться типовые решения, позволяющие осуществить переход к интегральной электронике.

Создание сложного радиоэлектронного комплекса включает сегодня следующий круг задач:

- задачи системотехники (разработка функциональной схемы комплекса вплоть до неделимого элемента; постановка задачи создания комплекса неделимых элементов, если нет возможности использовать уже имеющиеся типовые решения);

- — задачи схемотехники (разработка схемы неделимого элемента и увязка этой схемы с технологическими и физическими возможностями);

- разработку конструкции (топологии) и принципов изготовления (технологии) неделимого элемента;

- сборку узлов комплекса из неделимых элементов.

Получается, что для создания любого электронного комплекса третьего поколения в принципе необходимы (но не достаточны, естественно) специалисты с хорошей подготовкой двух профилей:

в областях радиоэлектроники, промэлектроники, автоматики, вычислительной техники, способные решать задачи системотехники и схемотехники, имеющие общее представление о технологических средствах микроэлектроники;

в областях физики полупроводников, теории полупроводниковых приборов, физической химии, кристаллографии, методов создания и исследования полупроводниковых структур, имеющие достаточно хорошее представление о схемотехнике, по крайней мере, на уровне неделимого элемента. Это и есть инженеры электронной техники.

На неделимом элементе эти две группы специалистов "стыкуются": одни его создают, другие — используют. Таковы пути, ведущие нас в глубь автоматики, радиоэлектроники, кибернетики...

Такая интеграция усилий специалистов различных смежных профилей, часто в пределах одного предприятия, получила название *вертикальной интеграции*.

ФУНДАМЕНТ СОВРЕМЕННОЙ КИБЕРНЕТИКИ



С появлением межконтинентальных ракет с ядерными боеголовками возникла и необходимость их своевременного обнаружения и уничтожения. Тогда же появился и анекдот о трех кнопках.

Один изобретатель предложил систему противоракетной обороны, в основе которой было три кнопки: зеленая, белая и красная. Нажатием на зеленую кнопку система включалась, нажатием на белую кнопку — переводилась в режим поиска неприятельской ракеты, нажатием на красную кнопку ракета уничтожалась на расстоянии. Когда же изобретателя спросили, а каким образом это все осуществляется, он ответил, пожав плечами: "Это уже дело техники. А мое дело предложить идею..."

Емкость неделимого элемента с каждым днем увеличивается: он принимает на себя все большее количество функций. Вероятно, и дальше все новый и новый круг задач будет уходить из сферы системотехники и переходить в сферу неделимого элемента. В конечном итоге можно себе представить, что к трем кнопкам будут присоединены три неделимых элемента. И тогда "дело техники" — это создание соответствующих неделимых элементов...

Естественно, три кнопки — это утрировано. В схемотехнике, например, в методах и принципах обработки информации много своих сложных и интересных задач. Однако утрировать, гиперболизировать можно лишь нечто реальное... Нуль ведь, во сколько раз не увеличивай, больше нуля не получишь...

Перейдем к цифрам. Большие электронные счетные машины первого поколения насчитывали несколько тысяч электронных ламп. Первые неделимые элементы третьего поколения ЭВМ насчитывают от 10 до 50 эквивалентных лампе элементов. Число этих эквивалентов лампы в неделимом элементе непрерывно растет и начинает исчисляться тысячами.

Наращивая плотность элементов в неделимом элементе, интегральная электроника переходит к "симбиозу" гибридных и монолитных схем, к сложным гибридным схемам, в которых в один корпус запаивается не несколько кристалликов дискретных диодов и транзисторов, а несколько кристаллов монолитных схем.

Получаются многокристальные гибридные БИС и СБИС.

Одним из крупнейших достижений интегральной электроники явилось появление в начале 70-х годов микропроцессоров. *Микропроцессоры* представляют собой набор интегральных микросхем, из которых можно собрать "мыслящую часть" ЭВМ. Если вся схема микропроцессора размещена на одном кристалле, то говорят об однокристалльном микропроцессоре. Следующий шаг был сделан от однокристалльных микропроцессоров к однокристалльным микро-ЭВМ.

Наиболее массовым типом является относительно простой четырехразрядный микропроцессор. В 1980 г. в капиталистических странах их было выпущено 150 млн. шт., восьмиразрядных микропроцессоров — 48 млн. шт.

В то же время для ряда применений, например для проектирования тех же самых СБИС, необходимо уже 32-разрядное устройство.

Одновременно со сложными универсальными микропроцессорами выпускаются и упрощенные варианты с узким целевым назначением.

Итак, основное назначение микропроцессора — автономное применение в качестве встроенных контрольно-управляющих и вычислительных средств и для построения процессоров микро-ЭВМ различного назначения.

В настоящее время, как уже говорилось, схемы в несколько десятков тысяч транзисторов на кристалле площадью 30—50 мм² не являются редкостью. Проектирование таких схем, даже с использованием современных вычислительных средств, превратилось в сложнейшую задачу, требующую многих месяцев работы.

Вычертить схему — это значит нанести на лист бумаги ряд точек, соединенных между собой отрезками прямых или дуг. Каждая точка должна иметь на чертеже вполне определенные координаты. Число координатных точек на больших интегральных микросхемах составляет несколько сотен тысяч и начинает приближаться к миллиону. Спроектировать такую схему вручную становится просто невозможно: слишком велика вероятность ошибки и слишком сложно ее обнаружить. Проектирование таких систем ведется с помощью ЭВМ, в памяти которых хранится набор самых различных типовых решений отдельных узлов схемы, транзисторов, проверенных на "технологическую совместимость". Результаты расчетов, проведенных ЭВМ, передаются на фотонаборную машину, "комплектующую" прототип того или иного фотошаблона. "Продукцией" цикла автоматизированного проектирования является комплект фотошаблонов и технологических режимов. Так создаются БИС.

И при организации автоматизированного проектирования при создании систем автоматизированного проектирования (САПР) во главу угла ставится все та же важнейшая экономическая задача: обеспечить максимальный процент выхода годных.

Время, затраченное на проектирование, это тоже экономическая проблема. Если оно составляет около года, то это и прямые расходы, и техническое отставание уровня изделий.

По прогнозам специалистов США эффективность средств проектирования к 1990 г. должна быть увеличена с современного уровня 50—100 транзисторов в сутки до 10 000.

В 1978 г. Министерство обороны США опубликовало программу развития техники сверхбыстродействующих интегральных микросхем (ССИС), в которой наряду с такими показателями, как доведение площади кристалла до 1 см^2 с размещением на нем до 250 тыс. вентилях (а каждый вентиль состоит из нескольких транзисторов) при минимальной ширине линии 0,5 мкм, предполагалось сократить сроки проектирования и затраты с 250 до 150 тыс. долларов.

И при этом 184 млн. долларов предполагалось выделить на работы по повышению процента выхода годных, что должно по расчетам снизить в 10—100 раз стоимость одной микросхемы.

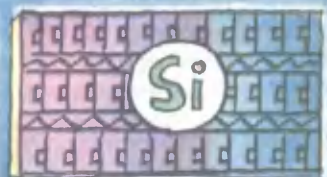
Интересно также отметить, что разные фирмы, принимающие участие в этой работе, используют разные языки автоматизированного проектирования. Только на разработку общего языка проектирования выделяется 50 млн. долларов.

Вот какие затраты делаются сегодня для создания устройств вычислительной техники и кибернетики.

У истоков технических основ кибернетики стоят, таким образом, создатели неделимого элемента основы основ любого электронного комплекса — *инженеры электронной техники*.

Итак, когда на землю падают спелые плоды кибернетики, то мы знаем, что выросли они на корнях полупроводниковой электроники.

КИБЕРНЕТИКА,
ФИЗИКА
ИЛИ ТЕХНОЛОГИЯ?



Мы, пожалуй, увлеклись проблемами развития вычислительной техники и кибернетики. Может создаться впечатление, что это-то и есть основное содержание профессии инженера электронной техники. Отнюдь нет... Мы хотели всего лишь показать, насколько широкий кругозор требуется инженеру электронной техники, особенно если он хочет стать исследователем, создателем новых приборов и элементов.

Вернемся к неделимому элементу — дискретному полупроводниковому прибору второго поколения и интегральной микросхеме третьего (или четвертого) поколения. Мы установили следующее:

без развития электронной техники, и особенно без быстрого развития полупроводниковой техники, невозможен прогресс в науке и технике вообще;

это очень сложная техника — техника микроразмеров и микроколичеств;

это техника, базирующаяся на структурообразовании, требующая хорошего знания физико-химических основ структурообразования: физической химии, кристаллографии, физического материаловедения и т. п.;

это техника, требующая широкого кругозора и особенно знаний в области электроники.

Мы еще ничего не сказали о физике — не всегда о самом важном говорят вначале. Иногда целесообразно самое важное оставить и напоследок. Мы рассмотрели проблемы структурообразования с точки зрения точности и сложности методов получения микроструктур в объеме кристалла полупроводника. А что представляют собой эти структуры? Какие процессы происходят в них? Почему они должны быть такими, а не иными? И вообще, какими должны быть структуры? Ответы на эти вопросы дает теория полупроводниковых приборов. Поскольку полупроводниковый прибор — сложная полупроводниковая структура, то теория прибора — это теория физических процессов в сложных полупроводниковых структурах.

Если в основе принципов действия предшественников полупроводниковых приборов — электровакуумных приборов — лежало

взаимодействие с электрическими, магнитными и электромагнитными полями в вакууме, то в основе принципа действия полупроводниковых приборов лежит взаимодействие электронов с электрическими и магнитными полями в твердом теле.

Физически это более сложный процесс, поскольку заряды взаимодействуют не только с наложенными извне полями, но и с кристаллической решеткой вещества, характеризующейся периодическим потенциалом, с атомами примесей, с другими дефектами кристаллической решетки. Особенно сложными, интересными и важными являются физические процессы на границе раздела двух сред: полупроводника и диэлектрика, полупроводника и металла, металла и диэлектрика, а также на границе "встречи" кристаллических решеток двух различных полупроводников.

Физика полупроводников, основанная на теоретической физике, физике твердого тела и квантовой механике, рассматривает в основном все виды физических процессов в однородных объемах полупроводника и частично процессы на плоских бесконечных границах раздела двух полубесконечных объемов разных сред. Таким образом, она подводит нас вплотную к изучению физических процессов в сложных полупроводниковых структурах, образованных неоднородными по свойствам и конечными по размерам объемами крайне малой величины.

