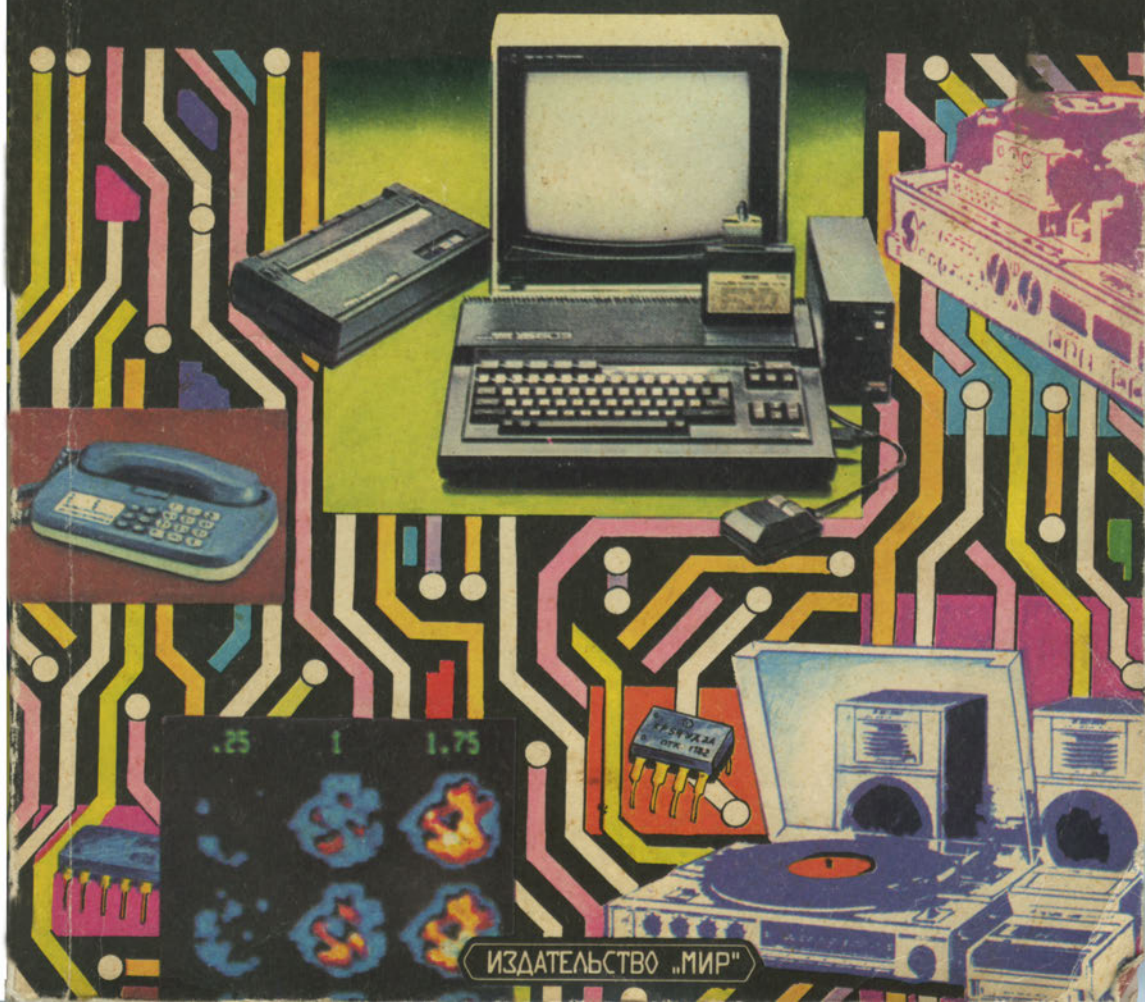


Р. ЭНДЕРЛАЙН

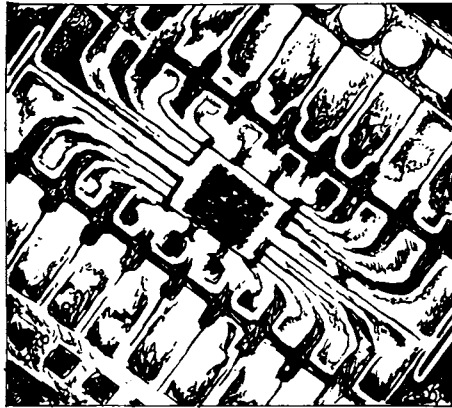
Микро- электроника для всех



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

R. ENDERLEIN

Mikroelektronik



Eine allgemeinverständliche Einführung
in die Welt der Mikrochips, ihre Funktion,
Herstellung und Anwendung

VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften
Berlin 1986

Р. ЭНДЕРЛАЙН

Микро- электроника для всех

Введение в мир интегральных микро-
схем: основы функционирования, техно-
логия изготовления и применение

Перевод с немецкого
Ю. А. Севастьянова
под редакцией
чл.-корр. АН СССР И. М. Цидильковского



Москва «Мир» 1989

ББК 32.85
Э64
УДК 621.374.1

Эндерлайн Р.

Э64 Микроэлектроника для всех. Введение в мир интегральных микросхем: основы функционирования, технология изготовления и применение: Пер. с немец. – М.: Мир, 1989. – 192 с., ил.

ISBN 5-03-000727-X

В книге известного ученого из ГДР, специалиста в области физики и техники полупроводников, изложены принципы действия, методы изготовления и разнообразные применения электронных устройств. Описаны принципы построения и функционирования новейших интегральных схем и цифровых устройств, являющихся основой ЭВМ.

Для широкого круга читателей, желающих ознакомиться с возможностями и достижениями микроэлектроники, школьников старших классов, учащихся ПТУ и техникумов.

Э $\frac{2403\,000\,000-367}{041\,(01)-89}$ 181–88, ч. 1

ББК 32.85

Редакция литературы по электронике

ISBN 5-03-000727-X (русск.)

© 1985 VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, DDR
© перевод на русский язык, с исправлениями и дополнениями автора, «Мир», 1989

Предисловие редактора перевода

Создание первого полупроводникового транзистора в 1948 г. привело к грандиозному качественному скачку в развитии техники—оно возвестило начало современной научно-технической революции. Совершенствование, миниатюризация и микроминиатюризация электронных приборов, изготовленных на основе транзисторов и диодов различных типов, разработка интегральных и в особенности больших интегральных схем позволили создать несколько поколений электронно-вычислительных машин. На наших глазах возникла новая отрасль знания—информатика. Сейчас совершенно очевидно, что информатика оказывает всевозрастающее влияние на современную технику, народное хозяйство и общественную жизнь. Основные области ее применения—связь и вычислительная техника—постоянно требуют все более надежных, быстродействующих, легких и миниатюрных электронных компонентов.

В книге проф. Р. Эндерлайна, крупного специалиста в области физики и техники полупроводников, в доступной форме изложены принципы действия, методы изготовления и разнообразные применения микроэлектронных приборов. Читатель найдет в этой книге описание логических цепей, построенных на их основе, и принципов действия цифровых схем, применяемых в информатике. Описывается также очень много новейших интегральных схем и изучаются тенденции их развития. Многочисленные рисунки и диаграммы позволили практически обойтись без сложного математического аппарата и изложить материал весьма наглядно. В книге определены понятия информации и ее единица—бит. Подробно рассмотрена роль микроэлектроники в развитии информатики и даны основные физические представления, лежащие в основе действия микроэлектронных схем. Описаны принципы действия важнейших полупроводниковых структур (p — n -перехода, биполярных и полевых транзисторов), логические элементы и способы их реализации с помощью электронных схем; приведены также многочисленные практические примеры.

Диапазон рассмотренных в книге электронных схем весьма широк—от простых (И-НЕ, ИЛИ-НЕ) логических схем в различных исполнениях и схем памяти до сложных схем сумматоров и аналого-цифровых преобразователей. Анализируются наиболее современные типы схем, а также специальные схемы часов, вычислительных машин, микрокалькуляторов и наконец схемы памяти—ПЗУ, ЗУПВ и СППЗУ. Включены вопросы технологии изготовления микроэлектронных схем на базе кремния. Говоря о технологии, автор затрагивает такие важные технологические процессы, как диффузия, окисление, эпитаксия, формирование структур и металлизация. Выделены проблемы, которые еще предстоит решить для совершенствования технологии и повышения выхода годных схем. Обращено внимание на

такие подготовительные процессы, как изготовление фотошаблонов и кремниевых подложек, выращивание кристаллов; рассматривается также сборка интегральных приборов. Убедительно показано, что уменьшение размеров отдельных элементов и использование новых методов физической реализации схем позволяют повысить степень интеграции, а следовательно, экономичность, быстродействие и надежность приборов.

В заключительной главе книги рассматриваются перспективы развития микроэлектроники. Обсуждаются технические и физические возможности дальнейшего уменьшения размеров приборов, а также использования эффектов Джозефсона и оптической бистабильности при создании элементов микроэлектронных устройств.

Книга Р. Эндерлайна – не простое собрание новейших сведений по микроэлектронике; она ценна с дидактической точки зрения, так как заставляет читателя (особенно, когда он разбирает практические примеры) размышлять над затронутыми в ней проблемами. Чтение книги заметно облегчается благодаря четкому разделению на главы и разбиению их на небольшие разделы. Несмотря на то что автор сумел обойтись без сложного математического аппарата, все вопросы рассматриваются достаточно глубоко.

Специально для русского издания автор значительно переработал немецкое издание 1986 г., внося в него большое количество исправлений, дополнений и новых рисунков, чтобы читатель получил более полное представление о современном состоянии микроэлектроники.

Книга вполне доступна лицам, не обладающим серьезной математической подготовкой. Необходим лишь интерес к микроэлектронике и различным областям ее применения. Те, у кого такой интерес есть, прочтут книгу Р. Эндерлайна с удовольствием и несомненной пользой для себя.

11 августа 1987 г.

И. М. Цидильковский

Предисловие автора к русскому изданию

Микроэлектроника – научно-техническое достижение нашего века, во многих отношениях носящее ярко выраженный интернациональный характер. Ученые разных стран внесли свой вклад в создание научных основ микроэлектроники, важнейшей из которых является физика полупроводников. Из выдающихся физиков, чьи исследования в связи с разработкой теории твердого тела подготовили все дальнейшее развитие микроэлектроники, прежде всего следует отметить Конрада Рентгена (Германия) и Абрама Федоровича Иоффе (СССР). Абрам Иоффе заложил фундамент крупных успехов советской науки в области изучения основ физики полупроводников, которая связана с именами Тамма, Френкеля, Курчатова, Ландау, Боголюбова, Алферова и др. Помимо Абрама Иоффе в СССР и Вальтера Шотки в Германии ученые и инженеры многих стран также упорно работали над преодолением технических и других трудностей по внедрению полупроводников в электронику. Поворотными этапами на этом пути были создание транзистора Бардином, Брэттейном и Шокли в США и объединение этих транзисторов в одной схеме. На базе упомянутых достижений науки и техники в течение последних 30 лет в мире сформировалась новая технология, связанная с микроэлектроникой и ее использованием в вычислительной технике, системах обработки информации, в средствах автоматизации и управления. Сегодня во многих странах интенсивно работают над наиболее полным раскрытием возможностей этой технологии, направленным на повышение производительности общественного труда и на подъем уровня жизни людей. И когда в наших странах мы говорим о необходимости научно-технического прогресса, то в первую очередь сюда относятся широкое применение микроэлектроники и ее дальнейшее совершенствование. Задача данной книги состоит в подготовке соответствующей почвы путем ознакомления как можно большего круга читателей с возможностями человека в отдельности с основами функционирования изделий микроэлектроники и технологии их изготовления. Поэтому автор испытывает большое удовлетворение от того, что эта книга издается на русском языке и становится доступной советскому читателю, известному во всем мире своей любовью и интересом к науке и технике. И если этот читатель хорошо примет книгу, на что автор, естественно, возлагает надежды, то большая заслуга будет принадлежать проф. И. М. Цидильковскому, под редакцией которого выходит русское издание, и Ю. А. Севастьянову, выполнившему ее перевод на русский язык. Автор приносит им благодарность за плодотворное сотрудничество.

Берлин, апрель 1987 г.

Рольф Эндерлайн

Предисловие

Микроэлектроника – наиболее значительное и, как считают многие, важнейшее научно-техническое достижение современности. Сравнить ее можно с такими поворотными вехами в истории техники, как изобретение книгопечатания в XVI в., создание паровой машины в XVIII в. и развитие электротехники в XIX в. И когда сегодня речь идет о научно-технической революции, то в первую очередь имеется в виду микроэлектроника. Микроэлектроника, как ни одно техническое достижение наших дней, пронизывает все сферы жизни и делает реальностью то, что вчера просто невозможно было себе представить. Стоит только вспомнить о карманных микрокалькуляторах, миниатюрных радиоприемниках, электронных управляющих устройствах в бытовых приборах, кварцевых часах, электронных играх, микрокомпьютерах и программируемых ЭВМ большой вычислительной мощности. Однако микроэлектроника способна на большее. Ее значение состоит в том, что она может дать для существования человеческого общества нечто сравнимое по степени важности разве что с энергией и материей. Это «нечто» – *информация*, причем в самом широком смысле, какой только можно вложить в данное понятие. Информационные процессы имеют место везде и всегда – в промышленности, управлении, науке, иначе говоря там, где в материальной и духовной сфере протекает деятельность, направленная на достижение определенной цели. При этом информацию нужно получить, обработать, передать и сохранить. В практической деятельности требуется обеспечить рациональность, быстроту и надежность *информационных процессов*. Ключом к решению подобных задач служит микроэлектроника, и в этом заключается ее практическое значение. Таким образом, понятие *ключевая технология* очень точно отражает сущность микроэлектроники. Эти, а также другие похожие эпитеты, характеризующие роль микроэлектроники, собственно говоря, не являются новыми, и ими пользуются все, хотя заложенный в них смысл полностью открывается лишь тому, кто знаком с предметом. Факты подтверждают справедливость сказанных слов. Однако далеко не каждый способен довольствоваться одними лишь фактами, т.е. видимыми всякому результатами применения микроэлектроники, – многие желают понять, каким же путем удалось получить эти результаты. Когда Альберт Эйнштейн, выступая в 1930 г. на открытии Берлинской выставки радио, бывшего тогда еще в новинку, сказал:

«Пусть будет стыдно тому, кто бездумно пользуется чудесами науки и техники, смысла в них не более того, что смыслит в ботанике корова, с удовольствием шиплющая траву»;

хотя это было шутливым преувеличением, в нем содержалась значительная доля истины. Это касается и знания микроэлектроники.

Микроэлектроника отличается очень сложным характером. Ознакомиться с ней можно, рассматривая только самые разнообразные аспекты науки и техники. Мы уже говорили о ее общем принципиальном значении в жизни общества. Однако каковы же частные практические задачи, которые решает микроэлектроника и которые привели к формированию этого направления научно-технического развития? Какие изделия, основанные на использовании микроэлектроники, имеются в нашем распоряжении и как их можно применять в промышленности, в управлении, в средствах связи, в науке и в быту? Как используются эти возможности уже сегодня и что можно ожидать в недалеком будущем? Стоит заметить, что социальные последствия развития микроэлектроники отличаются, как это бывает с технической новинкой, чрезвычайным многообразием и глубиной и охватывают все сферы общественной и личной жизни. Кроме общественной предопределенности и функционального назначения микроэлектроники интерес представляют технические вопросы, связанные с принципом действия. Как функционируют микроэлектронные устройства, как работают полупроводниковые элементы и состоящие из них схемы? Принцип действия следует рассматривать, с одной стороны, применительно к тому, какие физические процессы протекают на уровне элементной базы, микросхем, приборов или устройств, а с другой стороны, с учетом того, какие логические операции выполняются в этих системах и какие инструкции и программы нужно разработать, чтобы управлять этими операциями именно так, как это требуется для решения соответствующей прикладной задачи. Совокупность электронных схем, приборов и устройств в их *материальном* виде обычно называют *аппаратными средствами*, а необходимые для их эксплуатации *интеллектуальные* предпосылки в виде правил и программ — *программными средствами*. В каждую микроэлектронную систему в равной мере входят как аппаратные, так и программные средства. Чтобы разобраться в системе, необходимо знать, что из себя представляет и то и другое. Тот, у кого возникает желание познакомиться с микроэлектроникой ближе, в конце концов заинтересуется и вопросами технологии изготовления микросхем. Этот момент приобретает для микроэлектроники особую важность: ведь технология была, да и сегодня остается, искусством промышленного изготовления микросхем, состоящих из большого числа элементов. Принципиальная возможность создания микросхемы, содержащей 100 000 транзисторов, на что вполне способна современная микроэлектроника, была доказана давно. И если на практике долго не удавалось сделать этого, то не потому, что не были еще открыты какие-то физические принципы, а лишь по той причине, что мы тогда не владели этим искусством — технологией. Перелом произошел в 1960 г., когда появилась первая *интегральная* схема, созданная на основе *планарной технологии* изготовления кремниевых полупроводниковых приборов. С этого момента началось бурное развитие микроэлектроники. Ее будущее практически полностью зависит от технологического процесса.

Изучая микроэлектронику, можно рассматривать как этот, так и другие аспекты. О них и идет речь в многочисленных публикациях. Однако если такие публикации адресованы неспециалисту, то, как правило, в каждой из них рассматривается лишь *один* аспект, например применение или изготовление микроэлектронной элементной базы. Такие ограничения имеют весьма серьезные причины и являются вполне оправданными. Но в нашей книге мы намеренно решили не ограничиваться лишь *одним-единственным*

аспектом. Здесь предпринята попытка отразить в общедоступной форме всю область микроэлектроники. Книга обращена к читателю, который, не обладая специальными знаниями на уровне института, хочет понять, что же представляет собой микроэлектроника. Книга предназначена не для специалистов и не претендует на то, чтобы стать учебником. Учебников по микроэлектронике уже достаточно. Большинство из них хорошо выполняет свою задачу, помогая инженерам и представителям естественных наук расширить и углубить свои познания в этой области. Наша книга призвана сделать то, что не может сделать ни один учебник – помочь не имеющему специальной подготовки читателю получить представление о микроэлектронике. В первую очередь именно на это мы ориентировались при выборе материала и формы изложения.

Центральная тема книги – микроэлектроника в том виде, в каком она существует сегодня. Хотя здесь и говорится об основных движущих силах, которые привели к появлению микроэлектроники, все это, однако, рассматривается в более широком контексте, нежели простое описание путей и направлений технического развития. Подобные проблемы отодвинуты на второй план. Мы сосредоточили внимание на принципах, наиболее широко используемых сегодня в промышленности, на разновидностях технологии и вариантах применения микроэлектроники. При этом читатель познакомится с имеющимися в мире последними новинками, но без одностороннего смещения акцента в пользу только новейших достижений. Ведь так или иначе при современных темпах развития любые новинки быстро устаревают. Не устаревают лишь основные принципы. Кто знаком с основами, тот легко поймет и новое. Поэтому в нашей книге главный упор сделан на основы микроэлектроники. В гл. 1 дается общее описание того, что такое электроника и в каких «отношениях» она находится с информацией и ее обработкой. Глава 2 посвящена значению микроэлектроники для общества. В гл. 3 рассматриваются физические процессы, которые протекают в полупроводниках и на которых основан принцип действия электронных микросхем. Принципиальные возможности обработки информации с помощью электронных схем – тема гл. 4, а технология изготовления элементной базы микроэлектроники обсуждается в гл. 5. В гл. 6 сначала дается общая характеристика ассортимента электронных схем, в настоящее время выпускаемых промышленностью, после чего на примере отдельных схем разбираются их принцип действия и варианты применения. Развитию микроэлектроники в будущем, которое, очевидно, позволит намного перекрыть сегодняшние рекорды, отведена гл. 7. Таким образом, книга отвечает на довольно широкий круг вопросов. Но ответить в сжатой форме на эти вопросы можно только в том случае, если тщательно отобрать все самое важное и отбросить несущественное. Принцип, положенный в основу данной книги, заключается в том, чтобы доступно, ясно и наиболее полно изложить основные моменты, необходимые для понимания микроэлектроники, а прочие вопросы рассмотреть кратко или же вообще опустить. Наша задача – сделать микроэлектронику *понятной*; мы не стремимся дать обширную информацию обо всем, что касается микроэлектроники. В учебнике важным средством раскрытия содержания являются математические формулы и уравнения. Они позволяют легче установить взаимопонимание между автором и читателем, если последний на соответствующем уровне владеет языком формул. При подготовке данной книги, однако, нельзя было пойти по такому пути, и поэтому мы почти полностью отказались от

математических формул, обратившись к описательной форме изложения материала, и дополнили его иллюстрациями там, где это целесообразно.

И все же книга не обещает легкого чтения. Несмотря на все наши усилия сделать ее доступной каждому, для многих содержание покажется довольно сложным. Читателю в полной мере придется преодолевать трудности, которые микроэлектроника создает для понимания. Эти трудности – в природе вещей. Тот, кто хочет глубоко ознакомиться с предметом, должен пройти через это испытание. Местами книгу нужно не просто читать, а изучать.

Поводом для написания этой книги явились публичные лекции, прочитанные автором в прошлые годы по проблемам физических основ микро- и оптоэлектроники в Берлинском университете им. Гумбольдта. В работе над книгой большую помощь оказали коллеги по работе. В заключение автор хотел бы от всей души поблагодарить проф. Х. Фёльца, проф. Й. Зарембу, проф. Э. Кёлера, д-ра Р. Штруба, д-ра Й. Дизияти и проф. Х. Клозе, полностью или частично просмотревших рукопись и высказавших ряд ценных замечаний. За большую помощь при подготовке отдельных разделов автор хотел бы также выразить благодарность проф. Ю. Ауту, проф. Х. Раймеру, д-ру А. Рудольфу, д-ру Р. Берендту, проф. К.-Х. Херрману, д-ру Х.-Г. Шнайдеру.

Кроме того, особую благодарность автор приносит издательству «ФЕБ Дойчер Ферлаг дер Виссеншафтен», руководство и сотрудники которого оказали большую поддержку при подготовке и издании книги, в частности редактору Гизеле Цилас и художественному редактору Гизеле Дойч за деловое сотрудничество, а также художникам Вольфгангу Шварцкопфу и Гансу Вундерлиху за высокое качество иллюстраций. И все же данная книга не смогла бы появиться без той поддержки, которую автор постоянно ощущал со стороны жены, Ханнелоре Эндерлайн, за что и приносит ей свою самую глубокую благодарность.

Рольф Эндерлайн

1. Электроника

Эту книгу о микроэлектронике мы начинаем с краткого рассмотрения электроники без приставки «микро». Что же это такое – электроника? Само название уже говорит о том, что здесь мы имеем дело с электронами.

Электроны

Электроны – мельчайшие элементарные частицы материи, обладающие электрической энергией. Их диаметр равен $5 \cdot 10^{-13}$ см, масса составляет около $9 \cdot 10^{-28}$ г, а электрический заряд $1,6 \times 10^{-19}$ Кл. Каждый электрон имеет наименьший встречающийся в природе электрический заряд – элементарный электрический заряд. Электроны образуют электронные оболочки атомов. Вместе с протонами и нейтронами они являются теми важнейшими «кирпичиками», из которых построены атомы. Именно поэтому электроны как одни из основных структурных единиц материи входят в состав всех более или менее крупных систем, построенных из атомов, будь то твердые тела, жидкости или газы. Но электроны могут существовать и в виде свободных частиц. В космосе, например, свободные электроны можно встретить наряду с другими элементарными частицами. При так называемом бета-распаде радиоактивное атомное ядро испускает электроны. Под воздействием энергии, например теплоты, света или ионизирующего излучения, твердые тела также способны испускать свободные электроны. Это явление используется в электронных лампах, катод которых при нагревании испускает электроны. В свободном состоянии электроны могут находиться только в вакууме, т.е. когда

поблизости нет частиц, способных их притягивать. С находящимися в вакууме свободными электронами можно проводить различные физические эксперименты. Так, например, с помощью электрического поля электроны можно разогнать до высокой скорости (рис. 1, а), а поместив пучок уже разогнанных до определенной скорости электронов в электрическое поле, изменить направление их движения (рис. 1, б) или заставить двигаться по кривой под влиянием дополнительного магнитного поля (рис. 1, в) и т.д. Прodelать все это, однако, можно не только со свободными электронами, находящимися в вакууме. Некоторые твердые тела, кроме электронов, прочно связанных с атомами, имеют электроны, обладающие относительно большой свободой. Это также касается ионизованных газов – так называемой плазмы. Воздействие внешних электрических и магнитных полей на такие подвижные электроны, встречающиеся в твердых телах или газовой плазме, может осуществляться столь же легко, как и на свободные электроны в вакууме, причем возможности воздействия на электроны твердых тел даже более широки. Эти электроны реагируют не только на электрические и магнитные поля, но и на свет, давление или нагревание, т.е. на оптические, механические или тепловые раздражители. Итак, можно сказать, что мы получили первое представление об электронике: это наука об управлении потоками электронов в вакууме, твердых телах и газовой плазме путем внешнего воздействия на них.

Осуществляется такое воздействие, разумеется, с целью получения определенного полезного эффекта. Но каким же обра-

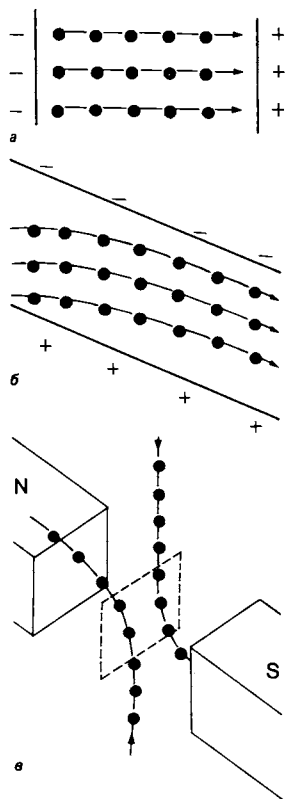


Рис. 1. *а* – движение электронов под действием электрического поля; *б* – изменение направления движения электронов под действием электрического поля; *в* – изменение направления движения электронов под действием магнитного поля.

зом электроны могут привести к такому эффекту? Здесь в первую очередь необходимо подчеркнуть, что там, где используется электрическая энергия, электроны играют огромную роль. Именно электроны являются главными носителями электрических зарядов, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни. Конечно, кроме электронов существуют другие элементарные частицы с положительным электрическим зарядом, в частности *протоны* и *позитроны*. Но позитроны встречаются чрезвычайно редко. Протонов, правда, в природе столь же много, как и электронов. Протоны играют определенную роль в электротехнике, например, входя в сос-

тав ионов, они участвуют в реакциях, протекающих в свинцовых аккумуляторах. Недостаток протонов в том, что, будучи в 2000 раз тяжелее электронов, они во столько же раз менее подвижны. Поэтому в большинстве случаев практическое использование электричества основано на переносе электрического заряда не протонами, а именно электронами. Если включить электрическую лампочку, то движущиеся в нити накаливания электроны будут сталкиваться с атомами, заставляя их испускать видимый свет. А в электродвигателе как раз кинетическая энергия электронов приводит во вращение ротор.

Преобразование электрической энергии

Упомянутые виды работы, совершаемой электронами, можно рассматривать как *генерацию энергии*, а точнее как *преобразование одного вида энергии в другой*. Электроны способны осуществлять перенос и преобразование энергии – электрической в световую, тепловую, механическую или химическую. Они играют главную роль в получении электрической энергии из тепловой, химической, ядерной, солнечной и т. д. и в передаче ее от места получения к потребителю. Но когда мы говорим об электронике, то как раз эта способность электронов осуществлять преобразование одного вида энергии в другой *не представляет* для нас особого интереса. Ведь здесь используются только самые элементарные свойства электронов, причем в относительно простом виде, т. е. используется возможность заставить их двигаться, и они, будучи однажды приведенными в движение, в свою очередь становятся источником движения. В отличие от этого электроника занимается более тонкими эффектами, в первую очередь тем, как изменяется характер движения потоков электронов в условиях внешних воздействий и к каким эффектам это может привести. Предметом электроники является не столько движение самих электронов, сколько целенаправленное формирование потоков электронов и управление

ими с помощью внешнего воздействия. О том, что при этом речь может идти об электрическом, магнитном, механическом или тепловом воздействии, мы уже говорили. Если путем нагрева резистора изменяют величину тока в цепи, то на поток электронов оказывают тепловое воздействие (рис. 2, а). Об электрическом воздействии речь будет идти в том случае, если для управления током изменяют напряжение на сетке вакуумной электронной лампы (рис. 2, б). Несмотря на то что в электронике используются и другие виды воздействия, *электрическое* по своей значимости намного превосходит их. В микроэлектронике, как мы ее понимаем в данной книге, применяются только электрические виды воздействия. В этом смысле предложенное выше определение электроники теперь можно уточнить следующим образом: это наука о формировании потоков электронов и управлении ими с помощью внешнего *электрического* воздей-

ствия с целью получения определенного полезного эффекта.

Промышленная и информационная электроника

Итак, теперь мы знаем, что в процессах передачи и преобразования энергии большую роль играют электроны. Если потоки электронов используются для преобразования и передачи значительного количества энергии и управляются путем электрического воздействия, то речь идет о *промышленной электронике*. Говоря другими словами, в промышленной электронике обеспечивается электрическое управление сильными токами и высокими напряжениями. Однако кроме электрической энергии электроны могут служить носителями и чего-то другого. Это другое — *информация*. Электрический ток может быть сильным и слабым. Сообщение «электрический ток сильный» — это уже информация. Сила внешнего воздействия на потоки электронов также может быть различной; напряжение на сетке электронной лампы, например, бывает и высоким, и низким. Следовательно, и во внешнем воздействии может содержаться определенная информация. Теперь решающее значение приобретает то, что электроны сами способны оказывать внешнее воздействие. Это дает возможность с помощью *одного* потока электронов оказывать направленное воздействие на *другие* потоки электронов. Если оба потока электронов несут информацию, то в результате мы имеем дело с воздействием *одного* информационного потока на *другой* (рис. 3). Но ведь именно это и требуется при обработке информации. Итак, мы подошли к очень важному выводу: с помощью электронов можно обрабатывать информацию. И когда электроника используется в этих целях, то говорят об *информационной электронике*.

Для эффективного воздействия потоков электронов друг на друга требуются так называемые *электронные элементы*. Если обратиться к рис. 3, то такие эле-

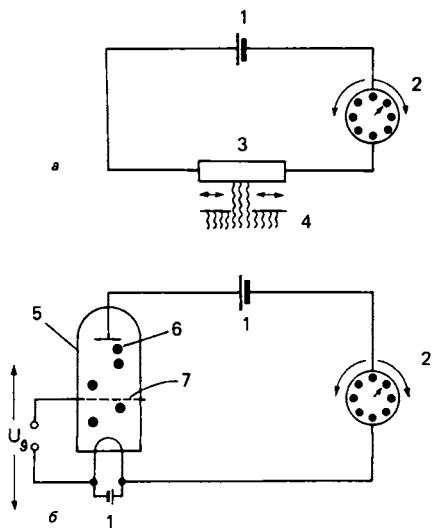


Рис. 2. а — тепловое воздействие на поток электронов путем нагревания твердотельного резистора; б — электрическое воздействие на поток электронов путем изменения напряжения U_g на сетке вакуумной электронной лампы. 1 — источник тока; 2 — измерительный прибор; 3 — твердотельный резистор; 4 — регулируемый источник тепла; 5 — вакуумная электронная лампа; 6 — свободные электроны; 7 — сетка.

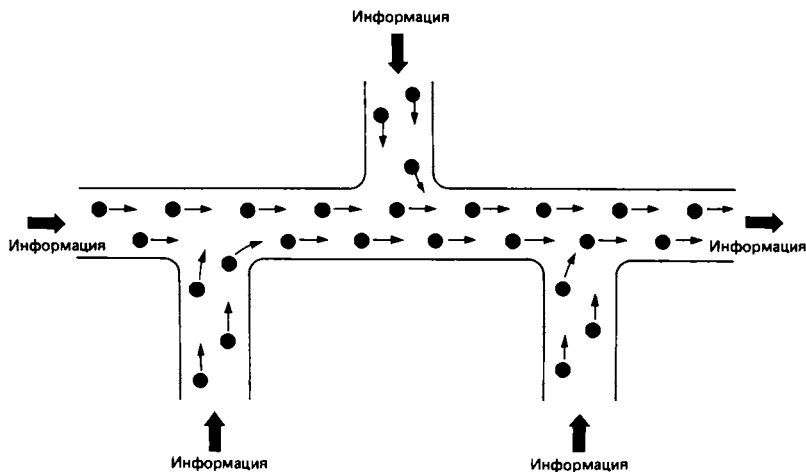


Рис. 3. Принцип обработки информации с помощью потока электронов.

менты должны быть расположены в точках пересечения потоков электронов. Сами потоки электронов движутся по проводникам. Одно это уже говорит о том, какую в принципе конструкцию должны иметь элементы, служащие для обработки информации. Эта конструкция должна обеспечивать возможность их объединения с помощью проводников в схему. Как

конкретно осуществляется обработка информации с помощью электронных схем, мы более подробно рассмотрим в следующих главах. А в гл. 2, не вдаваясь в технические подробности, попробуем показать читателю роль информации и ее обработки в человеческом обществе и рассказать, какое место здесь отводится микроэлектронике.

2. Микроэлектроника, информация и общество

Микроэлектроника – информационная электроника. Повсюду, где что-нибудь происходит с информацией, мы имеем дело с микроэлектроникой. При этом понятие «информация» следует рассматривать в очень широком смысле. Мы понимаем под информацией все так или иначе оформленные сведения или сообщения о вещах и явлениях. Информацию распространяют радио и телевидение. Ее можно получить из газет, ею можно обменяться по телефону. Почта является тем учреждением, которое имеет дело преимущественно с информацией. Над информацией осуществляет операции микрокалькулятор, непрерывно выдает информацию часы. Выполнить измерения – значит, получить информацию. Информация нужна и тогда, когда требуется автоматизировать управление машинами. Но информация немислима без носителя, т. е. определенного материального средства для ее хранения и передачи. Ни одно сообщение не существует само по себе: оно должно быть напечатано на бумаге, передано колебаниями воздуха или должно обрести какое-либо иное материальное воплощение. На одном и том же носителе информация может отображаться по-разному. На бумаге текст может быть написан по-немецки, по-русски или по-английски, да и вообще не буквами, а тайным цифровым кодом. Но, несмотря на различные формы представления, это будет все та же информация. Для начала, пожалуй, можно ограничиться этими краткими замечаниями об информации как понятии. Позднее мы еще вернемся к нему и постараемся дать более точное определение.

Информационные процессы и общество

Информация не есть нечто статичное. Как правило, с ней все время что-то происходит, т. е. осуществляются *информационные процессы*. В жизни всего общества и каждого человека в отдельности информационные процессы играют такую же большую роль, как и процессы обмена веществ или энергетические процессы. Решающее значение для жизни вообще информация имеет и в *биологическом* смысле. Однако в дальнейшем мы будем рассматривать лишь те информационные процессы, которые связаны с существованием человеческого общества и общественной природой человека, ибо только *они* имеют отношение к средствам микроэлектроники. Эти процессы можно разделить на четыре группы – получение, хранение, обработка и передача информации.

Получение информации

Человек воспринимает большую часть поступающей к нему информации непосредственно органами чувств, прежде всего с помощью зрения. Однако возможности наших органов чувств весьма ограничены, а многие вещи и явления для них вообще недоступны. Поэтому для получения информации важную для человека роль играют вспомогательные технические средства общения. С помощью измерительных инструментов человек активно собирает информацию о предметах окружающего мира и протекающих в нем процессах. А вот при медицинском обследовании

довании объектом диагностических измерений становится уже сам человек. Информация, получаемая в ходе измерений, однако, имеет важное значение не только для «человека разумного», но и для машин. Необходимые для получения такой информации чувствительные элементы средств измерения называют *датчиками*. Каждый прибор для регулирования температуры имеет температурный датчик; в любых системах предупредительной сигнализации применяются контактные или оптические датчики. Датчиками оснащены и промышленные роботы, решающие более сложные задачи. И если информация представляет собой совокупность сведений и сообщений о вещах и явлениях, то получение информации означает нечто гораздо большее, нежели просто измерение. Любой сбор фактов и ведущееся расследование, любой опрос населения в целях изучения общественного мнения, проведение любых наблюдений, исследование событий прошлого в этом смысле являются процессом получения информации. В широком смысле слова сюда же следует отнести изучение взаимосвязей в природе и обществе или создание произведений искусства. В то же время все это свидетельствует об одном: нет четких границ между получением информации и другими информационными процессами, такими, как хранение и обработка информации.

Хранение информации

Если информацию требуется использовать не только в момент получения, но и позже, или если она вообще создается лишь для использования впоследствии, то возникает необходимость в ее *хранении*. Примером информации в первом случае является выпущенная в прямой эфир и записанная на магнитную ленту телевизионная передача, а во втором – содержание какой-либо книги. Необходимость хранения информации возникает во всех сферах жизни. При этом речь может идти о профессиональных знаниях, результатах научных исследований, конструкторской

документации, произведениях искусства, последних новостях или «делах давно минувших дней». Результаты медицинского обследования необходимо сохранять, точно так же как и информацию о состоянии национальной экономики или личных банковских счетах. Цель хранения информации состоит в том, чтобы в течение длительного или непродолжительного времени обеспечить сохранность имеющейся информации и удобный доступ к ней. В природе естественным носителем информации является человеческая память. И все же с давних пор человек пользуется посторонними подсобными средствами для хранения информации, которые сначала были самыми примитивными, например окружающими предметами (камнями, ветками и т. д.); их определенное расположение давало возможность передать соответствующую информацию. Историческими вехами на пути развития способов и средств хранения информации явились создание письменности и изобретение бумаги, а затем и книгопечатания. Такие основанные на использовании этих открытий носители информации, как книги, деловые бумаги, газеты и журналы, остаются актуальными и в наши дни. Кроме них, однако, появились новые носители информации – фотографии, киноплёнки, граммофонные пластинки, магнитная лента, компакт-диск, гибкие магнитные диски, электронные микросхемы и многое-многое другое. В библиотеках и служебных кабинетах, вычислительных центрах и банках данных скапливается информация, хранящаяся на носителях данных. С развитием человеческого общества непрерывно росли и требования к хранению информации, так как объем новой ценной информации увеличивается, а точное время, когда информация обесценится полностью, неизвестно. Сегодня постоянно растущий поток информации стал большой проблемой. И состоит она не только в том, чтобы в ограниченной единице объема, площади или длины размещать все больше и больше информации, а прежде всего в том, чтобы улучшить возможности использования уже на-

копленной информации. Это означает, в частности, необходимость гарантировать быстрый доступ к нужной информации даже в том случае, когда не известно, в какое место памяти она помещена, а сведения о ней носят самый общий характер. Такое очень часто встречается в науке. Требуется узнать, к примеру, какие результаты уже опубликованы по той теме, над которой сам работаешь. Существующее дублирование научных работ доказывает, что сегодня решение этой проблемы еще очень далеко от совершенства.