Естественно, что не любая сложная структура будет обладать свойствами, которые можно будет практически использовать. Теория полупроводниковых приборов из всех видов физических процессов в полупроводниках и из всех возможных видов полупроводниковых структур выбирает для изучения в первую очередь те, которые уже сегодня находят или могут найти практическое применение.

Таким образом, физика полупроводников и ее естественное развитие — теория полупроводниковых приборов — и составляют, собственно говоря, физико-теоретические основы полупроводниковой электроники. Их задачей является изучение электрических, магнитных, тепловых, механических и оптических эффектов, возникающих в результате взаимодействия электрических зарядов, перемещающихся в твердом теле, с периодическим потенциалом кристаллической решетки и с приложенными извне электрическими и магнитными полями, механическими нагрузками, излучениями всех видов и градиентами температур.

На базе названных выше эффектов создается огромное количество самых различных по принципам действия и назначению полупроводниковых приборов — как дискретных, так и входящих в состав интегральных микросхем.

Мировая промышленность выпускает сейчас более 20 млрд. транзисторов и более 20 млрд. интегральных микросхем. Если считать, что среднее число транзисторов в одной микросхеме составляет около 3000, то это значит, что каждый год в электронное оборудование устанавливается более 6000 млрд. транзисторов. Для сравнения отметим, что самый большой объем выпуска электронных ламп не превышал 3 млрд. шт. в год.

Вот на чем, образно говоря, держатся вся электроника, автоматика, вычислительная техника, связь.

Трудно выбрать то, что необходимо сказать об этом классе приборов. Сказать мало — значит недооценить это направление. Попытаться сказать все — значит занять слишком много места. Тем не менее попытаемся кратко охарактеризовать этот класс приборов.

Прежде всего разделим приборы по назначению и выполняемым ими функциям.

1. Приборы для усиления электрических колебаний; широкая номенклатура диодов и транзисторов, отличающихся принципом действия (полевые и биполярные транзисторы), конструкцией и технологией (сплавные, мезапланарные, планарные, эпитанарные и др.), материалами (германий, кремний, арсенид галлия), частотным диапазоном (от единиц герц до десятков гигагерц; $1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$), чувствительностью, входным сопротивлением, отдаваемой мощностью, линейностью характеристик и многими другими свойствами и параметрами.

2. Приборы для генерирования электрических колебаний различных формы, мощности и частоты; множество диодов и транзисторов, различающихся по принципам действия (диод Ганна, лавинно-пролетный диод, туннельный диод, биполярный транзистор, полевой транзистор), по конструкции, технологии, материалам и параметрам.

3. Приборы для преобразования электрических сигналов; в первую очередь выпрямительные приборы — от сверхвысокочастотного диода до силовоточного выпрямителя, приборы, выпрямляющие колебания электромагнитного поля частотой от 50 до $50 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ и выше и мощностью сигналов от 10^{-12} до 10^4 Вт и выше.

Все эти типы приборов разделяются по материалам: от наиболее старого полупроводникового материала селена до наиболее новых и наименее изученных многочисленных соединений, двойных и тройных, состоящих из элементов II, III, IV, V и VI групп периодической системы Менделеева. Самым распространенным полупроводниковым материалом (как по числу изготавливаемых из него приборов, так и по количеству тонн его, потребляемому в мировой

практике) является сегодня кремний. Вторым за ним следует германий.

Этот самый большой класс (первые три пункта) полупроводниковых приборов вмещает в себя по приблизительной оценке около 98 % всего количества дискретных полупроводниковых приборов, поступающих на мировой рынок. Приблизительно то же получится, если мы будем оценивать объемы проданных изделий в денежном выражении или количество промышленных типов.

4. Следующий класс — приборы для оптоэлектроники. *Оптоэлектроникой* называют область электроники, занимающуюся преобразованием световых сигналов, несущих информацию, в электрические и наоборот. Сюда не следовало бы включать солнечные батареи — важнейшие устройства, преобразующие непосредственно солнечную энергию в электрическую и наоборот с коэффициентом преобразования от 7 до 15 %. Солнечные батареи успешно снабжали энергией электронное оборудование ряда искусственных спутников Земли и межпланетных станций, приводили в действие ходовую часть "Лунохода-1", обеспечивали энергией передачу информации на миллионы километров с автоматических станций, исследовавших Венеру, питают электроэнергией аппаратуру телевизионных спутников "Молния".

Чтобы не выделять эти приборы в особый класс и учитывая общность принципов действия, мы их также введем в класс оптоэлектронных приборов наряду с фоторезисторами, фотодиодами и фототранзисторами.

Названные выше типы приборов принадлежат к категории фотоприемников. К оптоэлектронным устройствам относятся также и самые разнообразные виды излучателей: светодиоды, индикаторы на светодиодном принципе и источники когерентного излучения — полупроводниковые квантовые генераторы (полупроводниковые лазеры). За последние годы этот тип приборов приобрел исключительно важное значение и объемы их производства быстро растут.

5. Особый класс приборов представляют приборы для автоматики — различные виды датчиков. Строго говоря, некоторые виды фотоприемников, регистрирующих наличие или отсутствие освещения или реагирующих на его заданный уровень, следовало бы отнести к этой категории. Сюда войдут датчики излучений, датчики температуры, датчики магнитных полей, тензодатчики и некоторые другие.

6. Отдельно рассматриваются энергетические термоэлектрические приборы — термогенераторы, преобразующие тепловую энергию непосредственно в электрическую, и полупроводниковые холодильники.

Нам осталось назвать последний и самый широкий класс изделий полупроводниковой электроники, достаточно подробно рассмотренный выше, — интегральные полупроводниковые приборы, или приборы микроэлектроники.

Для оценки соотношения между объемами продаж всех типов дискретных приборов и интегральных микросхем приведем такой пример. В 1981 г. в США дискретных приборов было продано на сумму 3,18 млрд. долларов, а интегральных микросхем — на 5,93 млрд. долларов.

Таким образом, полупроводниковая электроника — это очень емкое понятие. В него входят и основы всей современной электроники, и основы оптоэлектроники, в том числе полупроводниковые лазеры, и очень многое другое. И все это объединено общими теоретическими основами и общей технологической базой. Широкий профиль специалиста полупроводниковой электроники дает ему возможность работать в самых различных областях, в которых используется это направление науки и техники.

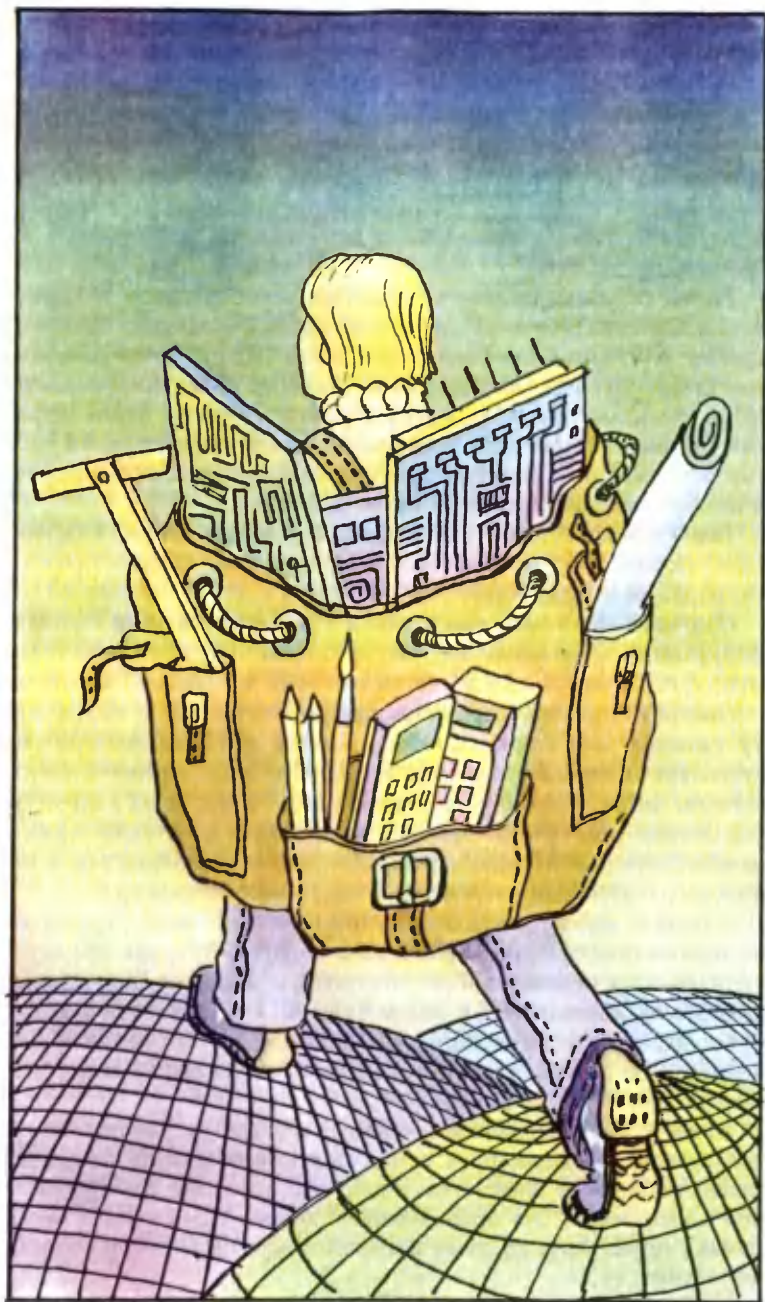
Так в чем же суть полупроводниковой электроники? Как наиболее коротко, но и достаточно полно сформулировать главное, что образует ее сущность?

Полупроводниковая электроника — это прецизионная технология, физика и материаловедение сложных полупроводниковых структур, схемотехника и системотехника неделимого элемента.

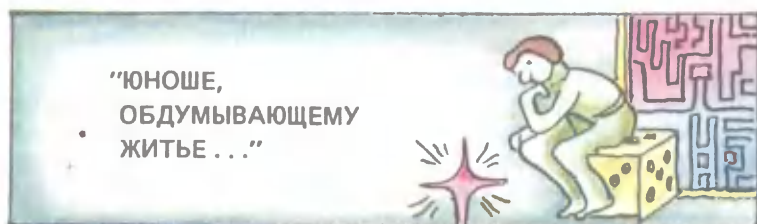
Нельзя не сказать, что в современную интегральную электронику начинают все шире проникать многие эффекты, которые не относятся к классическим эффектам полупроводниковой электроники. Здесь следовало бы упомянуть и об эффектах в структурах металл—диэлектрик—металл, об эффектах в металлических и диэлектрических пленках при крайне низких температурах, о некоторых магнитных, пьезоэлектрических эффектах и др.

В рамках интегральной электроники начинают интегрироваться не только приборы, но и различные по своей природе эффекты. Если сегодня основой микроэлектроники является полупроводниковая электроника, то в самом близком будущем этой основой будет электроника твердого тела, включающая в себя полупроводниковую электронику как основной, но далеко не единственный раздел.

Более того, появляются все новые и новые устройства, не использующие традиционных принципов схемотехники. Такая несхемотехническая электроника получила название *функциональной электроники*. Это принципиально новое направление в электронике может быть по праву названным электроникой четвертого поколения.



ГЛАВА 2 ТВОЙ ПУТЬ В НАУКУ



Десятиклассник приходит в вуз... Довольно часто он приходит в вуз с твердым убеждением, что его призвание — наука. Он еще только не решил, в какой области он себя проявит, но в том, что он будет ученым, не сомневается.

И действительно, многие из выпускников вузов будут работать в науке. Но сколько? Где будут работать остальные? Какими путями надо идти, чтобы прийти именно в науку? Кто попадает на производство? Можно ли "выучиться на ученого"? В каких вузах готовят научных работников, а в каких — производственников? Эти вопросы волнуют и абитуриентов, и студентов младших курсов, и старшекурсников. Может быть, в науку попадают самые одаренные?

Можно быть заурядным инженером в научно-исследовательском институте, и можно быть талантливым, именно талантливым, организатором производства на заводе. Руководить современным производством, особенно производством в электронной отрасли промышленности, производством изделий исключительной сложности и точности может только хорошо подготовленный и одаренный (заметьте — одаренный!) человек. Конечно, талант исследователя и талант организатора, командира производства, — это не одно и то же. Здесь нужны и разные способности, и разный склад ума и характера.

Несомненно, что талант организатора, талант руководителя является не менее редким и ценным, чем талант исследователя. Несомненно и другое: этот талант является не менее (а может быть, даже и более) нужным, чем талант исследователя. Что бы мы делали, если бы у нас были только талантливые исследователи и не было бы талантливых организаторов производства? Наука без производства не имеет никакого смысла. Плохо организованное производство сведет на нет усилия даже самых талантливых ученых. Хорошо организованное производство — это и быстрая реализация достижений науки, и помощь ученым в конкретном решении задач, и экономика, определяющая высокий жизненный уровень.

Еще Д. И. Менделеев писал: Только там наука будет любезна народу и станет через него развиваться, где промышленное развитие пустило глубокие корни. Именно поэтому, как служитель науки, ради нее самой, я пламенно желаю промышленного развития страны... Если без науки не может быть современной промышленности, то без нее не может быть и современной науки”.

”Источником прогресса науки и одновременно производства является творческий диалог между ними”, — говорит академик Н. Н. Семенов. Наука и производство должны представлять технические средства для дальнейшего развития и совершенствования, для повышения как технического уровня выпускаемых изделий, так и экономических показателей производства. В свою очередь, уровень развития производства определяет возможность науки, с одной стороны, и ставит задачи и проблемы перед наукой, с другой стороны.

Наука не могла бы существовать без производства хотя бы уже и потому, что производство создает прибыли и часть этих прибылей используется для финансирования науки. Производство кормит науку, и оно вправе требовать, чтобы наука в первую очередь решала проблемы, выдвигаемые насущными нуждами производства.

Зарубежная статистика показывает, что научные исследования проводятся за счет отчисления определенного процента от объема продаж промышленного производства. В разных отраслях этот процент может быть разным. Одна отрасль только формируется, развивается, и процент отчислений на исследования должен быть высоким, другая — является старой, установившейся, и ее технический уровень можно поддерживать ценой существенно меньших затрат. Обычно новые отрасли с еще не сложившимся производством развиваются за счет прибыли, даваемой старыми отраслями, в недрах которых они появились и на смену которым идут.

В разных случаях величина отчислений от общего объема про-

даж может колебаться от 1,5—2 до 8—10 %. Эти цифры дают возможность оценить соотношения между наукой и производством в развитых в техническом и экономическом отношении странах.

Если принять в среднем процент отчислений на научные работы равным 5 %, то это значит, что объем продаж производства в денежном выражении приблизительно в 20 раз превосходит затраты на науку. Заработная плата составляет обычно 20—40 % как от стоимости выпускаемой продукции, так и от полных затрат на науку. Остальное составляет стоимость материалов, амортизации оборудования, эксплуатации помещений, электроэнергии и отопления, затрат на транспорт и административные расходы.

Предположим, что в данной отрасли средняя заработная плата как в науке, так и в промышленности составляет 30 % от стоимости затрат. Тогда на каждый рубль зарплаты в науке приходится 20 руб. зарплаты в промышленности. Если предположить, что средняя заработная плата также одинакова, то и численность персонала в науке и в производстве будет относиться как 1:20.

Бесспорно, доля ИТР в научных учреждениях выше, чем на производстве. Для наших приближенных расчетов примем, что в науке ИТР составляют 50 %, а на производстве, тем более на таком, как предприятия электронной промышленности, — 10 %. Тогда при принятом нами соотношении численности 1:20 на каждые 10 человек в науке будет приходиться 5 ИТР, а на 200 человек в производстве — 20 ИТР.

Итак, на каждого инженера, работающего в науке, должно приходиться 4 инженера, работающих на производстве. Более того, если долю ИТР в науке принять равной 40 %, а на производстве — 20 %, то соотношение ИТР в науке и на производстве будет составлять 1:10. А это значит, что в науку должен идти каждый пятый, если не каждый десятый выпускник вуза. Именно поэтому надо готовить себя в первую очередь для работы в промышленности.

Правда, электронная промышленность повсюду является самой наукоемкой отраслью промышленности. Так, в США за период с 1972 г. по 1980 г. затраты на науку выросли в электронной промышленности в 4,1 раза, причем растут эти затраты, опережая прогнозы.

Так, на 1981 г. прогнозировались затраты в 1 млрд. долларов, а фактически было израсходовано уже в 1980 г. 1,36 млрд. долларов. Внутри же электронной промышленности самые высокие темпы роста ассигнований на научные исследования наблюдались в микроэлектронике.

Скажем прямо, эта подготовка не только не пропадет даром для того, кому придется работать в науке, но и существенно по-

может ему в научной деятельности. Это положение особенно справедливо для предприятий полупроводниковой электроники. Ведь раньше мы познакомились с тем, что технология, знание, *как сделать*, являются здесь основой основ не только для производителей, но и для разработчика приборов. (Кстати, технологическая документация по-английски так и называется: I know how — знаю как...)

Итак, то, что нужно для производственника, нужно и для научного работника. Это условие является, таким образом, необходимым. Но является ли оно достаточным? Вероятно, нет... Так что же нужно, чтобы стать научным работником? Чтобы стать ученым? Дает ли мой вуз эти необходимые знания? Каждый ли может стать ученым? Куда пойти и чем заняться, чтобы попасть в науку? Эти вопросы не отличаются особой новизной. Их задает каждое поколение студентов и в каждой отрасли техники.

Вот что пишет, например, известнейший авиаконструктор А. С. Яковлев в своей книге "Цель жизни": "Нередко я слышу вопрос о том, каков наиболее быстрый путь в науку, в самостоятельное творчество. Ответ на это один — такого общего рецепта не существует". Яковлеву можно верить. Это ученый и конструктор с мировым именем. На его самолетах мы летали до войны, на его самолетах воевали, на его самолетах летают и сейчас. Итак, поверим ему, что общего рецепта не существует.

Тем не менее вряд ли можно делать вывод, что и разговаривать тогда не о чем. Нет общего рецепта, но есть ряд совершенно необходимых, хотя и не достаточных условий. Можно и нужно рассмотреть ряд конкретных положений, которые сто́ит твердо усвоить любому претенденту на научную карьеру, и первое из них: "Наука или степень?"

Прочитируем снова А. С. Яковлева: "Приходят и такие, которые думают, что они рождены лишь "для науки", для "решения проблем", а посему требуют "создания условий", чтобы они могли немедленно сесть за написание диссертации и получить ученую степень. Едва окончив институт, не успев проявить свои творческие способности, они уже претендуют на кресло в науке. Это, за очень редким исключением, ловкачи, от которых мало пользы... Характерно, что молодые специалисты, живущие установкой на ученую степень, в практическую жизнь включаются неохотно".

Итак, диссертация и степень — это один вопрос, а наука — другой. Давайте с самого начала ориентироваться не на сомнительный афоризм: "Ученым можешь ты не быть, а кандидатом быть обязан", а скорее на слова из известной и популярной песни: "Готовься к великой цели, а слава тебя найдет...". Будет наука, будет и степень...



А что же такое наука? Академику Л. А. Арцимовичу приписывают высказывание, что наука — это способ удовлетворять свое собственное любопытство за государственный счет. Вряд ли важно установить, ему ли принадлежит эта шутка. Главное, что в ней будет огромная доля правды, если ваша научная деятельность не будет приносить конкретной практической пользы.

Наука прежде всего есть процесс общественный, отсюда и рассматривать ее следует только в тесной связи с практикой, с общественной полезностью ее результатов. Этот общественный процесс познания состоит из совокупности отдельных актов познания, каждый из которых выявляет какую-то крупницу истины. Крупница за крупницей мы накапливаем свои знания, от знания частных законов переходим к знанию более общих законов, от части движемся к целому. Путь от части к целому называют *индукцией*. С этой точки зрения наука развивается по законам индукции. Ниже мы будем говорить о методах и средствах познания, об индукции и дедукции. Индукцию как общий закон развития науки не следует путать с индуктивным методом, используемым в процессе познания.

Классическую формулу познания, схему, по которой осуществляется процесс познания, дал в "Философских тетрадах" В. И. Ленин: "От живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике — таков диалектический путь познания истины, познания объективной реальности"¹. Разработка материалистической теории познания явилась одним из крупнейших достижений марксистско-ленинской философии. Однозначно решив основной вопрос философии — вопрос об отношении мышления к бытию, сознания к природе, показав первичность материи и вторичность сознания, марксизм-ленинизм разгромил также и своих идейных противников в вопросах теории познания.