Хранение информации — это по существу передача информации *во времени*. Если обмен информацией осуществляется между различными *точками пространства*, то речь идет о передаче информации.

Передача информации

Информационное общение — связь — является одним из решающих условий существования и развития человеческого общества вообще. Способность к общению с себе подобными присуща человеку по самой его природе. Однако реализована она может быть лишь на расстоянии прямой видимости и слышимости. А вот для передачи информации на большие расстояния, т. е. для *телекоммуникации*, или дальней связи, организм человека не приспособлен. Человек пользуется курьерами или техническими средствами. До конца прошлого века для этих целей использовали барабаны, колокола, сигнальные дымы, мощные источники света и т. д. Перелом наступил с открытием электричества и электромагнитных волн. Появившиеся в распоряжении человека технические средства оказались очень эффективными для телекоммуникации — настолько эффективными, что и сегодня их возможности исчерпаны далеко не полностью. Это очень хорошо, так как в процессе развития общества требуется передавать на дальние расстояния все больше и больше информации. В нашем распоряжении уже имеются такие технические устройства и системы, как телетайпы и факсимильные устройства для передачи и приема зна-

ков, текстов и изображений или телефон для обмена речевыми сообщениями, который в будущем, очевидно, во всевозрастающих масштабах также будет использоваться для передачи изображений. Направленная радиосвязь позволяет осуществлять информационное общение с космическими кораблями и спутниками. Для передачи информации служат радио и телевидение, причем сюда следует отнести и развлекательные программы. Кроме электронных средств массовой информации в виде радио и телевидения, как и раньше, широко распространены и такие традиционные неэлектронные средства, как газеты, книги или кинофильмы.

Обработка информации

Передача и хранение являются процессами, которые не изменяют имеющуюся информацию. Однако существуют и такие процессы, которые преобразуют имеющуюся информацию в новую, прежде отсутствовавшую. Эти процессы объединяют под общим понятием *обработка информации*. Типичным примером обработки информации является выполнение вычислительных операций над заданными числами и их порядок. Если вычисления сложные и производятся с относительно небольшим объемом заданных чисел, то мы имеем дело с *численной арифметической задачей*. Если же речь идет о простых вычислениях, которые, однако, требуется выполнить с большим числовым материалом, то говорят об *обработке данных*. При этом понятие «данные» вообще включает в себя не только числа; обработка данных представляет собой нечто большее, нежели просто вычисления. Данные — это вся информация, представленная цифрами, буквами и прочими знаками. Под обработкой данных понимают выполнение различных операций над данными. Наряду с арифметическими вычислительными операциями сюда входят логические операции, операции сравнения и переноса. Для выполнения такой работы природа снабдила человека особым органом — мозгом, который способен обраба-

тивать не просто данные, а информацию в ее широком смысле. Что же касается *технических* средств обработки информации, то на них мы подробно остановимся дальше. Данная книга и посвящена важнейшему сегодня и в ближайшем будущем средству решения этой задачи – микроэлектронике. Но сначала вернемся к обработке данных. Ее значение велико именно по той причине, что очень большой объем информации поступает либо в виде данных, либо легко может быть в них преобразован. Идет ли речь о расчете зарплаты на заводе, выдаче книг в библиотеке, анализе статистических показателей или о тысяче других вещей, подлежащая обработке информация всегда поступает в виде данных, и обработка информации является обработкой данных. Собственно говоря, письменный текст представляет собой не что иное, как последовательный ряд данных. Поэтому операции, характерные для обработки данных, могут выполняться и с текстом. Это означает, например, что текст, напечатанный на машинке в одном формате, можно перепечатать в другом формате, что могут меняться местами или стираться определенные части текста, вводиться новые текстовые фрагменты, разыскиваться и распечатываться отдельные места. В таком случае говорят об обработке текста, которая является особой формой обработки данных. Но при всем том она затрагивает лишь формальную сторону текста, но не его содержание. Если же требуется обработать содержание, то речь пойдет уже не только об обработке данных, но и об *обработке знаний*. Ибо именно знания нужны для того, чтобы вообще можно было понять содержание, что, конечно же, является минимально необходимым для смысловой обработки написанного. Если же по содержанию текста нужно сделать какие-то выводы, то для этого требуются дополнительные знания. Типичным примером обработки знаний будет перевод текста на другой язык или определение медицинского диагноза по результатам обследования.

Кроме данных и знаний на практике

нередко приходится обрабатывать информацию, представленную в виде изображений. В таком случае говорят об *обработке изображений*. Примером может служить распознавание знаков или образов. Для этого требуется сверка с эталонным экземпляром из набора различных оригиналов. Рассматриваемая проблема возникает в связи с промышленными роботами, которые должны уметь распознавать, например, имеет ли поступающая на обработку заготовка нужную форму и заданное расположение. Зачастую передача информации осуществляется в *речевой форме*. Для информационного общения людей речь играет особую роль. Никакими другими физическими действиями человек не может передать столь большой объем информации, как с помощью речи – при отсутствии особых технических средств, таких, к примеру, как быстродействующие пишущие машинки, если он к тому же не обладает специальными навыками быстрого печатания. С учетом данного ограничения речь является тем информационным каналом, по которому за единицу времени человек способен передать наибольший объем информации, т. е. намного больше, чем удастся сделать, скажем, с помощью генерации знаков и образов, распознаваемых оптическим путем. Именно благодаря этому своему уникальному свойству речь стала важнейшим средством информационного общения между людьми. Но отсюда же вытекают и особенности связи между человеком, с одной стороны, и машиной и техническими устройствами, с другой стороны. Как было бы удобно, если бы информационное общение осуществлялось через восприятие речи и ответ человеческим голосом! Чтобы это стало возможным, машины, во-первых, должны понимать речь и, во-вторых, обладать способностью генерировать речевые сигналы. Таким образом, аналогично обработке данных, знаний и изображений распознавание речевых сигналов и синтез речи становятся задачами, приобретающими практическое значение для обработки информации.

До сих пор мы рассматривали в пер-

вую очередь информационные процессы в их первичном, так сказать, чистом виде, лишь мимоходом затрагивая практические примеры, число которых гораздо больше. Промышленные роботы, способные распознавать образы, и машины, понимающие человеческую речь, являются иллюстрациями той широкой сферы деятельности, где информации отводится важное функциональное значение, а именно сферы материального производства. Информация играет здесь роль невидимого рулевого, руководящего действиями человека, а через него и действиями машин, либо управляющего непосредственно машинами без помощи посредника. Производственные процессы являются *одновременно* информационными процессами. Обработка заготовки на станке будет не только механическим процессом, но и таким процессом, в ходе которого требуется обработка информации. Механическая обработка заготовки должна осуществляться так, чтобы в итоге получилась нужная деталь. Для этого во время выполнения определенной технологической операции, к примеру во время токарной обработки, должны проводиться измерения, а обточка должна продолжаться лишь до тех пор, пока не будут получены заданные размеры. Следующая операция, например сверление, должна выполняться только в том случае, если заданные размеры достигнуты, и т.д. Таким образом, необходимо сначала с помощью измерений получить информацию, которую затем предстоит обработать и преобразовать в какое-то определенное действие. В химической промышленности одни вещества превращают в другие, например каменную соль, аммиак и углекислоту в соду для последующего производства стекла или стиральных порошков, ацетилен и соляную кислоту в поливинилхлорид (ПВХ), чтобы потом изготовить из него различные пластмассовые изделия. Чтобы химические реакции давали большой выход продукта высокого качества при минимальных затратах энергии и сырья, требуется обеспечить оптимальный режим работы установки. Для этого

необходимо поддерживать наиболее благоприятную температуру, а в случае ее колебаний – отвод или подвод тепла. Необходимо также контролировать давление в аппаратах или концентрацию участвующих в реакции веществ и при необходимости выводить эти параметры на оптимальный уровень. И все это нужно делать не только где-то в одном месте, а в разных точках химической установки. То, что мы здесь рассказали о механическом и химическом производствах, относится к любой рабочей операции в сфере материального производства. Каждая рабочая операция наряду с оказанием непосредственного физического или химического воздействия на объект труда является также процессом обработки информации. Этот вывод, ограничивающийся здесь для начала только сферой материального производства, остается справедливым и в том случае, если понятие «труд» рассматривается в более широком смысле. Ведь не только непосредственные технологические процессы и операции связаны с затратами труда, но и все подготовительные и заключительные, начиная от лабораторной разработки, подготовки конструкторской документации и поставки материалов и кончая контролем качества готового изделия, упаковкой, складированием и отправкой заказчику. Не будет преувеличением сказать, что применительно ко многим видам продукции на подготовительно-заключительные операции уходит гораздо больше времени, чем на сам процесс изготовления. Соответственно больше и объем информации, которую при этом необходимо обработать. В конце концов материальное производство невозможно представить без администрации, почты и телефона, без проектирования и управления, т.е. без всего того, что не только на производстве, но и во всех остальных сферах общественной жизни играет большую роль и разнообразными способами связано с информационными процессами. Другой сферой человеческой деятельности, к тому же создающей предпосылки для существования и развития материального производства,

является наука. Тот факт, что именно в науке получение и обработка информации имеют огромное значение, не нуждается в комментариях. В равной мере нет надобности подчеркивать, что в школах и высших учебных заведениях и вообще во всей системе образования очень большое место занимает обработка информации.

К заключительным рабочим операциям в самом широком смысле относятся транспортировка товаров и их продажа через торговую сеть. И здесь мы повсюду встречаемся с информационными процессами. Водитель автофургона, выезжий товары в магазин, должен непрерывно получать и обрабатывать информацию о транспортной ситуации, о состоянии автомобиля и дороги и, руководствуясь правилами движения, выполнять операции по управлению машиной. Кстати, то же самое делаю и я, когда отправляюсь куда-нибудь на своей машине. Если мне нужно съездить в магазин или прачечную, чтобы купить какой-либо товар или сдать белье в стирку, то своими действиями я вызываю целую лавину информационных процессов. Вполне вероятно, например, что само мое появление в магазине регистрирует фотоэлемент, позволяющий дирекции постоянно быть в курсе того, какое число покупателей находится в торговых залах. Покупая нужные товары, я изменяю состав складских запасов магазина. Имеющееся количество товаров на складских полках является важной информацией, которая также должна учитываться. При оплате кассовый аппарат выдает информацию о том, какую сумму денег мне нужно заплатить, и одновременно он регистрирует, насколько увеличилась выручка магазина. Если же я оплачиваю покупки чеком или кредитной карточкой, то тем самым передаю в банк информацию о том, что означенная сумма подлежит списанию с моего счета и переводу на счет магазина. Размер моего счета в банке в принципе не что иное, как информация, выраженная в виде определенной суммы денег. Для меня эта сумма не является ни банкнотами, ни монетами, не говоря уже о каком-либо ином стоимостном эквива-

ленте, таком, как золото, лежащем в банковском сейфе, на дверце которого написан номер моего счета. Эта сумма – просто определенная цифра, записанная против моего номера на бумаге или магнитной ленте. Ежемесячно бухгалтерия с моей работы передает в банк информацию о том, что к этой сумме следует приплюсовать еще одну, соответствующую моей зарплате. А размеры моей зарплаты в конечном итоге не что иное, как дополнительная информация о том, в каком объеме я по результатам своего труда вправе воспользоваться результатами труда других. Деньги являются общепринятым средством овеществления этой информации. Поэтому процессы, в которых участвуют деньги, – это, по крайней мере частично, также информационные процессы. Покупая товар за наличные деньги и передавая продавцу нужную сумму денег, я передаю информацию о том, что определенную часть своих прав на пользование результатами труда других людей я уступаю прежнему владельцу товара. Снимая со своего счета в банке определенную сумму и получая в итоге денежные купюры на руки, я изменяю форму, в которой отражено мое право на пользование результатами чужого труда; ведь предыдущей формой была банковская кредитная запись. В доказательство того, что деньги являются овеществленной информацией, можно, наконец, сказать следующее: место банкнот и монет вполне могут занять электронные носители информации, например магнитные карточки, на которые электронным способом занесена информация, соответствующая определенной сумме денег. В момент оплаты информация на денежной карточке стирается и переносится в магнитное запоминающее устройство, имеющееся у продавца. Пока еще применение такой технологии, основанной на микроэлектронной информационной технике, не получило широкого распространения. Сначала нужно определить, насколько электронный денежный оборот по своей эффективности действительно превосходит традиционный. Ну а то, что в денежном и вообще платежном

обороте потоки информации велики, вытекает уже из самого факта проведения таких экспериментов.

Перечень важнейших случаев обработки информации будет неполным, если мы хотя бы вскользь не упомянем домашнего хозяйства и занятий на досуге. Выполнение домашних работ сопровождается многочисленными процессами обработки информации. Вспомним, к примеру, о приготовлении пищи, когда требуется обрабатывать информацию самого разного рода. То же самое относится и к организации свободного времени. Идет ли речь о пользовании радиоприемником, телевизором, проигрывателем или магнитофоном, игре в шахматы, посещении оперы или дискотеки, футбольного стадиона или легкоатлетического манежа, постоянно в более или менее выраженной форме осуществляется обработка информации.

Информация как понятие

После того как мы ознакомились с рядом наиболее типичных примеров, раскрывающих то, что понимают под информацией и ее получением, хранением, обработкой и передачей, давайте еще раз вернемся к информации как понятию в целом и попробуем найти более точное определение. Выше мы говорили, что информацией условились считать все какие бы то ни было сведения или сообщения о вещах и явлениях. Но такое определение говорит не очень много, так как в принципе слово «информация» мы заменили словами «сведения» и «сообщения». Точнее раскрыть суть этого понятия позволит ответ на вопрос: *какие задачи помогает решать информация* (а не что она собой представляет). Информация устраняет неопределенность, предоставляет человеку или техническому устройству возможность сделать выбор в пользу одного из нескольких равноправных вариантов. Таким образом, информация начинает играть определенную роль в том случае, если, во-первых, имеется некоторый выбор вариантов и, во-вторых, если эти варианты требуется определенным образом оце-

нить. Информация предоставляет человеку или техническому устройству возможность дать такую оценку. Существует, например, целый ряд вариантов, какой в принципе может быть сегодняшняя погода: может пойти дождь и подняться ветер, может светить солнце или небо будет затянуто облаками, температура воздуха может быть нулевой или подняться до 10, а то и 20°C. Информация о том, что сегодня термометр показывает 10°C, оценивает все прочие возможные варианты температуры воздуха – только одного из погодных параметров – как не соответствующие действительности, однако рассматривает варианты всех остальных погодных параметров как вполне возможные. Подойдя к развилке дорог, человек, направляющийся в определенное место, неожиданно встает перед выбором, на какую же из них свернуть. Он выбирает ту дорогу, которая ведет к цели. Если он знает, по какой из дорог он доберется до места, то информация ему не нужна. С самого начала он способен оценить оба варианта. Если же вся обстановка совершенно незнакома и с самого начала у него нет никаких исходных данных, то ему нужна информация. Объем информации, требующейся при полном отсутствии предварительных данных для выбора одного из двух равноценных и совершенно независимых вариантов, принято считать *единицей информации* и обозначать как *бит*. Чтобы иметь возможность сделать правильный выбор между четырьмя разными дорогами, требуются два бита информации. Поясним это на таком примере. Сначала четыре дороги делят на две группы по две дороги в каждой. Чтобы выбрать группу, в которую входит нужная дорога, требуется, как и в каждом случае выбора одного из двух равноправных вариантов, один бит информации. После того как станет известна группа в состав которой входит нужная дорога, в ней из двух дорог потребуются выбрать нужную. Для этого требуется еще один бит информации, т.е. в сумме это дает два бита. Если бы нам потребовалось сделать выбор из восьми вариантов, то

нужно было бы три бита, из шестнадцати – четыре бита и т. д. Здесь уже прослеживается определенная закономерность. При n битах информации нужный вариант можно выбрать из 2^n возможных. И наоборот, указав один нужный вариант из 2^n возможных и одинаково принимаемых в расчет, мы дадим информацию в n битов. Таким образом, информация является логарифмом с основанием 2 определенного числа вариантов, так как по определению логарифма справедливо выражение $n = \log_2 2^n$. В этом смысле можно записать следующее уравнение:

Информация = \log_2 определенного числа вариантов.

Тем самым мы получаем точное правило для определения объема информации, содержащейся в сведениях и сообщениях. Американский математик Клод Шеннон сформулировал и впервые применил это правило в 1947 г. при исследовании процессов передачи информации. Предложенное Шенноном понятие информации тесно связано с используемым в термодинамике понятием энтропии, обоснование которому еще во второй половине прошлого века дали физики немец Рудольф Клаузиус и австриец Людвиг Больцман. Уравнение Шеннона можно использовать даже в том случае, если число вариантов не является степенью двух, как это имеет место в приведенных выше примерах. Чтобы из трех дорог выбрать одну нужную, требуется информация в объеме, равном $\log_2 3 = 1,58$ бит. Каждая из 26 букв латинского алфавита содержит информацию $\log_2 26 = 4,70$ бит. При написании текста кроме букв требуются знаки препинания и пробелы между словами, т. е. вместе с буквами это составит примерно $2^5 = 32$ знака. Таким образом, каждый знак текста несет информацию объемом в 5 бит. Следовательно, книга в 100 страниц по 2000 знаков на каждой содержит информацию в объеме 10^6 бит. Понимать это следует так: мы получим информацию в количестве 10^6 бит, если во время чтения убедимся, что расположение 32 знаков и букв в книге не какое-нибудь, а

именно такое, каким мы его видим. При чтении книги мы получаем информацию о том, что это не просто одна из возможных в 10^6 случаях книга объемом в 100 страниц, а именно та, которая лежит перед нами. Но такой расчет объема информации, содержащейся в какой-либо книге, вызывает сомнения. И они на самом деле являются оправданными. Согласно такому расчету, даже совершенно непонятный или бессмысленный текст, например состоящий только из букв «е» или одних запятых, т. е. текст, в действительности не имеющий никакой информационной ценности, все же содержит 10^6 бит информации. Причина этого странного явления кроется в самом определении понятия информации, предложенном Шенноном, которое не учитывает ценность или значимость информации. Оно характеризует информацию как нечто, ограничивающее или устраняющее неопределенность перед лицом набора равноправных вариантов. Однако чутье подсказывает нам, что информация – более широкое понятие. Мы оцениваем информацию и по тому, является ли она интересной, важной и полезной, т. е. по признакам, которые вообще не фигурируют в определении Шеннона. Оно явно не охватывает все стороны информации и рассматривает ее лишь в статистическом аспекте. Вопрос о возможности обобщенного определения понятия информации, более полно отражающего ее суть, является вполне правомочным и сегодня широко обсуждается специалистами. Но окончательный ответ пока еще не дан. Несмотря на свое несовершенство, предложенное Шенноном определение понятия информации оказалось эффективным инструментом. Оно с успехом используется повсюду, а не только в науке и технике.

Информация и биологические процессы

Почти все сказанное об информации до сих пор мы рассматривали применительно к технике. Однако есть и другая область, где информация играет важную

роль. Это *живая материя*, для существования и эволюции которой информационные процессы имеют самое решающее значение. Чтобы обеспечить получение, обработку и хранение информации, природа снабдила все высокоразвитые живые существа органами чувств и нервной системой. Объем памяти человеческого мозга превышает, по всей видимости, 10^{10} бит. Механизм наследственности целиком базируется на хранении и передаче информации. У человека – по приблизительным подсчетам – объем генетической информации, заключенной в молекулах вещества наследственности [дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК)], составляет 10^{10} бит. Это соответствует такому объему информации, которую можно поместить в нескольких сотнях книг по тысяче страниц каждая. В каждой клетке живой материи, за исключением зародышевых, по всей видимости, содержится полная или почти полная генетическая информация. С одной стороны, здесь находят свое выражение чрезвычайно компактные и экономные вид и способ, которые природа может использовать для хранения информации, и в этом отношении она намного превосходит микроэлектронику. С другой стороны, бросается в глаза слишком расточительное обращение с информацией; ведь одной-единственной клетки с записанной в ней информацией уже было бы достаточно – все остальное является избыточным. Но такая избыточность означает запас надежности, причем не пяти- или десятикратный, знакомый нам по примерам из техники, а миллионнократный. Генетическая информация передается потомству путем производства копий молекул ДНК. Иногда в оригинале происходят спонтанные изменения, так называемые мутации. И они передаются по наследству. В результате естественного отбора выживают более жизнеспособные существа. Происходит то, что называют биологической эволюцией. И здесь решающую роль играет информация. Информационные процессы, протекающие на биологическом уровне, по крайней мере в

двух аспектах имеют отношение к технике. Во-первых, в технике могут быть использованы решения, найденные природой для осуществления информационных процессов в клетках живой материи. Во-вторых, можно попытаться оказать влияние на эти процессы в нужном направлении, как это сейчас и делается в генной инженерии. Может быть, когда-нибудь генетическим путем удастся изменить бактерии так, чтобы они могли создавать из молекул различных белков структуры, способные обрабатывать информацию. В определенном смысле тем самым был бы осуществлен синтез двух важнейших технологических новинок нашего времени – микроэлектроники и современной биотехнологии.

Информационные процессы как предмет электроники имеют дело с человеческим обществом и социальной природой человека. Поэтому после краткого отступления в биологию вернемся к информационным процессам в обществе, которые отличаются великим множеством и разнообразием. Они пронизывают все сферы жизни и деятельности общества – материальное производство и управление, планирование и регулирование общественных процессов, связь и транспорт, торговлю, бытовое и медицинское обслуживание, науку и образование, культуру, быт, спорт, отдых и развлечения. В жизни общества и каждого человека в отдельности не существует процесса, имеющего практическое значение и одновременно не являющегося информационным процессом. При этом обработка информации играет большую роль постольку, поскольку, во-первых, все прочие информационные процессы, т. е. получение, хранение и передача информации, немыслимы без ее обработки и, во-вторых, поскольку эти процессы могут быть осуществлены только потому, что они нужны для обработки информации – именно того процесса, который, собственно, нас и интересует. В этом смысле обработка информации является самым универсальным информационным процессом.

Обработка информации микроэлектронными средствами

Электроника в состоянии справиться с любой задачей обработки информации при условии, что задача представлена в математической форме и что можно сформулировать набор точных правил, указывающих, какие действия и в какой последовательности надо выполнить, чтобы ее решить, т. е. при наличии так называемого *алгоритма*. Из встречающихся на практике информационных задач многие с самого начала отвечают этому требованию. Существуют, однако, и такие, которые либо в принципе не имеют математического решения, либо такое решение еще не найдено. Но во многих случаях и такие задачи можно разбить на подзадачи, поддающиеся алгоритмизации. Вспомним, например, как планируется семейный бюджет или составляется программа научных исследований в каком-нибудь институте. И в том и в другом случае при выборе решения стоимостные категории (оценка ситуации и ожидаемые в перспективе результаты) играют такую роль, которую просто невозможно представить в математической форме. Поэтому ни для одной из этих задач не существует полного алгоритма решения. И все же в обоих случаях можно выделить подзадачи, поддающиеся алгоритмизации. Ниже мы будем обращаться лишь к тем задачам обработки информации, которые имеют математический алгоритм решения. Хотя количество этих задач и не охватывает все, что в широком смысле можно понимать под обработкой информации, оно невообразимо велико. И любая такая задача может быть решена с помощью электроники. В конечном счете причина ее огромного значения состоит в том, что электроника предлагает *принципиальное* решение для необозримо большого числа вариантов задач, возникающих при обработке информации и поддающихся алгоритмизации. Ударение здесь следует делать на слове «принципиальное». Во многих случаях микроэлектроника делает

принципиально возможное решение *осуществимым практически*. А это означает приемлемые финансовые расходы, малые затраты энергии и материалов, необходимые надежность и быстроту. Разница между «принципиально возможным» и «осуществимым практически» заслуживает более внимательного рассмотрения, так как имеет решающее значение для объяснения бурного развития микроэлектроники. В 1945 г. была построена одна из первых электронных вычислительных машин – ЭНИАК. В ней имелось около 18 000 электронных ламп. В те времена это, вне всякого сомнения, было самым большим числом активных электронных элементов, когда-либо собранных вместе в одном электронном устройстве. И все же эта машина была способна делать лишь то, что сегодня может любая настольная ЭВМ. А теперь попробуем себе представить (табл. 1) размеры, энергоемкость, быстродействие, надежность и цену трех одинаковых центральных процессоров, но созданных на базе электронных ламп, дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Конечно, высокая плотность упаковки в случае применения микроэлектронной технологии позволила бы сделать центральный процессор объемом 10^{-2} см³, или размером около $4 \times 4 \times 0,5$ мм. Но ведь и на дискретных полупроводниковых приборах он тоже получился бы достаточно компактным, имея объем 10^4 см³, или размер около $40 \times 40 \times 5$ см. Решающее достоинство микроэлектроники заключено, следовательно, в низких затратах, высокой надежности и малой энергоемкости при одновременно высоком быстродействии. Необходимым условием для этого является миниатюрность электронных элементов, входящих в интегральные микросхемы. Однако миниатюризация электронных элементов в микроэлектронике не самоцель, а средство для решения определенной задачи. В конечном итоге эта задача заключается в создании электронной вычислительной машины или в глобальном понимании проблем – электронной машины для обработки информации,

Таблица 1. Сравнение основных рабочих параметров электронных элементов и центральных процессоров, используемых в ЭВМ и содержащих 10^4 элементов, выполненных на различных ступенях развития электроники. Числовые значения являются ориентировочными

		Объем, см ³	Потребляе- мая мощ- ность, Вт	Быстродействие: чис- ло коммутаций или вычислительных опе- раций в секунду	Частота отказов в час	Цена, марки ГДР
1 электронный элемент	Электронная лампа	10^1	10^0	10^8	10^{-5}	10^1
	Транзистор	10^{-2}	10^{-1}	10^8	10^{-8}	10^0
	Транзистор, сформированный в микросхеме (микроэлектро- ника)	10^{-8}	10^{-5}	10^8	10^{-11}	10^{-4}
ЭВМ, содержа- щая 10^4 элек- тронных эле- ментов	Электронные лампы	10^7	10^4	10^6	10^{-1}	10^6
	Транзистор	10^4	10^1	10^6	10^{-4}	10^5
	Интегральные микросхемы (микроэлектро- ника)	10^{-2}	10^{-1}	10^6	10^{-7}	10^1

обладающей свойствами, делающими ее пригодной для практического применения. Создать машину с такими свойствами можно только с помощью микроэлектронной технологии. В определенном смысле ситуацию можно сравнить с положением дел до изобретения книгопечатания и после. Появление шрифта сделало принципиально возможной запись любого текста для дальнейшего его распространения. Для этого требовалось «всего лишь» вырубить в каменной плите нужные шрифтовые знаки. И если бы каждый человек, работая по десять часов в день, готовил бы по одной «каменной» странице, то, вероятно, и удалось бы сделать требуемое число книг. Вот только на практике реализовать это было невозможно. Требовались технические приспособления, обеспечивающие практическую возможность массового изготовления книг при приемлемых затратах сил и средств. Решающими этапами на этом пути стали, во-первых, появление бумаги

и, во-вторых, изобретение книгопечатания. Микроэлектронику иногда действительно сравнивают с книгопечатанием. Однако в этом случае ее роль скорее недооценивают, нежели преувеличивают. Хотя книгопечатание и связано с очень важным информационным процессом, последний в принципе все же остается очень узким, т.е. он представляет собой хранение информации, помещенной на бумагу в виде букв и знаков. В отличие от этого микроэлектроника обслуживает самый общий из информационных процессов — обработку информации, причем во всей ее полноте. Впервые за всю историю человечества микроэлектроника предлагает всеобъемлющую технологию обработки информации. Существует только одна альтернатива, превосходящая микроэлектронику в целом, но эту альтернативу создала не техника, а сама природа и имя ей — человек. Человеческий мозг осуществляет обработку информации. Умственная деятельность человека связана с обра-

боткой информации, а обработка информации в свою очередь является умственной деятельностью. Если способность обрабатывать информацию развита достаточно высоко, то говорят об интеллекте — у человека о природном, у машины об искусственном. Можно сказать и так: мы имеем дело с искусственным интеллектом, когда компьютер выполняет операции, типичные для умственной деятельности человека. Человек, например, может понимать речь и пользоваться ею, распознавать изображения, строить математические доказательства, играть в шахматы, сочинять музыку, осуществлять экспертный анализ или ставить медицинский диагноз. С момента появления ЭВМ предпринимаются попытки снабдить их человеческим интеллектом. И хотя коренного перелома еще не произошло, удалось заметно продвинуться вперед. В частности, практическое значение получили так называемые экспертные системы, т.е. компьютерные программы, содержащие знания экспертов и способные на базе этих знаний давать справки, ставить диагноз или делать прогноз. Однако в целом искусственный интеллект пока еще во многом уступает природному интеллекту человека. Английский математик Тьюринг придумал тест, с помощью которого можно определить, равен ли интеллект компьютера интеллекту человека или превосходит его. Кроме компьютера в этой проверке принимают участие еще два человека. Один из них задает одинаковые вопросы, приходящие в голову, компьютеру и другому человеку. Он получает от своих «собеседников» ответы, не зная, какие из них дала машина, а какие — человек. При нынешнем уровне развития компьютерной техники спрашивающий очень быстро определяет авторов ответов: машина отвечает намного хуже. Если когда-нибудь в будущем спрашивающий не сможет правильно определить автора, то в определенном смысле можно будет говорить о равенстве интеллектов машины и человека. Но сегодня еще никто не может уверенно сказать, когда первый компью-

тер успешно пройдет тест Тьюринга или наступит ли такое время вообще. И даже если это станет реальностью, все равно нельзя будет говорить о равенстве между машиной и человеком: ведь в большей физической мощности электродвигателя не отражается его превосходство над человеком. Ценность человека отнюдь не исчерпывается одними физическими или умственными способностями.

После всех этих рассуждений относительно будущего развития вернемся, однако, к современной микроэлектронике и к обработке информации, основанной на ее применении. И все же очень трудно провести четкую грань между просто «обработкой информации» и микроэлектронной обработкой информации. Лишь в одном мнения, пожалуй, сходятся: за этой гранью кроме способности обрабатывать данные должна существовать также определенная способность к обработке и использованию знаний. И все же машину нередко называют «умной» уже тогда, когда она располагает микроэлектронными техническими средствами обработки информации. Вообще-то сравнение между обработкой информации человеком и техническими средствами не обязательно бывает в пользу человека. В двух случаях микроэлектронная обработка информации превосходит возможности человека, а именно с точки зрения надежности и скорости. Конечно, человеческий мозг в состоянии выполнять очень сложные операции с высокой скоростью. Но человеку свойственно довольно часто ошибаться, а элементарные процессы в мозгу протекают сравнительно медленно. Если человек за одну минуту может досчитать до ста, то выполненная на микроэлектронной базе ЭВМ за то же время успевает сосчитать до миллиона и больше. Старое выражение «быстрый, как мысль» здесь совсем не к месту. И все же не это частное превосходство микроэлектронной обработки над способностями человеческого мозга является решающим, хотя само по себе оно дает много преимуществ. Решающее значение состоит в том, что в «лице»

микроэлектроники реально существует полезное техническое решение для обработки информации.

Как все это конкретно сказывается на практике, мы еще обсудим. Однако в любом случае нельзя забывать, что микроэлектронике только-только «перевалило» за 20 лет, а микропроцессор, появление которого, собственно говоря, и привело к резкому расширению области применения микроэлектроники, был создан чуть больше 15 лет назад. Нельзя забывать и о том, что микроэлектроника продолжает бурно развиваться. Поэтому нет никаких оснований считать, что развитие микроэлектроники завершается выходом на сегодняшний уровень ее использования для обработки информации. Этот уровень является лишь промежуточным этапом, пусть и важным, на пути к дальнейшим высотам прогресса. Поэтому наряду с достигнутыми результатами мы хотим рассмотреть также основные направления развития микроэлектронной технологии, четыре из которых нам представляются наиболее важными.

Новое должно быть лучше старого

Первое направление вплотную связано с тем, что задолго до появления микроэлектроники уже использовались различные технические средства обработки информации. Мы упоминали вычислительные машины на электронных лампах. Но в более отдаленном прошлом существовали также чисто механические вычислительные устройства. А электромеханические кассовые аппараты, к примеру, можно встретить и в наши дни. То же самое следует сказать об электромеханических торговых и игровых автоматах. Все часы в прошлом имели механический или электрический механизм. Но вот в отличие от вычислительных машин электронные часы на электронных лампах не выпускались никогда, за исключением немногих экземпляров, изготовленных с чисто научными целями. Они были бы слишком

дорогими и неудобными в обращении. Только в радио- и ТВ-приемниках в широких масштабах стали применять электронные лампы, на смену которым позднее пришли дискретные полупроводниковые элементы. Линии связи в городской телефонной сети первоначально соединяли телефонистки. Однако с увеличением числа абонентов этот способ стал быстро изживать себя. Операции коммутации на телефонном узле потребовалось автоматизировать. Сначала для решения этой задачи в распоряжении имелись только электромеханические реле. Связанные с их использованием затраты были чрезвычайно велики – стоит только вспомнить, какие здания строились для телефонных узлов, в залах которых размещались миллионы считающих реле, однако и с этим приходилось мириться из-за отсутствия лучших переключающих элементов. Проблема более эффективного поиска, т.е. электронного решения для использования в телефонной коммутационной технике, стала настолько острой, а электронная лампа оставалась настолько малоприспособленной для применения в этой области, что именно данная задача и заставила направить настойчивые усилия на создание твердотельного электронного коммутационного элемента. И тот факт, что этот коммутационный элемент – транзистор – был создан учеными лаборатории, основанной американским изобретателем телефона Грэхемом Беллом, никак нельзя считать случайностью. Хотя на телефонных станциях электромеханические реле все еще продолжают играть важную роль, однако переход на микросхемы стал не только актуальным, но частично уже совершившимся фактом. Что же касается бытовой электронной аппаратуры, да и почти всех упоминавшихся ранее примеров, то здесь практически во всех случаях или уже используется микроэлектроника, или ведется подготовка к ее применению. В этом и состоит первая связанная с микроэлектроникой важная тенденция развития обработки информации. Эта тенденция именно потому набирает или

уже набрала силу, что предлагаемые микроэлектроникой решения значительно лучше всех предыдущих, т.е. дешевле, надежнее, быстрее, компактнее и экономичнее с точки зрения материальных и энергетических затрат. Сегодня микроэлектронная технология открывает новые намного более удобные пути решения задач, связанных с обработкой информации, которые в течение многих десятков, а если принять в расчет часовой механизм, то и сотен лет, решались другими способами. На примере счетной машинки мы могли это видеть собственными глазами. Микроэлектроника позволяет создавать малые и большие ЭВМ с невиданной до сих пор вычислительной мощностью при относительно низкой стоимости. Домашний компьютер, который сегодня может делать то, что в недалеком прошлом делал целый вычислительный центр, и все же вполне доступен по цене – вот один из многочисленных примеров. Резкое увеличение вычислительной мощности больших ЭВМ приносит пользу в первую очередь в таких областях деятельности, где, как это имеет место в науке, метеорологии, планировании и управлении производственными и социальными процессами, без них просто невозможно обойтись. А что означает замена электронных ламп и дискретных полупроводниковых элементов в бытовой электронике микросхемами, каждый из нас знает по собственному опыту. И дело не только в том, что переход на микроэлектронную технологию дает возможность создать качественно новую аппаратуру с улучшенными потребительскими свойствами, аппаратуру, отличающуюся более высоким качеством звука и изображения, удобством обслуживания и дополнительными функциональными возможностями. Что же касается телефонной связи, то благодаря применению микросхем затраты уменьшаются на несколько порядков. Появляется возможность уменьшить телефонную станцию до размеров одной комнаты. Реальностью становится создание сети автоматической телефонной связи, охватывающей весь земной шар.