Суровой критике были подвергнуты господствовавшие в до-марксовской философии два основных философских направления:

¹ Ленин В. И. Полн. собр. соч., т. 29, с. 152, 153.

эмпиризм и рационализм. Эмпиризм выдвигал на первый план роль непосредственного наблюдения в познании и отрицал роль теоретического мышления, обобщения, абстракций. В противоположность эмпиризму рационализм выдвигал на первый план деятельность разума, приписывая ему роль единственной силы познания, игнорируя роль опыта в процессе познания.

Марксистско-ленинская философия преодолела ограниченность этих двух философских направлений, показав, что процесс познания имеет ряд ступеней развития, связанных между собой и вытекающих друг из друга. Эти ступени включают в себя использование в процессе познания как опыта, так и абстрактного мышления. Марксизм-ленинизм утверждает при этом первенствующее значение практики, опыта в познании. Это не значит, естественно, что процесс познания может опираться только на практику, так же как не может опираться только на абстрактное мышление.

Итак, исходным пунктом всякого акта познания является живое созерцание действительности. На этой первой ступени познание дает преимущественно образы единичных предметов, раскрывает лишь внешнюю сторону сущности, т. е. явление. Простое созерцание не дает возможности познать сущность. Целью же науки является вскрыть сущность вещей за внешними формами их проявления. Наука была бы излишней, если бы форма проявления и сущность совпадали.

На практике очень часто еще приходится встречаться с проявлениями эмпиризма. Накопление большого объема экспериментального материала обычно производит внушительное впечатление. Эта работа является к тому же очень полезной. Однако никакой объем и практическая ценность материала не могут придать ему характер научного исследования, если ленинская формула остается невыполненной. Только тогда, когда от простого накопления экспериментального материала (живое созерцание) мы переходим к его опосредствованию, т. е. к обобщению материалов ощущений мышлением, мы совершаем второй шаг, придающий нашей работе характер научного исследования, но и на этом процесс познания нельзя считать законченным. Чтобы завершить процесс исследования, мы должны подтвердить экспериментом правильность результатов опосредствования, т. е. правильность выбранной гипотезы.

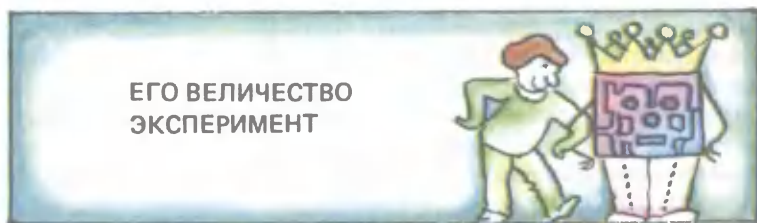
К вопросу о подтверждении гипотезы и превращении гипотезы в теорию мы еще вернемся. Здесь же скажем несколько слов о средствах познания. *Средствами познания* являются анализ и синтез, дедукция и индукция как виды и методы исследования. Эти методы и виды не являются ни в какой степени взаимоисключаю-

щими. Единство анализа и синтеза, их соединение являются элементами диалектики. Органическая связь анализа и синтеза в процессе познания неоднократно подчеркивалась К. Марксом, Ф. Энгельсом и В. И. Лениным. Аналогично обстоит дело и с индукцией и дедукцией.

Индукция представляет собой способ рассуждения от частного к общему, от фактов к обобщениям. Дедукция, наоборот, является способом рассуждения, при котором от общих положений мы приходим к частным выводам.

Дедукция и индукция взаимоотносятся так же, как рационализм и эмпиризм. Опираясь только на опыт или же только на абстрактное мышление, домарксистские философы признавали только один из способов рассуждения: рационалисты – только дедукцию, эмпирики – только индукцию. Для марксистской философии, не отрывающей опыта от абстрактного мышления, индукция и дедукция не являются самостоятельными, изолированными друг от друга видами исследования. Один из них невозможен без другого.

Ведя процесс познания с живого созерцания и опосредствования материалов наблюдения, мы неизбежно начинаем с индукции, т. е. идем от изучения единичных факторов к обобщениям. На основании предварительного индуктивного изучения материала мы получаем возможность, переходя к дедукции, делать частные выводы из общего положения. Эти выводы, носящие характер гипотезы, могут и должны быть проверены опытом, которому в процессе познания отводится первенствующая роль. Если опыт со всей убедительностью и достаточностью подтверждает гипотезу, то она становится теорией.



Об эксперименте следует поговорить особо. Корни пренебрежительного отношения к нему уходят, как говорится, в глубь веков. Еще в античные времена считалось достаточным дать объяснение наблюдаемым явлениям. Можно и сегодня столкнуться с научной работой, в которой приводится большое количество кривых, полу-

ченных экспериментально (!), и дается объяснение, какие физические процессы якобы обусловили тот или иной ход кривых.

В данном случае мы имеем дело с чистой водой рационализма, хотя и рассматриваются экспериментальные кривые. Эксперимент эксперименту рознь. В данном случае речь идет о накоплении фактического материала, служащего основой для последующего обобщения, изучения, опосредствования мышлением. Это всего лишь первый этап познания, это "живое созерцание", хотя "созерцаете" вы и не явление природы, а предметы или явления, созданные, так сказать, собственными руками. Говоря об определяющем значении опыта в процессе познания, мы имеем в виду тот эксперимент, который завершает процесс познания, который ставится для проверки собственных предположений.

Первые соображения об эксперименте именно в этом смысле относятся к XIII в. и принадлежат Роджеру Бэкону, английскому философу и естествоиспытателю, занимавшемуся научными исследованиями в Оксфорде. В философских взглядах Роджера Бэкона для нас представляют интерес два положения.

1. Все науки основываются на математике и только тогда прогрессируют, когда факты могут быть подведены под математические принципы. Другими словами, железная логика математики и точные количественные соотношения, вытекающие из математических зависимостей, должны лежать в основе всех наук, которые мы сегодня называем "точными".

2. В основе науки лежат два метода исследований: один — путем рассуждений, второй — путем опытов. Чистые доводы никогда не бывают достаточными; они могут решить вопрос, но не дают уверенности уму, который убеждается и удовлетворяется только немедленной проверкой и исследованием факта, а это достигается только опытом. Другими словами, путем рассуждений мы способны выработать правильную гипотезу, но убедиться в ее правильности мы можем лишь с помощью эксперимента.

Средневековым схоластам и метафизикам такой подход показался, по-видимому, крамольным. Роджер Бэкон подвергался суровым преследованиям со стороны ордена францисканцев, ему чинились всяческие препятствия в работе, за ним устанавливался надзор со стороны ордена, книги его конфисковывались; 14 лет своей жизни он провел в темнице.

Почти 350 лет спустя после Роджера Бэкона той же точки зрения на роль и значение эксперимента в исследовании придерживался его однофамилец — Фрэнсис Бэкон. Жизнь Ф. Бэкона сложилась легче, чем жизнь его предшественника. Лорд и барон Веруламский, виконт Сент-Ольбанский, лорд великий канцлер, он если и подвергался преследованиям, то главным образом со стороны Палаты

общин за то, что скреплял печатью распоряжения короля, превышавшие пределы его власти, установленные парламентом. И в тюрьме он провел всего лишь один день...

Своей славой Ф. Бэкон обязан не государственной, а научной деятельности. Еще не достигнув 13-летнего возраста, он поступает в Кембриджский университет. Некоторые биографы предполагают, что он еще во время учебы в университете набросал план наиболее известного своего сочинения "Новый Органон". Однако это вызывает сильные сомнения, так как "Новый Органон", являющийся второй частью философского сочинения "Великое возрождение наук", скорее подводит итог научной деятельности Ф. Бэкона. Именно в "Новом Органоне" он излагает суть индуктивного метода. Ф. Бэкон был настолько убежден в несостоятельности процветающего тогда дедуктивного метода, что и "близко не подпускал" к себе дедукцию. В этом главная ошибка Ф. Бэкона, не позволившая ему создать действительно правильный метод исследования. Заслуга же его в том, что он поднял роль эксперимента как единственного критерия истины в научных исследованиях.

В 1645 г. под влиянием сочинений Ф. Бэкона было создано первое общество экспериментаторов, явившееся основой возникшего несколько позже Королевского общества ученых. Девизом этого общества явилось: "Ничего на слово...".

Произошло это уже после смерти Ф. Бэкона. Он умер в 1626 г., простудившись во время экспериментов по предохранению продуктов от гниения с помощью замораживания. Он сам лично набивал курицу снегом и затем, заболев, до последней минуты жизни интересовался результатами своего эксперимента, который, между прочим, закончился вполне успешно. Так появился первый вариант холодильника...

Справедливости ради необходимо отметить, что Ф. Бэкон не был единственным философом эпохи Возрождения, утверждавшим эксперимент в его правах. Например, Леонардо да Винчи, умерший в 1519 г., т. е. за 42 года до рождения Ф. Бэкона, писал: "И если ты скажешь, что науки, начинающиеся и кончающиеся в мысли, обладают истиной, то в этом нельзя с тобой согласиться, а следует отвергнуть это по многим причинам, и прежде всего потому, что в таких чисто мысленных рассуждениях не участвует опыт, без которого нет никакой достоверности".

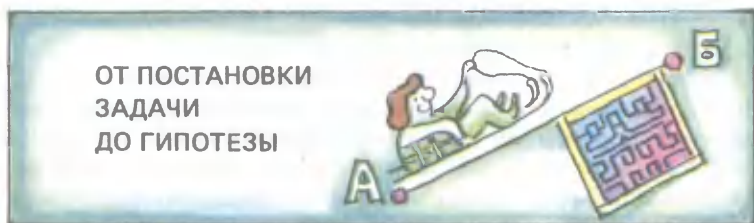
Настаивая на важности эксперимента, Леонардо да Винчи не делал упора только на эксперимент: "Влюбленный в практику без науки — словно кормчий, ступающий на корабль без руля и компаса; он никогда не уверен, куда плывет". Сам великий практик и экспериментатор, он советовал: "Когда будешь излагать науку о

движениях воды, не забудь под каждым положением приводить его практические применения, чтобы твоя наука не была бесполезна”.

Таким образом, наука эпохи Возрождения стала уже прочно опираться на эксперимент. Это не значит, естественно, что с тех пор и до наших дней роль эксперимента понимается правильно и однозначно.

В начале этого параграфа мы говорили об имеющейся у некоторых исследователей тенденции собрать экспериментальный материал и “объяснить кривую”. Говорят, что в 30-х годах в физикотехническом институте в Ленинграде Я. И. Френкеля остановил в коридоре один из сотрудников института и показал ему экспериментальную кривую. Я. И. Френкель тут же на месте дал объяснение хода этой кривой. Когда выяснилось, что кривая случайно была перевернута вверх ногами, то Я. И. Френкель, немного поразмыслив, дал объяснение и этому случаю.

Объяснить — это еще не доказать. Это еще только всего-навсего гипотеза. И для ее проверки и подтверждения нужен эксперимент.



Посмотрим, каким же образом появляется гипотеза. Остановимся в самом начальном пункте исследования. Всякое исследование начинается с постановки задачи. Постановка задачи — важнейший этап в проведении исследования. Это, кстати сказать, и своеобразный пробный камень для исследователя. К. А. Тимирязев говорил, что от самостоятельного исследователя мы вправе требовать: умения выбрать и поставить вопрос; умения пользоваться средствами исследования, которыми располагает наука (если уже не находить своих новых); умения разобраться в полученных результатах, т. е. понимать, что дало исследование и дало ли оно что-нибудь.

Итак, на первом месте — постановка задачи. Действительно, правильно сформулированная задача — это, как правило, 50 % успеха, и в ней уже содержится значительная часть решения.

Возьмем в качестве примера задачи из школьного учебника. В них приводятся только те данные, которые необходимы для решения задачи. Ни одного лишнего числа и тем более ни одного недостающего. Если вы выбрали путь решения, для которого в условиях задачи имеются избыточные или недостающие сведения, то можно смело сказать, что этот путь неправилен. Зачастую достаточно выбрать (совершенно бездумно!) формулу, включающую все необходимые величины, и задача будет решена "под ответ".

В науке нет готовых задач и нет ответов. Задачу формирует сам исследователь, а правильность ответа он устанавливает многократной проверкой, получением различными путями одинаковых результатов, повышением точности экспериментальных средств. Это подчеркивает огромное значение метрологии в науке.

Правильно сформулировать задачу зачастую значительно сложнее, чем найти решение к готовой (естественно, правильно сформулированной!) задаче. Обратите внимание, что способность решать поставленные задачи К. А. Тимирязев не включает в перечень требований, предъявляемых к исследователю. Это качество предполагается само собой разумеющимся, как и умение читать, например, или знание основных законов данного направления в науке: физике, биологии и т. д.

Когда у вас появится желание определить, принадлежите ли вы к категории самостоятельных исследователей, то прежде всего разберитесь, ставите ли вы задачу себе самостоятельно или получаете ее в готовом виде от руководителя? Не следует впадать в ошибку и считать, что для самостоятельного исследователя требуется полная независимость от руководителя, т. е. стремление делать не то, что от него хотят, а нечто совершенно другое, не совпадающее с интересами руководителя и научного учреждения. Речь идет совсем не об этом.

Если руководитель говорит: "Необходимо исследовать такой-то эффект... Непонятно, почему получается так, а не иначе... В то же время нам необходимо по тем или иным причинам это знать..." — это еще не постановка задачи, во всяком случае, в том смысле, как мы здесь это понимаем. Это скорее выдача задания.

Вот если после этого говорится о том, какие образцы необходимо изготовить, как это следует сделать, какие зависимости и каким образом следует получить, как их обработать и даже что делать при получении тех или иных результатов, здесь уже о самостоятельности не может быть и речи. Исследователем в данном случае является руководитель, и только он.

Самостоятельный исследователь даже задание получает далеко не всегда. К моменту решения одной задачи ему чаще всего быва-

ет ясно, какие еще проблемы возникли в той области, в которой он работает, какие из них являются наиболее важными, определяющими работу его коллег, и он сам выдвигает предложение о дальнейшей работе.

Итак, задание получено или же предложено и утверждено. Исследователь приступает к работе. Прежде всего он оценивает роль данной проблемы в комплексе задач, решаемых коллективом, в котором он работает. После этого изучает имеющуюся литературу (статьи, отчеты и т. п.) и выясняет, что уже известно по этому вопросу. Затем исследователь приступает к формулировке задачи или, говоря другими словами, к планированию исследования. Он определяет:

что он хотел бы получить в результате исследования, на какие вопросы должен быть дан ответ;

должен ли он добиться положительного ответа, т. е. найти способ, приводящий к желаемому решению, или же его задача является, так сказать, познавательной и он ищет только ответ на вопрос;

какой кратчайший путь ведет к получению необходимого ответа;

достаточно ли литературные данные для того, чтобы использовать их в качестве экспериментального материала для выработки гипотезы, или же придется проводить дополнительную экспериментальную работу;

каким образом при минимальном объеме дополнительного собственного эксперимента получить все необходимые для выработки гипотезы данные.

Для первого этапа исследования — выработки гипотезы — этого достаточно. Планировать эксперимент, подтверждающий гипотезу, целесообразнее, вероятно, тогда, когда гипотеза будет выработана и станет ясно, что именно надо подтверждать. Это будет вторым этапом исследования.

Считаем, что задача поставлена, необходимый дополнительный экспериментальный материал собран, можно начинать искать решение: вскрывать сущность рассматриваемого явления, выявлять основные, существенные связи, искать закономерности в наблюдаемых процессах и явлениях, искать причины, породившие те или иные следствия.

И вот, наконец, гипотеза выработана. Утверждение сформулировано. Мы еще не знаем, так ли это? Наше утверждение носит пока характер предположения. Однако всякое ли предположение можно считать гипотезой, даже самое нелепое? Вряд ли. К гипотезе предъявляются вполне конкретные требования:

1. Прежде всего гипотеза должна объяснять всю совокупность явлений, для объяснения которых она выдвигается. При этом

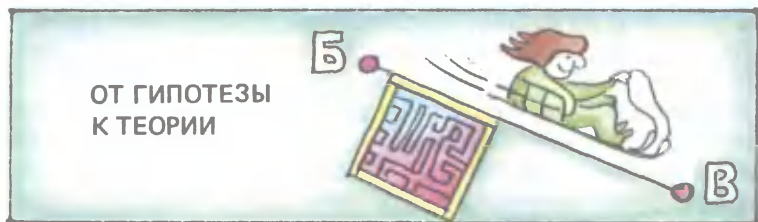
ранее существовавшие, ранее установленные положения, касающиеся тех же фактов и явлений, не должны противоречить выдвигаемой гипотезе. (Если же противоречие все-таки возникает, то выдвижение такой гипотезы сопровождается опровержением существовавших положений, причем научным, а не голословным.)

2. Вытекающие из предлагаемой гипотезы следствия должны в принципе поддаваться экспериментальной проверке.

3. Гипотеза должна выходить за пределы тех фактов, на основании анализа которых она выдвинута. Закономерность, предлагаемая данной гипотезой, объясняет широкий круг явлений. Другими словами, экспериментальные данные дают отдельные точки. Гипотеза должна обосновать кривую, включающую в себя эти отдельные точки и выходящую за их пределы.

4. Гипотеза должна быть достаточно простой и цельной. В ней не может быть искусственных построений и произвольных допущений. Кстати, даже самая невероятная гипотеза может и должна быть и простой, и цельной.

Таким образом, нами создана гипотеза — простая и цельная, не противоречивая, объясняющая широкий круг явлений, в принципе поддающаяся проверке. Мы подошли вплотную к следующему этапу — экспериментальной проверке, которая должна превратить нашу гипотезу в теорию.



Иногда считают, что теория появляется в результате теоретических работ, что теорию создают теоретики. Из изложенного выше этого не следует. Более того, получается, что теория появляется в результате эксперимента! Что это? Ошибка? Недоразумение? Нет и не другое. Не следует забывать, что "проект теории" — гипотеза — родилась, так сказать, "в промежутке" между двумя экспериментами, на этапе между "живым созерцанием" и практикой, на этапе абстрактного мышления в ленинской формуле познания. Однако "утвержден" этот проект был только после завершения экспериментальной проверки.

Очень часто споры, разногласия и недоразумения являются следствием нечеткости определений, смещения понятий. Аналогичное положение может возникнуть и со словом *теория*. Здесь и дальше мы под теорией понимаем гипотезу, прошедшую испытание экспериментом. Однако в разговоре мы очень часто используем это слово в качестве противопоставления слову *эксперимент*. Мы противопоставляем экспериментальному материалу теоретический. О любой версии, догадке, гипотезе можно сказать: "Ну, это все теория... А что говорит эксперимент?"

Конечно, "теория-догадка" и "теория-закон" — это разные вещи. Хорошо бы, бесспорно, если бы разные вещи и назывались разными словами, но мы сегодня можем принять положение только таким, каким оно есть, и постараться не путать комплекс работ по созданию теории с теоретической (т. е. не экспериментальной) работой.

Последнее время очень модно и ученых делить на теоретиков и экспериментаторов. Складывается мнение, что теоретики — это думающая часть ученых, та часть ученых, которая создает теорию. Что касается экспериментаторов, то их уделом считается эксперимент. Это, так сказать, люди-руки... А теоретики — люди-голова. И вдруг получается, что без экспериментатора не может быть теории!

Что же такое теоретик и что такое экспериментатор? У Ричарда Фейнмана, физика, автора известного цикла лекций, есть такое высказывание: "Бывают физики-теоретики, они воображают, соображают и отгадывают новые законы, но опытов не ставят, и бывают физики-экспериментаторы, чье занятие — ставить опыты, воображать, соображать и отгадывать".

По Фейнману получается, что экспериментатор — это физик, встающий из-за письменного стола, где он занимался "абстрактным мышлением", и без страха и сомнения усаживающийся за экспериментальную установку, чтобы проверить опытом свою гипотезу. Теоретик же проводит теоретическую работу за письменным столом и обходит стороной физическую аппаратуру и установки.

Думать должен каждый ученый, каждый исследователь. Уметь излагать свои мысли на бумаге — то же. А вот облечь свои мысли в математическую форму, решить сложную математическую задачу, дать интерпретацию полученных результатов иногда бывает не всякому под силу. Сложность теоретических задач, так же как и сложность эксперимента, имеет весьма широкий диапазон.

Есть талантливые экспериментаторы, настоящие мастера эксперимента, способные придумать и осуществить такие сложные и

оригинальные эксперименты, которые вызывают изумление и зависть коллег-физиков. Таким был выдающийся русский физик А. Г. Столетов, а также П. Н. Лебедев, И. В. Курчатов, П. Л. Капица.