Технические решения для неразрешимых в прошлом задач. Автоматизация

До появления микроэлектроники большинство задач, связанных с обработкой информации, вообще не имело технического решения, и впервые его позволила найти микроэлектронная технология. С ее помощью уже сегодня и в будущем можно решать такие задачи обработки информации, которые в прошлом либо вообще оставались неразрешимыми, либо решались только самим человеком. Это второе направление развития микроэлектронной техники обработки информации. Раньше в сфере материального производства обработка информации, если таковая вообще осуществлялась, была *делом рук человека*. С появлением быстродействующих больших ЭВМ возникла принципиальная возможность внедрения машинной обработки информации на производстве. Но для этого информацию требовалось передать из различных точек производственного процесса в большую ЭВМ, установленную в вычислительном центре, там ее обработать и вернуть обратно. Однако большие ЭВМ тех времен были слишком дороги, а весь этот процесс, связанный со слишком большими затратами сил и средств, оставался неустойчивым к помехам, что и сдерживало широкое использование электронной обработки информации на производстве. И здесь коренной перелом был связан с микроэлектроникой. Только появление в конце 70-х годов сравнительно дешевых микропроцессоров и микроЭВМ позволило оснастить каждый станок или технологическую линию собственным миниатюрным вычислительным центром, осуществляющим обработку информации. Таким образом, появилась возможность обрабатывать информацию непосредственно в том месте, где она возникает или требуется. Начался процесс децентрализации обработки информации. Применение на местах малых ЭВМ вместо больших, размещенных в удаленных вычислительных

центрах, стало для обработки информации тем, чем для развития машиностроения был переход от паровой машины к электродвигателю. Ведь, как правило, паровая машина приводила в движение не один какой-нибудь механизм, а целую группу таких механизмов, более или менее удаленных друг от друга. А вот электродвигатель можно было поставить на каждую машину, как и микроЭВМ, дав каждой машине индивидуальное средство обработки информации. Для управления машинами, имеющими такое оборудование, человек уже не нужен. Они сами управляют собой с помощью микроЭВМ и введенной в ее память программы. Поэтому в таких случаях говорят об автоматическом управлении. Имеющие автоматическое управление станки и технологические линии дают возможность автоматизировать целые производственные процессы, причем в различной форме – в зависимости от степени и вида автоматизации. Конечная цель, вне всякого сомнения, состоит в полной автоматизации производственного процесса, внутри которого человек выполняет лишь косвенные функции. Ближе всего к достижению этой цели сегодня подошли там, где в течение длительного времени выпускается большой объем продукции одного вида, например железнодорожных рельсов, электрического кабеля, цемента или химического сырья. Изготавливается эта и аналогичная продукция на поточных линиях и установках, в режим работы которых, как и в саму продукцию, в течение длительного времени не нужно вносить изменений. Автоматизация таких специализированных производственных систем осуществляется с помощью микроэлектронных технических средств управления, она в настоящее время уже хорошо освоена и дает большой экономический эффект. В этом случае говорят о специализированной автоматизации. Однако таких видов продукции, которые можно было бы в большом объеме без изменений выпускать годами, например, рельсы или цемент, очень мало. Во многих случаях требуется продукция, изготавливаемая лишь малыми и

средними сериями, к тому же технический прогресс, а зачастую и мода требуют обновления и изменения продукции в течение короткого времени. Хотя с технической точки зрения и здесь аналогично массовому производству можно было бы внедрить средства специализированной автоматизации, в экономическом плане такое решение, как правило, является невыгодным. Нужен другой подход к автоматизации, позволяющий получить такой же высокий экономический эффект, как и в условиях специализированной автоматизации массового производства. Реализовать такой подход позволяют разработанные уже в конце 50-х – начале 60-х годов станки с числовым программным управлением и промышленные роботы. Объединение станков, рабочими операциями которых можно управлять, с роботами, обеспечивающими подачу заготовок на обработку и транспортировку готовых изделий, привело к созданию так называемых гибких производственных систем. Их гибкость заключается в том, что в результате сравнительно небольших изменений, например за счет замены инструмента, их можно переналаживать на изготовление разных видов продукции одного основного типа. Чтобы изготовить продукцию измененного вида, не требуется новая производственная система: остается лишь приспособить уже имеющуюся систему для выпуска новой продукции. В результате при небольших дополнительных затратах для переналадки на изготовление конкретного вида продукции обеспечивается высокая серийность по определенному типу основной продукции и сокращаются затраты времени на обновление производственной программы. Более наглядно все это можно себе представить следующим образом: если основной продукцией является деталь машины, электрическая лампочка или упаковочная тара, то конкретным видом такой продукции будут вал двигателя, лампочка на 60 Вт или коробка для стирального порошка. В комбинации с гибкими производственными системами микроэлектронная технология позволяет найти искомое

решение для автоматизации производства, т.е. обеспечить так называемую *гибкую автоматизацию*. Цель ее заключается в создании управляемого ЭВМ производства с быстрым переходом от одного вида продукции к другому на базе автоматизированных рабочих мест (АРМ), систем автоматизированного проектирования и автоматизации производственных процессов (САПР/АПП) и по возможности в их объединении в единый производственный комплекс, охватывающий проектирование и конструирование, материальное снабжение вместе со складским хозяйством и внутризаводским транспортом, собственно производство, контроль качества, упаковку и отправку конечной продукции заказчику. Такая интеграция становится более выгодной с экономической точки зрения, поскольку большие резервы для экономии рабочей силы и сокращения продолжительности производственного цикла скрыты именно в подготовительно-заключительных операциях, а также в коэффициенте использования оборудования. Во многих странах, включая ГДР, сегодня интенсивно работают над созданием условий для гибкой автоматизации производства. Одним из них является, в частности, роботизация промышленного производства. Промышленные роботы выполняют, как об этом говорит само их название, те операции, которые пришлось бы выполнять человеку. В настоящее время промышленные роботы находят применение на многих участках производства, причем не только в составе гибких производственных систем, помогая решать самые различные задачи, например окраску, сварку или загрузку заготовок. В наиболее полной мере их способности раскрываются в гибких автоматизированных производственных системах. Промышленные роботы можно разделить на несколько поколений. Роботами первого поколения являются манипуляторы с автоматическим управлением, которое может быть представлено как в виде системы, выполняющей раз и навсегда зафиксированные операции, так и в виде микропроцессорной системы с гибким

программированием. Промышленные роботы второго и третьего поколений помимо микропроцессорного управления имеют также датчики, с помощью которых они способны определять состояние обрабатываемой заготовки и обрабатывающего инструмента и, используя получаемую от последних информацию, приспосабливать рабочую программу к ситуации. Характерным отличием роботов третьего поколения является развитая способность распознавать образы и координировать соответствующим способом выполнение рабочих движений. Роботы четвертого поколения обладают искусственным интеллектом, т.е. более высокой по сравнению с предшественниками способностью обрабатывать информацию. Используемые в настоящее время промышленные роботы в основном пока еще относятся к первому поколению.

Быстрыми темпами автоматизация охватывает не только сферу производства, но и сферу управления. И здесь централизованная обработка данных с помощью больших ЭВМ сначала не принесла ожидаемого успеха. Перелом наступил только после перехода к децентрализованной обработке информации. Подобно тому, как «умные» станки стали частью современного промышленного производства, так и в учреждения пришли «умные» электронные пишущие машинки. В дополнение ко всему, на что способны обычные пишущие машинки, электронные могут выполнять простую обработку текста, например заменять фрагменты старого текста новыми или печатать с выключкой вправо. При желании текст из памяти такой машинки можно перенести на магнитную ленту и уже ее, а не бумагу использовать в качестве носителя информации. Однако все это вряд ли имело бы смысл, если бы речь шла только о хранении текста. Бумага пока отлично справляется с этой задачей. И все же канцелярский труд—это прежде всего обработка текстов и данных. И если запись сделана на магнитном носителе, то с помощью микроэлектронной техники эту информацию можно направить непосредственно

на автоматизированную обработку. Для этого помимо пишущей машинки нужна микроЭВМ. Персональная ЭВМ и является тем устройством, где микроЭВМ объединена с пишущей машинкой. С помощью этого устройства можно автоматизировать значительную долю канцелярского труда, и тогда это будет *автоматизация канторских работ*. А если «электронизацию» распространить на служебную переписку, то направляемые обычно почтой данные и тексты можно будет ввести в систему автоматизированной обработки. И для этого уже не потребуются снова садиться за клавиатуру персональной ЭВМ: данные уже будут в ней, как только поступят в адрес учреждения, ведь одновременно они поступят и прямо в компьютер. А уже здесь с ними можно осуществлять любые операции обработки, включая вывод на экран дисплея или распечатку на бумаге. Внедрение этой новой технологии канторских работ во всех странах мира пока находится в начальной стадии. Но уже совершенно ясно, что она будет способствовать существенной рационализации канцелярского труда. В дополнение ко всему новая технология приведет к замене бумаги, являющейся сейчас одновременно носителем и средством отображения информации, на дисплей и магнитные носители данных, такие, как гибкий магнитный диск или магнитная лента. Прогнозы говорят, что в будущем учреждения будут работать по «безбумажной» технологии.

Но автоматизация рабочих операций с помощью обработки информации на базе микроэлектронной техники не ограничивается только сферами материального производства и управления. Применение микроэлектроники в домашнем хозяйстве дает возможность создать автоматы или полуавтоматы для стирки, приготовления пищи или мытья посуды. В науке и технике существует масса *измерительных операций*, автоматизировать которые позволяет микроэлектроника. Большая скорость микроэлектронной обработки информации обеспечивает также автоматизацию управления процессами, протекаю-

щими очень быстро, например посадкой самолета или полетом ракеты. В других случаях обширную информацию о ходе производственного процесса, получаемую с помощью измерительных преобразователей, можно подвергать сложным вычислительным операциям и на основании полученных результатов подбирать параметры оптимального режима. Для энергоемкого производства таким параметром могут быть, например, затраты энергии. Таким образом, микроэлектронная технология обеспечивает не только автоматизацию, но и *оптимизацию трудовых процессов*.

Ну, а если уж речь идет о технических решениях, используемых для обработки информации и ставших реальностью лишь благодаря микроэлектронике, то нельзя обойти молчанием электронные игры. Вообще-то игровые автоматы делали и раньше, вот только интеллект их был невелик, а то и попросту отсутствовал. Первый шахматный автомат – «турок» огромного размера – вызвал большой интерес в Европе и Америке во второй половине XVIII в. Секрет его был прост: внутри скрывался человек, хорошо игравший в шахматы. Современные шахматные компьютеры обходятся без фокусов в духе иллюзионистов. Их искусственного интеллекта, состоящего из электронных микросхем, хватает на то, чтобы заставить надолго задуматься даже опытного шахматиста. Многие из выпускаемых сегодня электронных игр функционируют по тому же принципу. «Умная» микроэлектроника играет роль соперника. В электронных видеоиграх дополнительным подспорьем являются, к примеру, программа, с помощью видеокассеты вводимая в игровое устройство, и телевизор, на экране которого идет сама игра.

Влияние на другие информационные процессы. Новые виды связи

До сих пор мы говорили только о значении микроэлектронной технологии для обработки информации. Рассмотрим те-

перь, какое влияние оказывает микроэлектроника на другие информационные процессы. Это связано с тем, что в большей или меньшей степени все информационные процессы, включая получение, хранение или передачу информации, непосредственно связаны с ее обработкой. Но и здесь микроэлектронная технология позволяет выполнять операции, связанные с обработкой информации, на более высоком качественном уровне. В результате на новую ступень поднимается общий технический уровень реализации этих информационных процессов. Итак, третьим основным направлением развития микроэлектронной технологии является дальнейшее совершенствование информационной техники. Свое конкретное выражение это находит, например, в том, что запоминающие устройства и некоторые датчики, используемые для получения информации, с помощью микроэлектроники переводятся в разряд «умных», т.е. их можно оборудовать собственными устройствами для обработки информации. Глубокие изменения, которые сегодня может наблюдать каждый в области телекоммуникации, обусловлены переходом на микроэлектронную технологию обработки информации. Конечно, эти процессы нельзя сводить только к применению микроэлектроники, они основываются на использовании и других достижений научно-технической революции, таких, как спутники связи, а также световоды. Последние могут служить примером каналов связи, или так называемых *информационных каналов*. Непрерывно будет расти число информационных каналов, обладающих большей пропускной способностью. Во-первых, по ним можно передать больше радио- и телепрограмм. Во-вторых, информация, представляющую интерес для всех, например о погоде, репертуаре театров и кино, расписании движения поездов или туристических маршрутах, можно будет получить не по телефону, как это делается сейчас, а прочесть на экране телевизора (система Телетекст). Если к такому телевизору подключено печатающее устройство, то нужный текст можно

получить в напечатанном виде. А когда будет налажен массовый выпуск вполне надежных и дешевых печатающих устройств, то появится и электронная газета. Толстые пачки газет уже не потребуются развозить по киоскам: вместо этого свежий номер в виде электрических сигналов будет передаваться прямо из редакции по телефонному кабелю на дом к читателю для воспроизведения на телевизионном экране или распечатки на бумаге. Существенно улучшится и расширится информационное общение через общедоступную сеть связи, которое до сих пор практически полностью ограничивается только телефоном и телетайпом. Использование техники телетекста даст возможность направлять письма из одного учреждения в другое, из одной квартиры в другую (электронная почта). По системе Телефакс на большие расстояния можно передавать копии документов или рисунков; в будущем во время разговора по телефону собеседника можно будет не только слышать, но и видеть (видеотелефон). Уже сейчас практикуется проведение так называемых телемостов и телеконференций. Тогда как участники обычных конференций съезжаются из разных мест, в большинстве случаев удаленных друг от друга на сотни километров, для участия в телеконференции можно вообще остаться в своем рабочем кабинете или же перейти в специально оборудованный зал, где все собеседники видят и слышат друг друга. Техника телетекста даст также возможность заказать проездной билет или номер в гостинице. Вместо того, например, чтобы пойти в туристическое бюро и сначала узнать, есть ли подходящие путевки, а затем заполнить бланк, собрать подписи и, оплатив путевку, отправиться в кассу предварительных заказов билетов, можно будет воспользоваться каналом телефонной связи и все перечисленные операции проделать электронным способом. И наконец, каждый абонент телефонной сети общего пользования сможет связаться с содержащей большой объем информации базой данных, например с банком данных или библиоте-

кой, и воспользоваться возможностями ЭВМ, обладающей большой вычислительной мощностью для дистанционной передачи данных. Новые виды техники связи обеспечивают индивидуальное пользование базами данных и обработку информации на ЭВМ для каждого абонента в отдельности, как если бы и базы данных, и мощные ЭВМ находились в его рабочем кабинете или на квартире. Вместо того, чтобы брать книгу из библиотеки на дом, все ее содержание или отдельные отрывки по каналу телефонной связи можно переписать в память домашнего компьютера, а затем прочитать текст на экране телевизора или перевести на бумагу с помощью печатающего устройства. Средства связи, которые мы пока рассматривали на примерах из частной жизни, еще большее значение имеют в сфере материального производства, административной деятельности и общественной жизни. Необходимая информация будет собрана и обработана буквально за считанные секунды. Это позволит быстро принять правильное решение, имея полное представление о ситуации.

Часть из рассказанного здесь о телекоммуникации уже стала реальностью, часть остается делом далекого будущего. И сейчас очень трудно со всей уверенностью сказать, какие из новых средств связи и в какой мере найдут массовое применение. Но одно ясно уже сегодня: появится единая система связи, так называемая «цифровая сеть с комплексными услугами». И все же существует принципиально важный момент, общий для новых средств связи. В настоящее время для передачи информации необходимо перемещать в пространстве не весьма малое количество энергии, как это делается при электронной передаче данных, а значительную массу вещества. При этом передача информации осуществляется путем перемещения в пространстве того материального носителя, на котором она записана. Переход на микроэлектронную технику передачи информации означает, что на смену потоку вещества и энергии приходит поток информации. Хо-

тя это сказано с преувеличением, но по существу верно. Конечно, нельзя представить себе информационный поток без энергии, как цвет без вещества. При электронной передаче информации, однако, поток энергии по сравнению с потоком информации становится настолько мал, что полностью отодвигается на второй план. Как эти принципиально новые виды технологии, еще только зарождающиеся в области телекоммуникации, так и уже реализованные на практике неразрывно связаны с предоставлением большого числа каналов передачи информации, обладающих к тому же высокой пропускной способностью. Но это лишь одна сторона дела. Ведь для того, чтобы передать информацию по каналу связи, ее сначала нужно снять с первичного носителя данных, ввести в канал, а после передачи вывести из него и выдать на экран или воспроизвести каким-либо другим способом, т. е. информацию нужно обработать. Чтобы гарантировать правильное распознавание переданной информации, требуется ее закодировать, что опять же означает дополнительную обработку. Если за единицу времени нужно передать большой объем информации, то за ту же единицу времени точно такой же объем должен быть и обработан. Итак, современные виды связи нуждаются в технике, обеспечивающей быструю обработку больших объемов информации. Единственно приемлемое решение этой проблемы предлагает микроэлектроника. Без ее помощи современные средства связи не найдут своего практического воплощения. Микроэлектроника способна поднять и передачу информации, и другие информационные процессы на значительно более высокий уровень. И это третье направление, в котором, как мы уже говорили, идет развитие микроэлектронной технологии.

Единая информационная система

Влияние этого развития в свою очередь оказывается очень широким: если микро-

электронная обработка информации становится важной составной частью всех прочих информационных процессов, то в результате стираются границы между различными информационными процессами. То же самое происходит и тогда, когда использование новых средств связи открывает возможности обмена большими объемами информации между удаленными друг от друга информационными центрами и базами данных. Это приводит к их тесному сближению, в результате чего появляется единая система, в состав которой входят также средства передачи информации. В такой единой системе процессы обработки, хранения и передачи информации вообще уже невозможно разделить друг от друга. Решение одной конкретной информационной задачи одновременно «включает» все три процесса. Происходит слияние обработки, хранения и передачи информации. В некотором роде это явление можно сравнить с созданием региональных и общегосударственных объединенных энергосистем. Интеграция трех составляющих информационного процесса, т. е. объединение трех подсистем в одну общую информационную систему, характеризует четвертое основное направление развития информационной техники, которое хорошо просматривается уже сегодня. И здесь главная роль отводится микроэлектронике.

Микроэлектроника и научно-техническая революция

Рассмотрев этот и другие частные вопросы, раскрывающие взаимоотношения между микроэлектроникой, информацией и общественным развитием, обратимся в заключение еще раз к основной теме данной главы, т. е. к определению значения микроэлектроники для существования человеческого общества, и к тому вопросу, почему именно с микроэлектронной технологией связывают такие большие надежды. Мы уже имели возможность убедиться, что для этого есть много причин. Главная из них заключается в том, что

микроэлектроника позволяет в корне революционизировать технику, а не только получить то или иное новое техническое решение. Техника, появившаяся в результате промышленной революции XVIII–XIX вв., в основном предназначалась для выполнения физической работы. Создание новой технической базы с полным правом рассматривается как главное содержание происходящей в наши дни научно-технической революции и ставится наравне с результатами промышленной революции прошлого. Подобно тому как промышленная революция извбила человека от необходимости нести бремя тяжелого физического труда, дав ему в руки инструменты и машины, позволившие почти безгранично увеличить физические возможности, так и научно-техническая революция сегодня во все большей и большей степени освобождает человека от рутинной умственной деятельности и, предоставляя в его распоряжение «умные» машины, помогает поднять его творческий потенциал на неизмеримо более высокий уровень. Техника берет на себя выполнение тех процессов обработки информации, которые раньше были прерогативой человека. Исчезают привычные и возникают новые виды деятельности со своими требованиями и особенностями. В экстремальных случаях некоторые традиционные профессии вообще могут стать ненужными. В ходе научно-технической революции эти явления неизбежно сопровождают развитие производительных сил, испытывающих влияние со стороны микроэлектронной технологии. Развитие это ведет к мощному подъему производительности общественного труда и существенному умножению общественного достояния в его материальном выражении. Но все имеет свою цену. И будет только справедливо, если все члены общества в целом и каждый в отдельности станут участвовать в умножении общего достояния. Весь ход развития производительных сил неизбежно вел к созданию микроэлектроники. Она должна была появиться, ибо общественная необходимость требовала передать часть трудоемкого умст-

венного труда машинам. Чистой случайностью было то, что в данном случае на помощь пришла микроэлектроника, основанная на использовании свойств полупроводников. Ведь решения могли основываться и на других принципах — физических, химических или биологических — главное, чтобы их можно было использовать для обработки информации

так, как того требовала общественная практика. И все же с точки зрения развития науки и техники нет никакой случайности в том, что сегодня мы имеем дело не с несколькими, а только с одной, реально существующей в нашей жизни микроэлектроникой, с такой, какая она есть. Более подробно эти вопросы мы рассмотрим в следующей главе.

3. Полупроводниковые приборы

Исторически сложилось так, что сначала в электронике использовались электроны, находящиеся в вакууме. Вспомним хотя бы об электронной лампе, где внутри стеклянной колбы, из которой удален воздух, движутся электроны. Позднее, после того как Бардин, Брэттейн и Шокли изобрели в 1948 г. транзистор, к ним добавились электроны в полупроводниковых кристаллах, «потеснив» электроны в вакууме, но не заменив их полностью. Микроэлектроника оперирует исключительно с электронами в полупроводниках.

Полупроводники

Большинство полупроводников являются твердыми телами с правильной кристаллической структурой, т.е. монокристаллами химических элементов, например кремния, германия, теллура, или химических соединений, например арсенида галлия, сульфида кадмия или теллурида свинца. Название «полупроводник» в первую очередь говорит о том, что речь идет о материалах, по своей удельной электропроводности занимающих промежуточное положение между диэлектриками [удельная электропроводность менее $10^{-10}/(\text{Ом} \cdot \text{см})$] и проводниками [удельная электропроводность более $10^2/(\text{Ом} \cdot \text{см})$]. Хотя такая характеристика довольно поверхностная, она в определенной степени все же отражает внутренние особенности полупроводников, представляющие их особую ценность для электроники. Но об этом мы еще поговорим более подробно.

Шаг, сделанный электроникой от вакуума к полупроводникам, является логичным. Если предназначение электрони-

ки состояло бы только в получении свободно движущихся электронов и раз таковые имеются также в твердых телах, то зачем же получать эти электроны, заставляя твердые тела испускать их в вакуум, как это происходит в электронной лампе? Ведь электроны можно использовать сразу в твердых телах. А твердыми телами со свободно движущимися электронами являются металлы и полупроводники. Почему же электроника пользуется только полупроводниками, а не металлами для создания своей элементной базы? Металлы и полупроводники различаются числом имеющихся в них свободных электронов. В металлах их количество очень велико: на один атом металла приходится почти по одному свободному электрону. Таким образом, их плотность составляет около 10^{22} на 1 см^3 . А вот в полупроводниках имеется сравнительно мало свободных электронов и только на каждые $10^3 - 10^{10}$ атомов приходится один свободный электрон. Следовательно, плотность их равна $10^{12} - 10^{19}$ на 1 см^3 . Как мы знаем, задача микроэлектроники заключается в формировании потоков электронов и управлении ими с помощью внешнего электрического воздействия. Вполне понятно, что при значительно меньшем числе электронов в полупроводнике по сравнению с металлами оказать такое воздействие легче. Для электронных приборов, таким образом, полупроводники подходят больше, чем металлы. Чтобы понять принципы функционирования полупроводниковых приборов, нам следует сначала более подробно разобраться в том, что происходит с потоками электронов в полупроводниковом кристалле.

Энергетические зоны

Начнем с того, что рассмотрим, какой энергией может обладать электрон в таком кристалле. Известно, что электроны свободного атома могут находиться не на любом, а только на строго определенном энергетическом уровне, как это следует из предложенной Бором модели атома и фундаментальных положений квантовой теории. В атоме между разрешенными дискретными энергетическими уровнями существуют запрещенные интервалы энергии, где не может находиться ни один электрон. Аналогичную ситуацию мы встречаем в полупроводниковом кристалле, но с тем различием, что при сближении атомов, образующих кристалл, разрешенные дискретные энергетические уровни расширяются в энергетические зоны (рис. 4). Между разрешенными энергетическими зонами – как и в атоме – имеются запрещенные зоны, не содержащие разрешенных значений энергии. Электроны кристалла должны обладать теми энергиями, которые лежат внутри энергетических зон. Однако каждая такая зона имеет лишь определенное число мест для размещения электронов. Если все места заняты, то данная энергетическая зона целиком заполняется и начинается запол-

нение следующей зоны с более высокой энергией.

Электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне – носители заряда в полупроводниках

Отличительной особенностью полупроводника является то, что одна энергетическая зона – *валентная зона* – занята почти полностью, а расположенная над ней *зона проводимости* почти полностью свободна. «Почти полностью» означает, что при наличии 10^{22} мест 10^{12} – 10^{19} мест занято или свободно. Небольшое число незаполненных мест валентной зоны – *дырок* – ведет себя как электроны с положительным электрическим зарядом. Понять это нетрудно. Подадим на полупроводник электрическое напряжение. Что же случится после этого с электронами в валентной зоне? Электрическое поле потянет их влево (рис. 5). Однако сместиться влево электроны могут только в том случае, если перед ними есть свободное место. На верхней схеме рис. 5 незанятое место находится слева от электрона, обозначенного номером 2. Этот

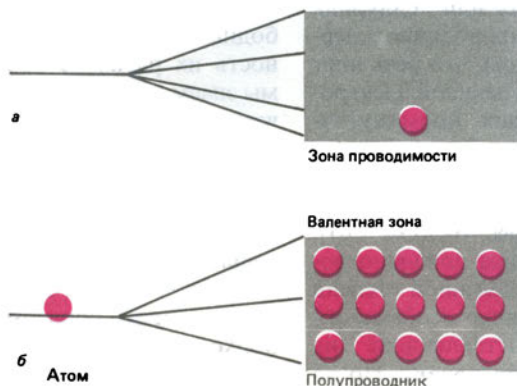


Рис. 4. Энергетические уровни атома и энергетические зоны полупроводника. Образование энергетических зон из дискретных уровней при характерном для полупроводникового кристалла близком расположении атомов.

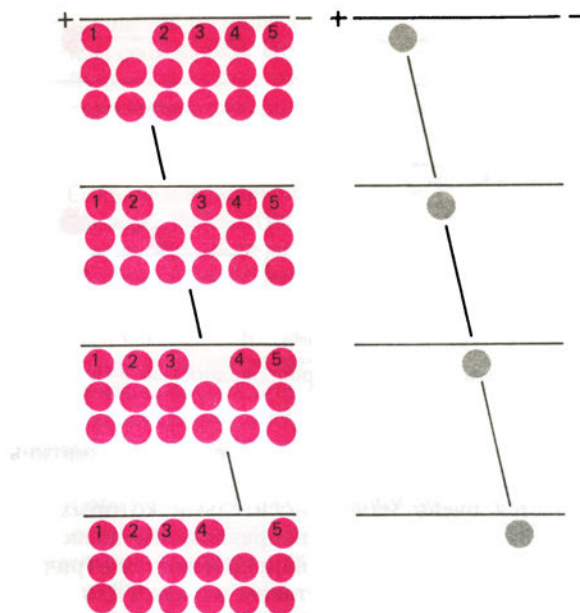


Рис. 5. Движение дырки как частицы с положительным зарядом в не полностью заполненной электронами энергетической зоне под воздействием электрического напряжения.

электрон смещается влево, оставляя вместо себя пустое место (дырку), куда теперь может переместиться следующий электрон под номером 3 и т. д. Незаполненное электроном место смещается вправо по направлению к отрицательному электроду, как двигалась бы положительно заряженная свободная частица. Таким образом, дырки в валентной зоне, как и электроны в зоне проводимости, можно рассматривать как свободные носители заряда, но только в отличие от электронов они представляют собой носители положительного заряда.

Образование двух разновидностей свободных носителей заряда — отрицательных электронов и положительных дырок — является важнейшей особенностью полупроводников. В сочетании с легкостью регулирования концентрацией носителей заряда при помощи внешнего воздействия (о чем мы будем говорить чуть ниже) она стала тем фундаментом, на котором основан принцип действия полупроводниковых приборов. Но сначала

немного задержимся на этом несколько странном свободном носителе положительного заряда — «дырке». В конечном итоге дырку можно представить как совокупность всех электронов валентной зоны за вычетом одного. Вместо движения дырки можно было бы рассматривать движение электронов валентной зоны, имеющей одно свободное место. Но в таком случае пришлось бы указать, что мы, кстати, и сделали, объясняя рис. 5, как смещается каждый из $10^{22} - 1$ электронов валентной зоны. Это сложно, и к тому же почти никогда не нужно, ибо возможности перемещения электронов надежно установлены квантовой теорией. Только электроны 1 и 2 в верхней части рис. 5 могут перемещаться, причем электрон 1 только вправо, а электрон 2 только влево. На передвижение всех остальных электронов наложен запрет. Использование понятия дырки как свободного носителя заряда в валентной зоне позволяет, таким образом, дать более удобное описание движения электронов в валентной

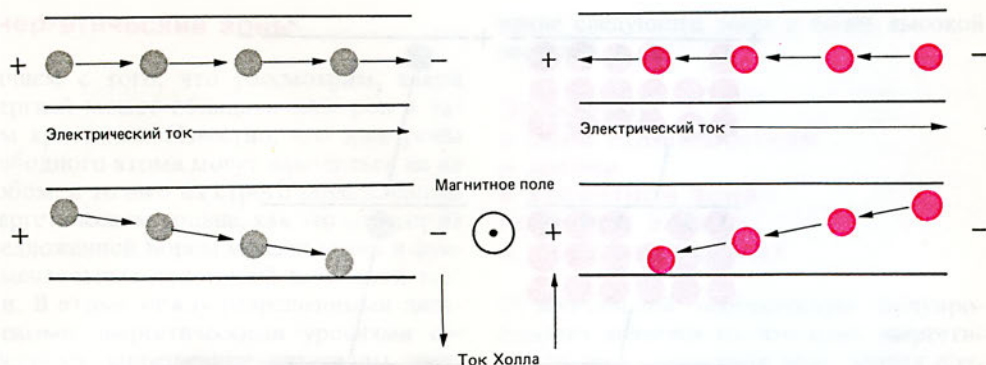


Рис. 6. Эффект Холла в полупроводнике с электропроводностью p - и n -типа.

зоне. В принципе понятие дырки применимо и к зоне проводимости. Но так как в зоне проводимости имеется очень мало электронов, то пришлось бы говорить, что она почти полностью заполнена дырками. Использовать дырки для описания зоны проводимости так же нецелесообразно, как и электроны для описания валентной зоны. Полупроводники, в которых имеются преимущественно свободные электроны, называют *электронными* или n (negative)-типа, а те, в которых преимущественно дырки — *дырочными* или p (positive)-типа. Ограничение, находящее свое отражение в слове «преимущественно», нужно по той причине, что в полупроводнике n -типа всегда есть определенное число дырок, а в полупроводнике p -типа — некоторое число электронов. Их называют *неосновными носителями заряда* в отличие от подавляющего числа носителей заряда — *основных*.

Чтобы продемонстрировать, что дырки не являются плодом чистой фантазии физиков, можно рассмотреть мысленный эксперимент, который, впрочем, легко осуществить на практике (рис. 6). Как определить, имеются ли в данном полупроводниковом образце в основном электроны или дырки? Совершенно очевидно, что сделать это невозможно, зная лишь направление тока, возникающего под влиянием приложенного электрического напряжения. Хотя под действием напряжения электроны и дырки начинают дви-

гаться в противоположных направлениях, однако из-за противоположных зарядов, носителями которых они являются, для направленного влево потока электронов направление электрического тока будет таким же, как и для направленного вправо потока дырок. Поэтому амперметр постоянного тока не обнаружит никакого различия. Оно проявится только в том случае, если поместить полупроводник в магнитное поле, направленное перпендикулярно направлению электрического тока. Магнитное поле искривляет траектории движения электронов и дырок, причем таким образом, что это искривление зависит только от направления электрического тока (эффект Холла), т.е. в полупроводниках как n -типа, так и p -типа носители заряда отклоняются в одну сторону. Однако в полупроводниках p -типа возникает ток, направленный вниз, а в полупроводниках n -типа — ток, направленный вверх (рис. 6). Каждый может, таким образом, наглядно убедиться в реальности дырок.

Легирование

До сих пор мы принимали, что без какого-либо вмешательства с нашей стороны полупроводники обладают электропроводностью p - или n -типа. Чтобы целенаправленно обеспечить электропроводность n - или p -типа, необходимо, однако, позаботиться о том, чтобы электро-

ны могли поступать *откуда-нибудь* в зону проводимости или *куда-нибудь* из валентной зоны, оставляя после себя дырки. Под словами «откуда-нибудь» и «куда-нибудь» обычно подразумеваются чужеродные примесные атомы, введенные в чистый полупроводник и имеющие на один валентный электрон больше или меньше, чем атомы полупроводника. Рассмотрим следующий пример (рис. 7). Возьмем кремний в качестве беспримесного чистого полупроводника, называемого собственным. Кремний четырехвалентен, т.е. его атом обладает четырьмя валентными электронами. Фосфор пятивалентен, и его атом обладает пятью валентными электронами. При замещении атома кремния атомом фосфора четыре из его пяти валентных электронов образуют валентные связи с четырьмя соседними атомами кремния, а пятый электрон фосфора оказывается химически слабо связанным с ядром: он легко отрывается и переходит в зону проводимости кремния. Введение атомов фосфора, или, как принято го-

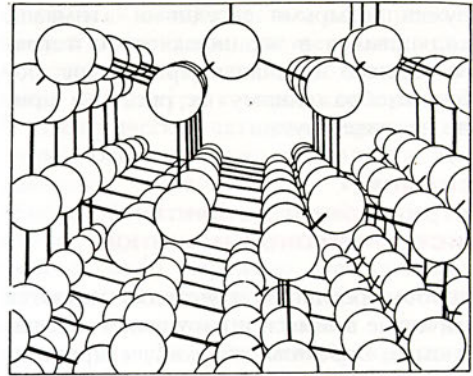


Рис. 8. Структура идеального кристалла кремния.

ворить, *легирование* фосфором, делает кремний электронным полупроводником, т.е. *n*-типа проводимости. Образующаяся концентрация свободных электронов при этом в типичных случаях почти равна или несколько меньше концентрации примесных атомов. Если же осуществить легирование кремния атомами трехвалентного бора вместо пятивалентного фосфора, то получим дырочный полупроводник, т.е. *p*-типа проводимости. Ясно, почему это происходит: для образования четырех валентных связей у атома бора не хватает одного электрона. Этот электрон он забирает из валентной зоны кремния, в которой образуется таким образом дырка. Иными словами, кремний становится дырочным полупроводником. Следовательно, легирование примесями позволяет целенаправленно формировать тип электропроводности полупроводников. Здесь мы, разумеется, сделали одно предположение, которое в действительности не соблюдается. Мы предположили, что до легирования полупроводник был беспримесным, химически чистым и обладал к тому же совершенной кристаллической структурой. На рис. 8 показан фрагмент правильной кристаллической решетки кремния. Она содержит только атомы кремния и бесконечно простирается во всех трех направлениях пространства. Каждый атом кремния является центром геометрически правильного тетраэдра и

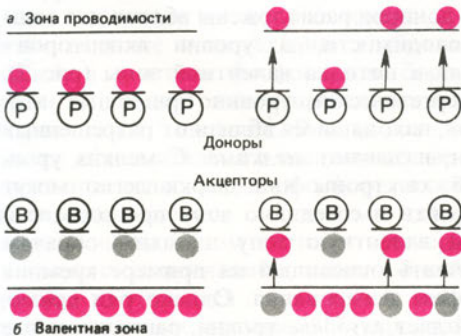


Рис. 7. а — образование электронов в зоне проводимости при введении атома пятивалентного фосфора в четырехвалентный кремний. Большинство атомов фосфора отдает свой пятый валентный электрон в зону проводимости кремния. Примесь этого типа называется донорной. б — образование дырок в валентной зоне при введении атома трехвалентного бора в четырехвалентный кремний. Большинство атомов бора захватывает свободные валентные электроны из валентной зоны кремния. В результате в валентной зоне образуются дырки. Примесь этого типа называют акцепторной.

окружен четырьмя соседними атомами, находящимися в вершинах этого тетраэдра. Однако идеальных кристаллов, подобно изображенному на рис. 8, в природе не существует.

Примеси и структурные дефекты кристаллической решетки

В любом реальном кристалле имеются химические примеси и нарушения, так называемые *дефекты структуры* кристаллической решетки. Кроме того, каждый кристалл имеет определенный объем, ограниченный в пространстве. В кристаллических стержнях кремния, которые используются в качестве исходного сырья для изделий микроэлектроники, содержатся различные посторонние примеси, в частности углерод, кислород, железо, медь, а также атомы тяжелых металлов. Химические примеси являются причиной появления точечных дефектов структуры. Точечными дефектами структуры являются, например, *вакансии*. Вакансия возникает в том случае, если в идеальной кристаллической решетке остается свободным, т. е. вакантным, одно место, которое должно быть занято атомом. Кроме точечных дефектов структуры встречаются также линейные и плоскостные. Дислокационной линией называется дефект решетки, характеризующий тем, что кристаллографическая плоскость, которая должна быть полностью занята атомами, вдруг обрывается в некотором направлении. Сама поверхность полупроводника тоже является плоскостным дефектом кристалла, который в идеале бесконечен в пространстве. Каждый реальный кристалл имеет большое число подобных точечных, линейных и плоскостных дефектов структуры, что и отличает его от идеального. Даже если число таких дефектов по сравнению с огромным количеством структурно правильно расположенных в решетке атомов исчезающе мало (в противном случае речь вообще не может идти о кристалле, в том числе и о дефектном), эти отклонения от идеаль-

ности оказывают большое влияние на свойства полупроводников.

Мелкие и глубокие уровни

В той степени, в какой это касается электрических свойств, такое влияние прежде всего приводит к образованию разрешенных энергетических уровней между валентной зоной и зоной проводимости. В идеальном кристалле этот энергетический интервал для электронов запрещен. Однако в кристалле с дефектами решетки в запрещенном интервале энергий существуют разрешенные энергетические состояния. В отличие от энергетических зон электроны или дырки в этих состояниях не свободны: они связаны с дефектом. Поэтому говорят о локализованных состояниях, с определенным типом которых мы познакомились на примере введения атомов легирующих примесей. Ведь и примесные атомы являются дефектами и поэтому связаны с локальными энергетическими уровнями, лежащими в пределах запрещенной зоны. Их особенность заключается в том, что уровни доноров расположены вблизи дна зоны проводимости, а уровни акцепторов — вблизи потолка валентной зоны (рис. 7). Энергетические уровни примесных атомов, находящиеся вблизи от разрешенных зон, называют *мелкими*. С мелкими уровнями электроны или дырки легко могут перейти в соседнюю зону проводимости или валентную зону и таким образом вызвать описанный на примере кремния эффект легирования. Однако ряд примесей дает *глубокие* уровни, расположенные вблизи середины запрещенной зоны и сравнительно далеко от обеих разрешенных зон. Почти все перечисленные выше дефекты ведут к появлению глубоких уровней. Из-за слишком большого удаления от энергетических зон они не вносят вклад в эффект легирования, т. е. не приводят к увеличению числа носителей заряда в разрешенных зонах, и являются, таким образом, электрически неактивными. Во многих случаях они даже препятствуют увеличению числа подвижных

электронов или дырок. Пусть, например, в кубическом сантиметре кристалла кремния имеется 10^{16} дефектов (химические примеси или структурные нарушения кристаллической решетки). Пусть с каждым дефектом связан один глубокий уровень, где имеется свободное место для дополнительного электрона. Если мы попробуем теперь путем введения 10^{16} атомов фосфора в один кубический сантиметр кристалла кремния сделать последний полупроводником *n*-типа, то испытанием разочарование. Атомы фосфора будут отдавать свой пятый электрон не в зону проводимости, а преимущественно глубоким уровням. Здесь электроны закреплены и в электропроводности принять участия не могут. Таким образом, при определенных условиях химические примеси и дефекты решетки оказывают существенное влияние на легируемость (а точнее — на электропроводность) кристалла кремния даже тогда, когда их концентрация составляет всего 10^{16} на 1 см^3 . Если общее число атомов в 1 см^3 равно 10^{22} , то их доля составляет всего лишь 0,0001%. Но ведь может быть и так, что в исходном материале имеются не только дефекты, ведущие к появлению глубоких уровней, а и атомы фосфора или бора, причем в концентрации, превышающей или равной 10^{16} на 1 см^3 . В этом случае влияние дополнительно и специально введенных примесных атомов фосфора также существенно меняется. То, что мы здесь рассмотрели на одном частном примере и в связи с легированием, носит общий характер и относится не только к введению примесных атомов. Полупроводниковые материалы должны отвечать самым высоким требованиям с точки зрения химической чистоты и совершенства кристаллической структуры. Необходимо овладеть методами введения мельчайших количеств примесей. В химии материал, содержащий 0,001% примесей, уже считается высокочистым. Для полупроводниковой техники требуются в 100 и 1000 раз более чистые материалы. «Чистый, как полупроводник» — это выражение стало воплощением почти идеальной чистоты

материала. К самым чистым полупроводниковым материалам, полученным до сих пор, относится германий, в одном кубическом сантиметре которого содержится 10^9 электрически активных примесных атомов. Освоена также технология выращивания совершенных кристаллов кремния, обладающих высокой степенью чистоты. Кроме того, у кремния относительно слабо выражено электрическое влияние таких неизбежных дефектов, как наличие поверхности, точнее говоря, границы раздела с двуокисью кремния. Это лишь некоторые из причин той широкой популярности, какой пользуется кремний в микроэлектронике. Другие мы рассмотрим в гл. 5, посвященной технологии изготовления изделий микроэлектроники. Встречающиеся в природе кристаллы даже приблизительно не имеют той химической чистоты и совершенства кристаллической структуры, которые требуются для полупроводников. Практически ни один из встречающихся в природе полупроводниковых кристаллов не легируется; лишь немногие из них вообще являются полупроводящими, к примеру галенит или некоторые природные алмазы. Таким образом, полупроводниковые кристаллы поистине являются делом рук человека. Их получение связано с большими затратами сил и средств. Но к этому мы еще вернемся в гл. 5 при обсуждении технологии изготовления изделий микроэлектроники.

Генерация неравновесных носителей заряда

Несколько раньше мы уже выяснили, что для электронной обработки информации необходимо сформировать потоки электронов и управлять ими с помощью внешнего электрического воздействия. Так как же конкретно осуществляется такое воздействие в полупроводнике? Оно основано на возможности создания заметного числа *дополнительных* (избыточных по отношению к электронам и дыркам, уже имеющимся в полупроводнике при обыч-

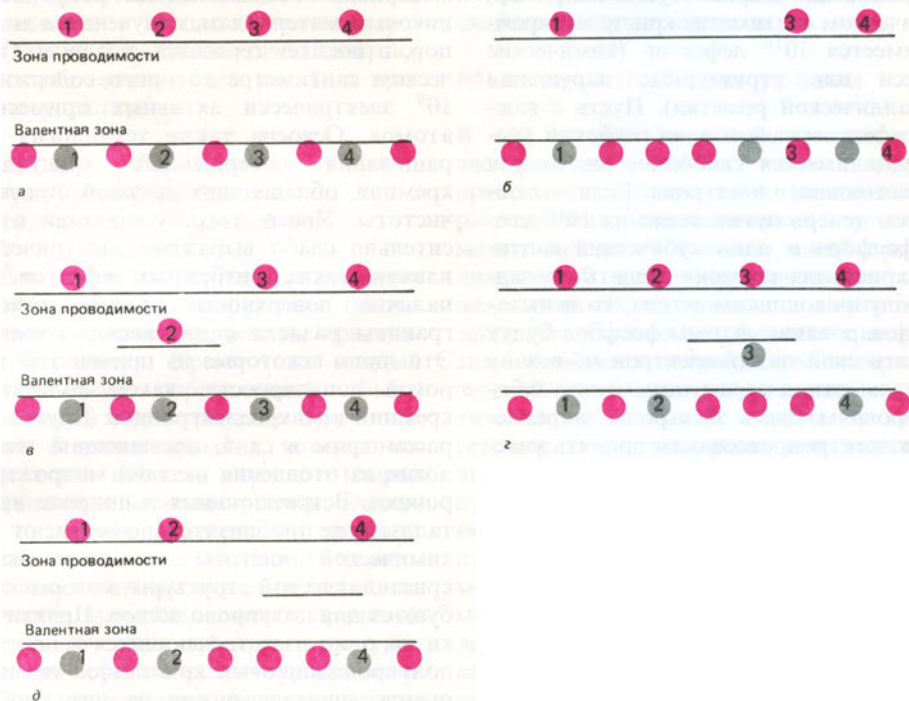


Рис. 9. Процессы, ведущие к уничтожению избыточных (неравновесных) носителей заряда. *а* – электроны в зоне проводимости и неравновесные дырки в валентной зоне. *б* – рекомбинация: дырка 2 захватывает электрон 2. Освобождаемая при этом энергия может превращаться в энергию тепловых колебаний решетки кристалла или выделяться в виде кванта излучения. *в* – захват электрона глубоким уровнем: свободный электрон 2 зоны проводимости исчезает, а число дырок не изменяется. *г* – захват дырки глубоким уровнем: свободная дырка 3 валентной зоны исчезает, но число электронов не изменяется. *д* – рекомбинация через глубокий уровень: один и тот же глубокий уровень захватывает электрон 3 и дырку 3.

ных условиях) свободных носителей заряда. Их называют обычно неравновесными носителями заряда. Рассмотрим генерацию неравновесных носителей заряда сначала на простом примере. Если воздействовать светом определенной длины волны на полупроводник, то электрон, поглотив один фотон, будет возбужден из валентной зоны в зону проводимости, а в валентной зоне останется одна дырка. В результате возникнут избыточные электроны и дырки (рис. 9,а). Электропроводность полупроводника увеличивается, но лишь на короткое время, так как продолжительность жизни неравновесных носителей заряда ограничена. Она определяется происхо-

дящими в полупроводнике процессами, которые не затухают до тех пор, пока число электронов и дырок не будет соответствовать нормальному состоянию – так называемому состоянию термодинамического равновесия. Некоторые из этих процессов показаны на рис. 9. Электроны, к примеру, могут обратно вернуться в состояние валентной зоны, где находится дырка (рис. 9,б). В этом случае говорят о рекомбинации электронно-дырочной пары.

Рекомбинация носителей заряда

Электрон или дырка могут также быть захвачены глубоким уровнем и остаться

на нем (рис. 9, в и г). Если тот же самый глубокий уровень последовательно захватывает электрон и дырку, результат будет тот же, что и при рекомбинации: электронно-дырочная пара исчезнет (рис. 9, д). Нередко именно этот процесс, т.е. рекомбинация через глубокие уровни, ограничивает время жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Для увеличения времени жизни необходимо уменьшить число глубоких уровней, т.е. полупроводник должен быть химически чистым и иметь совершенную кристаллическую структуру. Именно от этого зависит не только хорошая легируемость, о чем мы говорили выше, но и время жизни неравновесных носителей заряда. Однако со временем даже в самом лучшем полупроводнике исчезают однажды появившиеся неравновесные носители заряда. Если не освещать продолжительное время полупроводник и не генерировать таким образом все новые электронно-дырочные пары, то электропроводность не будет претерпевать длительных изменений. Она будет снижаться до величины темновой проводимости.

p-n-переход.

Полупроводниковый диод

Описанная генерация неравновесных носителей заряда под воздействием света, однако, не используется в микроэлектронике. Мы коротко рассмотрели ее как пример самого простого механизма образования неравновесных носителей заряда. Для микроэлектроники значение имеет другой механизм, о котором речь пойдет ниже. Получить дополнительные электроны в полупроводнике *p*-типа, в котором изначально имеется много дырок, но мало электронов, можно путем установления контакта с полупроводником *n*-типа, имеющим большое число электронов. В этом случае говорят о *p-n-переходе*. Из полупроводника *n*-типа электроны *диффундируют* в полупроводник *p*-типа, т.е. проникают в него вследствие своего теплового движения, подобно тому, как это делают молекулы газа, проникая в эва-

куированный сосуд¹⁾, если на их пути нет никаких препятствий. Полупроводник *p*-типа является вакуумом для электронов полупроводника *n*-типа. В отличие от молекул газа, однако, время жизни электронов в полупроводнике *p*-типа невелико. Они рекомбинируют с дырками полупроводника *p*-типа. Число свободных электронов становится тем меньше, чем более длительное время находятся они в полупроводнике *p*-типа, в частности, чем больше они удаляются от полупроводника *n*-типа. Диффундируя в соседнюю область, электроны оставляют в полупроводнике *n*-типа вблизи границы с полупроводником *p*-типа слой, обедненный свободными носителями заряда, который заряжается положительно. Этот обедненный слой называют также *областью объемного заряда*. Во избежание недоразумений заметим, что положительный объемный заряд в обедненном слое не является результатом наличия дырок как носителей положительного заряда (дырок в *n*-области *p-n*-перехода практически вообще нет); это «дело рук» неподвижных примесных ионов-доноров, покинутых электронами. С образованием объемного заряда в обедненной зоне все больше и больше затрудняется диффузия других электронов из полупроводника *n*-типа, пока, наконец, не будет переходить столько электронов, сколько требуется для поддержания уже имеющегося объемного заряда и компенсации эффекта рекомбинации. Все сказанное в отношении диффузии электронов полупроводника *n*-типа в полупроводник *p*-типа относится и к дыркам полупроводника *p*-типа. Они также диффундируют «в соседний вакуум», т.е. в *n*-область, частично рекомбинируют, а образующийся в *p*-области отрицательный объемный заряд все больше препятствует их дальнейшему переходу в полупроводник *n*-типа. Итак, на *p-n*-переходе одновременно протекают довольно сложные процессы диффузии, рекомбина-

¹⁾ Эвакуированным называется сосуд, в котором поддерживается низкое давление газа, в пределе — вакуум. — *Прим. ред.*

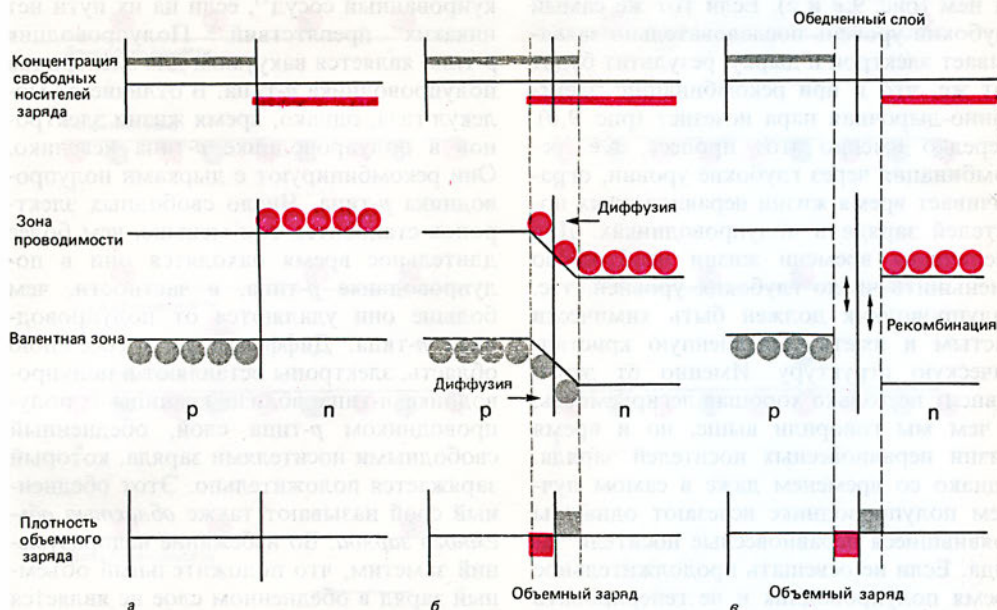


Рис. 10. Установление равновесного состояния на *p-n*-переходе. *а* – возникновение контакта между *n*- и *p*-областями; *б* – диффузия электронов в *p*-область, а дырок в *n*-область с образованием области положительного объемного заряда в *n*-области и отрицательного в *p*-области; *в* – рекомбинация электронов и дырок в области объемного заряда; возникновение в результате рекомбинации слоя, обедненного подвижными носителями заряда, и достижение равновесия.

ции и образования объемного заряда. Равновесное состояние, устанавливающееся в том случае, когда все три фактора являются сбалансированными, показано на рис. 10.

Инжекция носителей заряда

А что произойдет, если это равновесие нарушить, приложив к *p-n*-переходу внешнее напряжение? Ясно, что через переход начнет протекать ток. Но каким образом это будет происходить? Довольно странно! В *p*-области – далеко от области объемного заряда – ток будет в основном дырочным. Если к *p*-слою приложить положительное внешнее напряжение, то дырки потекут направо в область объемного заряда и оттуда будут диффундировать дальше в *n*-область (рис. 11). В таком случае говорят об *инжекции носителей заряда*. В *n*-области дырки встречаются с большим числом имею-

щихся электронов и рекомбинируют там. Из глубины *n*-области должно подойти пополнение, чтобы компенсировать дефицит электронов, вызванный рекомбинацией. В течение одной секунды в область рекомбинации поступает столько дырок и электронов, сколько рекомбинирует там за то же время. Все сказанное о дырках, поступивших из *p*-области в *n*-область, справедливо в отношении электронов, перешедших из *n*-области в *p*-область. Они рекомбинируют с дырками в *p*-области. В итоге устанавливается результирующий ток, являющийся током рекомбинации, поскольку сила тока определяется скоростью рекомбинации электронов и дырок. Рекомбинация протекает сравнительно быстро, так как для этого не требуется энергия; наоборот, энергия может быть даже отдана. Поэтому ток рекомбинации является относительно сильным. Здесь мы имеем дело со смещением потоков носителей заряда через *p-n*-переход в

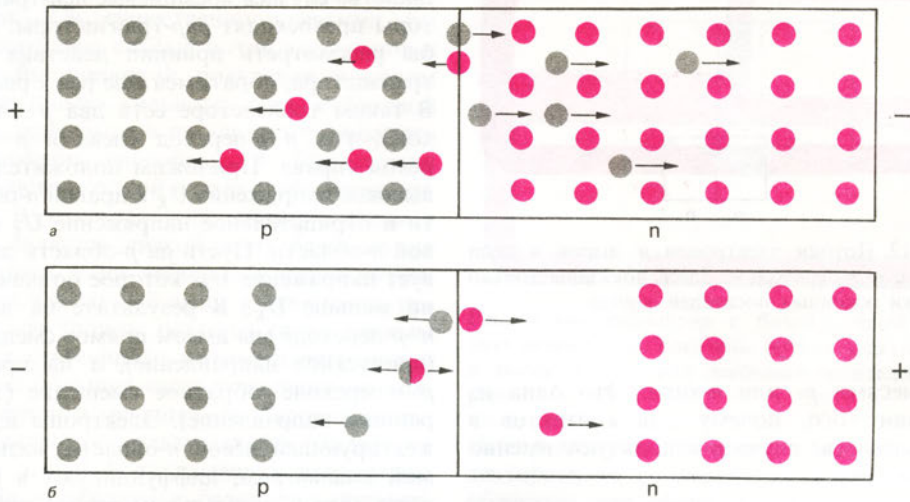


Рис. 11. *а* – движение носителей заряда через p – n –переход в пропускном направлении. Дырки, проникающие из p –области в n –область, и электроны, проникающие из n –области в p –область, рекомбинируют. Ток, обусловленный движением основных носителей заряда, называется током рекомбинации. *б* – движение носителей заряда через p – n –переход в запирающем направлении. Дырки, перемещающиеся в p –области влево, и электроны, перемещающиеся в n –области вправо, должны поступать из области объемного заряда. Этот ток также обусловлен движением основных носителей заряда и называется током термогенерации.

прямом, пропускном направлении. По-иному обстоит дело, если к p –слою приложено внешнее отрицательное напряжение. В этом случае дырки в p –области движутся налево, а электроны в n –области – направо (рис. 11). За одну секунду налево может пройти столько дырок, а направо столько электронов, сколько за это же время их генерируется на p – n –переходе. Ток, обусловленный процессом генерации электронно-дырочных пар в переходе, называют током термогенерации. Генерация протекает сравнительно медленно, так как для нее требуется энергия. Поэтому ток термогенерации относительно слабый. В этом случае говорят о смещении потоков носителей заряда через p – n –переход в обратном, запирающем направлении. Итак, *переход* действует как выпрямитель. Поэтому его и называют *полупроводниковым выпрямителем* или полупроводниковым диодом. На рис. 12 схематически показано, как поток носи-

телей заряда течет по цепи тока с таким полупроводниковым диодом: в одной области он осуществляется электронами, в другой – дырками. В металлических проводниках, соединяющих диод с источником напряжения, ток, естественно, переносится электронами. В обоих местах контакта между металлическими проводниками и обеими областями полупроводника также возникают объемные заряды. В зависимости от вида металла и материала полупроводника здесь появляется область, обедненная носителями заряда, как это имеет место при p – n –переходе, или обогащенная ими. При обогащении контакт характеризуется хорошей, а при обеднении – плохой электропроводностью. В микроэлектронике интерес представляет обладающий хорошей электропроводностью так называемый «омический» контакт полупроводника с металлом. Такой контакт дает комбинация алюминия с кремнием, сильно легированным

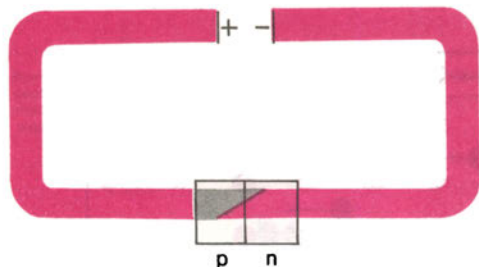


Рис. 12. Потоки электронов и дырок в цепи тока с p - n -переходом. Здесь показаны только потоки основных носителей заряда.

примесями p - или n -типа. Это одна из причин того, почему для контактов в большинстве случаев используют именно алюминий.

Биполярный транзистор

Принцип работы *биполярного транзистора* можно объяснить, опираясь на те же явления, которые мы наблюдали в pn -выпрямителе. У pnp -транзистора одна n -область находится в контакте с p -областью, а та в свою очередь контактирует со второй n -областью (рис. 13). Главным здесь, как мы сейчас увидим, является то, что средняя p -область очень узка и относительно слабо легирована. pnp -транзистор получается заменой в pnp -транзисторе p - и n - областей. На практике применяются транзисторы обоих видов; функции их схожи, но в pnp -транзисторе носителями заряда в основном являются дырки, а в pnp -транзисторе – электроны. Так как в кремнии электроны обладают большей

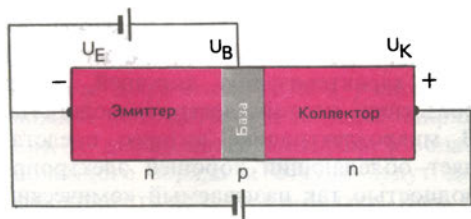


Рис. 13. pnp -транзистор с эмиттером, общим для двух цепей.

подвижностью, чем дырки, то в большинстве случаев кремниевые pnp -транзисторы превосходят pnp -транзисторы. Чтобы рассмотреть принцип действия pnp -транзистора, обратимся еще раз к рис. 13. В таком транзисторе есть два p - n -перехода, т.е. n - p -переход слева и p - n -переход справа. Приложим положительное высокое напряжение U_K к правой n -области и отрицательное напряжение U_E к левой n -области. Пусть на p -область действует напряжение U_B , которое больше U_E , но меньше U_K . В результате на левом n - p -переходе мы имеем прямое смещение (пропускное направление), а на правом p - n -переходе – обратное смещение (запирающее направление). Электроны из инжектирующей левой n -области, называемой *эмиттером*, диффундируют в p -область, где в нормальном случае они бы рекомбинировали, если бы p -область, т.е. так называемая *база*, не была настолько узкой, что электроны успевают проскочить через нее не рекомбинируя. Таким образом удастся добиться того, чтобы электроны попали в правую n -область и там поступали на электрод. Поэтому правую n -область называют *коллектором*. Он собирает инжектированные из левой n -области – эмиттера – электроны. Различные роли обеих n -областей, которые без приложенного к ним напряжения совершенно равноправны, конечно же, являются следствием того, что к правой n -области приложено положительное напряжение, а к левой – отрицательное. Соединим теперь базу через источник напряжения и проводник с эмиттером, как это показано на рис. 13. Мы получим две цепи тока – базовую и коллекторную. В базовой цепи в ток вносят вклад лишь те электроны, которые, как мы видели в случае с прямым смещенным переходом (в пропускном направлении), рекомбинируют в p -области. Но из-за узости p -области их очень мало. Следовательно, выходящий из базы поток электронов очень невелик. Большая часть тока, поступающего с эмиттера, течет через коллектор (рис. 14). Однако мы знаем, что в ток через p - n -переход вносят вклад не только электроны, но и дырки. В

нашем конкретном случае это означает, что из базы в эмиттер поступает поток дырок. Он существенно превышает бы сравнительно слабый поток электронов и стал бы причиной появления в целом относительно сильного тока в базовой цепи, если бы его не удалось уменьшить каким-либо способом. В биполярном транзисторе с этой целью слабо легируют базу. В результате концентрация дырок в базе является низкой и из базы может поступить лишь небольшой поток дырок. Вывод, сделанный выше в отношении потоков электронов, остается справедливым и для суммарного потока электронов и дырок: большая часть тока течет по коллекторной и меньшая – по базовой цепи.

Какую же пользу можно извлечь из всего этого? Если изменить напряжение между эмиттером и базой при постоянном напряжении между базой и коллектором, то изменится ток, идущий от эмиттера. Это изменение в большей мере затронет коллекторную цепь и в меньшей – базовую. Таким образом, путем небольшого изменения тока в базовой цепи можно получить значительное изменение тока в коллекторной цепи. В данном случае транзистор работает как усилитель тока. Но так как сопротивление базовой цепи значительно меньше (прямосмещенный p - n -переход) сопротивления коллекторной цепи (обратносмещенный p - n -переход), то и потребляемая в базовой цепи электрическая мощность значительно меньше, чем в коллекторной. В итоге с помощью небольшой электрической мощности в базовой цепи можно управлять величиной мощности в коллекторной цепи. Ту же функцию в вакуумной электронике выполняют трехэлектродные электронные лампы. Эмиттер транзистора соответствует катоду электронной лампы, коллектор – аноду и база – сетке.

Схема включения транзистора, показанная на рис. 13, где эмиттер соединен с базой и коллектором, а база и коллектор – соответственно только с эмиттером, называется схемой с общим эмиттером. Она является одной из трех возможных схем включения транзистора. Если тран-

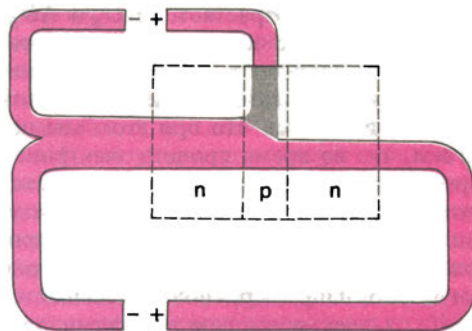


Рис. 14. $n-p-n$ -транзистор с базой, общей для двух цепей. Здесь показаны потоки электронов и дырок, т.е. потоки основных носителей заряда.

зистор включен по схеме с общим коллектором, то коллектор является общей областью для обеих цепей тока, а при включении по схеме с общей базой такой областью становится база. В микроэлектронике применяются также транзисторы, обладающие двумя и более изолированными друг от друга эмиттерными областями. В результате появляются разнообразные варианты схем включения. Существует также возможность получения транзисторов с несколькими коллекторами.

С помощью транзисторов можно осуществлять увеличение или преобразование электрической мощности. В микроэлектронике транзисторы являются прежде всего усилительными приборами с различными принципами усиления сигналов электрической природы и используются в ключевых схемах. Важной характеристикой такого транзисторного ключа является время, необходимое для одного переключения из положения «включено» в положение «выключено» или наоборот, короче говоря, время задержки. Чтобы получить представление о величине времени задержки биполярного транзистора, рассмотрим следующий пример. Пусть к эмиттеру, базе и коллектору $n-p-n$ -транзистора приложены определенные электрические напряжения U_E , U_B и U_K . В коллекторной цепи появится ток определенной силы. Если напряжение, прило-

женное к базе, возрастает до $U_B + \Delta U_B$, то сопротивление как левого n - p -перехода, так и правого p - n -перехода уменьшается и в результате ток в коллекторной цепи увеличивается. Но при этом мы полагаем, что во время пролета электронов через базу напряжение на ней остается неизменным и равным $U_B + \Delta U_B$. Ситуация изменяется, если за это время приложенное к базе напряжение меняется. Когда оно, например, снова уменьшается до U_B , а электроны еще не успели проскочить через базу, то вызванное ΔU_B возрастание тока в коллекторной цепи не так велико, как при неизменном напряжении $U_B + \Delta U_B$. Отсюда можно сделать вывод о том, что эффективность переключения транзистора падает, если команды на переключение в форме более высоких или низких напряжений поступают на базу с интервалами, которые меньше времени, затрачиваемого электронами на пролет через базу. Время задержки T транзистора представляет собой, таким образом, время, необходимое для пролета электронов через базу. Поэтому становится ясно: чем тоньше база, тем меньше время задержки. Делается понятным и стремление сделать как можно тоньше прежде всего базу. Тем самым мы также доказали высказанное в гл. 2 утверждение, что с уменьшением размеров полупроводниковых электронных элементов их быстродействие возрастает. Ориентировочно время пролета T сквозь базу инжектированных эмиттером носителей заряда легко определить, зная коэффициент диффузии электронов D и ширину базы b . В общем случае справедливо выражение $T \approx b^2/D$. Если для кремния ширину базы принять равной 0,7 мкм и коэффициент диффузии электронов 50 см²/с, то время задержки для n - p -транзистора составит $T \approx 10^{-10}$ с. Коэффициент диффузии менее подвижных по сравнению с электронами дырок в кремнии почти в 3 раза меньше. Поэтому и время задержки p - n -транзистора в 3 раза больше, чем у n - p -транзистора. Еще более высокой подвижностью по сравнению с электронами кремния обладают электро-

ны арсенида галлия (GaAs). Поэтому из арсенида галлия n -типа можно изготавливать сверхбыстродействующие pnp -транзисторы.

Итак, теперь мы в состоянии рассчитать требуемую энергию для выполнения одной операции переключения в pnp -транзисторе. Необходимое на одно переключение время T следует умножить на израсходованную при этом электрическую мощность P . В биполярном транзисторе преобразование электрической мощности осуществляется в базовой цепи. Вообще мощность равна произведению напряжения на силу тока. В нашем конкретном примере сила тока зависит от величины транзистора. Чем меньше транзистор, тем слабее возникающие в нем токи. В интегральных микросхемах транзисторы размещаются на площади 1000 мкм² и менее. Сила тока в базовой цепи составляет всего несколько микроампер, а напряжение — около 1 В. Следовательно, мощность, необходимая для переключения, равна произведению одного вольта на несколько микроампер, т.е. несколькими микроваттам. При $P = 10^{-5}$ Вт и $T = 10^{-10}$ с получаем энергию переключения, равную $10^{-5} \times 10^{-10}$ Вт·с = 10^{-15} Дж. Это очень малая энергия, которая, однако, не имеет ничего общего с действительным энергопотреблением транзистора. Энергозатраты в коллекторной цепи гораздо выше.

Полевой транзистор. МОП-транзистор

По сравнению с биполярным транзистором, о котором мы говорили выше, принцип работы *полевого транзистора* проще. В настоящее время оба типа транзисторов находят применения в интегральных микросхемах. Полевые транзисторы при этом встречаются даже чаще, чем биполярные, в частности в микросхемах с высокой степенью интеграции и в интегральных схемах памяти. Изобретение полевого транзистора представляет интерес и с точки зрения истории науки. Его изобрели по меньшей мере трижды. В 1928 г.

Лилиенфельд, а в 1930 г. Хейл описали, но не реализовали на практике полевой транзистор. В 1947 г. Шокли изготовил полевой транзистор, который, однако, работал совершенно неудовлетворительно. В поисках причин неудачи и путей их устранения Бардин и Брэттейн в 1948 г. изобрели точечный транзистор. Сразу после этого Шокли создал биполярный транзистор, принцип работы которого, рассмотренный нами выше, основан на использовании $p-n$ -переходов. Но полевой транзистор, получить который хотел Шокли, появился лишь в 60-е годы, когда с помощью усовершенствованных методов выращивания кристаллов удалось обеспечить гораздо более совершенную структуру кристалла кремния, а создание планарной технологии дало возможность сформировать нужную внутреннюю структуру транзистора.

Принципиальная структура полевого транзистора показана на рис. 15. Полупроводниковая подложка p - или n -типа (в дальнейшем мы будем рассматривать полупроводники только n -типа) с одной стороны покрыта диэлектриком и помещена между двумя металлическими электродами. Если к верхнему электроду приложено положительное внешнее напряжение, то электроны вытягиваются в полупроводник, или, как говорят, здесь *индуцируются* носители заряда. Если число индуцированных электронов сравнимо с числом свободных электронов, имевшихся в полупроводнике до того, как электрическое напряжение было приложено, то в итоге сопротивление существенно изменится.

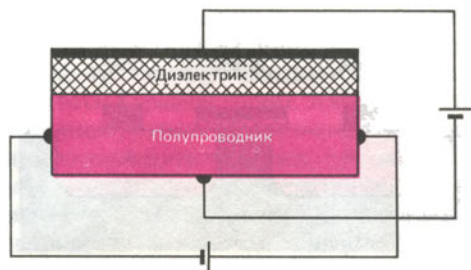


Рис. 15. Принципиальная схема полевого транзистора.

Ток в верхней цепи на рис. 15 практически равен нулю, а значит, равна нулю и затраченная в этой цепи электрическая мощность, тогда как в нижней цепи идет более сильный ток и здесь можно преобразовать большую электрическую мощность. Таким образом, перед нами снова открывается возможность с помощью меньшей электрической мощности регулировать существенно большую, т. е. осуществлять усиление или переключение электрическим путем. Сам принцип настолько прост, насколько сложна его практическая реализация. Коротко остановимся на двух моментах. Приложить положительное напряжение означает подать на поверхность диэлектрика положительный электрический заряд, причем чем больше заряд, тем выше напряжение. Если от каждого атома первого слоя атомов диэлектрика мы заберем один электрон (т. е. добавим положительный элементарный заряд), то получим электрическое поле, напряженность которого будет примерно соответствовать напряженности электрического поля в атоме, т. е. около 10^8 В/см. При расстоянии между атомами в поверхностном слое $3 \cdot 10^{-8}$ см потребуется убрать около 10^{15} электронов с одного квадратного сантиметра. Точно такое же число электронов индуцируется в полупроводнике. Представим себе полупроводниковую пластинку толщиной 1 мкм; под поверхностью площадью 1 см² даже без приложенного напряжения здесь уже имеется около 10^{15} электронов, если концентрация носителей заряда составляет 10^{16} см⁻³, что типично для полупроводников. Чтобы обеспечить индуцирование по крайней мере такого числа электронов, которое равно числу уже имеющихся в полупроводнике свободных электронов, пришлось бы приложить огромное напряжение, равное 10^6 В. И даже если бы это удалось сделать, результат не оправдал бы ожиданий: большинство индуцированных электронов было бы захвачено упомянутыми ранее примесными уровнями, которых очень много как раз на поверхности, а потому лишь малое число электронов остались бы свободными и спо-

собствовали изменению сопротивления. Итак, этим путем получить реальный полевой транзистор вряд ли возможно. Поэтому на практике его конструкция выглядит несколько иначе. Это видно из схематического разреза на рис. 16. Характерным признаком здесь является наличие двух расположенных зеркально по отношению друг к другу p - n -переходов. Если между левой и правой n -областями приложить напряжение, то независимо от полярности один из p - n -переходов смещается в обратном направлении и в выходной цепи будет протекать очень малый ток обратносмещенного перехода. Транзистор заперт. Сделать его токопроводящим можно с помощью третьего электрода, так называемого затвора. Металлический электрод-затвор отделен от подложки тонким слоем диэлектрика; он располагается между двумя n -областями над p -областью и служит для индуцирования электронов, о чем мы уже говорили, рассматривая принципиальную структуру полевого транзистора на рис. 15. Только теперь эти электроны индуцируются в полупроводник p -типа, который, кроме того, имеет обедненную дырками область объемного заряда. Теперь можно было бы ожидать гораздо большей эффективности и от индуцированных электронов. Однако и в этом случае первые индуцированные электроны не участвуют в переносе заряда: они рекомбинируют с дырками в p -области, которые еще имеются между обеими p - n -областями. Когда все дырки исчезают, дальнейшее индуцирование приводит к избытку электронов в p -области у границы с диэлектриком. Здесь образуется тонкий канал с электронной электропроводностью, соединяющий обе n -области слева и справа. По этому каналу электроны могут беспрепятственно перетекать из левой n -области в правую, если к правой приложено положительное напряжение. Левую n -область называют *истоком*, а правую – *стоком*. Наличие области, обладающей электронной электропроводностью, в полупроводниковой подложке p -типа на первый взгляд удивительно, но это легко можно понять;

дырочной электропроводностью полупроводник обладает только в состоянии термодинамического равновесия, т.е. без воздействия внешнего электрического поля. Если же, как это происходит в случае с затвором, в полупроводниковой подложке p -типа образуется достаточно сильное поле, то энергетические зоны опускаются и концентрация носителей заряда в них изменяется. Дырки в валентной зоне полностью заполняются электронами, и зона проводимости также частично насыщается электронами. Этот процесс называется *инверсией*, а n -канал в полупроводнике p -типа – инверсионным слоем. Напряжение на затворе, при котором образуется инверсионный слой, называется *пороговым напряжением*. В случае превышения порогового напряжения запертый транзистор становится электропроводным. Конструкция кремниевого транзистора, используемого в микроэлектронике, показана на рис. 16. Диэлектриком под полупроводниковой подложкой p -типа является двуокись кремния. Поэтому и говорят о полевых транзисторах со структурой металл – оксид – полупроводник (сокращенно МОП-транзисторы). Кроме МОП-транзисторов с индуцированным каналом полевые транзисторы могут выполняться с встроенным каналом в виде тонкого приповерхностного запирающего слоя. Однако в кремниевой микроэлектронике МОП-транзисторы с встроенным каналом играют лишь второстепенную роль, и мы не будем останавливаться на них более подробно.

Конструкция описанного выше МОП-транзистора с индуцированным каналом,

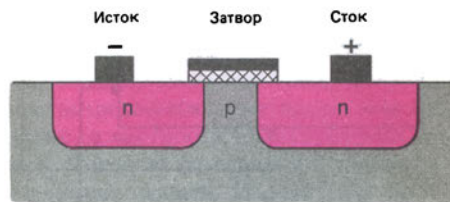


Рис. 16. Конструкция полевого транзистора, используемого в микроэлектронике.

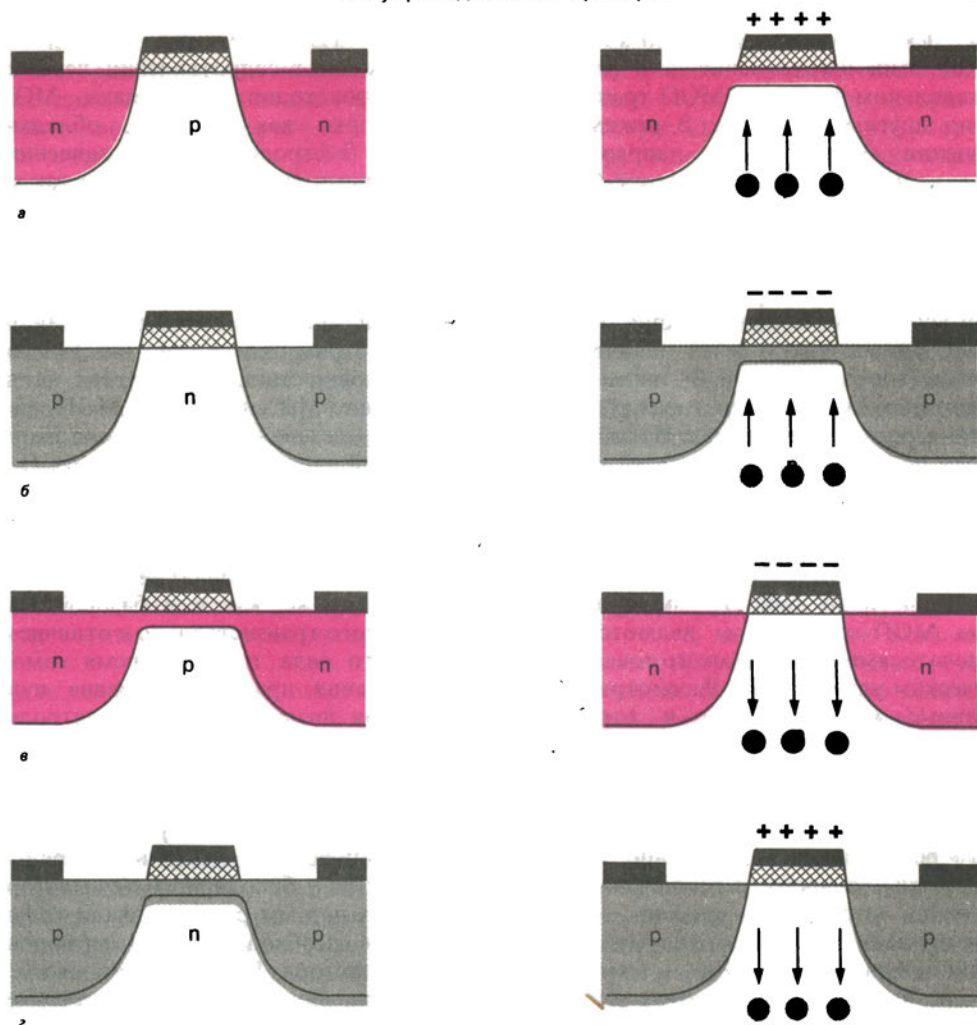


Рис. 17. Различные типы МОП-транзисторов. Слева – без напряжения на затворе, справа – с напряжением на затворе.

схематически показанная на рис. 16, является лишь одной из многих возможных. Такой транзистор называется *n*-канальным МОП-транзистором. Аналогично биполярному транзистору и здесь *n* и *p* можно поменять местами, т.е. использовать *n*-подложку, а области истока и стока выполнить с электропроводностью *p*-типа, получив, как показано на рис. 17,б и г, *p*-канальный МОП-транзистор. Изображенные на рис. 17,а и б МОП-транзисторы работают в так называемом режиме

обогащения, т.е. в случае приложения внешнего положительного напряжения к затвору носителями заряда обогащается *n*-канал, а отрицательного – *p*-канал, и транзистор становится электропроводящим. Существует и прямо противоположная возможность. Обогащение может происходить без приложения напряжения к затвору (рис. 17,в и г) в *n*-канальном МОП-транзисторе, например вследствие присутствия носителей положительного заряда в подзатворном оксиде, полнос-

тью исключить которое невозможно по технологии изготовления, а в реальном p -канальном полевом МОП-транзисторе и по другим причинам. В режиме обогащения отрицательное напряжение в n -канальном МОП-транзисторе (рис. 17, а) и положительное в p -канальном МОП-транзисторе (рис. 17, б) ведут к увеличению обедненного слоя и уменьшению толщины канала между истоком и стоком: при достаточно большом напряжении вообще происходит отсечка канала – появляется ток запираания. В таком случае говорят о МОП-транзисторах, работающих в режиме обеднения. Из-за присутствия положительных носителей заряда в подзатворном оксиде n -канальные МОП-транзисторы работают в режиме обеднения, а p -канальные – в режиме обогащения.