Есть и талантливые теоретики. Их руки имеют дело главным образом с авторучкой, а не с экспериментальными установками. Из-под их пера выходят иногда очень смелые предположения, дающие мощный толчок развитию науки, продвигающие ее вперед буквально на десятилетия. Что же представляют собой эти предположения? Это гипотезы, построенные на базе уже известных положений и требующие экспериментальной проверки.

Попросите кого-нибудь назвать имя любого известного физика-теоретика, и большинство назовет Альберта Эйнштейна... Но и теория относительности проходила (и проходит) экспериментальную проверку. Однако главное в том, что далеко не каждому дано "выйти в Эйнштейны". Большинство исследователей все же экспериментаторы, которые и воображают, и соображают, и ставят эксперименты.

И если молодой специалист (или тем более будущий инженер) заявляет, что он собирается стать теоретиком, то за этим в большинстве случаев стоят боязнь практической работы, нежелание осваивать аппаратуру и методику эксперимента, попытка обойтись наклонностями и привычками, приобретенными еще в школе: кто-то сформулирует мне задачу, а я ее решу... на кончике пера. Получается, что "тяга в теоретики" во многом обусловлена не исключительными способностями к этой работе, а стремлением к "чистой" работе, боязнью экспериментальной работы.

Ведь эксперимент надо подготовить; в эту подготовку войдут и создание гипотезы, и планирование эксперимента, и подготовка оборудования для эксперимента. Но его мало подготовить, его надо и осуществить, и правильно интерпретировать результаты, и, может быть, скорректировать предположения, а возможно и запланировать новую серию экспериментов... Я хотел бы снять с экспериментаторов клеймо "физиков, за которых думают другие...". Вероятно, ни один уважающий себя физик не будет пренебрегать экспериментом. Собственные идеи и проверять надо самому.

Так что думают не только теоретики... Не будем больше возвращаться к этому вопросу, а вернемся к эксперименту, который должен превратить нашу гипотезу в теорию.

Каким должен быть этот эксперимент? Прежде всего достоверным и достаточным как по объему, так и по количеству содержащихся сведений. Эксперимент, неправильно спланированный, эксперимент недостаточный может, к сожалению, подтвердить и неправильную гипотезу, построенную на случайных, а не на основных закономерностях.

Это положение можно проиллюстрировать такой шуткой. Предполагаем, что 60 делится на все числа. Замечаем также, что 60 делится на 1, 2, 3, 4, 5 и 6. Проверяем несколько других чисел, например 10, 20, 30, взятых наугад. Так как 60 делится на них, то считаем экспериментальные данные достаточными. В этой шутке есть все элементы исследования: наблюдение, сбор материала (деление на 1, 2, 3, 4, 5 и 6), выработка гипотезы о делимости на все числа, экспериментальная проверка путем деления на 10, 20 и 30. Однако вывод является явно неверным. Нетрудно догадаться, что эксперимент был спланирован неправильно. И 10, и 20, и 30 состоят из тех же множителей: 2, 3, 4, 5. Для эксперимента надо было выбрать числа, состоящие из других множителей, например 7, 14, 22, 23... Те же результаты можно было получить и простым увеличением объема эксперимента, например, вдвое, т. е., взяв для проверки не три числа, а шесть, мы могли бы попасть на числа 12 и 15, но третьего числа, на которое делилось бы 60, уже нет. Третье число опровергло бы нашу гипотезу.

Правда, в физическом эксперименте иногда такой результат считают случайным и отбрасывают его. В данном случае такое решение привело бы нас к ошибочному выводу. Становится ясным, что отбрасывать результаты эксперимента можно лишь с большой осторожностью. Если мы попробуем провести еще один эксперимент на трех числах, то убедимся, что случайные результаты мы получили в первых пяти случаях (10, 20, 30, 12 и 15). Повторяя эксперимент снова и снова, мы будем получать только отрицательные результаты, что должно нас окончательно убедить в ошибочности нашей гипотезы. Пример, который мы только что рассмотрели, интересен и тем, что он показывает возможность проведения эксперимента без аппаратуры и установок, только с помощью пера и бумаги и даже, как в данном случае, в уме. Таким образом, эксперимент обязателен и для математика, только выглядеть он будет несколько иначе...

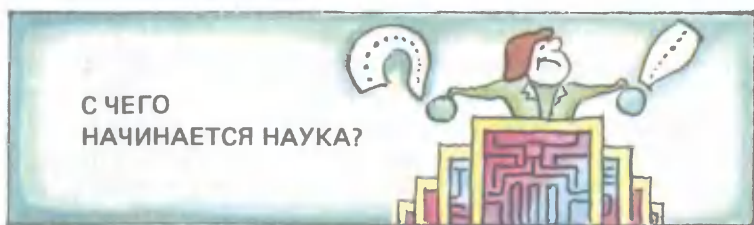
Приведем другой пример, показывающий, что эксперимент может опровергнуть и правильную гипотезу. Колумб, считая, что земля круглая, предположил, что в Индию можно попасть, плывя на запад. Он не достиг Индии, так как появилось непредвиденное обстоятельство (Америка), требовавшее скорректировать гипотезу. Тем не менее Земля была и остается круглой, и до Индии можно доплыть и в западном направлении, но обогнув Америку или воспользовавшись Панамским каналом.

Допустим, что эксперимент нами спланирован верно, непредвиденных препятствий на нашем пути не возникло. Можно ли считать результаты эксперимента достоверными? Да, если мы уверены

в выбранной нами методике и аппаратуре эксперимента. В конце концов, трудно ошибиться в делении 60 на 19 или на 23, но проще простого совершить ошибку в измерениях, проводимых с помощью сложнейшей аппаратуры, в сложнейших процессах, требующих невероятной точности и чистоты, в методах, которые еще никем не были опробованы.

Экспериментальная работа в физике вообще и в полупроводниковой электронике в частности имеет две стороны: изготовление объекта исследования и измерение параметров и характеристик объекта исследования. В первом случае речь идет об изготовлении того или иного полупроводникового материала, прибора, структуры и т. д., короче, того объекта, параметры и характеристики которого должны подтвердить правильность нашей гипотезы. Во втором случае речь идет об измерении параметров этих объектов.

Если по поводу изготовления объекта исследования трудно дать какие-либо общие рекомендации, то об измерениях можно и нужно поговорить подробнее.



Д. И. Менделеев сказал, что наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немыслима без меры. Палата мер и весов в России (в Петербурге) была создана именно Д. И. Менделеевым. Он же был и первым ее директором.

В физике, в электронной технике практически любой эксперимент связан с измерениями. Можно прямо сказать, что методы измерения, разработанные ранее для других случаев, удастся использовать весьма редко. В основном методика измерения создается самим исследователем.

Простейшие измерения, при которых интересующие нас величины (длина, масса, сила тока или напряжение) измеряются непосредственно, встречаются в полупроводниковой электронике очень редко. В этих, в общем-то довольно простых, измерениях ошибки носят случайный характер и обусловлены самыми различными причинами: трением в подшипниках прибора, ошибками операто-

ра, колебаниями напряжения в сети, изменениями температуры и т. п. Есть специальные способы вычисления этих ошибок и их учета при обработке результатов измерения.

В полупроводниковой электронике довольно часто измерения носят косвенный характер: измеряются некоторые величины, которые нам непосредственно не нужны, и по их значениям рассчитываются тем или иным способом значения нужных нам величин.

Возможные ошибки будут в этом случае увеличиваться за счет ошибок, присущих именно этому методу измерения. Они называются *методическими*. Методические ошибки являются систематическими: отклонение измеренной величины от ее истинного значения в последовательной серии измерений происходит всегда в одну и ту же сторону. Причинами методических ошибок бывают неучтенные или трудноустраняемые факторы. Если этот фактор известен, но трудноустраним, то такую ошибку можно учесть и внести поправку. Если же экспериментатор не знает о существовании фактора, вызывающего методическую ошибку, то эта ошибка может стать "роковой": результаты измерений окажутся недостоверными.

Такими факторами может являться ответвление тока в какую-то паразитную цепь (неучтенная существенная утечка) или неучтенное методом изменение параметров с изменением температуры. Экспериментатор использует, например, метод, проверенный и испытанный другими исследователями в режиме малых токов, не вызывающих перегрева образца, а исследования проводит в режиме больших токов. Разогрев образца, не учитываемый при эксперименте, может сильно исказить результаты.

Поскольку условия исследования отличаются, методическая ошибка, пренебрежимо малая в одном случае, в другом принимает угрожающие размеры.

В ходе косвенных измерений мы вычисляем интересующую нас величину с помощью тех или иных формул. Величина ошибок здесь будет связана со степенью приближения, с которой данная зависимость отражает истинную связь величин, с влиянием неточных, неконтролируемых факторов, с изменением величин, которые мы считаем неизменными. На результаты измерений можно полагаться только в том случае, если методика измерения изучена и проанализирована самым тщательным образом, а измерительная аппаратура проверена и прокалибрована.

Для проверки измерительной аппаратуры есть специальные подразделения и организации, существуют эталоны, есть правила и сроки контроля и проверки.

За ошибки метода отвечает сам исследователь, и никто больше, ибо метод выбран или создан им самим. Возникает двойственное положение: исследователь должен верить в свой метод и в то же время постоянно подвергать его сомнению. Верить и сомневаться... Это одно из качеств исследователя, о котором мы поговорим особо.



”Самым трудным, но и самым главным для ученого является необходимость быть предельно строгим и беспристрастным критиком и судьей своих гипотез, своих опытов, своих обобщений”, — пишет академик Н. Н. Семенов в статье ”Объективность ученого и оценка открытий”¹

Упорство и упрямство, уверенность и самоуверенность, критическое отношение к своим результатам и неуверенность в себе — это совсем разные качества; одни совершенно необходимы исследователю, другие же мешают в жизни любому человеку.

Критическое отношение, умение разумно сомневаться не следует смешивать с неуверенностью, сомнением в способности правильно оценить результаты и правильно выбрать метод.

”Интуиция и воображение должны находиться под непрерывным контролем холодного рассудка. Мало того, истинный ученый должен быть не только беспристрастным, но самым пристрастным критиком того, что ему дороже всего, — своей творческой работы, которой он посвятил много дней и ночей труда, радости, вдохновения. Он должен быть как бы врагом самому себе — в этом и трагедия и величие ученого.