Аналогично биполярным транзисторам МОП-транзисторы являются переключателями электрического тока с электрическим управлением. Рассмотрим здесь главные характеристики и параметры этих переключателей и прежде всего время задержки. Если предположить, что необходимое для переключения МОП-транзистора изменение напряжения на затворе происходит мгновенно, т.е. без задержки, то время переключения определяется интервалом времени, нужного для пролета носителя заряда через канал. Если длина канала около 1 мкм, то на пролет затрачивается несколько миллиардных (10^{-12}) долей секунды. Однако наше предположение о мгновенном возникновении напряжения на затворе не реалистично. В нем не учитывается то обстоятельство, что носители заряда должны все-таки дойти до электрода затвора. Необходимое на это время зависит от емкости затвора C и сопротивления R проводника, соединяющего затвор с источником напряжения. Если $C \approx 10^{-12}$ Ф и $R \approx 10^3$ Ом, то $RC = 10^{-9}$ с, т.е. время переключения значительно больше предполагавшегося. Как правило, оно соответствует фактическому времени задержки T МОП-транзистора. Впрочем, то же самое относится и к биполярным тран-

зисторам. Из-за больших перезаряжаемых емкостей и сопротивлений, через которые происходит перезарядка, МОП-транзисторы, как правило, обладают меньшим быстродействием в сравнении с биполярными транзисторами. Но так как у МОП-транзистора емкость в основном определяется площадью затвора и ее можно сделать тем меньше, чем короче канал, то уменьшать время задержки следует за счет сокращения длины канала.

Рассмотрим теперь, как все это связано с мощностью, расходуемой на переключение. Мы видели, что МОП-транзистор представляет собой резистор, управляемый напряжением на затворе. Преобразуемая мощность является произведением приложенного к затвору напряжения на величину тока, проходящего через затвор. Если напряжение на затворе почти такое же, как и в базовой цепи биполярного транзистора, то в отличие от последнего сила тока во время самого переключения практически равна нулю из-за слоя диэлектрика под электродом затвора. Во время переключения этот ток является зарядным для электрода затвора. Но и он настолько мал, что расходуемая в МОП-транзисторе на переключение мощность на несколько порядков меньше, чем у биполярного транзистора.

До сих пор мы рассматривали только мощность, необходимую для переключения транзистора. Но ведь и то, что усиливает транзистор, тоже есть электрическая мощность, т.е. мощность, преобразуемая в коллекторной цепи биполярного транзистора или в цепи истока – стока МОП-транзистора. В общем и целом она намного больше мощности, расходуемой на переключение, а ее точное значение зависит от приложенного напряжения и прежде всего от вида схемы, в которую входят как транзисторы, так и другие элементы полупроводниковой электроники. Время задержки также определяется видом транзисторной схемы и рабочим напряжением. Потребление мощности и время задержки в какой-либо схеме вообще нельзя смешивать с мощностью, расходуемой отдельным транзистором на

переключение, и его временем задержки, для которых выше мы привели оценку. Последние являются минимальными значениями времени задержки и потребляемой мощности схемы, ниже которых опуститься уже нельзя. Эти параметры дают возможность получить представление о том, насколько полно мы используем свойства данного конкретного транзистора в схеме или насколько эффективной вообще может быть схема с конкретно взятыми транзисторами. На эффективности электронных микросхем мы еще подробно остановимся в гл. 4. Однако на основании всего сказанного выше уже сейчас можно сделать вывод о том, что биполярные транзисторы должны применяться в очень быстродействующих микросхемах. Если же на передний план выступает не быстродействие, а малое потребление мощности, то предпочтение следует отдать МОП-транзисторам.

Резисторы. Конденсаторы

Ознакомившись с транзисторами и полупроводниковыми диодами, мы получили представление о важных активных элементах, используемых в микросхемах. Однако, как известно, для сборки электронной схемы требуются также резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. Принцип действия резисторов и конденсаторов намного проще, чем транзисторов и диодов. Нет нужды останавливаться на этом детально. Но совсем не так проста реализация этих пассивных элементов в полупроводниковой электронике. Сегодня чаще всего вместо резисторов и конденсаторов используют транзисторы. Если, например, к базе *nnp*-транзистора раз и навсегда приложить определенное отрицательное напряжение, то коллекторная цепь станет резистором с довольно большим сопротивлением. В МОП-транзисторе затвор и противоположный ему так называемый электрод полупроводниковой подложки можно использовать как обкладки, а подзатворный оксидный слой – как изолятор конденсатора и таким путем получить определен-

ную емкость. Кроме этого, однако, в микроэлектронике применяются непосредственно создаваемые резисторы и конденсаторы. Для создания резисторов, например, используют полупроводниковый образец, у которого в *n*-области имеется полоска *p*-типа. Путем подбора размеров полоски *p*-типа можно получить необходимое значение (в определенных пределах) электрического сопротивления резистора при условии, что запирающий потенциал на *n-p*-переходе обеспечит прохождение тока только по полоске *p*-типа. Для создания конденсатора можно вообще отказаться от легированных акцепторной примесью истока и стока *n*-канального МОП-транзистора и воспользоваться только затвором, подзатворным оксидным слоем и слоем полупроводника *n*-типа, лежащим под оксидным слоем. Здесь мы хотим указать на рис. 38 в гл. 5, на котором показаны возможности получения описанных резисторов и конденсаторов. Что же касается индуктивных элементов, то, поскольку в микроэлектронике пока еще не разработаны способы их создания в виде отдельных полупроводниковых приборов, применение находят либо косвенные методы, в частности метод, основанный на использовании обратной связи между различными элементами, собранными в схему, либо метод подбора схемотехнических решений, предусматривающих подключение дополнительных внешних катушек индуктивности.

Оптоэлектронные индикаторы. Полупроводниковые датчики

Обработка информации в интегральных микросхемах – это еще не все, что во многих случаях требуется на практике. Обработываемую микросхемой информацию сначала нужно получить, осуществив измерения, а результаты обработки отобразить оптическим путем. Для решения этих задач, т.е. получения и отображения информации, имеются соответствующие полупроводниковые приборы. Здесь преимущество по сравнению с другими реше-

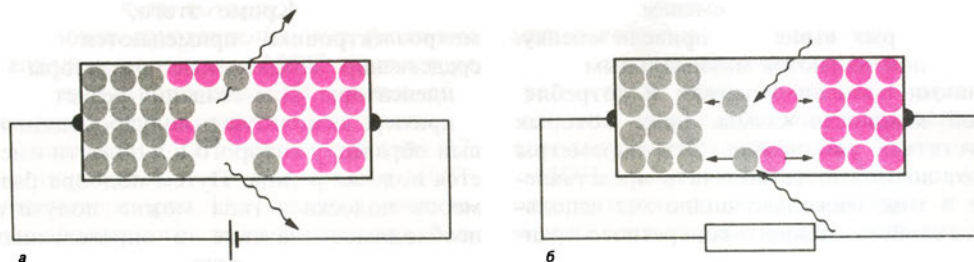


Рис. 18. *а* – принцип работы светодиода; *б* – принцип работы фотодиода.

ниями заключается в том, что такие приборы могут быть хорошо согласованы с микросхемами, также состоящими из полупроводниковых приборов. Кроме того, высокоэффективная полупроводниковая технология существенно удешевила их изготовление.

Наряду с жидкокристаллическими индикаторами для оптического представления знаков и символов используются и полупроводниковые устройства. Так называемые тонкопленочные электролюминесцентные дисплеи переменного тока, выполненные из легированного марганцем сульфида цинка, служат для отображения крупных блоков информации. Для представления информации в малом объеме применяют индикаторные приборы на светодиодах. В светодиодах используется эффект излучательной рекомбинации электронов и дырок. Электрон в зоне проводимости или на примесном уровне рекомбинирует с дыркой в валентной зоне или на примесном уровне и при этом испускает фотон. Чтобы такой процесс мог непрерывно повторяться, требуется постоянно поддерживать уровень концентрации электронов и дырок. В светодиодах для этого прикладывают напряжение к прямосмещенному (в пропускном направлении) $p-n$ -переходу (рис. 18, *а*). Таким образом, избыточные электроны инжектируются в p -область, а избыточные дырки – в n -область и рекомбинируют там с основными равновесными носителями заряда, испуская видимый свет. Таким образом, здесь осуществляется преобразование электрической энергии источника напряжения непосредственно в световую.

Если, наоборот, облучать светом $p-n$ -переход, то будет происходить генерация электронно-дырочных пар, которые станут разрушаться в электрическом поле $p-n$ -перехода (рис. 18, *б*). Через $p-n$ -переход начнет проходить электрический ток, величина которого служит мерой интенсивности света. Такой полупроводниковый прибор называется *фотодиодом*. В фотодиоде происходит преобразование светового сигнала в электрический, который уже можно обработать непосредственно в микросхеме. Фотодиод – это лишь один из примеров полупроводниковых приборов, используемых в микроэлектронике для получения информации. Иногда полупроводниковые приборы, преобразующие неэлектрические сигналы в электрические, называют *полупроводниковыми датчиками*. Такие датчики уже применяются для измерения не только света, но и давления, температуры или концентрации химических веществ. Их принцип действия станет понятен, если вспомнить рассмотренные нами выше полупроводниковые эффекты. Но на этом мы не будем останавливаться более подробно. Производство и применение полупроводниковых датчиков, за исключением оптоэлектронных, в настоящее время находится в начальной стадии. Однако как раз в этой области намечается очень бурное развитие, поскольку речь идет о приборах, без которых применение микроэлектроники во многих случаях становится невозможным. Датчики предоставляют информацию, необходимую для использования изделий микроэлектроники. Носителями информации являются электрические заря-

ды. Их также необходимо откуда-то получать, иначе изделия микроэлектроники не смогут функционировать. Для электропитания используют, например, бытовые сети электроснабжения или аккумуляторы. Однако существуют полупроводниковые приборы, способные давать электрическую энергию. Такими приборами являются солнечные элементы.

Солнечные элементы

Солнечный элемент работает по тому же принципу, что и фотодиод. Падающий на него свет поглощается и непосредственно

преобразуется в электрическую энергию. Солнечные элементы из кремния, прежде всего из относительно дешевого аморфного кремния, сегодня используются, в частности, для электропитания микрокалькуляторов.

Ознакомившись с принципами работы основных элементов полупроводниковой электроники, прежде всего транзисторов, мы перейдем в следующей главе к рассмотрению того, как с помощью схемных устройств, состоящих из этих элементов, т. е. с помощью интегральных микросхем, осуществляется обработка информации.

4. Электронная обработка информации

Информация нуждается в материальном носителе. В электронике такой носитель – электрический заряд. Информацию можно представить в виде сигналов электрического тока или напряжения разной величины подобно тому, как в фотографии содержащаяся в изображении информация представлена различными плотностями почернения фотобумаги. Локальные вариации плотности изображения на фотографии можно даже прямо преобразовать в сигналы электрического напряжения, т. е. во временные вариации значений электрического напряжения, если с помощью фотодетектора сканировать изображение. Подобно тому как на фотобумаге могут встречаться все возможные – естественно, в определенных пределах – значения яркости изображения, так и сигналы электрического напряжения могут иметь все возможные значения напряжения. Большой яркости будет соответствовать высокое напряжение, а малой – низкое.

Аналоговая и цифровая обработка информации

Информация, представленная сигналом электрического напряжения, *аналогична* первоначальной информации, представленной изображением на фотобумаге. Об *аналоговом представлении* информации говорят во всех тех случаях, когда первоначальная информация именно в этом смысле в точности трансформируется в сигналы электрического напряжения. Обработку информации, представленной в форме аналоговых сигналов электрического напряжения, называют *аналоговой*

обработкой информации. Она используется, к примеру, в радио- и телевизионной аппаратуре. Наряду с этим существует *цифровая обработка информации*, занимающая совершенно особое место в микроэлектронике.

Понять, что из себя представляет цифровая обработка информации, нам поможет рис. 19, на котором аналоговый сигнал электрического напряжения разбит на отдельные части, для чего временную ось разделили на короткие одинаковые интервалы. Как и в музыке, эти интервалы называются *тактами*. На каждом такте электрическое напряжение в первом приближении можно рассматривать как постоянное при условии достаточно малой продолжительности такта. Определенное напряжение, сохраняющееся на протяжении ровно одного такта, называют *импульсом напряжения*. В таком случае весь сигнал электрического напряжения на рис. 19 приближенно можно рассматривать как сплошную временную серию импульсов напряжения различной величины. Аналоговая обработка информации оперирует последовательностями (сериями) импульсов всех возможных значений напряжения. При цифровой обработке информации используются только два значения напряжения – минимальное, обозначаемое нулем, и максимальное, обозначаемое единицей. Каждую аналоговую серию импульсов приближенно можно разделить на значительное число цифровых сигналов, которые вместе взятые приближенно отображают ту же информацию, что и аналоговая серия импульсов. Способ трансформации аналоговой серии импульсов в цифровую форму и продемонстрирован на рис. 19. Шкалу напря-

жений делят на определенное число n одинаковых интервалов (на рис. 19 $n = 3$) и для каждого из них выделяют отдельный проводник—для первого интервала проводник 1, для второго—проводник 2 и т. д. Рассмотрим теперь на рис. 19 первый такт. Там первый интервал напряжения перекрыт импульсом, а второй и третий свободны. Поэтому в проводник 1 подается импульс, соответствующий единице, а в оба других проводника—импульсы, соответствующие нулю. На втором такте первый интервал занят полностью, второй—частично, а третий свободен. В этом случае импульс, соответствующий единице, поступает в первый и второй проводники, а нулевой импульс—в третий. Это повторяется по всем трем временным тактам. В итоге появляется n -е число серий импульсов, составленных только из единиц и нулей. Аналоговая серия импульсов, однако, лишь приблизительно отображается цифровыми сигналами, так как электрическое напряжение описывается n -числом дискретных значений. Погрешность от округления тем меньше, чем мельче сетка, накладываемая на первоначальную аналоговую серию импульсов. Однако одновременно увеличивается как число различных серий импульсов, так и число импульсов в каждой отдельной серии, которые обрабатываются за единицу времени, например в течение одной секунды. Увеличение точности влечет за собой повышение затрат на цифровую обработку. Для получения высокой точности при

аналоговой обработке информации требуются схемные элементы высокого качества. В частности, они должны обладать очень хорошей линейностью, т. е. между изменениями напряжения на выходе элемента и на его входе должна существовать точная линейная зависимость; в противном случае на выход будет подана искаженная информация. Цифровая форма обработки информации в целом является более надежной и менее подверженной искажениям вследствие несовершенства отдельных элементов. Однако достигается все это путем использования значительно большего числа элементов, нежели при аналоговой обработке. Если же таких элементов недостаточно много, то по скорости цифровая обработка информации уступает аналоговой. Цифровой способ позволяет добиться более высокой точности и надежности, но ценой увеличения числа элементов. Правда, для микроэлектроники это не является особенно сложной проблемой, ибо разместить на минимальной площади очень большое число не слишком точных, зато миниатюрных, быстродействующих и дешевых элементов—это как раз то, на что она способна. В определенном смысле цифровая обработка информации и микроэлектроника искали и нашли друг друга. С помощью микроэлектроники высокое качество небольшого числа высокоточных операций обработки информации можно заменить большим числом быстрых, но не таких точных операций. Помехи извне

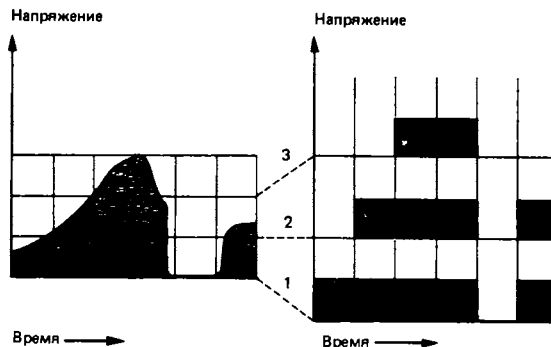


Рис. 19. Преобразование аналоговой серии импульсов в цифровую и наоборот.

или из самой обрабатывающей системы цифровой способ обработки информации «переносит» легче, чем аналоговый.

Двоичная система счисления

Нередко первоначальная информация имеется не в аналоговой форме, а выражена через привычную нам десятичную систему счисления, буквы и прочие символы. Чтобы и в этом случае ее можно было обработать в виде импульсов, соответствующих 1 и 0, все эти знаки и составленные из них цепочки предварительно необходимо преобразовать в так называемые двоичные числа. Ниже мы рассмотрим, что же представляет собой двоичная система счисления и какое значение она имеет для обработки информации. Полезно вспомнить, как устроена обычная наша десятичная система счисления. Ее основание = 10, т.е. для представления любого числа необходимо иметь десять символов – цифр. Число можно записать, используя степени основания, т.е. 10^{n-1} : в первом разряде $10^0 = 1$ (единица), во втором $10^1 = 10$ (десять), в третьем $10^2 = 100$ (сто) и т.д. Четырехзначное число 6347 в десятичной системе может быть представлено развернутой записью $6 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^2 + 4 \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0$. Двоичная система построена аналогично десятичной, но только здесь для записи любого числа используются степени основания 2, т.е. 2^{n-1} . С помощью всего двух цифр – нуля и единицы – в этой системе также можно записывать числа любой величины, складывать их, умножать, делить и т.д. Четырехзначное двоичное число 0101, таким образом, будет означать $0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 5$. Максимальное четырехзначное число, которое можно себе представить в двоичной системе счисления, это $1111 = 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0 = 15$. Чтобы сосчитать до $2^{10} - 1 = 1023$, требуется десятизначное двоичное число, а до $2^{20} - 1 = 1\,048\,575$ – двадцатизначное.

Каждое число можно изобразить как в десятичной, так и в двоичной системе.

Хотя в двоичной системе количество разрядов больше, чем в десятичной, зато меньше символов – цифр, т.е. две, а не десять.

Преимущество двоичной системы по сравнению с десятичной заключается в том, что в двоичной системе используется меньше знаков. Несмотря на это, двоичная система все же не обладает наименьшим количеством знаков, которое можно получить, используя в качестве основания $e = 2,718$. Однако большое значение придает тому, чтобы основание было представлено целым числом. С этой точки зрения наилучшими кандидатами являются числа «два» и «три». Однако из-за удобства применения в электронных схемах предпочтение отдается двоичной, а не троичной системе счисления.

Итак, заодно мы выяснили, почему цифровая обработка информации, по определению вроде бы имеющая дело с «цифрами», т.е. дискретными знаками любого рода, оперирует исключительно двоичными знаками.

Несмотря на информационно-теоретическое превосходство двоичной системы над десятичной, о чем впрочем Г. В. Лейбниц писал еще в 1679 г., при выполнении машинных вычислений от последней полностью все же не отказываются. В конечном итоге причина заключается в том, что на руках у человека имеется десять пальцев и вся историческая память его неразрывно связана с десятичной системой счисления. Именно поэтому десятичную систему используют всюду, где требуется установить с человеком контакт, в частности при вводе и выводе данных. Внутри системы электронной обработки информации операции счета, как правило, осуществляются с двоичными числами. Связующим звеном между внешней десятичной и внутренней двоичной формами представления чисел служит так называемое двоично-кодированное десятичное представление, т.е. выражение десятичных чисел в двоичном коде. Для каждой десятичной цифры требуется четырехзнач-

ное двоичное число, так называемая тетрада:

0 = 0000, 1 = 0001, 2 = 0010,
3 = 0011, 4 = 0100, 5 = 0101,
6 = 0110, 7 = 0111, 8 = 1000,
9 = 1001.

Закодированное в двоичном коде число 2536, согласно этому, будет иметь следующую форму записи: 0010 0101 0011 0110. Только после двоично-кодированного десятичного представления десятичное число становится пригодным для обработки в цифровой ЭВМ. Такое преобразование ЭВМ осуществляет самостоятельно, и пользователь этого не замечает. Затем двоично-десятичное число внутри ЭВМ в большинстве случаев переводится в чисто двоичное число, и лишь после этого могут быть начаты вычислительные операции, результатом которых также является двоичное число. При выдаче данных его снова нужно представить в двоично-десятичной форме, что также осуществляется автоматически. Двоично-кодированное десятичное представление не исчерпывает все возможности, предоставленные комбинацией из четырех знаков двоичного числа.

В так называемой *шестнадцатеричной системе* счисления для этого помимо десятичных цифр 0–9 берут еще шесть первых прописных букв латинского алфавита: A, B, C, D, E, F (A = 10, B = 11, C = 12, D = 13, E = 14, F = 15). В шестнадцатеричной системе числа записывают, используя степень основания 16, т.е. в первом разряде справа $16^0 = 1$, во втором 16^1 , в третьем 16^2 и т.д. В целях однозначного определения системы счисления перед шестнадцатеричным числом ставится условное обозначение доллара \$. Запись \$7F3, например, означает шестнадцатеричное число

$$7 \cdot 16^2 + 15 \cdot 16^1 + 3 \cdot 16^0 = 2035.$$

Один разряд шестнадцатеричного числа соответствует *четырем* двоичным разря-

дам, т.е. одной тетраде. Поэтому двоичное число легко переводится в шестнадцатеричное: двоичное число требуется лишь поделить справа налево на тетрады и каждую из них заменить соответствующей шестнадцатеричной цифрой. Рассмотрим это на примере. Пусть двоичное число равно 10110100. Первая четырехзначная группа справа представлена $0100 = 4 = \$4$, вторая – $1011 = 11 = \$B$. Таким образом, шестнадцатеричное число имеет вид \$B4. Проверим правильность нашего перевода по десятичной системе:

$$\begin{aligned} 10110100 &= 1 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + \\ &+ 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = \\ &= 128 + 32 + 16 + 4 = 180. \end{aligned}$$

$$\$B4 = 11 \cdot 16^1 + 4 \cdot 16^0 = 180.$$

Следовательно, перевод был осуществлен правильно. В определенных случаях просто неизбежным является общение с ЭВМ на языке тех чисел, на котором она «говорит» внутри, т.е. используя двоичную, а не десятичную систему, например при программировании микроЭВМ на машинном языке. Так как, с одной стороны, шестнадцатеричные числа ЭВМ легко переводит в двоичные и, с другой стороны, для человека они являются более наглядными, чем двоичные, то вместо двоичного кода нередко пользуются шестнадцатеричным.

Итак, в основном мы познакомились с кодированием цифр и чисел в двоичной системе. Остался лишь один шаг до представления в двоичном коде букв и других знаков. Для перевода в двоичный код букв латинского алфавита каждой из них, например, можно присвоить определенное число от 0 до 25, скажем используя ноль вместо «а», единицу вместо «b», двойку вместо «с» и т.д., а затем закодировать в виде пятизначных двоичных чисел. В таком случае одна буква будет содержать объем информации 5 бит, хотя в действительности он меньше – всего $\log_2 26 = 4,7$. Это объясняется тем, что алфавит не исчерпывает всех возможностей пятизначного двоичного числа. Данная особенность, встретившаяся нам

на примере двоичного представления алфавита и проявляющаяся уже при двоично-кодированном десятичном представлении, вообще присуща двоичному отображению информации. Необходимое количество двоичных символов не обязательно равно соответствующему объему информации в битах, т. е. он может быть меньше количества двоичных символов. Поэтому существует единица информации, представленной в двоичном коде, так называемый двоичный разряд, или *Бит*¹⁾. От *бита*, отражающего количество информации, он отличается тем, что пишется с прописной буквы и является единицей длины одного двоичного числа. Содержащее n -е число разрядов двоичное число имеет длину, равную n Бит. Но содержит ли n -е число Битов информацию—это уже другой вопрос. Количество двоичных разрядов, т. е. Битов, может быть представлено только целым числом: не существует ни половины, ни десятой части Бита, как не существует половины или десятой доли двоичного символа. Однако *объем* информации вполне может быть 0,5 бит или 0,1 бит. Поэтому неправильным является иногда встречающееся мнение, что бит является мельчайшим объемом информации, так сказать ее элементарной частицей. В то же время 1 Бит—минимальная длина, которую может иметь двоичное число. Чем меньше Битов, используемых для представления определенной информации, тем больше плотность информации. Идеальным случаем является 1 бит/Бит, но это встречается редко. При двоичном представлении алфавита, например, плотность информации составляет $4,7/5$ бит/Бит = $0,9$ бит/Бит, при двоично-кодированном десятичном представлении четырехзначного десятичного числа $\log_2 10^4/16$ бит/Бит = $0,8$ бит/Бит.

Чтобы представить в двоичной форме любой символ, требующийся при обра-

ботке информации, т. е. не только цифру и строчную букву, но и прописную букву, знак математической операции, знак препинания, пробел, управляющий символ и т. д., достаточно 8 Бит, т. е. для каждого используемого при обработке информации символа в распоряжении имеется восьмизначное двоичное число. Такое число называют двоичным словом и обозначают байтом. Таким образом, мы имеем

1 байт = 8 Бит,

1 кбайт = 2^{10} байт = 1024 байт,

1 Мбайт = 2^{20} байт = 1 048 576 байт.

Двоичное кодирование символов для обработки информации не должно допускать двоякого толкования, т. е. каждому символу может соответствовать только одно двоичное число. Но ведь сочетания могут быть какими угодно! Поэтому существуют самые разные коды. В используемом наиболее часто коде ASCII (American Standard Code of Information Interchange—американский стандартный код обмена информацией), например, десятичному числу 1 соответствует двоичное число 00010000 (2^5), числу 2—двоичное число 00010001, числу 3—двоичное число 00010010 и т. д. Двоичное число 00011000 используется для буквы А, 00011001—для буквы В, 00011010—для буквы С и т. д.

После экскурса в область двоичного кодирования символов для обработки информации перейдем к рассмотрению вычислений с использованием двоичных чисел, которые имеют центральное значение в цифровой обработке информации. Начнем с однозначных двоичных чисел. В процессе сложения мы получим

$$0 + 0 = 0,$$

$$1 + 0 = 1,$$

$$0 + 1 = 1,$$

$$1 + 1 = 10.$$

В правильности этих равенств можно легко убедиться, обратившись к десятичной системе счисления. Первые три равенства в этой системе выглядят точно так же. Четвертое равенство означает $1 + 1 = 2$,

¹⁾ Обычно в отечественной и зарубежной литературе не различают единицу информации и двоичный разряд—и то и другое обозначают бит.—Прим. ред.

что опять же верно. При вычитании получаем

$$0 - 0 = 0,$$

$$1 - 0 = 1,$$

$$0 - 1 = -1,$$

$$1 - 1 = 0.$$

И здесь правильность уравнений сразу видна в десятичной системе счисления. При умножении, как и в десятичной системе, получим

$$0 \times 0 = 0,$$

$$1 \times 0 = 0,$$

$$0 \times 1 = 0,$$

$$1 \times 1 = 1.$$

При делении нуль как делитель исключается, а при делении на единицу находим

$$0 : 1 = 0,$$

$$1 : 1 = 1.$$

Арифметический счет с многозначными двоичными числами можно выполнить способом «в столбик», предложенным еще Адамом Ризом для вычислений с многозначными десятичными числами. Продемонстрируем сказанное на примере сложения двух четырехзначных двоичных чисел 0011 и 0110. В десятичной системе им соответствуют числа 3 и 6. Сложим оба двоичных числа:

$$\begin{array}{r} 0011 \\ + 0110 \\ \hline 1001. \end{array}$$

При этом 1 переносят в следующий разряд, когда в предшествовавшем разряде требовалось сложить 1 и 1. Действуя по такой схеме, в сумме мы получим число 1001. Проверим правильность счета по десятичной системе:

$$0011 = 3, 0110 = 6, 1001 = 9.$$

Итак, результат верный.

Уясним себе еще раз порядок действий при сложении двух четырехзначных двоичных чисел. Мы предприняли несколько одинаковых шагов. На каждом из них складывали два однозначных числа. По-

этому можно сказать, что на каждом шаге два однозначных числа мы сопоставили с третьим (максимально двузначным) числом — парю (0,0) с числом 0, парю (0,1) или (1,0) с числом 1 и парю (1,1) с числом 10. К таким сопоставлениям двоичных чисел можно свести все арифметические счетные операции, включая вычитание, умножение и деление. Более того, можно убедиться, что таким путем вообще можно решать все задачи цифровой обработки информации. Однако правила сопоставления, в правильности которых мы убедились на примере сложения, все же не являются достаточно элементарными. Их можно свести к еще более элементарным, так называемым булевым правилам сопоставления, оперирующим только с однозначными двоичными числами.

Элементарные логические операции

В математике правила сопоставления называют также функциями. Поэтому в дальнейшем мы будем говорить о функциях, а не о правилах сопоставления. Несколько переменных величин x, y, \dots связаны функциональной зависимостью, если каждому значению, которое может принять одна из них, соответствует одно или несколько определенных значений другой. Можно сказать: функции z имеют одно или несколько значений, сопоставляемых с исходными величинами, или аргументами. Если каждому значению аргумента соответствует только одно значение функции, то функция называется однозначной, если два или больше — многозначной. В обработке информации обходятся одно- и двузначными булевыми функциями. Однозначная функция может быть представлена двумя аргументами, а именно 0 и 1, и двумя значениями, также 0 и 1. В соответствии с этим существуют четыре однозначные булевы функции. Особый интерес представляет одна из них — логическое отрицание, остальные являются тривиальными. С помощью отрицания 0 сопоставляется с 1 и 1 с 0. Для записи функции отрицания используют

Таблица 2. Отрицание (логическая операция НЕ)

x	\bar{x}
0	1
1	0

форму $z = \bar{x}$, понимая под этим, что $z = 1$ для $x = 0$ и $z = 0$ для $x = 1$ (см. табл. 2). Двойное отрицание дает аргумент. На этом основана следующая загадка: предположим, что какой-то человек всегда говорит только правду или всегда остается лжецом. Но неизвестно, кто перед нами — тот, кто говорит правду, или лжец. Как, стоя у развилки дорог, следует сформулировать вопрос, чтобы этот человек правильно показал дорогу? Вопрос должен быть поставлен таким образом, чтобы ответ относился к одному из ответов, данных ранее, например: что бы вы ответили вчера прохожему, если бы он спросил, по какой дороге ему идти? Если человек всегда говорит правду, то каждая часть ответа будет правильной, т.е. он повторит сказанное вчера. Если человек говорит только неправду, то и сейчас он скажет прямо противоположное тому, что сказал вчера, т.е. дважды обратит правильный ответ в неправильный, в итоге показав нужную дорогу. Отрицание является однозначной булевой функцией. Для обработки информации используются, как уже было сказано, также двужначные функции. Они могут иметь четыре различных аргумента, а именно (0,0), (0,1), (1,0), (1,1), и два разных значения, т.е. 0 и 1, что в итоге дает $2^4 = 16$ разных двужначных булевых функций. Однако обходятся лишь небольшим набором из них, к которому можно свести все прочие функции. В этот набор входит и отрицание, с которым мы познакомились как с однозначной функцией и которое встречается теперь и среди двужначных, являясь функцией, в которой значение зависит лишь от одной из двух величин, скажем от x , и равно $z = \bar{x}$. Кроме того, в

этот же набор входят функции дизъюнкции и конъюнкции.

При дизъюнкции обе величины x и y в соответствии с табл. 3 сопоставляются с величиной $z = x \vee y$.

Дизъюнкция является логической операцией ИЛИ: если нет x и нет y , то нет и « x или y ». Если есть $x(y)$ и нет $y(x)$, то есть « x или y ». Если есть x и есть y , то также есть « x или y ».

При конъюнкции в соответствии с табл. 4 элементы x и y сопоставляются с величиной $z = x \wedge y$.

Конъюнкция является логической операцией И: если нет x и нет y , то нет « x и y », если нет $x(y)$ и есть $y(x)$, то нет « x и y », если есть x и есть y , то есть « x и y ».

Логические операции ИЛИ и И являются совершенно однозначными. К обычному в повседневном обиходе употреблению слова «или» это не относится. Если, к примеру, x отражает высказывание «он находится дома» и y высказывание «она находится дома», то дизъюнкция $x \vee y$ отражает высказывание «он находится дома или она находится дома». С точки зрения формальной логики это оз-

Таблица 3. Дизъюнкция (логическая операция ИЛИ)

x	y	$x \vee y$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблица 4. Конъюнкция (логическая операция И)

x	y	$x \wedge y$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

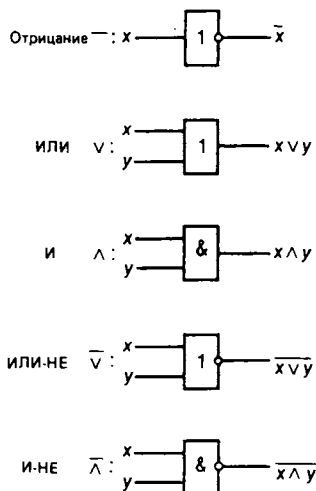


Рис. 20. Условные обозначения элементарных логических операций.

начает, что дома находится или он один, или она одна, или оба. В обиходе это выражение мы скорее поймем так, что дома находится либо он, либо она, хотя и можно предположить вариант интерпретации по формальной логике. В обиходе слово «или», таким образом, имеет два значения — одно исключаящее, т.е. в смысле «или — или», и одно обязывающее, отвечающее формальной логике. Язык пользуется этой двузначностью, позволяющей более гибко варьировать форму выражения. Однозначность достигается в общем контексте высказывания. По-другому обстоит дело с обиходным значением «и». Под высказыванием «он находится дома и она находится дома» понять можно лишь одно: он и она находятся дома, как это и соответствует логическому значению «и». Во избежание характерной для обихода двузначности в микроэлектронике используют краткие обозначения операций ИЛИ и И. Для обозначения логических операций или логических элементов на блок-схемах применяются показанные на рис. 20 логические символы функций отрицания, дизъюнкции и конъюнкции.

К операциям отрицания, дизъюнкции и конъюнкции можно свести каждую за-

дачу цифровой обработки информации. Поэтому их называют *элементарными* логическими операциями. Упрощение может быть даже более обширным. Используют, например, не все три названные операции, а лишь одну из них, т.е. либо так называемую логическую операцию ИЛИ-НЕ, возникающую вследствие отрицания результата логической операции ИЛИ:

$$x\text{ИЛИ-НЕ}y = x \vee \bar{y},$$

либо так называемую логическую операцию И-НЕ, означающую отрицание результата логической операции И:

$$x\text{И-НЕ}y = x \wedge \bar{y}.$$

Однако на практике в микроэлектронике используют как операции И-НЕ и ИЛИ-НЕ, так и операции ИЛИ, И и отрицания.

Схемы реализации элементарных логических операций

Теперь мы обсудим, как с помощью транзисторов и резисторов строятся схемы для выполнения этих элементарных логических операций. Продвигаясь вперед постепенно, рассмотрим сначала электро-механический вариант, а потом уже перейдем к электронным схемным решениям. Мы знаем, что двоичные числа 0 и 1 могут быть представлены минимальным и максимальным электрическим напряжением. Однако с одинаковым успехом их можно реализовать в цепи тока с помощью механического переключателя, условившись, что если в цепи есть электрический ток, то это состояние соответствует единице, а если тока нет — нулю. Реализовать логическую операцию ИЛИ и И при таких положениях переключателей в цепи тока можно с помощью схем, показанных на рис. 21. Результатом выполнения логической операции в обоих случаях будет возникновение электрического напряжения между выводами, обозначенными A и T . Отсутствие напряжения соответствует нулю, а наличие — единице. Обратимся сначала к показанной на

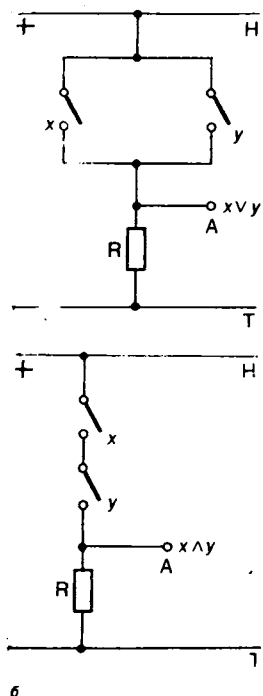


Рис. 21. *а*—схема реализации с помощью механических переключателей логической операции ИЛИ; *б*—схема реализации с помощью механических переключателей логической операции И.

рис. 21, *а* логической схеме ИЛИ. Если оба переключателя выключены, то к *А* приложен потенциал нижнего электрода. Напряжение между *А* и *Т* равно нулю. Если левый переключатель включен, а правый выключен, то по левой ветви и через резистор проходит электрический ток. Предположим, что включенный переключатель практически не обладает никаким сопротивлением. Полное напряжение между *Н* и *Т* падает на резисторе *R*. Верхний вход резистора, а следовательно, и выход *А* находится под потенциалом *Н*, т. е. между *А* и *Т* имеется напряжение, а значит, на выходе мы имеем единицу. То же самое происходит, когда включен не левый, а правый переключатель. Даже если включены оба переключателя, электрический ток проходит через резистор *R*.

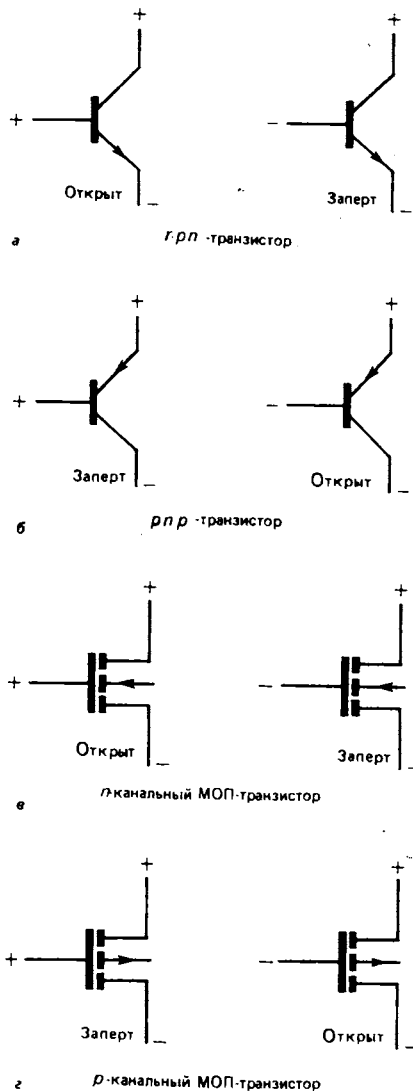


Рис. 22. *а, б*—условные обозначения биполярных транзисторов; *в, г*—условные обозначения МОП-транзисторов, работающих в режиме насыщения.