Особенно придирчиво ученый должен относиться к опыту — верховному судье всех научных гипотез и теорий. Он должен всесторонне проверять теорию опытами и тщательно исключать при постановке эксперимента всевозможные источники ошибок, не отбрасывать и не скрывать хотя бы отдельные результаты, не укладывающиеся в его гипотезу. Более того, если ваши результа-

¹ Наука и жизнь, 1972, № 2, с. 40—42.

ты начинают проводить другие ученые в различных странах и среди подтверждающих опытов вдруг появляются противоречащие вашей теории, обязательно надо со всей возможной тщательностью проверить их опыт и либо показать, что ваш оппонент допустил в эксперименте ошибку, либо удостовериться, что он прав, и честно признать, что ваша теория неправильна или частично неправильна. Необходимо без всяких уловок признать это прямо и смело, как бы ни было это нестерпимо тяжело”, — пишет академик Н. Н. Семенов в той же статье.

Итак сомневаться полезно, сомневаться нужно, сомневаться просто необходимо. Но, с другой стороны, сомневаться до бесконечности тоже нельзя. Нужно правильно оценить момент, когда дальнейшее усовершенствование метода, дальнейшее увеличение объема эксперимента превращаются уже в бесполезную трату времени и средств.



Говоря о научной работе, об исследовании, мы будем иметь в виду любое научное исследование вне зависимости от его глубины и объема. В это понятие входят и студенческая учебная исследовательская работа (УИР), и важнейшее исследование, проводимое солидным научным коллективом:

Любая работа, претендующая на название научного исследования, будь то учебное исследование студента, дипломная работа, кандидатская или докторская диссертация, — все должно подчиняться ленинской формуле познания. Мы уже рассмотрели последовательность и содержание отдельных этапов исследования и теперь подошли к последнему, заключительному этапу — к подведению итогов исследования. Итогом исследования является отчетный материал: отчет, статья, доклад, дипломная работа, диссертация.

Не прибор или образец, созданный в итоге исследования, является главным итогом работы, а те выводы и заключения, которые удалось сделать. Прибор или образец скорее подтверждают правильность выводов, доказывают их практическую ценность. Нуж-

но твердо понимать, что лучше иметь отрицательные результаты и точно знать, почему именно они получены, чем иметь положительные, но чисто случайные результаты. Ведь в последнем случае мы имеем дело с эмпиризмом. Мы никогда не будем иметь гарантии в воспроизводимости и повторяемости нашего эксперимента, если нам не удалось вскрыть наиболее существенные закономерности.

Итак, выводы и обобщения являются главным результатом исследования, и поэтому, подводя итоги исследования, необходимо в первую очередь добиваться предельно четких и ясных формулировок выводов.

Основное назначение остального содержания статьи, отчета или диссертации — показать читателям, каким образом исследователь пришел к тому или иному выводу, дать возможность проверить правильность полученных расчетных и экспериментальных данных, изучить и оценить использованную методику и при необходимости воспроизвести ее.

Прежде всего хотелось бы подчеркнуть, что выводы имеют несравнимо большее число читателей, чем основной текст. Детали и пути, которыми вы шли, интересуют далеко не каждого... Это предъявляет повышенные требования к выводам и рекомендациям. Отсутствие же выводов в статье заставляет задуматься: а понял ли исследователь, что дало исследование и дало ли оно что-нибудь? Сумел ли он разобраться в полученных результатах? И вообще, исследование ли это или всего лишь набор случайных фактов, обнаруженных неискушенным в науке человеком, оказавшимся неспособным подобрать и обработать материал?

Другая мысль сводится к следующему: отчетный материал пишется главным образом для читателей, и об этом следует всегда помнить. Излагать материал следует с максимальной доходчивостью, в нем должны быть необходимые ссылки и пояснения. В нем не должно быть неизвестно откуда "высочивших" формул, непонятных и непоясненных символов, обозначений и сокращений. Нужно помнить, что каждый час, затраченный на обработку и оформление отчетного материала, сэкономит десятки и сотни часов у читателей. К отчетному материалу нельзя относиться как к тяжелой и неприятной обязанности, с которой необходимо как можно скорее покончить и заняться снова "полезным делом".

Кстати, отчетный материал необходим и самому исследователю. Сколько людей сокрушалось по поводу того, что год, два или три тому назад не зафиксировали в протоколах, графиках, журналах или отчетах те или иные условия эксперимента... Относитесь с большим уважением к отчетному материалу, в этом надо видеть и личный интерес, и общественную обязанность, и это окупится сторицей!

Схема, по которой обычно строится отчетный материал, приблизительно одна и та же, хотя в зависимости от вида и объема отчетного материала объем тех или иных разделов может меняться от главы или параграфа до одной-единственной фразы.

Предлагается следующая схема, которая может быть использована и для курсовой исследовательской работы, и для курсового или дипломного проекта, и впоследствии для диссертации или научно-технического отчета.

Состояние вопроса. В этом разделе должно быть обрисовано состояние вопроса в области более широкой, чем та, которой посвящено данное исследование. Если ваша работа направлена на усовершенствование автомобиля, то здесь вы должны охарактеризовать проблему автомобильных перевозок и показать, что автомобили требуют усовершенствования.

Постановка задачи. Этот раздел должен показать, чем интересно выбранное вами направление, какие задачи необходимо решить и почему, в чем важность и практическая ценность решения этих задач. Здесь же в основных чертах намечается путь, который выбирает исследователь для решения поставленной задачи.

Обобщение фактического материала. Этот раздел не следует путать с состоянием вопроса. Здесь рассматриваются конкретные исходные материалы, необходимые для построения рабочей гипотезы; обобщаются как данные, полученные другими исследователями и почерпнутые из статей или отчетов, так и данные собственных экспериментов, дополняющие имевшийся материал и восполняющие пробелы в проведенных ранее исследованиях, результаты проверки и подтверждения (или опровержения) литературных данных.

Построение гипотезы. Теоретический анализ и расчеты. Этот раздел не требует особых пояснений. Важно, что он должен заканчиваться прогнозами, своего рода "техническим заданием на эксперимент". Исследователь предполагает, что правильность выдвинутой гипотезы может быть однозначно доказана тем или иным экспериментом.

Экспериментальная часть. Этот раздел должен включать не только результаты проделанного эксперимента, но и описание методики и аппаратуры эксперимента, оценку его возможных погрешностей и т. п. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных может быть приведено в этом же разделе или, если необходимо, выделено в отдельный раздел.

Выводы и рекомендации. Как уже было сказано, этот раздел является важнейшим. В четких, кратких, но ясных определениях здесь должны быть даны основные итоги проведенной работы.

Наиболее общие выводы должны предшествовать частным, а частные — логически вытекать из общих. Первый пункт выводов всегда должен говорить о главном, основном итоге работы. Стиль изложения выводов должен быть максимально отшлифован, язык прост и доходчив. Выводы не должны содержать второстепенных деталей, которые могли бы "смазать" основные результаты. Помните, что выводы — необходимы, весь же остальной материал — желателен.

Одним из документов, подводящих итог научной работе, является *авторское свидетельство*. Оно призвано защитить право автора на оригинальные идеи и решения. Мы не ставим перед собой задачи изложить основы патентоведения. Мы хотели лишь обратить внимание на то, что защита оригинальной идеи авторским свидетельством, — не только личное дело самого изобретателя. Это и государственная проблема. Сегодня вы своевременно не оформили заявку на вашу идею. Завтра аналогичная идея оказывается запатентованной за рубежом. А еще через некоторое время нашим внешнеторговым организациям придется вести переговоры о приобретении у держателя патента лицензии, т. е. права на изготовление тех или иных приборов или устройств, в которых используются защищенные патентом идеи. Пострадаете материально и вы, так как и внутри страны автору при использовании его идеи выплачивается вознаграждение.

Каков порядок оформления заявок? Как правильно составить заявку? Как описать предмет изобретения? Об этом вам лучше расскажут патентоведы. Мы же здесь ограничимся небольшим примером.

В "Энциклопедическом словаре" Брокгауза и Ефрона в статье "Швейные машины" можно прочесть, что "отцом современной швейной машины справедливо считается Элиас Гоу..." и что "Исаак Зингер, ловкий и оборотистый коммерсант... сумел, рекламируя ее как свое изобретение, доставить ей значительное распространение... Процесс с Зингером окончился в пользу Гоу, Зингер был принужден уплатить Гоу убытки...". Вот что значит своевременно защитить свою идею патентом.

НЬЮТОНОВО ЯБЛОКО



Всякий ли объект пригоден для исследования? Пожалуй, что всякий... Всякий ли объект следует выбирать в качестве объекта исследования? С уверенностью можно сказать, что далеко не всякий. К сожалению, можно еще встретить исследователей, особенно молодых, которые любят рассуждать "о чистой науке", о "науке для науки" и т. д. Может быть несколько утрируя, их концепцию можно свести к следующему: неважно, что исследовать, главное — надо исследовать, а в ходе исследования можно натолкнуться на что-то совершенно неизвестное до этих пор, на что-то крайне важное и интересное, т. е. сделать открытие. Другими словами бредите в темноте наощупь. Имеется некоторая вероятность, что вы натолкнетесь на открытие. В подтверждение этих слов вам напомнят и Марка Твена, который назвал величайшим из изобретений Случай, и Исаака Ньютона с его знаменитым яблоком. Получается, что Ньютон вроде бы ждал, когда на него что-нибудь упадет. По счастью, для него и для мировой науки это оказалось всего лишь яблоко...

А вот сам Ньютон, когда его спрашивали о том, как он пришел к открытию закона тяготения, говорил, что он очень много думал об этом. Таким образом, Ньютон искал и знал, что искал. Что же касается легенды о яблоке, то если оно и было, то послужило лишь последним толчком, давшим великому ученому возможность сформулировать итог длительных размышлений. Это была последняя черта под этапом абстрактного мышления, опосредствования разумом результатов живого созерцания...

Если вы собираетесь искать, то надо знать, где искать и что искать. Бродить наощупь — это бесцельно тратить силы, время и средства. (Правда, кое-кто не очень бережливо относится к средствам государственным, хотя своей копейки зря не потратит...)

Возьмем к примеру голландцев. Год за годом, десятилетие за десятилетием они отвоевывали землю у моря. Строили дамбы, отсекали кусочек моря, ставили ветряные мельницы и откачивали воду. Дамбы и ветряные мельницы и сейчас главные детали голландского пейзажа. Представьте себе, что было бы, если бы они

просто день за днем швыряли землю в морскую пучину? Может, и появились бы отдельные отмели, которые в период штормов море бесследно стирало бы и которые вновь возрождались бы ценой больших усилий.