Величина тока такая же, как и в случае включения *только* одного переключателя; в разветвленной части схемы он равномерно разделяется на обе ветви. Сравнение двоичных численных значений на выходе с величинами функции ИЛИ в табл. 3 показывает полное совпадение.

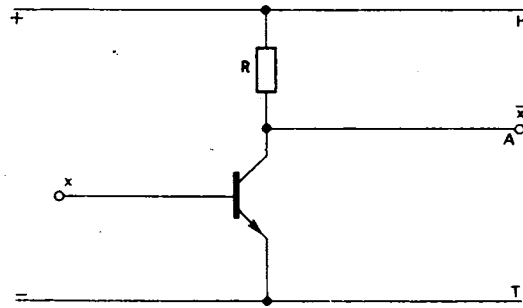


Рис. 23. Логическая схема НЕ с биполярным транзистором.

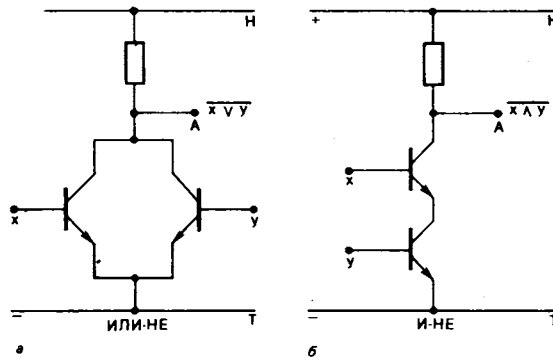


Рис. 24. а – логическая схема ИЛИ-НЕ; б – логическая схема И-НЕ. В этих схемах используются биполярные транзисторы.

На выходе A , таким образом, мы действительно получаем результат логической операции ИЛИ с двумя входными значениями x, y . Аналогичным способом можно показать, что на выходе A схемы на рис. 21,б получаем результат логической операции И с двумя входными данными. В этом случае предоставим читателю возможность самостоятельно разобраться в деталях.

С помощью механического переключателя можно также реализовать логическую операцию отрицания. В электронике для этого требуется резистор. Условные обозначения биполярных и полевых транзисторов показаны на рис. 22. Эмиттер отмечен стрелкой. В pnp -транзисторе потенциал эмиттера обычно ниже потенциала коллектора. Электрический ток

направлен от низкого потенциала к высокому, т.е. от эмиттера в направлении, указанном стрелкой. В pnp -транзисторе потенциал эмиттера выше потенциала коллектора и ток идет, как показано стрелкой, в эмиттер. Потенциал базы может быть высоким или низким, и это приводит к тому, что коллекторная цепь становится запертой или токопроводящей, о чем мы говорили в предыдущей главе. Условные обозначения и схемы включения МОП-транзистора, работающего в режиме обогащения, показаны в нижней части рис. 22. На схеме НЕ, изображенной, например, на рис. 23, входным является напряжение x в базовой цепи. Если к базе приложено положительное напряжение, то транзистор открыт. Электрический ток проходит через резис-

тор R и транзистор, напряжение z будет очень малым (по сравнению с T), т.е. $z \approx 0$. Если к x не приложено положительное напряжение, то электрический ток не проходит через резистор R и на выходе будет полное напряжение, т.е. $z = 1$. Итак, $z = \bar{x}$. Теперь никакой сложности не представляет реализация логических схем ИЛИ-НЕ и И-НЕ с помощью элементов полупроводниковой электроники: в основном остается лишь заменить транзисторами механические переключатели на рис. 21, что и сделано на рис. 24. Если, кроме того, резистор R поместить (в направлении протекания тока) перед транзисторами (рис. 24), то в дополнение к логическим операциям ИЛИ и И будет выполняться логическое отрицание. В итоге мы получаем схемы для реализации логических операций ИЛИ-НЕ и И-НЕ.

Схемы логических элементов

Схемы, показанные на рис. 23 и 24 и используемые для реализации элементарных логических операций, называются *схемами логических элементов*. Речь идет о логических элементах ИЛИ-НЕ и И-НЕ. На рис. 23 и 24 изображены *простейшие* схемы, которые только можно себе представить для выполнения элементарных логических операций. Из сравнения этих схем с условными обозначениями логических операций на рис. 20 становится видно, что схемы логических элементов имеют два дополнительных входа для подвода электрического питания. Через них в схему поступает носитель информации — электрическое напряжение, на которое информация «накладывается» в момент ввода и с которого она «снимается» в момент вывода. Питающее напряжение вызывает ток питания. Этот электрический ток в схемах, показанных на рис. 23 и 24, во всех транзисторах проходит по коллекторной цепи. При величине несколько миллиампер этот ток считают сравнительно сильным, во всяком случае по отношению к переключающим токам, проходящим по базовой цепи и состав-

ляющим несколько микроампер. Схемы логических элементов на рис. 23 и 24 потребляют электрическую мощность не только при переключении, но и в нерабочем состоянии. Если, к примеру, напряжение между эмиттером и коллектором составляет несколько вольт, то потребление мощности в несколько милливольт на схему логических элементов намного превышает потребление мощности на транзисторе, равное, как мы заметили в предыдущей главе, нескольким микроваттам. Время задержки между подачей импульсов напряжения на входы схемы логических элементов и появлением обработанных импульсов на выходе превышает время задержки отдельно взятого транзистора. В частности, оно зависит от того, насколько быстро может быть передано напряжение между отдельными транзисторами внутри схемы. Необходимое для этого время определяется сопротивлением и емкостью схемных элементов и соединений. В интегральных схемах логические элементы должны быть соединены друг с другом, т.е. выходы одного элемента соединены с входами другого. Для этого требуется взаимное согласование входных и выходных напряжений и сопротивлений логических элементов. Как правило, в связи с этим возникает необходимость использования дополнительных резисторов и транзисторов. Быстродействующие схемы логических элементов должны обладать наименьшим возможным сопротивлением и малой емкостью. С уменьшением сопротивления автоматически возрастает потребление мощности. Это значит, что между временем задержки и потреблением мощности существует обратная зависимость. Быстродействие схем логических элементов можно повысить, увеличив потребление мощности, т.е. приложив более высокое напряжение. Следовательно, появляется возможность варьирования в определенных пределах таких параметров схем, как время задержки и потребление мощности. Добротность схемы логических элементов обычно характеризуется произведением потребляемой мощности

на время задержки. Если для показанных на рис. 23 и 24 схем логических элементов принять потребляемую мощность равной 10 мВт и время задержки 100 нс, то добротность составит 1000 пДж ($1 \text{ пДж} = 10^{-12} \text{ Дж}$). Сравнение с энергией, расходуемой одним транзистором на переключение, которая намного меньше 1 пДж, говорит о том, что мы очень плохо используем свойства отдельных транзисторов в схемах логических элементов, показанных на наших рисунках. Хотя эти схемы очень просты, они потребляют чересчур большую мощность и отличаются низким быстродействием. Поэтому и предприняты были попытки создать более быстродействующие и менее энергоемкие схемы логических элементов, обладающие к тому же рядом других положительных свойств, например хорошей технологичностью в изготовлении и высокой надежностью в работе. Разработка таких схем логических элементов — одна из главных задач микроэлектроники. В ходе ее решения появился ряд схем для реализации элементарных логических операций.

Логические схемы

Их называют *логическими схемами* или *логикой*. На рис. 24 показаны транзисторные логические схемы с непосредственными связями. По упомянутым выше причинам такие схемы уже не применяют. Используемые сегодня логические схемы — это основанная на биполярных транзисто-

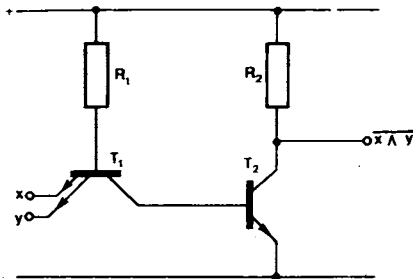


Рис. 25. Схема И-НЕ на базе транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ).

рах транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ), интегральная инжекционная логика (И²Л) и эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ). Базовой схемой ТТЛ является схема И-НЕ, показанная на рис. 25. В отличие от схем логических элементов на рис. 23 и 24, где входные данные подаются на электроды баз обоих транзисторов, в схеме ТТЛ входные напряжения поступают на оба электрода эмиттеров двухэмиттерного транзистора T_1 . Если по крайней мере на один из входов подан низкий потенциал, т. е. если $x = 0$, $y = 0$, $x = 1$, $y = 0$ или $x = 0$, $y = 1$, то токопроводящей становится базовая цепь транзистора T_1 . Через резистор R_1 и базовую цепь транзистора T_1 проходит ток. На базу и коллектор транзистора T_1 подан низкий потенциал. В результате транзистор T_2 закрыт, и на резисторе R_2 напряжение практически не падает, т. е. на выход подается высокий потенциал. При $x = 0$, $y = 0$ и $x = 0$, $y = 1$ или $x = 1$, $y = 0$ на выходе, таким образом, появляется единица, т. е. $x \wedge y$. Если $x = 1$, $y = 1$, то закрыта базовая цепь транзистора T_1 . Потенциал базы, а вместе с тем и коллектора транзистора T_1 высокий. Транзистор T_2 становится токопроводящим. Потенциал за резистором R_2 уменьшается, на выходе получаем нуль, т. е. что и требуется для логической операции И-НЕ. Существуют схемы элементов ТТЛ на транзисторах не только с двумя, но и тремя и больше эмиттерными электродами. Схемы логических элементов, реализованные не на биполярных, а на МОП-транзисторах, называют МОП-схемами. В качестве примера можно привести схемы на рис. 26, полученные в результате применения в логической схеме с непосредственными связями (рис. 24) *n*-канальных МОП-транзисторов, работающих в режиме обогащения, где кроме этого и резисторами являются *n*-канальные МОП-транзисторы. Разным видам МОП-транзисторов соответствуют разные логические схемы на МОП-транзисторах. Если в одной и той же схеме используются *n*- и *p*-канальные МОП-транзисторы, работающие в режиме обогащения, то говорят о логических

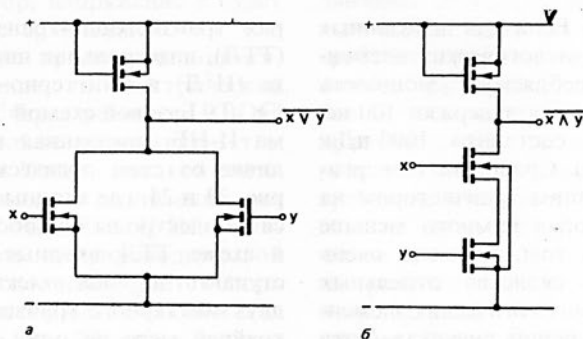


Рис. 26. а – схема ИЛИ-НЕ; б – схема И-НЕ. Используются n -канальные МОП-транзисторы.

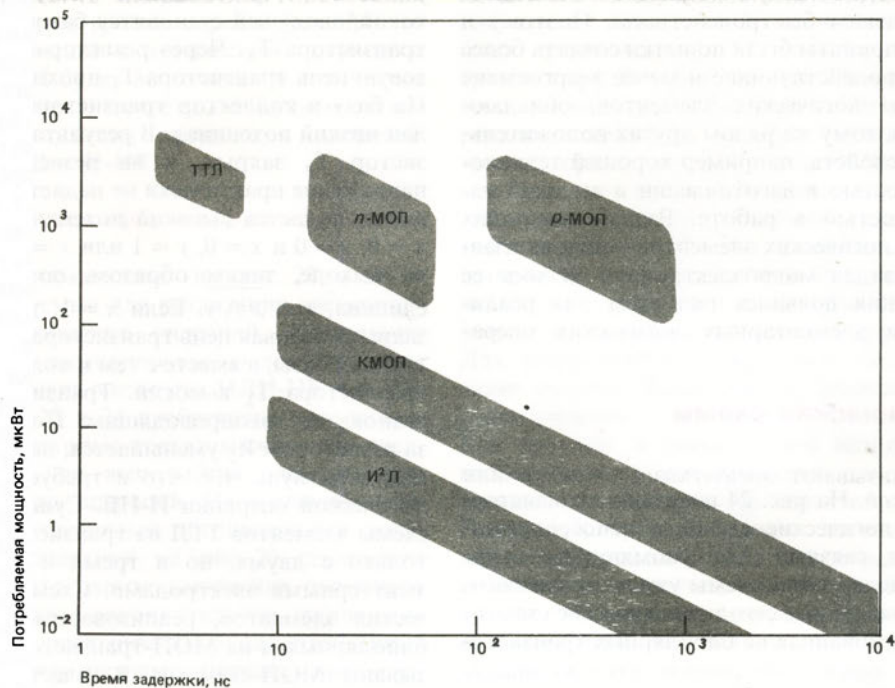


Рис. 27. Зависимость потребляемой электрической мощности от времени задержки для схем логических элементов, используемых в различных логических схемах.

схемах на комплементарных МОП-транзисторах, или КМОП-схемах. Детальное обсуждение различных логик вышло бы далеко за рамки введения в микроэлектронику, и поэтому мы ограничимся уже сказанным, тем более что в них нет ничего принципиально нового. Все самое главное относительно реализации элементарных логических операций мы уже вы-

яснили с помощью рассмотренных выше примеров.

Получить представление о добротности логических схем, наиболее часто встречающихся в настоящее время, можно на основании рис. 27. Здесь указаны такие параметры схем логических элементов, как потребляемая электрическая мощность и время задержки, т.е. интервал,

необходимый для выполнения одной логической операции. Выделенные области соответствуют различным логическим схемам, причем на оси ординат отложены значения потребляемой электрической мощности, а на оси абсцисс — значения времени задержки. Из рисунка видно, что схемы элементов ТТЛ характеризуются временем задержки менее 10 нс при потреблении мощности 1–10 мВт. Примерно таким же энергопотреблением отличаются *n*-канальные и *p*-канальные МОП-схемы, но их время задержки составляет от нескольких десятков до нескольких сотен наносекунд. При почти одинаковом времени задержки КМОП-схемы потребляют примерно в сто раз, а И²Л-схемы в тысячу раз меньше энергии. Тот факт, что на рис. 27 логическим схемам соответствует не какая-то одна определенная точка, а целая область, имеет свои причины. Одна из них нам уже известна: потребление мощности и время задержки в определенных пределах могут варьироваться за счет выбора рабочего напряжения. Другой причиной являются различия в технологии изготовления схем логических элементов. Более подробно этот вопрос мы рассмотрим в гл. 5, а здесь лишь заметим, что схемная логика тесно связана с технологией изготовления. В частности, определенные логические схемы привязаны к совершенно определенной технологии (например, МОП-схемы к МОП-технологии). Иногда вообще разницу между схемной логикой и технологией ее реализации игнорируют и говорят только о технологии, хотя речь, собственно, идет как раз о схемной логике.

Схемы памяти

Кроме элементарных логических операций над импульсами, соответствующими 0 и 1, нужно обеспечить *хранение* информации, имеющейся в виде таких импульсов, а для этого требуются схемы памяти. Пригодная для решения поставленной задачи схема должна иметь два устойчивых состояния, внешнее управление которыми

осуществляется через один вход. Кроме того, значение напряжения на выходе должно давать возможность определить, в каком состоянии находится схема. Следовательно, в отличие от схем логических элементов данное значение напряжения на выходе не может зависеть от напряжения, в то же самое время поданного на вход. Оно должно определяться через *состояние* схемы, т. е. по напряжению, которое с целью установления этого состояния *было приложено* к входу *в прошлом*. Тем самым схемы памяти существенно отличаются от логических и прочих схем, где напряжение на выходе однозначно определено напряжением, одновременно поданным на вход. Последние называются *комбинационными* схемами. Они, как правило, могут использоваться для хранения информации. Хранящуюся в схемах памяти информацию можно изменять, не меняя самой схемы. Меняется лишь ее состояние. Установление определенного состояния схемы памяти означает запись информации, а распознавание этого состояния — ее считывание. Без внешнего воздействия схема памяти должна как можно дольше оставаться в состоянии, установленном при записи, т. е. хранить информацию. В микроэлектронике для хранения информации используются две принципиально разные схемы памяти, каждая из которых обладает необходимыми свойствами. В одном случае речь идет о так называемых триггерных схемах, в другом — о схемах памяти, главной частью которых является конденсатор.

Триггерные схемы памяти

Рассмотрим сначала триггерную схему, представленную на рис. 28. Чтобы лучше разобраться в ней, представим, что отсутствуют крайние левый и правый транзисторы. Что же касается двух оставшихся транзисторов, то здесь важно следующее: база одного транзистора соединена с коллектором другого и наоборот. В результате лишь один из обоих транзисторов может быть открытым: если открыт левый, то закрыт правый, так как

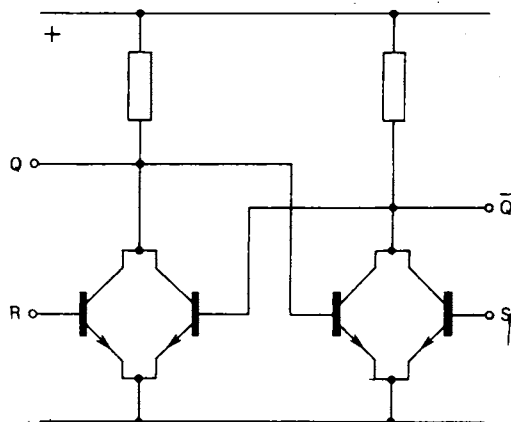


Рис. 28. Схема памяти, в которой используются триггеры.

при открытом левом транзисторе все напряжение между высоким положительным и низким отрицательным потенциалом шин падает на левом резисторе и к базе правого транзистора прилагается низкий потенциал. Но, являясь *pnp*-транзистором, он закрыт (рис. 22). Если же открыт правый транзистор, то закрыт левый. Когда схема находится в одном из двух состояний, то она в нем и остается. Каждое из них устойчивое. Какое состояние установлено, из схемы на рис. 28 не видно. Возможны оба состояния. Высказывание, что имеется определенное состояние, скажем «левый транзистор открыт, правый закрыт», несет информацию 1 бит. Таким образом, с помощью триггерной схемы можно хранить информацию объемом 1 бит. Для записи информации служат оба крайних транзистора – левый и правый, функции которых мы теперь и рассмотрим. Если к базе левого транзистора (вход *R*) в течение короткого времени приложить положительное электрическое напряжение, соответствующее сигналу единицы, то после этого оба левых транзистора становятся открытыми, а оба правых – закрытыми. Если раньше схема уже была в этом состоянии, она в нем и останется. Если нет (левые транзисторы закрыты, правые открыты), то схема меняет свое состояние. В любом

случае после приложения импульса единицы ко входу *R* схема будет находиться в состоянии «слева открыто, справа закрыто». Значение единицы записалось в триггерную память. Состояние схемы считывается на обоих выходах *Q* и \bar{Q} . В зависимости от того, какая сторона открыта – левая или правая, – на выходе имеется высокий потенциал (единица) или низкий (ноль). Считывая этот потенциал, мы определяем, что хранится в памяти – единица или ноль.

Конденсаторные схемы памяти

Точно так же, как и в триггерной схеме, оба необходимых состояния можно реализовать с помощью конденсатора. Такая схема памяти показана на рис. 29. Кроме конденсатора здесь имеется транзистор, который, однако, к хранению информации не имеет никакого отношения. Заряженное состояние конденсатора отвечает единице, а разряженное – нулю. Когда конденсатор заряжен, а транзистор открыт, электрический заряд может уйти через выход, т.е. будет выдана хранившаяся в памяти единица. Если же конденсатор разряжен, то заряд отсутствует, т.е. выдается хранимый в памяти ноль. Но состояние конденсатора можно изменить, т.е. записать информацию. Функции транзистора более подробно мы рассмотрим несколько позднее. Однако хранение информации с помощью конденсатора осуществляется не так просто, как показано на рис. 29. Проблема заключается в том, что из-за неизбежных токов утечки конденсатор более или менее быстро разряжается, да и при считывании зарядного состояния часть заряда уходит через шину считывания. Поэтому время от времени хранимый заряд необходимо «освежать», чтобы не терять информацию. Для этого требуются дополнительные элементы, которые усложняют саму по себе простую конденсаторную схему памяти. В качестве конденсаторов чаще всего используются полевые МОП-транзисторы.

Схемы памяти для хранения 1 бит информации называют *ячейками запомина-*

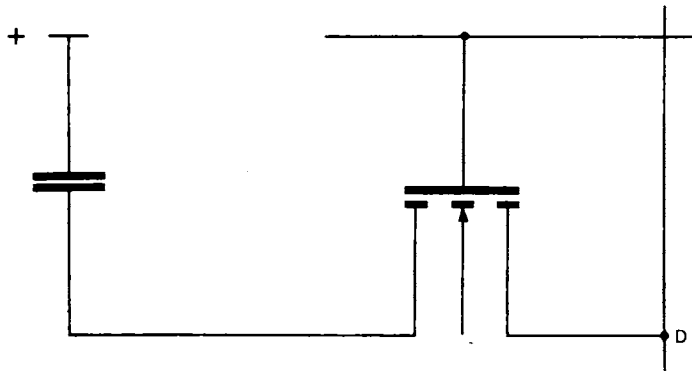


Рис. 29. Схема памяти, в которой используется конденсатор.

ющего устройства. Показанная на рис. 28 схема является примером ячейки *статического*, а на рис. 29 — *динамического* ЗУ. Определение «динамическое» говорит о том, что записанное состояние подвержено временным изменениям, о которых мы говорили выше. Из отдельных ячеек можно собирать запоминающие устройства, способные хранить крупный объем информации. При этом стремятся обойтись как можно меньшим числом внешних выводов: ведь если к каждой ячейке ЗУ подводить шины записи и считывания, то в запоминающем устройстве на 16 бит потребовалось бы $2 \times 16 = 32$ вывода. Но есть и другой путь существенного сокращения числа выводов, когда применяются всего одна шина считывания и одна шина записи, соединяющие все ячейки ЗУ. Так как, однако, запись или считывание информации должны осуществляться только в одной ячейке ЗУ, а не во всех одновременно, необходимо предусмотреть возможность выбора определенной ячейки ЗУ, или, как принято говорить, *адресную выборку*.

Адресная выборка ячеек ЗУ

Для решения этой задачи ячейки ЗУ располагают в форме квадратной матрицы. Каждая ячейка находится в точке пересечения определенного столбца с определенной строкой матрицы. Чтобы найти нужную ячейку, необходимо знать номер ее столбца и строки. Если в ЗУ имеется

$N \times N$ ячеек, то для адресной выборки определенной ячейки требуется $N + N$ выводов. При 16 ячейках это означает 8 выводов, а вместе с шинами записи и считывания их становится 10, т. е. гораздо меньше по сравнению с тем случаем, когда каждая ячейка ЗУ имеет собственные шины записи и считывания. Число выводов для адресной выборки можно уменьшить, если закодировать номера строк и столбцов. При использовании двоичного кода матричная память 4×4 вместо 2×4 содержит всего $2 \times \log_2 4$ выводов. Во всех схемах памяти сегодня применяется кодирование адресов. Так как же можно с помощью электронной схемы реализовать адресную выборку? Предположим, что ячейку ЗУ привели в готовность для записи или считывания, подав импульс единицы на дополнительный вход этой ячейки и приняв, что импульс нуля на этом входе вообще блокирует ячейку для записи или считывания информации. Сделать это можно, соединив, например, вход записи или выход считывания через МОП-транзистор с шиной записи или шиной считывания, как это показано на рис. 29. Электрод затвора данного транзистора в таком случае становится дополнительным входом. Когда подача напряжения на затвор открывает этот транзистор, можно осуществлять запись или считывание. Если же транзистор заперт, то запись или считывание не могут быть осуществлены.

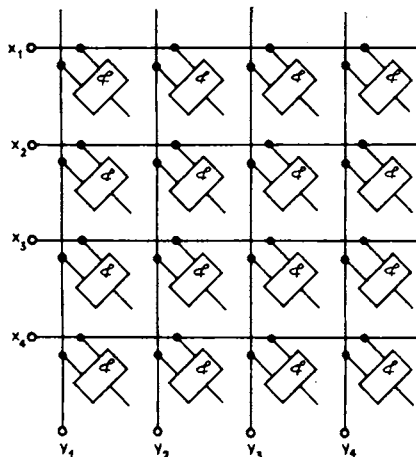


Рис. 30. Схема адресной выборки ячеек ЗУ.

Схема адресной выборки доукомплектованной таким образом ячейки ЗУ может быть построена на логических элементах И. К каждой ячейке ЗУ относится свой логический элемент И. Его выход соединен с электродом затвора дополнительного транзистора ячейки ЗУ. На рис. 30 показана (для простоты без двоичного кодирования) схема адресной выборки 32×16 бит, снабженная условными обозначениями логических операций. Если требуется вызвать ячейку ЗУ во второй строке третьего столбца, то на входы x_2 и y_3 соответственно следует подать единичный импульс напряжения, а на все остальные входы — нулевой. В таком случае на выходе одного-единственного элемента И (рис. 29) появится единичный импульс, а именно на ячейке второй строки третьего столбца. Запись и считывание могут быть осуществлены только на этой ячейке ЗУ. Можно, однако, полностью отказаться от дополнительной схемы адресной выборки, состоящей из элементов И, используя в этих целях непосредственно транзисторы ячеек ЗУ на рис. 29. Приложив положительное электрическое напряжение к электродам затворов всех транзисторов в одной строке (шина выборки слова), осуществляют выборку строки, а меняя напряжение на электродах всех транзисторов одного столбца (разрядная шина), устанавли-

вают столбец. Теперь полностью готовая к адресной выборке ячейка динамического ЗУ состоит лишь из конденсатора и МОП-транзистора. Наряду с описанным выше ЗУ с произвольной выборкой каждой ячейки существуют ЗУ с последовательной выборкой. Представим себе, что ячейки ЗУ расположены в одну строку. С шиной записи и считывания соединена лишь одна ячейка, расположенная на дальнем конце строки справа. Если сделать так, что отдельные ячейки в определенном ритме будут передавать хранящиеся в них данные соседним ячейкам, т.е. правая ячейка в левую и т.д., то за один полный цикл такой передачи данные всех ячеек последовательно один раз поступят в шину записи и считывания, где могут быть сняты или изменены. Особое значение для реализации последовательной выборки имеют МОП-структуры. Как уже упоминалось, информация может храниться в конденсаторе в виде электрического заряда. Но вместо конденсатора используются МОП-транзисторы! Заряд накапливается под затвором. Чтобы получить ЗУ с последовательной выборкой, требуется МОП-транзистор с большим числом затворов, расположенных в одну строку. Под действием импульсов электрического напряжения хранимый заряд переходит от одного затвора к другому. В этом случае говорят о приборах с зарядовой связью, или ПЗС.

Счетные схемы

К основным операциям, которые приходится выполнять с нулевыми и единичными импульсами при обработке информации, относится счет. Счет импульсов в серии можно рассматривать как особую форму записи информации в ЗУ. Поэтому счетные схемы очень похожи на схемы памяти. Счет до двух можно реализовать с помощью схемы, показанной на рис. 31. Здесь мы также воспользуемся логическими символами, приведенными на рис. 20; это делает схему более наглядной, хотя на первый взгляд она кажется весьма сложной. В электронике вообще

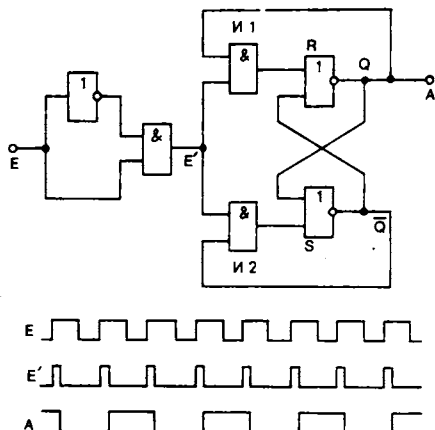


Рис. 31. Счетная схема. Эта схема считает до двух.

очень часто прибегают к логическим схемам вместо электрических, когда хотят представить в более понятной форме сложные схемные решения.

Разбор схемы на рис. 31 мы осуществим в несколько этапов. Обратимся вначале еще раз к простой триггерной схеме, которая является составной частью счетной схемы на рис. 31. Вспомним рис. 28, где в триггерной схеме используются электрические условные обозначения. Если их заменить логическими символами, то получим логическую триггерную схему, представленную ниже на рис. 32,а. Распределение состояний выводов дано в табл. 5. Зачеркнутые варианты ведут к

возникновению логических противоречий. Обоим логически приемлемым вариантам соответствуют два установившихся состояния триггерной схемы. Другая подсистема, также входящая в счетную схему на рис. 31, назначение которой мы рассмотрим отдельно, изображена на рис. 32,б. Эта схема формирует логическое выражение $E' = E \wedge \bar{E}$, которое всегда равно нулю. По правилам логики на выходе E' , таким образом, всегда имеется нуль вне зависимости от того, что на входе E — нуль или единица. В реальных схемах логические операции реализуются с помощью транзисторов, а транзисторы, как мы знаем, не отличаются безграничным быстродействием: напротив, они работают с определенным временем задержки. Конкретно в нашем случае это означает, что входной импульс после отрицания несколько позже поступает на верхний вход элемента И, нежели сам входной импульс на нижний вход. Если до ввода импульса верхний вход E был уже занят единицей и $E' = 1$, то на выходе у нас единица будет находиться до тех пор, пока сформированный в логической схеме НЕ нулевой импульс не поступит на верхний вход элемента И. Начиная с этого момента $E' = 0$. Если $E = 0$, то на выходе всегда будет нуль, т.е. и в течение задержки на логической схеме НЕ. В правой части на рис. 32,б внизу показана серия импульсов, возникающая на выходе реальной электронной схемы при равномерном вводе нулевых и единичных импуль-

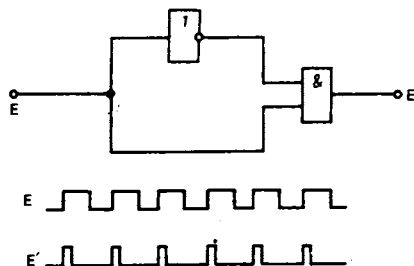
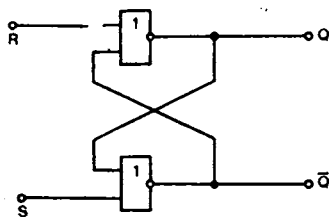


Рис. 32. а — логическая схема триггера; б — логическая схема для формирования коротких импульсов.

Таблица 5. Распределение состояний выводов триггерной схемы. Зачеркнутые варианты исключаются.

R	1	0	1	0	1
S	0	1	0	1	1
Q	0	1	1	0	0
\bar{Q}	1	0	0	1	1

сов. Эта серия состоит из очень коротких единичных импульсов и появляется, когда на входе нулевые импульсы переходят в единичные импульсы, т. е. на положительных фронтах серии входных импульсов.

Итак, теперь мы готовы к рассмотрению счетной схемы на рис. 31. Подадим на вход E равномерную серию нулевых и единичных импульсов. Пусть изображенная здесь триггерная схема находится в состоянии $R = 0$, $S = 1$, $Q = 1$ и $\bar{Q} = 0$. Что же произойдет в этом случае? На E' мы получим показанную на рис. 32,б серию очень коротких единичных импульсов. Они поступят соответственно на один из входов обоих элементов И. В таком случае на элементе И1 при появлении одного такого короткого единичного импульса на нижнем входе в течение короткого времени на обоих входах будет единица, так как $Q = 0$, а $\bar{Q} = 1$. На выходе элемента И1 в результате кратковременно появляется единичный импульс. Короткий единичный импульс поступает на вход R триггерной схемы, на котором до сих пор был нуль, и переключает ее в другое состояние. Теперь мы имеем $R = 1$, $S = 0$, $Q = 0$ и $\bar{Q} = 1$. В состоянии схемы ничего не меняется, пока на E' снова не появится короткий положитель-

ный импульс. Вся история повторяется с той лишь разницей, что теперь единица будет не на \bar{Q} , а на Q , а это влечет за собой появление короткого единичного импульса на выходе элемента И2, а не элемента И1. Короткий единичный импульс поступает на вход S триггерной схемы, ранее занятый нулем, и переключает ее в другое состояние. Теперь мы снова имеем $R = 0$, $S = 1$, $Q = 1$ и $\bar{Q} = 0$. Первоначальное состояние восстановлено, и цикл может быть повторен снова. Для выполнения описанных операций нам потребовались два положительных импульса. Читатель уже наверняка догадался, что в ответ на два положительных импульса на входе появляется один положительный импульс на выходе A , что и показано на рис. 31 внизу, где изображены серии импульсов на входах E и E' и выходе A . Видно, что число импульсов на выходе схемы вдвое меньше, чем на входе. После каждого второго импульса на входе появляется один импульс на выходе. Схема считает до двух. Соединив последовательно несколько таких схем, например связав выход предыдущей схемы с входом последующей, число импульсов можно еще уменьшить. При n схем отношение пересчета будет равно $1:2^n$, т. е. на 2^n импульсов на входе первой схемы мы получим один импульс на выходе n -й схемы (рис. 33). Вся схема будет считать до 2^n . С помощью десяти схем можно сосчитать до $2^{10} = 1024$. Понятно, что таким образом можно построить схему для кварцевых часов. Более подробно мы остановимся на этом в гл. 6.

Схемы памяти и счетные схемы являются примером реализации сложных функций с помощью элементарных логических операций. Однако в обоих случаях речь идет не о комбинационных схемах, с которыми до сих пор мы имели дело применительно только к элементарным логическим операциям. Ниже мы рассмотрим некоторые более сложные комбинационные схемы, имеющие практическое значение для обработки информации.

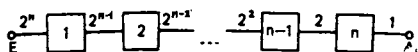


Рис. 33. Схема счета до 2^n . Квадратами условно обозначаются схемы, аналогичные представленной на рис. 31. 2^n импульсам на входе E соответствует 1 импульс на выходе A .

Постоянная память

Обратимся сначала к постоянной памяти, о которой коротко уже упоминалось. В качестве ячеек ЗУ здесь можно использовать простые МОП-транзисторы, скомпонованные в виде матрицы (рис. 34). Электроды затворов полевых транзисторов соединяются или же не соединяются с x -шинами ЗУ. В зависимости от этого ячейка ЗУ занята единицей или нулем, чему можно дать следующее объяснение. Если на y_2 -шину (рис. 34) подан положительный электрический потенциал, то при положительном напряжении на x_1 -шине ток проходит через y_2 , т. е. ячейка x_1y_2 выдает единицу. Если же осуществляется выборка ячейки x_2y_2 , когда положительный импульс подается на x_2 , а не на x_1 , то через y_2 ток не проходит и ячейка x_2y_2 выдает ноль.

Схемы кодирования и декодирования

В связи с адресной выборкой мы упоминали о кодировании чисел. Схемы, которые переводят числа из одного кода в другой, называют *схемами кодирования*. *Схемы декодирования* решают прямо противоположные задачи. На рис. 35 показана схема декодирования записанного в двоичной системе номера строки матричной памяти 4×4 . По табл. 6 можно определить, следствием каких напряжений на обоих входах являются напряжения, снимаемые с четырех выходов. Предоставляем сделать это читателю. Каждое имеющееся на входах и закодированное двоичным кодом число от 0 до 3 дает на одном выходе единицу и нули на трех остальных выходах. Выход, на котором имеется единица, однозначно сопо-

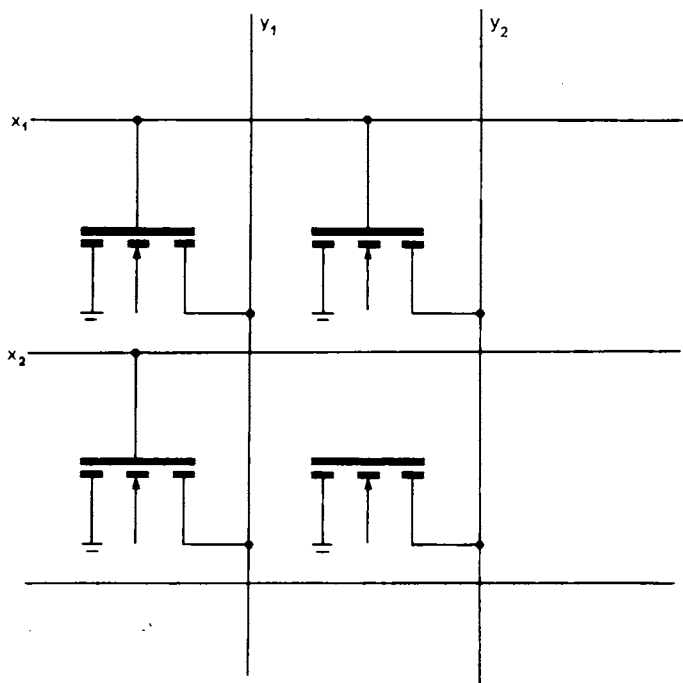


Рис. 34. Принципиальная схема постоянной памяти (ПЗУ).

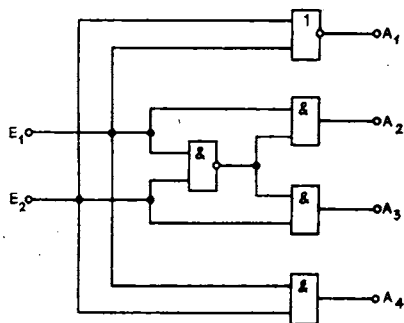


Рис. 35. Схема декодирования.

ставлен с двоичным числом на входе. При занятости двух выходов одним определенным двоичным числом можно точно выбрать лишь один из четырех выходов. Поэтому в данном случае говорят о форме выборки «1 из 4».

Мультиплексор

При обработке информации нередко возникает задача преобразования импульсов, передаваемых одновременно по нескольким каналам связи, в серию импульсов, последовательно поступающих по одному каналу связи. Эту задачу решает схема уплотнения каналов связи — так называемый *мультиплексор*, а вот для обратного преобразования серии разделенных временными интервалами импульсов одного канала в импульсы, передаваемые параллельно и одновременно по разным каналам, используется *демультиплексор*. Схема уплотнения изображена на рис. 36, а. Входы T_1 , T_2 , T_3 и T_4 предназначены для ввода тактовых импульсов. Форма четырех тактовых импульсов $T_1 - T_4$, а также импульсов на входах $E_1 - E_4$ и последовательность импульсов на выходе показаны на 36, б. Благодаря тактированию единичный импульс, имеющийся на первом такте на входе E_1 , может идти до выхода A , а вот для импульсов трех других входов путь к выходу закрыт. На втором такте тактовый импульс с T_2 открывает путь для нулевого импульса, имеющегося на входе E_2 , и т. д. Итак,

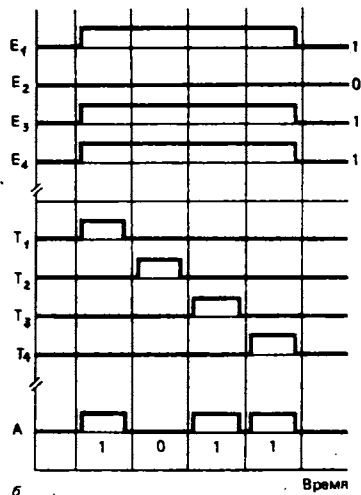
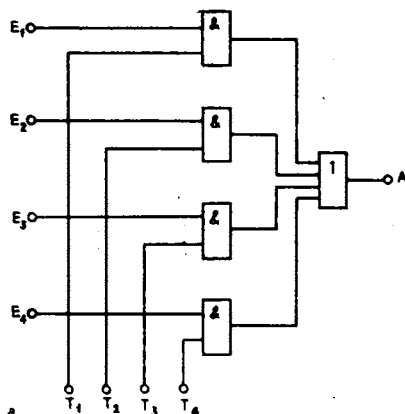


Рис. 36. Мультиплексор. а — схема; б — импульсы на входах $E_1 - E_4$, тактовые импульсы $T_1 - T_4$ и последовательность импульсов на выходе A .

Таблица 6. Распределение состояний входов и выходов схемы декодирования на рис. 35.

E_1	E_2	A_1	A_2	A_3	A_4
0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1

одновременно имеющиеся на четырех разных входах импульсы действительно преобразуются в серию разделенных во времени импульсов, которую можно снять с одного выхода.

Суммирующие схемы

Другой имеющей важное значение операцией является сложение двоичных чисел. Рассмотрим сначала схему для суммирования двух однозначных двоичных чисел x, y . Результат может оказаться не только однозначным, но и двузначным двоичным числом (см. табл. 7).

Обозначим цифру первого разряда результата через z , а второго — \bar{u} (\bar{u} получается переносом из первого разряда во второй). Обе цифры можно получить как результат следующей комбинации элементарных логических операций:

$$z = (\bar{x} \wedge y) \vee (x \wedge \bar{y}),$$

$$\bar{u} = x \wedge y.$$

Для проверки обратимся к таблице значений. Если, к примеру, $x = 0, y = 1$, то при определении z из нашего уравнения можно принять такой ход рассуждений: $\bar{x} = 1$, значит, $\bar{x} \wedge y = 1, \bar{y} = 0$, а следовательно, $x \wedge \bar{y} = 0, 1 \vee 0 = 1$, и результат решения приведенного здесь уравнения равен единице, что и подтверждает таблица значений. Определение z по указанному уравнению выполняет логическая схема, показанная на рис. 37, которую расширили с таким расчетом, чтобы она могла рассчитывать еще и перенос \bar{u} . Такая схема называется «полусумматором». Если не разбирать в подробностях прин-

Таблица 7. Численные значения для суммирования двух однозначных двоичных чисел

x	y	z		$+ \bar{u}$
		1-й разряд	2-й разряд	
0	0	0	0	
0	1	1	0	
1	0	1	0	
1	1	0	1	

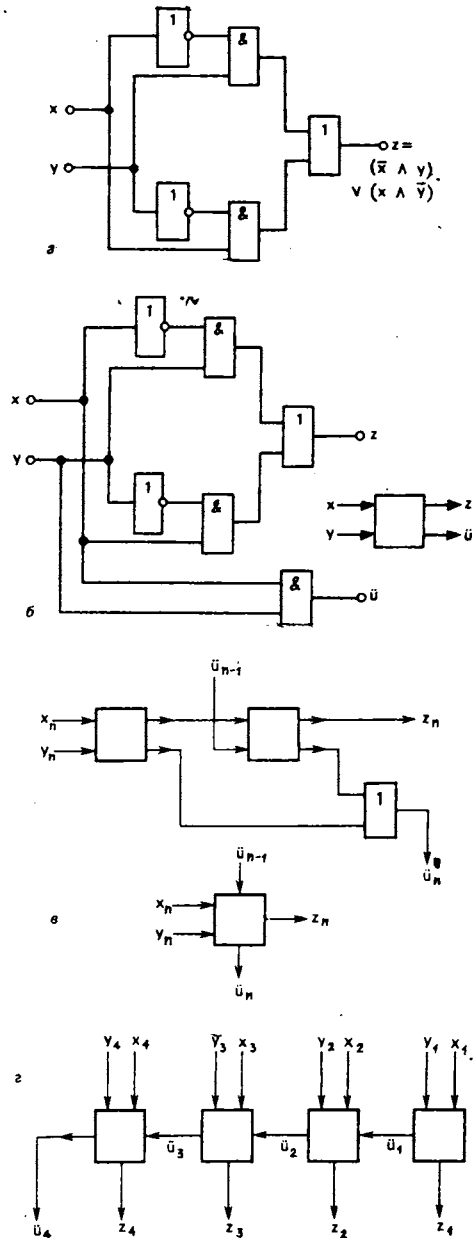


Рис. 37. а — схема для расчета первого разряда суммы двух двоичных чисел; б — схема для расчета обоих разрядов (полусумматор); в — схема для расчета переноса из предыдущего разряда (полный сумматор из двух полусумматоров); г — схема для расчета суммы двух четырехзначных двоичных чисел $x_4x_3x_2x_1$ и $y_4y_3y_2y_1$.

цип действия полусумматора и основное внимание сосредоточить на результате его работы, то эту схему можно рассматривать в виде блока с двумя выходами и двумя входами, как это и сделано на рис. 37,б.

А теперь представим, что нам нужно сложить два N -значных двоичных числа $x_N x_{N-1} \dots x_1$ и $y_N y_{N-1} \dots y_1$. Обозначим сумму как $z_{N+1} z_N \dots z_1$. В таком случае справедливо

$$\begin{array}{r} + \quad x_N x_{N-1} \dots x_1 \\ \quad y_N y_{N-1} \dots y_1 \\ \hline z_{N+1} z_N z_{N-1} \dots z_1 \end{array}$$

При определении суммы необходимо учитывать, что, начиная со второго разряда, требуется складывать не только цифры для соответствующего разряда, но и перенос из предыдущего разряда. Рассмотрим, к примеру, n -й разряд: z_n является цифрой первого разряда суммы $x_n + y_n + \dot{y}_{n-1}$. Здесь \dot{y}_{n-1} означает перенос из $(n-1)$ -го разряда. С помощью двух полусумматоров легко можно рассчитать z_n . Соответствующая схема показана на рис. 37,в. Чтобы получить перенос \dot{y}_n , нам остается лишь приплюсовать перенос, имеющийся на выходе первого полусумматора, к переносу второго полусумматора, как это сделано на рис. 37,в. Такую схему называют полным сумматором. Ее можно упростить, опять же если рассматривать только результат работы схемы, получив три входа и два выхода, что также отражено на рис. 37,в.

А теперь на примере рис. 37,г рассмотрим сложение четырехзначных двоичных чисел. Перенос \dot{y}_4 равен либо $0 \cdot 2^4$ (т.е. переноса нет), либо $1 \cdot 2^4 = 16$. Если счет выполняется в закодированной двоичным кодом десятичной системе, то перенос из одной тетрады в другую равен не 16, а 10. Вот здесь впервые вызывает осложнения параллельное использование двоичной и десятичной систем. Обе системы счисления вступают в противоречие, и для их примирения требуются дополнительные операции. Но на этом

более подробно останавливаться мы не будем.

Вернемся к довольно наглядной схеме на рис. 37,г, представив, что вместо полных сумматоров и полусумматоров у нас вычерчены все подсхемы с детализировкой вплоть до отдельных схем ИЛИ-НЕ и И-НЕ, и сразу убедимся в достоинствах блок-схем. С их помощью можно уровень за уровнем компоновать сложные схемы (схема на рис. 37,г выполняет 52 логические операции и содержит несколько сотен элементов), не испытывая неудобств в связи со сложностью построения каждого уровня в отдельности. На каждом уровне встречаются только сравнительно простые схемы. Представлять себе электронные принципы реализации поставленных задач нам нужно лишь на самых низших уровнях, т.е. уровнях реализации элементарных логических операций, так как более высокие уровни строятся из элементов низшего уровня.

Аналоговые интегральные схемы

До сих пор мы ограничивались рассмотрением схем, используемых для цифровой обработки информации, ибо эта форма является для микроэлектроники наиболее удобной. Типичными аналоговыми ИС, используемыми в полупроводниковой микроэлектронике, являются ИС усилителей аналоговых сигналов. Наиболее распространенными из универсальных усилительных ИС можно, конечно, считать так называемые операционные усилители. Аналоговые ИС служат также для обработки сигналов (остающихся пока еще большей частью аналоговыми) в видеоманитфонах и другой бытовой радиоэлектронной аппаратуре. Все большее значение приобретают ИС, способные осуществлять преобразование аналоговых сигналов в цифровые и наоборот. Их называют аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями. Понятно, что ИС аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей наряду с циф-

ровыми всегда содержат аналоговые под-схемы. На ИС аналого-цифрового преобразователя, показанной на рис. 38, мы остановимся специально.

Аналого-цифровой преобразователь

Аналоговая часть этой во всем остальном цифровой ИС представлена компаратором, изображенным на рис. 38,а в виде треугольника с двумя входами и одним выходом. Принцип работы компаратора становится понятным из рис. 38,б. Компаратор сравнивает имеющиеся на входах E и R напряжения U_E и U_R . Если U_E больше U_R , мы получаем на выходе положительное напряжение U_S , если же U_E меньше U_R , то отрицательное напряжение ($-U_S$). Важным является то, что выходное напряжение U_A лишь по своему знаку,

но не по абсолютному значению зависит от разности напряжений на входах. Абсолютное значение остается постоянным вне зависимости от того, какую разность напряжений — положительную или отрицательную — мы имеем на выходе. На выходе компаратора может быть только одно из двух напряжений, а именно $+U_S$, пригодное для дальнейшего использования в качестве единичного сигнала, и $-U_S$ — в качестве сигнала нуля. По своей сути компараторы являются дифференциальными усилителями, но с ограниченным выходным напряжением. Поэтому их можно выполнить на базе полупроводниковых усилительных элементов.

После того как мы выяснили принцип работы компаратора, легче будет понять принцип функционирования всей схемы аналого-цифрового преобразователя на рис. 38,а. Данная схема почти буквально

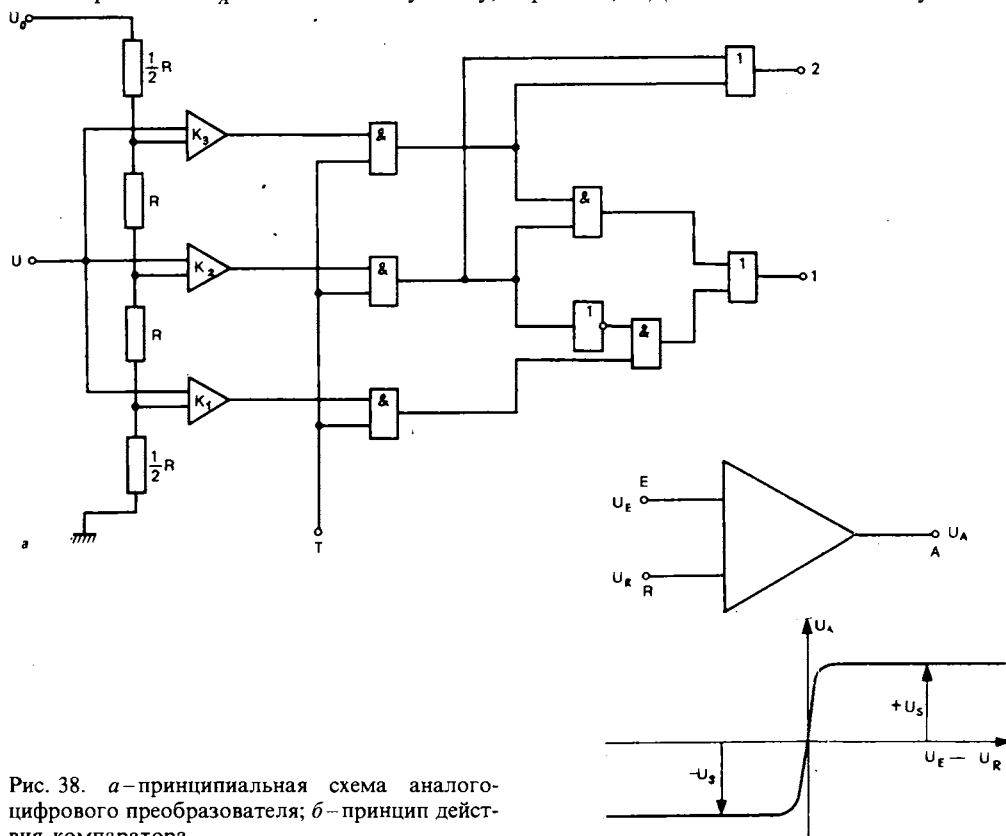


Рис. 38. а — принципиальная схема аналого-цифрового преобразователя; б — принцип действия компаратора.

Таблица 8. Пояснения к схеме аналого-цифрового преобразователя на рис. 38

Напряжение на аналоговом входе	Округленное значение напряжения	Состояния выходов компараторов			Состояния двоичных выходов	
		K_3	K_2	K_1	y_2	y_1
$5/6 - 1U_0$	$3 \cdot U_0/3$	1	1	1	1	1
$3/6 - 5/6 U_0$	$2 \cdot U_0/3$	0	1	1	1	0
$1/6 - 3/6 U_0$	$1 \cdot U_0/3$	0	0	1	0	1
$0 - 1/6 U_0$	$0 \cdot U_0/3$	0	0	0	0	0

выполняет то, о чем мы говорили в начале этой главы применительно к получению цифровых сигналов из аналоговой серии импульсов. Советуем читателю освежить в памяти этот способ, так как мы сейчас будем в своих рассуждениях опираться непосредственно на него. Разбивка шкалы напряжений на отдельные интервалы осуществляется за счет последовательного соединения резисторов. Значения напряжений на рис. 38,а, если смотреть сверху вниз, равны $5/6 U_0$, $3/6 U_0$ и $1/6 U_0$. Напряжение U_0 надо сделать таким, чтобы все значения напряжения U в аналоговой серии импульсов были меньше U_0 . С другой стороны, напряжение U_0 не только не должно быть чересчур большим, но и—при соблюдении условия $U < U_0$ —снижено до минимально возможного, чтобы при дискретизации значений напряжения не растерять точность. Компаратор K_3 (рис. 38,а) устанавливает, превышает ли напряжение U напряжение $5/6 U_0$. Если это так, то на выходе компаратора K_3 появляется единица, если $U < 5/6 U_0$, и нуль, если $U < 3/6 U_0$. На выходе компаратора K_2 будет единица, если $U > 1/6 U_0$, и нуль, если $U < 1/6 U_0$. Таким образом, напряжение U попадает в один из четырех интервалов табл. 8 (первый столбец). Соответствующие каждому интервалу значения на выходах компараторов показаны в третьем столбце. Если в самом верхнем интервале округлить значения напряжения с избытком, а в самом нижнем—с недостатком и остальные принять на уровне средних значений,

то для четырех интервалов будут получены значения, показанные во втором столбце. Одно из имеющихся на входе напряжений U идентифицируется как одно из четырех этих значений, т.е. $3 \cdot U_0/3$, $2 \cdot U_0/3$, $1 \cdot U_0/3$ и $0 \cdot U_0/3$. Остается лишь закодировать числа 3, 2, 1 и 0 двоичным кодом, и мы получим готовый аналого-цифровой преобразователь. Кодирование осуществляется логической схемой после выходов компараторов, точнее после логических элементов И, функции которых мы сейчас рассмотрим. Читатель сам может легко убедиться в том, что на обоих двоичных выходах y_2 (второй разряд двоичного числа) и y_1 (первый разряд двоичного числа) логической схемы имеются правильные значения, т.е. указанные в четвертом столбце табл. 7. Наш аналого-цифровой преобразователь на рис. 38,а трансформирует аналоговый сигнал в двузначное двоичное число. Если требуется повысить точность аналого-цифрового преобразования, следует сузить интервалы напряжений, т.е. взять больше компараторов. Соответственно должно быть больше и разрядов двоичного числа на выходе. Если число разрядов двоичного числа равно n , или, что одно и то же, n бит, требуется $2^n - 1$ компараторов. Это условие, естественно, соблюдается и в нашем примере: $2^2 - 1 = 3$. Схема логического элемента И на выходе каждого компаратора аналого-цифрового преобразователя на рис. 37,а гарантирует последовательную подачу аналоговых сигналов, трансформированных в цифровые, на двоичные выходы только в том

случае, если на вход T подан тактовый импульс.

Важнейшая составная часть показанного на рис. 38 аналого-цифрового преобразователя – компаратор. Он является примером аналоговой ИС. Другие аналоговые ИС мы рассматривать не будем, ибо это не даст нам ничего нового и принципиально важного для понимания микроэлектроники. Вот только не следует из этого делать вывод, будто аналоговые ИС не так важны в микроэлектронике, как цифровые. Правда, все задачи электронной обработки информации в принципе могут быть решены цифровым способом, если не принимать во внимание неизбежность округления аналоговых величин, связанного с их преобразованием в дискретные. Однако стоит ли использовать цифровой способ в тех случаях, когда для решения определенных задач, таких, как усиление аналоговых сигналов или генерация электрических колебаний; существуют хорошие аналоговые схемы? Ответ на этот вопрос зависит от технического уровня реализации цифровых схем средствами микроэлектроники, т.е. от степени интеграции элементов в ИС, от ее быстродействия и от цены. Некоторые признаки говорят о том, что с развитием техники цифровые схемы будут все больше и больше вытеснять аналоговые. Однако полностью аналоговая форма обработки информации не исчезнет, тем более что микроэлектроника позволяет существенно улучшить и аналоговые схемы. Но она будет использоваться для решения немно-

гих специфичных проблем, с которыми цифровая обработка информации справляется плохо.

Эту главу, посвященную электронным схемам, мы завершим краткими рассуждениями, имеющими большое значение для технической реализации таких схем. Речь идет о схемотехнической интеграции отдельных электронных компонентов (ЭК). Чтобы хотя бы приблизительно представить себе, сколько ЭК требуется для одной схемы, предположим, что в реальной практике для выполнения одной элементарной логической операции, т.е. для одной схемы логических элементов, требуется 10 отдельных ЭК. В счетной схеме на рис. 31 используется шесть схем логических элементов, т.е. около 60 ЭК. В наручных кварцевых часах работает примерно 30 таких схем, т.е. почти 2000 ЭК. Полный сумматор на рис. 37 с 13 схемами логических элементов имеет около 130 ЭК. Для динамической памяти, показанной на рис. 28, требуются два ЭК. В памяти на 10^5 бит имеется более 200 000 ЭК. Конечно, эти цифры очень приблизительные и вполне могут отличаться от фактических на два-три порядка. И все же даже на этих примерах видно, какое огромное количество ЭК используется в интегральных схемах, служащих для обработки информации.

В следующей главе мы переходим к вопросу о возможности промышленного изготовления интегральных схем, содержащих такое большое число электронных компонентов.

5. Технология промышленного производства изделий микроэлектроники

Электронные схемы, с которыми мы познакомились в предыдущей главе, состоят из транзисторов, диодов, конденсаторов и резисторов. Если мы хотим разобраться в методах производства таких схем, то, казалось бы, прежде всего необходимо ознакомиться с технологией изготовления отдельных электронных компонентов (ЭК). Так, во всяком случае, следовало бы подойти к освещению технологии производства изделий микроэлектроники, если бы в основе их промышленного изготовления лежала сборка схем из отдельных ЭК, т.е. методика, принятая у радиолюбителей, которые, как известно, приобретают отдельные схемные элементы и, соединяя их проводниками, собирают нужные схемы. Однако такой подход как раз и не нашел применения в микроэлектронной промышленности.

Интегральные схемы

Интегральные схемы получают не путем соединения изготовленных по отдельности ЭК. Все элементы интегральной схемы и межсоединения выполняются одновременно в *одном технологическом цикле*, т.е. вообще изготавливаются не отдельные элементы, а конструктивно законченные схемы. Именно поэтому такие изделия и называются *интегральными схемами* (ИС). Таким образом, микроэлектронная технология отличается от любой другой промышленной технологии, построенной по принципу «изготовление отдельных деталей – сборка изделий из отдельных деталей». Правда, при изготовлении ИС необходимо выполнить также и определенные сборочные операции – смонтировать полупроводниковый крис-

талл, содержащий схему, на кристаллоносителе, имеющем внешние контактные выводы, соединить его с этими выводами, а затем поместить такую сборку в герметичный корпус. Только после этого можно говорить о готовом изделии – интегральной схеме. Однако ее основной компонент – схема на полупроводниковом кристалле – изготавливается без какой-либо сборки отдельных элементов. В данном случае говорят об интегрально-групповом принципе синтеза, на котором основана технология изготовления изделий микроэлектроники. Использование подобного принципа в автомобилестроении означало бы, например, изготовление всего шасси целиком из одной металлической заготовки: весь процесс сборки сводился бы только к установке колес и кузова. Не говоря уже о том, что такой процесс невозможен с точки зрения технологии, в автомобилестроении в нем вообще нет никакой нужды. Напротив, в микроэлектронике интегрально-групповой принцип не только эффективен и необходим, но и может быть реализован на практике. Его технологическая эффективность заключается в том, что отпадает необходимость введения в схему комплекта отдельных навесных элементов путем их подключения через внешние контакты, а также использования защитного кожуха. К достоинствам можно отнести отказ от выполнения межсоединений с помощью отдельных электрических проводников. В готовой ИС элементы уже соединены друг с другом. В контактных выводах и в корпусе нуждается лишь интегральная схема в целом. А это весьма существенно удешевляет производство ИС.

Однако преимущества интегрально-

группового метода изготовления ИС состоят не только в возможности сокращения производственных затрат. Такой метод необходим, поскольку лишь он один позволяет изготавливать промышленным путем схемы, насчитывающие от нескольких десятков до сотен тысяч ЭК. Это объясняется рядом причин. Одна из них определяется надежностью схем со столь большим числом элементов. Надежность слишком мала, а частота отказов соответственно чересчур велика в тех случаях, когда схему собирают путем соединения отдельных элементов. Предположим, к примеру, что один такой элемент способен безотказно работать на протяжении 10^6 ч, т. е. более ста лет, а затем выходит из строя. Частота отказов схемы, насчитывающей 10 000 таких элементов (согласно правилам расчета вероятностей), равняется в этом случае приблизительно $10^{-6} \cdot 10^4 \text{ ч}^{-1}$, т. е. 10^{-2} ч^{-1} . Следовательно, может случиться так, что рассматриваемая схема перестанет функционировать уже через 100 ч после ее первого включения. Поскольку интегральная схема во многих отношениях сходна со схемным элементом, отличаясь от него лишь сложностью своей структуры, то можно надеяться, что изготовленные по интегрально-групповой технологии ИС будут обладать более высокой надежностью. Даже если их надежность и не удастся приблизить вплотную к надежности обычного ЭК, она, во всяком случае, не будет в 10^4 раз ниже (как в нашем примере), т. е., вообще говоря, надежность ИС должна быть гораздо выше надежности такой же схемы, собранной из дискретных элементов. Эти ожидания полностью оправдываются. Интегральные схемы действительно оказываются надежнее схем из дискретных элементов, причем не в 5 или десять раз, а на три-четыре порядка. Только благодаря использованию интегрально-групповой технологии появилась принципиальная возможность построения достаточно надежных схем, содержащих 10–100 тыс. ЭК.

Другие причины, диктующие переход на интегрально-групповую технологию,

связаны с размерами и массой отдельных ЭК. Если для сборки электронной схемы использовать ЭК объемом $0,1 \text{ см}^3$ и массой $0,1 \text{ г}$ каждый, то объем схемы из 10 000 ЭК превысил бы объем литровой бутылки, а масса ее была бы больше массы налитой в нее воды. В одних случаях с этим можно смириться, в других нельзя. Тенденция к миниатюризации явилась результатом не только и не столько желания получить малогабаритные и легкие схемы, отличающиеся высокими конструктивными и механическими показателями. Решающую роль сыграло то, что хорошие электрические характеристики – прежде всего значительное быстродействие и малое потребление мощности – можно получить только путем использования миниатюрных элементов. Миниатюризация затрагивает, следовательно, само существо ИС – ее *электрические* характеристики. А они улучшаются с уменьшением размеров элементов. Чтобы получить элементы с электрическими характеристиками, необходимыми для обработки информации, их размеры не должны превышать сотых долей миллиметра. Отдельные элементы, длина, ширина и высота которых равны сотым долям миллиметра, вообще говоря, изготовить можно, но лишь с помощью самой совершенной техники, да и обойдутся они очень дорого. Их соединение тонкими проводниками также является непростой задачей. На практике вопрос использования иной (не интегрально-групповой) технологии для изготовления ИС столь малых размеров вообще не возникает. Наши рассуждения по поводу ИС позволяют сделать следующие выводы: только интегрально-групповая технология делает возможным изготовление надежных, миниатюрных, легких и дешевых ИС малой мощности, в которых нуждается информационная техника.

Однако возможность использования интегрально-групповой технологии тесно связана со свойствами полупроводниковых ЭК и состоящих из них ИС. Представим себе еще раз структуру таких элементов, например структуру МОП-транзистора (рис. 16). Чисто внешне такой

транзистор имеет вид крохотной полупроводниковой пластины – кремниевого кристалла. В ней имеется легированная акцепторной примесью p -область, на ней – слой диэлектрика, представляющий собой двуокись кремния. На этот слой нанесен слой металлического алюминия. Кроме того, на полупроводниковой пластине имеются две легированные донорной примесью n -области, поверх каждой из которых располагается слой металлического алюминия. Размер МОП-транзистора по горизонтали составляет 10 мкм, причем в основном он определяется обеими n -областями, правой и левой, поскольку расположенная между ними область (p -канал) должна иметь минимальные размеры, чем обеспечивается максимальное быстродействие МОП-транзистора. В настоящее время канал, как правило, делают длиной около 3 мкм, хотя имеется немало таких приборов и с более короткими каналами. По вертикали размер полевого транзистора составляет всего несколько микрон. Чтобы обеспечить возможность достаточно эффективного управления проводимостью канала с помощью затвора, слой оксида должен быть очень тонким (менее 0,1 мкм).

Кремниевый кристалл МОП-транзистора должен иметь толщину порядка сотых долей миллиметра хотя бы для того, чтобы он не разрушался при малейшем прикосновении к нему, и тогда становится ясно, что сам полевой прибор занимает относительно тонкий приповерхностный слой, т. е. на него приходится всего лишь около 1% толщины полупроводникового кристалла. Остальные 99% объема кристалла, лежащего под этим слоем, выполняют роль лишь носителя МОП-транзистора или подложки. Таким образом, структуру МОП-транзистора можно охарактеризовать следующим образом: она представляет собой упорядоченные определенным образом по горизонтали и вертикали смежные области из различных материалов, располагающиеся в приповерхностном слое кремниевого кристалла. К числу этих материалов относятся p -кремний (легированный акцепторной примесью), n -кремний (легированный донорной примесью), двуокись кремния и металлический алюминий. Аналогичным образом можно описать структуры и других полупроводниковых элементов. Биполярные транзисторы, диоды, конденсаторы и резисторы представляют собой не что

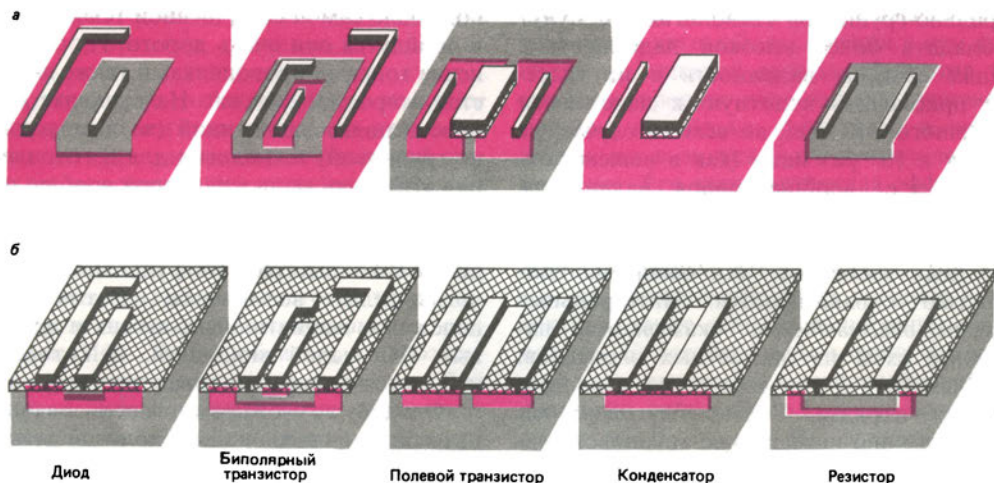


Рис. 39. Возможность реализации полупроводниковых элементов на поверхности кремниевого кристалла. а – реализация отдельных ЭК; б – те же элементы, но с поверхностным защитным слоем оксида и дополнительным p - n -переходом, обеспечивающим взаимную электрическую развязку элементов.

иное, как упорядоченные по горизонтали и вертикали области из перечисленных материалов, сформированные в приповерхностном слое кремниевого кристалла. В этом легко убедиться, обратившись к рис. 39.

А теперь мысленно попробуем собрать схему из показанных на рис. 39 полупроводниковых элементов. Для этого разместим кристаллы отдельных полупроводниковых элементов на стеклянной пластинке в соответствии с положением в схеме, а затем соединим их между собой и с выходными контактами, воспользовавшись алюминиевыми проводниками. Тот факт, что из-за миниатюрности элементов эту операцию можно выполнить только умозрительно, мы уже отмечали выше. На рис. 40 показана построенная таким путем схема логического элемента И-НЕ, которая уже приводилась на рис. 24,б. Если не обращать внимания на зазоры между отдельными полупроводниковыми кристаллами и вообразить, что алюминиевые соединительные проводники наклеены на поверхность, на которой предварительно был сформирован изолирующий слой оксида, то мы увидим, что построенная нами на стеклянной пластине структура полностью соответствует описанию структуры отдельных полупроводниковых ЭК: схема представляет собой пространственно упорядоченные области из p - и n -кремния, двуокиси кремния и металлического алюминия, которые располагаются как раз в приповерхностном слое полупроводникового кристалла. Единственное различие между структурами отдельного элемента и схемы из нескольких элементов заключается в том, что в состав последней входит большее число различных областей, да и размеры ее кристалла больше. Однако, если пренебречь размерами и сложностью схемы, можно сказать, что в структурном отношении она полностью аналогична отдельному полупроводниковому ЭК. Используя технологию, которая применяется для изготовления отдельных ЭК, можно изготовить конструктивно законченную схему, состоящую из таких компо-

нентов. Именно это мы и имели в виду, когда отмечали выше, что особые свойства полупроводниковых ЭК и построенных из них схем позволяют достичь в микроэлектронике того, чего невозможно добиться в автомобилестроении – изготовить изделие в едином технологическом цикле, т. е. наладить производство по интегрально-групповой технологии.

На одной сложности, присущей интегрально-групповой технологии изготовления электронных схем, здесь следует остановиться более подробно. Она связана с воздушными зазорами между отдельными элементами – полупроводниковыми кристаллами, представленными на рис. 40; существованием таких зазоров мы вначале пренебрегли. Эти зазоры играют важную роль: они обеспечивают электрическую изоляцию отдельных элементов друг от друга. Если полупроводниковые кристаллы без каких-либо мер предосторожности привести в контакт друг с другом, то в местах соприкосновения они окажутся связанными между собой токопроводящими соединениями, которые недопустимы в реализуемой схеме. В итоге схема перестанет функционировать. Если необходимо отказаться от воздушных зазоров, то изоляция должна быть обеспечена другими средствами. С этой целью между отдельными элементами в полупроводниковом кристалле в большинстве случаев формируют p - n -переход, к которому, как правило, прикладывается запирающее напряжение – разумеется, при условии, что такой переход не требуется для реализации самого схемного элемента. Такая возможность существует для элемента в виде МОП-транзистора, а для других элементов, изображенных на рис. 39,а, данное условие не соблюдается. Поэтому все эти элементы должны быть «опущены» в p -область, как показано на рис. 39,б. Хотя здесь для формирования одного элемента необходима большая площадь, структура ЭК остается прежней – нужно лишь выделить для него некоторую дополнительную область p -кремния. Уже отсюда становится ясно, что МОП-транзисторы лучше всего подходят

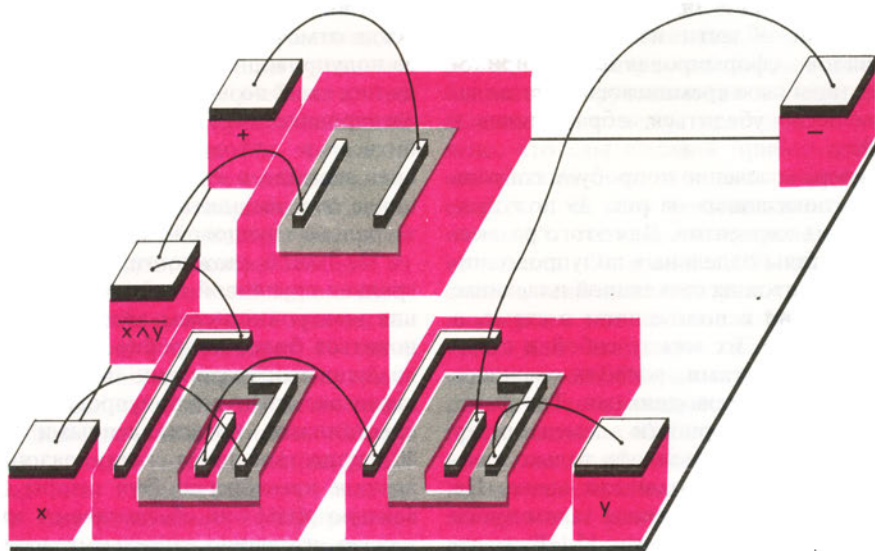


Рис. 40. Построение схемы из полупроводниковых компонентов.

для создания интегральных схем, в которых требуется использовать *большое число элементов*. Основные характеристики элемента не меняются и после введения двух слоев оксида кремния для изоляции соединительных проводников и их защиты от внешнего воздействия. На рис. 39, б изображен нижний из этих слоев.

Планарная технология

Конкретный тип интегрально-групповой технологии изготовления ИС в основном определяется тем, что ИС формируется на поверхности полупроводникового кристалла и что в направлении, нормальном к поверхности кристалла, имеется лишь несколько областей, различающихся по составу материала. Если же смотреть в горизонтальном направлении, т. е. вдоль поверхности кристалла, то можно наблюдать большое число имеющих различную протяженность областей, представленных разными материалами. Это свидетельствует о возможности создания ИС за один технологический цикл обработки поверхности кристалла. Таким образом, в микроэлектронике практически нет необходи-

мости в обработке, которая ведется в глубину и затрагивает боковые и нижнюю стороны создаваемого прибора, как это имеет место, например, в металлообрабатывающей промышленности. В ходе технологического процесса изменению по существу подвергается только одна плоскость заготовки, а именно верхняя поверхность кремниевой пластины. Такой метод обработки получил название *планарной технологии*. Заготовка, с которой мы более подробно познакомимся несколько позднее, не является одиночным кристаллом. Это диск, называемый полупроводниковой пластиной или *подложкой*. После завершения технологической обработки его можно разделить на большое число отдельных кристаллов. Для изготовления ИС используются процессы планарной технологии, объектом которых как раз и является кремниевая подложка. Ниже мы остановимся на некоторых деталях технологических процессов, причем в первую очередь обратимся к центральному, так называемому циклу 1, затем рассмотрим предшествующий ему и последующий процессы — соответственно цикл 0 и цикл 2.

Цикл 1. Оксидирование

Исходным материалом для цикла 1 является необработанная подложка из кремния.

В начале этого цикла под воздействием кислорода при температуре 1000°C на поверхности пластины формируется слой двуокиси кремния – оксид. Чтобы ускорить процесс оксидирования, кислород обычно смешивают с парами воды. Регулируя время воздействия кислорода и температуру кремниевой подложки, можно легко сформировать слой оксида нужной толщины. При подаче сухого кислорода с температурой 1050°C слой оксида растет со скоростью $0,1\text{ мкм/ч}$. В случае добавления в кислород паров воды толщина этого слоя растет (при прочих равных условиях) со скоростью $0,5\text{ мкм/ч}$.

Двуокись кремния отличается очень высокой химической стойкостью, большой механической прочностью и обладает свойствами хорошего диэлектрика, обеспечивающего надежную изоляцию расположенного под ним кремния. При изготовлении ИС слой оксида является не только электрическим *изолятором*, но и осуществляет *пассивацию*, т. е. обеспечивает электрическую и химическую стабилизацию поверхности кремния, а также служит для *маскирования* подложки, защищающего ее от нежелательных воздействий в ходе последующих этапов технологической обработки. Высокая эффективность двуокиси кремния в маскирующих, пассивирующих и электроизоляционных слоях наряду с указанными в гл. 3 физическими свойствами явилась тем важнейшим обстоятельством, которое позволило кремнию «занять доминирующее положение» среди всех полупроводниковых материалов для микроэлектроники. Если некоторые лежащие под слоем оксида области кремния требуется подвергнуть обработке, например легированию атомами фосфора, то слой оксида необходимо предварительно удалить с соответствующих участков.

Формирование структур методом фотолитографии

Выделение таких участков на кремниевой подложке, или так называемое формирование структур, выполняется с помощью процесса, получившего название *фотолитографии* (от греческих слов «*фото*» – свет, «*литос*» – камень и «*графия*» – письмо). Под воздействием света в слое оксида кремния формируется плоский рисунок. Для этого весь слой оксида предварительно покрывают светочувствительным фоторезистом. Слой фоторезиста играет роль фотографической пленки. Его можно засвечивать и проявлять. Органическим растворителем фоторезист удаляют с засвеченных участков, а с открывшихся мест (и только с них) уже можно удалить слой оксида путем последующей обработки кислотой. Если такая обработка кислотой продолжается достаточно долго, то обнажается слой кремния и таким образом вскрывается «окно» для доступа к материалу подложки, необходимого на следующей операции технологического процесса.