Нельзя бездумно сыпать землю в океан незнания. Нужно отвоевывать у него сушу знания кусок за куском, планомерно и настойчиво. Исследования должны быть конкретны и целенаправленны... В ответ на это часто раздаются ехидные замечания: "Значит, надо исследовать только истираемость подметок?". Во-первых, истираемость подметок тоже очень важная вещь, и чем больше мы будем решать подобных задач, тем выше будет наш жизненный уровень. Во-вторых, сказанное выше не следует понимать как одобрение только крайне утилитарных задач. Не каждое исследование оборачивается немедленной выгодой. Есть еще и такое понятие — задел.

США вложили в программу "Аполлон" 26 млрд. долларов. Извлекли ли они из этого какую-нибудь прибыль? По промышленным нормам США прибыль должна составлять в среднем от 5 до 10 %. Когда они вернут эти 26 млрд. и получают 2,6 млрд. долларов прибыли? Сколько стоят исследования по осуществлению управляемой термоядерной реакции и когда они окупятся?

Главное, что все серьезные научные проблемы и задачи тесно увязаны между собой, успех в одной области помогает продвигаться в смежной области. Так, помогая друг другу, решая задачи друг для друга, ученые медленно, но верно строят дамбу в океане незнания...

Так что дело не в том, что проблема должна обладать крайней утилитарностью и давать немедленный экономический эффект (хотя это и очень желательно), а в том, что собирающийся искать должен знать, что и зачем он собирается искать. Блуждание в потемках в расчете на случай — это порочный принцип постановки и проведения исследований. Случай — плохой помощник, да и помогает он далеко не всякому. Вот Пастёр, например, говорил, что не всякому помогает случай. Судьба одаривает только подготовленные умы. Так что тот, кто собирается стать исследователем, должен сам позаботиться о том, чтобы ньютоновское яблоко упало на "подготовленную" голову.

ПОНЕМНОГУ ОБО ВСЕМ
И ВСЕ О НЕМНОГОМ



Так как же надо готовить себя к научной работе? Какие качества должны отличать исследователя?

Прежде всего — эрудиция. Это касается и теории, и основ эксперимента, и физики с математикой, и умения пользоваться в расчетных работах ЭВМ. Чем шире кругозор исследователя, чем глубже его эрудиция как в области своей узкой специальности, так и в смежных специальностях, тем больше у него шансов на успех. Говорят, что больше всего открытий совершается на стыке наук, но для этого нужно овладеть смежной специальностью. Электроника имеет, пожалуй, больше "стыков", чем любая другая наука. Она стыкуется сегодня и с биологией, и с радиофизикой, и с автоматикой, и с оптикой, и с многими другими отраслями.

Вот что говорит об эрудиции авиаконструктор А. С. Яковлев: "Наука и техника достигли таких вершин, что дальнейшее их развитие требует от специалиста разносторонности. Инженеру-конструктору, особенно если он мечтает об интересной творческой работе — я уже не говорю о самостоятельной творческой работе, — должны быть органически присущи широта взглядов, глубокая образованность, знание проблем современной науки и техники, интерес к различным отраслям знания".

Важным качеством исследователя является ассоциативное мышление. Мало иметь в ячейках памяти сведения о тех или иных фактах, логически связанных между собой. Нужно связать эти факты между собой, вскрыть внутреннюю связь. Необходимо, чтобы при изучении одного явления в памяти всплыло воспоминание о другом, казалось бы далеком, но чем-то неувлимо на него похожем . . . И вспомнив о нем, сравнить эти явления, оценить это сходство, попытаться найти на основании этого сходства основные, существенные связи между ними. В качестве примера таких "полезных ассоциаций" часто называют висячий мост через реку Твид в Шотландии, идею которого его автору подсказала паутина.

Следующим совершенно неотъемлемым качеством исследователя является пытливость. Все непонятное должно привлекать к себе внимание. Если вы можете спокойно проходить мимо непо-

нятных вещей или явлений, если, встретившись с неизвестным вам словом, понятием или величиной, вы поленились снять с полки словарь, энциклопедию или справочник, из вас вряд ли выйдет ученый. Академик Н. Н. Семенов пишет по этому поводу: "Никогда не следует проходить мимо неожиданных и непонятных явлений, с которыми невзначай встречаешься в эксперименте".

Хотелось бы добавить: и не только в эксперименте. В жизни вокруг нас на каждом шагу встречаются непонятные факты и явления. Видите ли вы их? Увидев, пытаетесь ли вы найти им объяснение? Задумывались ли вы над тем, почему, например, африканские народы имеют почти черный цвет кожи, хотя, казалось бы, она должна быть ослепительно белой? Ответ на это есть: природа защищает пигментным слоем их организм от перегрева глубоко проникающими ультрафиолетовыми лучами. Поглощение же лучистой энергии кожным покровом менее опасно, так как на этот случай у организма есть "средства охлаждения".

Большое значение для исследователя имеет и самокритичность. Об этом мы уже говорили как об умении сомневаться. Это ценное и нужное качество, без которого обойтись никак нельзя.

Особое внимание следует уделить трудолюбию, усидчивости: "светлые умы", с наскока решающие трудные задачи, а потом неделями занимающиеся зубоскальством с приятелями, встречаются главным образом в легковесных фильмах и романах. Действительно, физики шутят. Может быть, даже больше, чем представители каких-либо других профессий. Однако было бы ошибкой считать, что большую часть времени они бьют баклуши и лишь изредка работают. Трудолюбие должно быть свойственно не только просто способному человеку. Большой талант требует огромного трудолюбия. Многие поистине талантливые люди говорили, что талант на 95% состоит из трудолюбия и только 5% отводили природным способностям.

Трудолюбие требует хорошего здоровья. А бодрость, здоровье доставляет нам спорт. Кроме того, академик П. А. Ребиндер говорил: "Науку делают люди веселые. Нытики и пессимисты, как правило, неудачники, ибо они неспособны к творчеству".

Далеко немаловажным качеством исследователя является умение правильно спланировать и провести эксперимент.

И, конечно, самое главное, научный работник должен владеть марксистско-ленинской философией, ибо познание философских основ науки — залог успешной деятельности исследователя.

Таковы основные качества исследователя, необходимый комплекс способностей и знаний, которыми он должен обладать. Возникает вполне естественный вопрос: каждый ли может стать ис-

следователем? Здесь все зависит полностью от вас, от вашего желания, от вашей настойчивости, от вашего трудолюбия. Вуз, кафедры, предприятия и научно-исследовательские организации помогут вам в этом, но первое слово за вами.

Почему мы столько внимания уделили науке, если работать в научные учреждения попадает далеко не каждый? Не получается ли это циклом лекций для избранных?

Дело в том, что заниматься наукой, познавать, исследовать — это не то же самое, что занимать должность в научно-исследовательском учреждении. Познавать, стараться выявлять новое и полезное, вносить свой вклад в развитие техники, в углубление наших знаний о природе вещей можно везде: и в научно-исследовательском институте, и на производстве. Особенно важно иметь думающих инженеров в электронной технике. Редкое производство может "похвалиться" таким обилием неясных, до конца не понятных процессов и явлений. Многие вещи становятся по-настоящему понятными только в ходе производства. И эта ясность не приходит сама собой. Ее вносят думающие специалисты.

Можно ли в вузе сформировать ученого? Вряд ли. А вот грамотно мыслящего, вооруженного всеми необходимыми средствами познания человека — можно. Это и будет тот "подготовленный ум", о котором говорит профессор Пастер. Однако не рассчитывайте, что это может произойти без вашего участия.

Путь к этому ведет через лаборатории кафедр и институтов, цехи заводов, успешно сданные экзамены и студенческую исследовательскую работу, изучение базовых дисциплин и постоянное расширение кругозора, воспитание в себе трудолюбия и настойчивости. Только этим путем вы придете к желаемой цели.

Наш разговор о науке не был бы закончен, если бы мы не остановились на вопросе использования результатов исследования. Каждое научное исследование должно приносить конкретную практическую пользу. Вопрос эффективности научных исследований является сегодня одним из самых актуальных.

Коллективы научных работников расходуют ежедневно огромные средства и материальные ценности. Исследования ведутся в самых различных направлениях. Человеку с узким кругозором зачастую трудно оценить перспективность того или иного направления, практическую ценность полученных результатов. Вот почему исследователю необходимы кругозор, практическая сметка, целеустремленность и активность. Все наши усилия должны направляться на скорейшее и наиболее эффективное использование научных исследований в народном хозяйстве и обороне страны.

Результаты научных исследований — в практику, на благо человечества, на общее дело построения коммунистического общества. В этом главная наша задача, в этом партийность нашей науки.



СОДЕРЖАНИЕ

От автора	3
Глава 1. Твоя профессия.	7
"Листы и корни . . ."	7
Что такое электронная техника?	13
Без "мелкоскопа"	16
Что мы увидим на заводе?	20
Что такое технология?	26
Люди твоей профессии	29
Гомеопатов нам, конечно, не догнать	33
Микроэлектроника? Это очень просто!	37
Фундамент современной кибернетики	44
Кибернетика, физика или технология?	47
Глава 2. Твой путь в науку	53
"Юноше, обдумывающему житье..."	53
От явления к сущности	57
Его величество Эксперимент	59
От постановки задачи до гипотезы.	62
От гипотезы к теории.	65
С чего начинается наука?	69
Самый строгий судья	71
Первый научный труд	72
Ньютоново яблоко	76
Понемногу обо всем и все о немногом	79

Инженер электронной техники

В настоящей книге рассказывается об одной из сложнейших и наиболее важных областей электроники — микроэлектронике, являющейся катализатором прогресса в эпоху научно-технической революции.

Написал книгу лауреат Ленинской премии, доктор технических наук, профессор Яков Андреевич Федотов, автор более 300 работ по полупроводниковой технике и микроэлектронике.

В доступной форме и на наглядных примерах автору удастся раскрыть все сложности микромира полупроводников, тонкости технологических процессов превращения кристаллов кремния в сложнейшие устройства микроэлектроники; рассказать о работе инженера электронной техники при проектировании и производстве этих устройств; показать, что, где бы ни трудился специалист — в науке или на производстве, главное в его деятельности — творческий подход к делу.



„РАДИО И СВЯЗЬ“