Травление

Эту операцию называют *травлением оксида кремния*. Помимо травления с помощью жидких реактивов (жидкостное химическое травление) сегодня все шире и шире применяют плазменное травление. Такая обработка основана на применении галогенсодержащих газов. Газ вместе с подвергаемой травлению подложкой находится в реакционной камере, где происходит электрический газовый (или плазменный) разряд, при котором галогенное соединение разлагается на компоненты. Среди них имеются обладающие сильной реакционной способностью галогенные ионы, которые энергично разрушают слой оксида. Если в реакционную камеру ввести другой газ, то вместо двуокиси кремния можно удалить слой кремния или слой металлизации. Путем плазменного травления можно снять и фоторезист. По-

скольку при изготовлении ИС необходимо выполнить целый ряд последовательных технологических операций, например легирование фосфором, за которым следует легирование бором, фотолитографическая обработка применяется многократно. Перед каждой такой операцией поверхность кристалла кремния должна подвергаться оксидированию; в результате образующийся оксид распространяется с поверхности в глубь материала. Затем с целью подготовки к следующему технологическому этапу не подвергаемые обработке участки поверхности необходимо засветить. Для избирательной засветки можно воспользоваться установкой, построенной на принципе диапроектора. Диапозитив, или фотошаблон, как его обычно называют, содержит рисунок поверхности полупроводникового кристалла, на котором засвечиваемые участки оставлены светлыми, а все остальные затемнены. Для обеспечения большей резкости контуров засветка производится излучением с как можно более короткой длиной волны. Помимо описанного нами позитивного фоторезиста, при использовании которого вытравливаются засвеченные участки, а незасвеченные, темные, сохраняются, применяется также негативный фоторезист, засветка которого приводит к противоположному результату.

Легирование

Вслед за фотолитографической обработкой выполняется операция легирования кремния примесями – фосфором или мышьяком – для получения проводимости *n*-типа и заданной концентрации носителей заряда или же операция легирования бором для получения проводимости *p*-типа. Легирование осуществляется диффузионным способом: поверхность подложки при температуре 900–1200°C подвергается воздействию атомов легирующей примеси, которые диффундируют в глубь подложки. Этого же результата можно достичь и ионной имплантацией. В данном случае поверхность подложки бомбардируют электрически заряженными атома-

ми фосфора, бора или мышьяка, т.е. ионами, предварительно ускоренными в электрическом поле. Благодаря своей кинетической энергии ионы проникают в материал подобно снарядам, врезающимся в стену, и, пройдя некоторое расстояние, останавливаются. Таким образом, они внедряются (имплантируются) в кремний. На своем пути в кремний ионы вызывают весьма значительные нарушения регулярной кристаллической решетки. Эти дефекты необходимо устранить, для чего служит последующая термическая обработка при температуре 500–900°C. Может также применяться облучение мощным световым импульсом или лазерным лучом. Как диффузионное легирование, так и ионная имплантация происходят лишь на тех участках поверхности кремния, с которых был удален слой оксида. Если оксид не удален, то примесные легирующие атомы застревают в этом слое.

Эпитаксия

Слой кристаллического кремния, определенным образом легированные примесями атомами, можно сформировать на подложке также путем выращивания. В этом случае процесс называют *эпитаксиальным выращиванием*. При обычном осаждении, например при напылении кремния на стеклянную пластину из паровой фазы, образуется слой, не имеющий упорядоченной структуры. Особенность эпитаксиального осаждения заключается в том, что формируемый слой представляет собой монокристалл. Такое упорядочение в процессе наращивания происходит под влиянием монокристаллической подложки. Она «навязывает» осаждаемому слою кремния свою собственную кристаллическую структуру. На практике в большинстве случаев используют осаждение из газовой фазы, представляющей собой смесь газообразного четыреххлористого кремния, водорода и газообразного соединения, содержащего мышьяк или фосфор, которые обеспечивают легирование, воздействуя на подложку, нагретую до

высокой температуры. Реже применяется осаждение из жидкой фазы, когда тигель с расплавом кремния и легирующих компонентов медленно перемещают вдоль поверхности кремниевой подложки. В результате образуется кремниевый слой, содержащий необходимую легирующую примесь. Эпитаксиальный процесс расширяет возможности формирования вертикальной структуры как отдельных ЭК, так и целых ИС. Это и является главной причиной применения эпитаксии при легировании кремния наряду с упомянутыми ранее технологическими процессами.

Металлизация

Для получения токопроводящих соединений (токопроводящих линий) между элементами ИС, а также между такими элементами и контактными площадками для подключения внешних цепей (или площадками для термокомпрессионной сварки) подложка полностью покрывается слоем алюминия. Это осуществляется пу-

тем напыления алюминия, который переводят в паровую фазу методом высокотемпературного нагрева или распыляют, используя пучок разогнанных до высокой скорости электронов или ионов. На кремниевую подложку алюминий оседает в виде тонкого слоя. В дальнейшем такой металлический слой подвергают фотолитографической обработке. Аналогично описанному выше селективному (избирательному) травлению отдельных участков слоя оксида кремния далее выполняется операция травления металла, в результате чего от всего слоя металлизации остаются лишь токопроводящие линии и контактные площадки для термокомпрессионной сварки (рис. 41). В заключение всю поверхность полупроводникового кристалла покрывают защитным слоем. Для этого чаще всего применяется силикатное стекло, которое затем удаляется с контактных площадок.

Пример изготовления ИС

Теперь рассмотрим еще раз описанный выше технологический процесс на некоем гипотетическом примере изготовления ИС логического инвертора, состоящей из одного *npr*-транзистора и одного резистора. Правда, по «нашей» технологии в настоящее время интегральные схемы уже не изготавливаются, но к реальным технологическим процессам, используемым в серийном производстве ИС, мы еще вернемся ниже. Сущность указанной технологии станет ясна даже из простейшего примера. На рис. 42 показаны отдельные этапы технологического процесса. Подложка, на которой предстоит сформировать интегральную схему, состоит из кремния с проводимостью *p*-типа. В результате оксидирования на подложке из *p*-кремния образуется слой оксида (а). После завершения фотолитографической обработки с использованием первого фотомаски и легирования фосфором мы получаем структуру (б), где уже просматриваются контуры транзистора (слева) и резистора (справа). Диффузия фосфора при температуре 1200°C автоматически

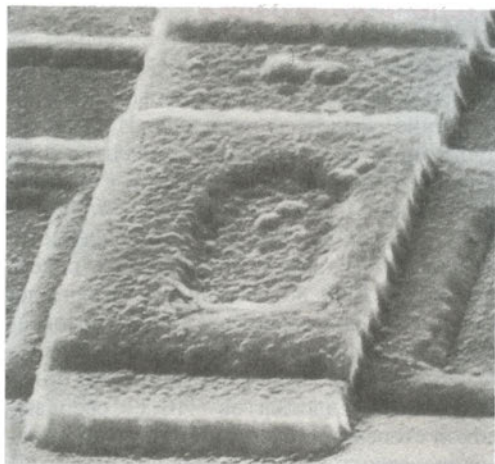


Рис. 41. Фотография металлического печатного проводника, сделанная с помощью электронного микроскопа. Канавка с правой стороны возникла при травлении избытка алюминия. Углубление в середине указывает на окно в слое оксида. В этом месте металлический проводник имеет контакт с подстилающим слоем кремния.

ведет к окислению всей внешней поверхности кристалла и одновременно служит для подготовки к последующей фотолитографической обработке (в). С помощью второго фотошаблона от слоя оксида освобождают две области на поверхности кремния, которые затем легируют бором с целью получения проводимости p -типа (г). После этого операции оксидирования (д), фотолитографии и легирования (е) повторяют еще раз, но теперь с применением третьего фотошаблона и фосфора в качестве легирующей примеси. В результате такой последовательности технологических операций возникает вторая n -область транзистора (е). Теперь использование еще одного фотошаблона позволяет «вскрыть» площадки для внешних контактов (ж). Затем на всю поверхность наносится слой алюминия (з), из которого фотолитографическим способом формируют внешние контакты для обоих элементов и соединения (и). При этом в отличие от описанного ранее фотолитографического процесса, когда применялся позитивный фоторезист, берут негативный фоторезист. По окончании всего цикла, состоящего из перечисленных операций, мы получаем nnp -транзистор и резистор (и), электрическую изоляцию которых от подложки с p -проводимостью обеспечивает p - n -переход при условии, что к последнему приложено запирающее напряжение. Для этого к подложке с проводимостью p -типа должно быть приложено отрицательное напряжение, а к обеим граничащим с ней n -областям – положительное. Таким образом, внешняя n -область транзистора становится коллектором. Примыкающая к коллектору p -область будет базой, а внутренняя n -область – эмиттером. Коллектор транзистора соединен с «выходом» резистора. «Вход» и «выход» резистора вместе с базовым и эмиттерным контактами транзистора – это четыре вывода ИС инвертора (рис. 42), которые служат для подключения внешних цепей. Итак, для изготовления такой схемы требуется 5 раз повторить фотолитографическую обработку, 3 раза – окисление, 2 раза – легиро-

вание n -примесью, а легирование p -примесью и металлизацию осуществляют однократно. Это, несомненно, приведет к немалым затратам – ведь следует учесть, что наша схема весьма проста. Однако анализ данной технологии позволяет сделать весьма интересный вывод: если на наших фотошаблонах были бы изображены рисунки структур не одного транзистора и одного резистора, а десятков тысяч таких элементов, а также структуры межсоединений и контактных площадок для термокомпрессионной сварки, то при той же последовательности технологических операций мы вместо одной схемы из двух элементов получили бы устройство, насчитывающее десятки тысяч подобных элементов. При этом не пришлось бы выполнять ни одной дополнительной операции. В планарной технологии нет никакой разницы между изготовлением одного-единственного схемного элемента, интегральной схемы из двух элементов или микросхемы, объединяющей огромное число элементов.

Степень интеграции

Сложность интегральной схемы характеризуется показателем, который получил название *степень интеграции*. ИС, насчитывающие не более 100 элементов, называют микросхемами с малой степенью интеграции. Схемы, содержащие от 100 до 1000 элементов, – это ИС со средней степенью интеграции, а микросхемы, содержащие от 1000 до нескольких тысяч элементов, имеют высокую степень интеграции и называются большими интегральными схемами (БИС). Схемы с еще большим числом элементов – ИС со сверхвысокой степенью интеграции – получили название сверхбольших интегральных схем (СБИС). В настоящее время изготавливают СБИС, которые насчитывают по нескольку сотен тысяч элементов. В лабораториях созданы интегральные схемы, содержащие до миллиона элементов. Размер кремниевого кристалла, на котором размещается ИС, относительно невелик. Если ориентировочно принять, что длина

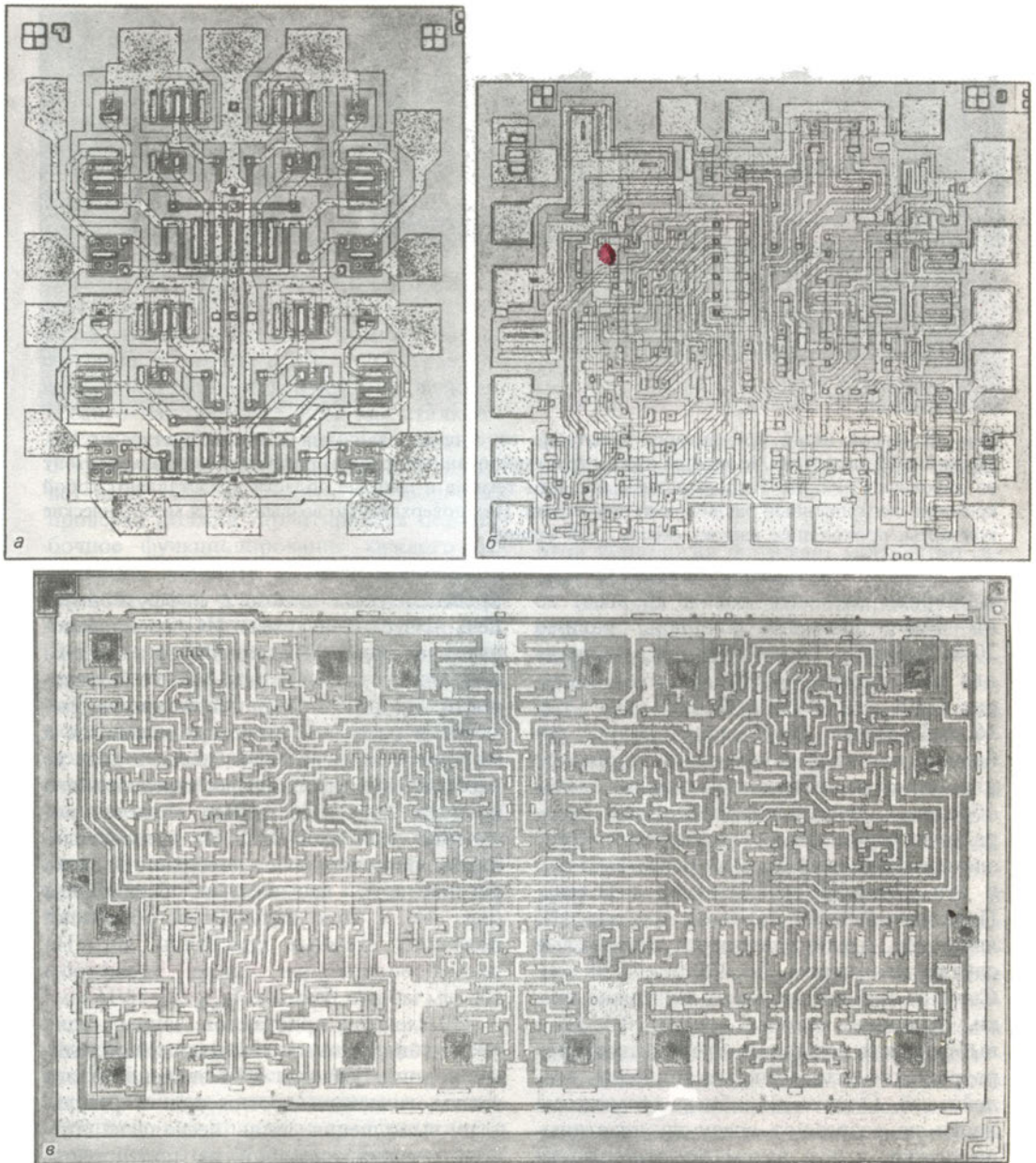


Рис. 45. Полупроводниковые кристаллы. *а* – стандартная цифровая ИС с четырьмя логическими элементами И-НЕ типа D100 (SN7400); *б* – ИС радиоприемного каскада типа A244; *в* – ИС счетчика типа D193 (SN74193).

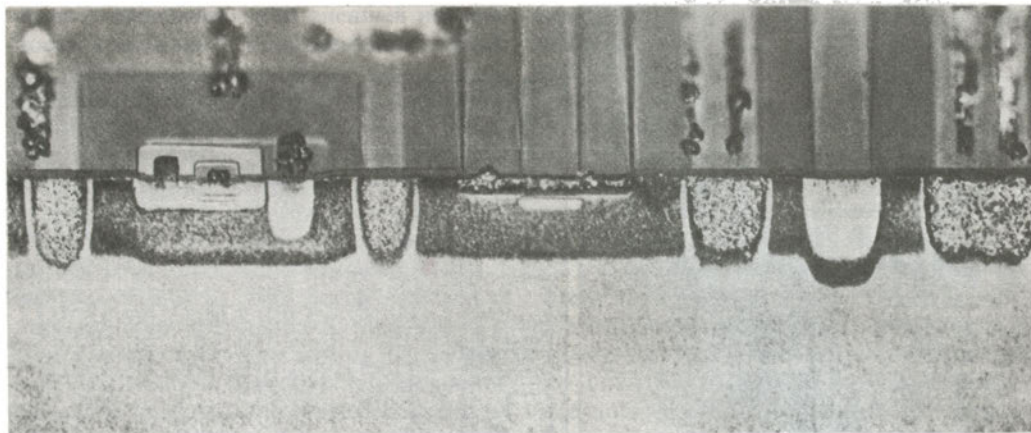


Рис. 48. Косой шлиф кремниевого кристалла со сформированными в нем структурами ИС. Тонкий слой покрытия, имеющий тонкоструктурированный (с края) рифленый профиль, состоит из двуокиси кремния. Расположенные под ним темные и светлые области представляют собой кремний, легированный различными примесями. Над поверхностью возвышаются металлические контакты, проходящие наружу сквозь слой оксида.

и ширина элемента равны 20 мкм, то он будет занимать площадь, равную $20 \times 20 \text{ мкм}^2$. Таким образом, площадь для размещения 40 000 элементов составит $4 \cdot 10^4 \times (2 \cdot 10^{-2}) \times (2 \cdot 10^{-2}) \text{ мм}^2$, т.е. 16 мм^2 . Кроме того, сюда следует добавить площадь контактных площадок для термокомпрессионной сварки. Таким образом, длина боковой стороны квадратного кристалла для размещения 40 000 элементов должна быть не менее 4 мм. Но и эти размеры сравнительно невелики. Первоначальными заготовками для ИС являются цилиндрические кремниевые слитки диаметром 70, 120 или 150 мм. Сначала эти слитки режут на тонкие диски, толщина которых — около 0,5 мм — выбрана как раз такой, чтобы исключить разрушение вследствие механических воздействий. Однако подобные кремниевые диски не разрезают сразу на пластины-подложки, чтобы затем по отдельности подвергнуть их обработке (как можно было ожидать на основании всего сказанного выше). Такой полупроводниковый диск проходит весь цикл технологической обработки, рассмотренный нами на примере изготовления одной ИС, как единое целое. На рис. 43 показана загрузка полу-

проводниковых дисков в диффузионную печь. Изготавливаемые ИС воспроизводятся на диске в том количестве, в каком они могут разместиться на его поверхности. Процесс интеграции на уровне элемента в известной мере продолжается и на уровне интегральной схемы в ходе ее изготовления, но лишь до определенного предела, поскольку целью является получение *отдельной* ИС. Из прямоугольников, вычерченных на поверхности диска устройством, называемым скрайбером (рис. 44), в ходе дальнейшей обработки получают схемные кристаллы ИС. На полупроводниковом диске диаметром 100 мм можно разместить $\pi \cdot 50 \cdot 50 / 16 \text{ мм}^2 = 490$ схемных кристаллов, занимающих рассчитанную выше площадь. Необходимо хорошо уяснить себе значение этого технологического достижения: в результате выполнения лишь нескольких технологических операций на полупроводниковом диске получают почти 500 ИС, насчитывающих по 40 000 элементов. Следовательно, кремниевая планарная технология отличается исключительно высокой производительностью. Сказанное остается справедливым даже в том случае, когда речь идет об относительно

невысоком выходе годных изделий, т.е. безотказно функционирующих ИС. Ниже мы более детально остановимся на выходе годных ИС. Для максимально раннего выявления дефектных микросхем, которое позволит избежать непроизводительных затрат на последующих стадиях технологического процесса, все ИС подвергаются строжайшей проверке, еще оставаясь на исходном полупроводниковом диске. Для этого к контактным площадкам каждой ИС подключают зонды контрольно-испытательного устройства, на которые в соответствии с программой испытаний подаются импульсы электрического напряжения. Здесь мы сталкиваемся с весьма сложной задачей, связанной с большими затратами времени. Это станет ясно, если вспомнить, что подобная проверка должна гарантировать безошибочное функционирование каждого отдельного элемента и межсоединения, а также каждого соединения между элементами и контактными площадками ИС. Дефектные ИС маркируются на диске красной точкой (рис. 44), что облегчает их выбраковку после резки полупроводникового диска на кристаллы. На рис. 45–47 приведены сделанные с помощью микроскопа фотографии отдельных полупроводниковых кристаллов, выпускаемых Комбинатом микроэлектроники ГДР. На рис. 48 показано, как выглядит такой кристалл после удаления поверхностных слоев.

Промышленная технология изготовления ИС

Ознакомившись с пассивацией, фотолитографией, травлением, эпитаксиальным выращиванием, легированием и металлизацией, мы получили представление о важнейших этапах технологического процесса изготовления интегральных схем. Итак, теперь мы знаем, как в едином технологическом цикле получают ИС, содержащие совокупность электрически связанных между собой электронных компонентов. Однако конкретная реализация

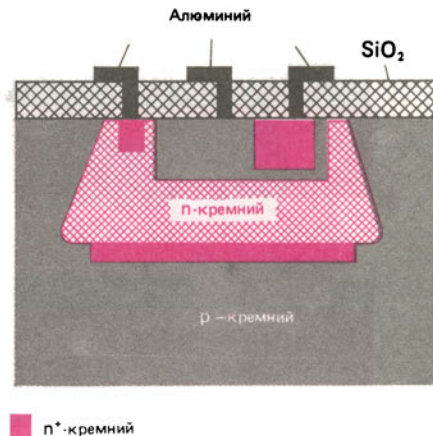


Рис. 49. Структура биполярного транзистора, реально используемого в современной микроэлектронике.

этой технологии допускает множество самых различных вариантов.

На рис. 39 продемонстрирован простейший вариант формирования полупроводниковых элементов из областей, образованных различными материалами. Однако простейший вариант почти никогда не бывает оптимальным. Придавая отдельным областям другую конфигурацию, располагая их в ином порядке и вводя дополнительно области, сформированные из других материалов, можно создать более совершенные элементы. Наряду с нормально легированным n - и p -кремнием вводятся также области сильно легированного n^+ - и p^+ -кремния. Пример на рис. 49 позволяет представить себе структуру биполярного транзистора, который в настоящее время используется в реальных ИС. Характерным здесь является наличие дополнительного, скрытого n^+ -слоя. В униполярных транзисторах интегральной схемы все каналы могут быть сформированы только из n - или p -материала. Могут также одновременно использоваться каналы с обоими типами проводимости. Вместо алюминия для реализации затвора МОП-транзистора может применяться поликристаллический кремний (поликремний) с высокой элект-

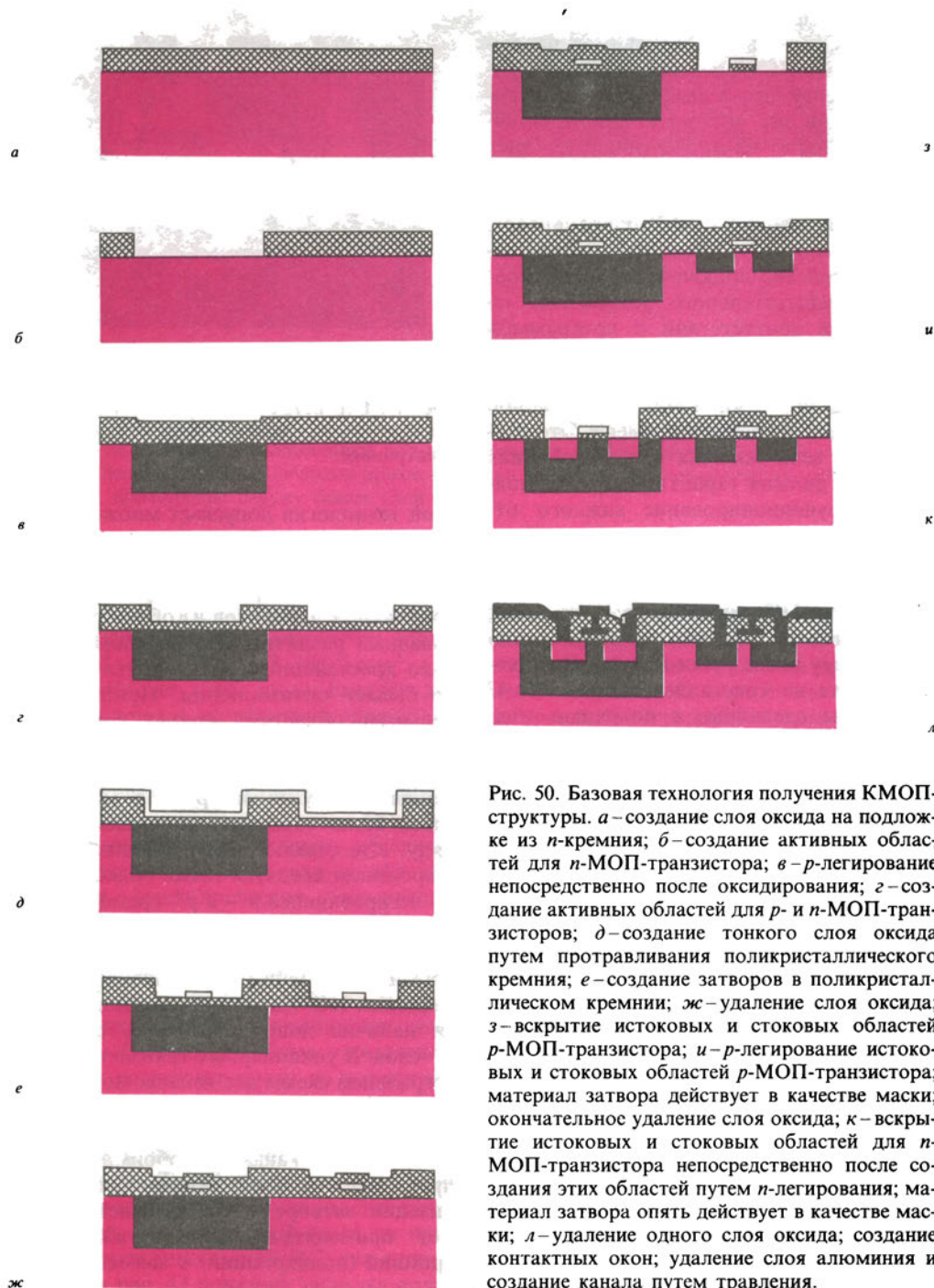


Рис. 50. Базовая технология получения КМОП-структуры. *а* – создание слоя оксида на подложке из *n*-кремния; *б* – создание активных областей для *n*-МОП-транзистора; *в* – *p*-легирование непосредственно после оксидирования; *г* – создание активных областей для *p*- и *n*-МОП-транзисторов; *д* – создание тонкого слоя оксида путем протравливания поликристаллического кремния; *е* – создание затворов в поликристаллическом кремнии; *ж* – удаление слоя оксида; *з* – вскрытие истоковых и стоковых областей *p*-МОП-транзистора; *и* – *p*-легирование истоковых и стоковых областей *p*-МОП-транзистора; материал затвора действует в качестве маски; окончательное удаление слоя оксида; *к* – вскрытие истоковых и стоковых областей для *n*-МОП-транзистора непосредственно после создания этих областей путем *n*-легирования; материал затвора опять действует в качестве маски; *л* – удаление одного слоя оксида; создание контактных окон; удаление слоя алюминия и создание канала путем травления.

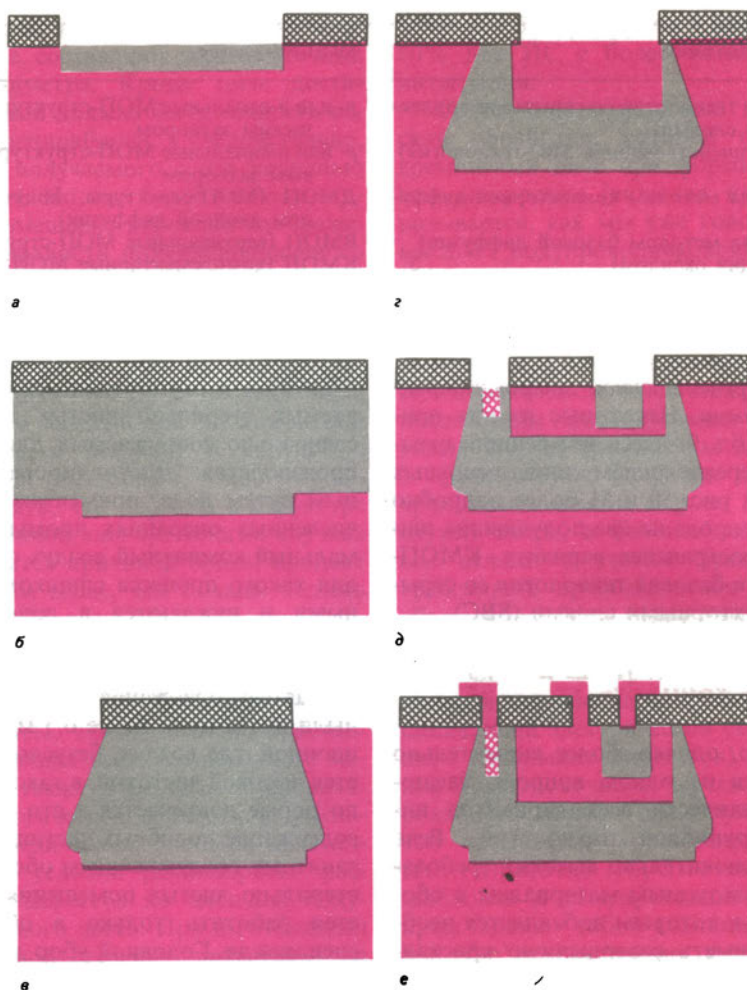


Рис. 51. Упрощенная базовая технология получения структур со скрытыми коллекторными слоями. *а* – оксидирование и создание *n*-коллекторного слоя путем диффузии (фотошаблон 1); *б* – удаление *n*-слоя; *в* – создание изолирующей рамы из p^+ -кремния путем диффузии (шаблон 2); *г* – p^- -базовая диффузия (шаблон 3); *д* – *n*-диффузия эмиттерной и контактной областей (шаблон 4); *е* – вскрытие контактных окон, металлизация (шаблон 5) и создание канала путем травления (шаблон 6).

ропроводностью. Из поликремния можно также сформировать токопроводящие линии под поверхностью кремния. Тогда в распоряжении специалиста-схемотехника окажется большое число таких линий, причем из алюминия будут выполнены лишь верхние из них. Взаимная электрическая развязка (изоляция) элементов в

пределах одной ИС может осуществляться не только с помощью запертых $p-n$ -переходов, как описывалось выше, но и другими методами, например путем формирования в промежутках между элементами областей из оксида. Реализовать как эти, так и другие не названные нами возможности позволяют многочисленные

Таблица 9. Варианты промышленной микроразлектронной технологии

Биполярная технология	МОП-технология
SBC (базовая технология со скрытыми коллекторными слоями)	<i>p</i> - или <i>n</i> -канальные МОП-структуры с металлическим затвором
ASBC (усовершенствованная SBC-технология)	<i>p</i> - или <i>n</i> -канальные МОП-структуры с кремниевым затвором
CDI (изоляция методом коллекторной диффузии)	ДМОП (МОП-структуры, полученные методом двойной диффузии)
BDI (изоляция методом базовой диффузии)	ВМОП (вертикальные МОП-структуры)
OXIS (изоляция оксидом)	КМОП (комплементарные МОП-структуры)
	КНС (структуры типа «кремний на сапфире»)

варианты *промышленной микроразлектронной технологии*. Некоторые из них приведены в табл. 9. Здесь мы решили ограничиться перечислением лишь основных из них, а на рис. 50 и 51 более подробно проиллюстрированы два получивших широкое распространение варианта – КМОП-технология и базовая технология со скрытыми коллекторными слоями (SBC).

Чистота и точность

Необходимо, однако, более внимательно остановиться на одном вопросе, касающемся практически всех вариантов интегрально-групповой технологии. Речь идет об исключительно высоких требованиях к используемым материалам и оборудованию, к которым добавляется необходимость иметь совершенную кристаллическую решетку полупроводниковых подложек. Столь высокие требования обусловлены, с одной стороны, чрезвычайно малыми размерами и сложностью различных структур ИС, а с другой – своеобразием свойств полупроводникового кристалла, о которых мы говорили в гл. 3. Электрические характеристики такого кристалла могут радикальным образом измениться при внесении в него малейшего количества загрязнений или в результате возникновения микродефектов структуры. По этой причине весь описанный технологический процесс должен основываться на использовании химических веществ исключительно высокой чистоты

(99,999%) и осуществляться в так называемых стерильно чистых помещениях, специально сооружаемых для подобного производства. Дистиллированная обычным путем вода, применяемая в многочисленных операциях промывки, и нормальный комнатный воздух оказываются для такого процесса слишком загрязненными и нуждаются в дополнительной очистке. В одном кубическом метре воздуха стерильно чистого помещения допускается содержание всего 3500 частиц пыли диаметром более 0,5 мкм. В операционной, где воздух, безусловно, отличается высокой чистотой, в таком же объеме по норме допускается в сто раз большее содержание подобных частиц. Персоналу, занятому обслуживанием оборудования в стерильно чистых помещениях, разрешается работать только в обеспыленной спецодежде. Головной убор должен плотно закрывать волосы. Рис. 43 позволяет получить некоторое представление об особенностях работы в стерильно чистом помещении. Чистота, однако, является лишь одним из условий, за соблюдением которых тщательно следят на всех стадиях технологического процесса. Высокие требования предъявляются, например, к геометрической точности шаблонов для фотолитографии. Достаточно вспомнить, что среди формируемых в кристалле структур есть такие, размер которых составляет всего 1 мкм – скажем, канал МОП-транзистора. А точность проекции схемного рисунка должна быть по крайней мере на порядок выше. Отклонения от

номинального размера допускаются в пределах нескольких десятых долей микрометра, т. е. составляют десятитысячные доли миллиметра. Кроме того, достаточно высокой должна быть точность исполнения фотошаблона, а следовательно, и резкость получаемого с его помощью изображения. Но еще более важным становится совмещение проекций изображений на поверхности полупроводникового диска во время всех операций фотолитографической обработки. Помимо этого полупроводниковая подложка многократно подвергается нагреву до температур, превышающих 1000°C , с последующим охлаждением каждый раз до комнатной температуры и вступает в контакт с травильными растворами, и поэтому нетрудно понять, что дефекты в структуре ИС — неизбежное зло. Во многих случаях они становятся причиной брака, процент которого тем выше, чем больше степень интеграции и больше плотность упаковки, т. е. соответственно число элементов в кристалле и число элементов на единицу площади кристалла. Последнее можно объяснить тем, что количество кристаллов, не имеющих дефектов исходного материала, а также дефектов, обусловленных технологической обработкой, уменьшается с увеличением площади кристалла, но при условии равномерного распределения дефектов по площади полупроводникового диска. При изготовлении ИС с высокой степенью интеграции на начальной стадии технологического процесса брак может достигать до 90%, однако это не должно смущать изготовителя. Ведь 10% годных ИС означают, что из каждых 100 схем, сформированных на полупроводниковом диске, получено десять работоспособных. Выход годных ИС и эффективность микроэлектронного производства оценивают совсем по иным критериям, нежели в традиционных отраслях промышленности. Но, как и в последних, в микроэлектронике требуется совершенствование технологических процессов, направленное на повышение выхода годной продукции. Правда, нельзя забывать и о том, что здесь речь идет об

увеличении выхода годных не с 90 до 95%, а с 5 до 15% для СБИС и с 40 до 80% для ИС с более низкой степенью интеграции.

Совокупность процессов технологической обработки, которой подвергается кремниевый диск при формировании на нем микросхем (включая их проверку), называется, как мы уже говорили выше, *циклом 1* полупроводниковой технологии. Слово «цикл» в некоторой степени способно ввести в заблуждение, ибо речь здесь идет не о циклически повторяющемся процессе, а о последовательном процессе, направленном на достижение определенной цели — формировании ряда одинаковых ИС на кремниевом диске. Циклу 1 предшествуют операции изготовления кремниевых дисков, сырьем для которых служит кварц, и фотошаблонов; последние делают с учетом функциональных требований, предъявляемых к ИС. Весь объем проектных работ — от составления общего описания функции ИС (за которым следует построение ее логической схемы и разработка на этой основе принципиальной электрической схемы с указанием отдельных элементов) до выполнения компоновочного чертежа, детализированного вплоть до структур элементов — называется *разработкой топологии ИС*. Разработка ИС, изготовление фотошаблонов и полупроводниковых дисков представляют собой комплекс мероприятий, без осуществления которых нельзя приступить к циклу 1. Часто его называют циклом 0. Все работы, которые осуществляются после завершения цикла 1 и направлены на превращение изготовленных ИС в готовые к продаже изделия, относятся к циклу 2 полупроводниковой технологии. Цикл 2 начинается с резки (скрайбирования) полупроводникового диска на отдельные кристаллы и завершается функциональной проверкой готовой ИС. В табл. 10 приведены все этапы процесса изготовления изделий микроэлектроники.

Нам еще нужно сообщить читателю некоторые дополнительные подробности, касающиеся циклов 0 и 2. Однако им

Таблица 10. Технология изготовления изделий микроэлектроники

Цикл 0	Исходные материалы Функции реализуемой ИС	Изготовление полупроводниковой пластины (диска)
		Разработка топологии ИС
	Полупроводниковые пластины Фотошаблоны	Изготовление фотошаблонов
Цикл 1		Оксидирование Фотолитография Травление Эпитаксиальное выращивание Легирование Металлизация Испытания
	Полупроводниковая пластина со сформированной на ней ИС	
Цикл 2		Разделение полупроводниковой пластины на отдельные кристаллы Посадка кристалла на носитель Присоединение проволочных выводов Сборка в корпусе Испытания
	Кристаллы ИС	

будет уделено меньше внимания, чем циклу 1, который ввиду его ключевого значения был разобран более детально. Итак, начнем с цикла 0.

Цикл 0. Разработка топологии ИС

Цель разработки топологии ИС состоит в создании оригиналов схемы, на основе которых изготавливают фотошаблоны. Для начала будем считать, что подобные оригиналы являются чертежами, выполненными на бумаге, хотя – и мы в этом скоро убедимся – они вовсе не обязательно должны иметь такой вид. Для изготовления каждого шаблона требуется один чертеж. На каждом чертеже показана горизонтальная структура определенного слоя материала ИС, т.е. даны форма и расположение геометрических областей,

соответствующих этому слою. Полный комплект таких чертежей для одной ИС носит название компоновочной документации. На компоновочных чертежах содержатся все данные, касающиеся чередования слоев различного состава по вертикали и геометрической структуры каждого отдельного слоя материала ИС. Основой для разработки компоновочных чертежей служат функциональные требования, предъявляемые к проектируемой схеме. Такие требования могут, например, выглядеть следующим образом: ИС должна представлять собой ЗУ емкостью 64 кбит с прямой адресацией ячеек, номинальное рабочее напряжение – не выше 5 В, потребляемая мощность – не более 200 мВт, время доступа к данным, хранящимся в памяти, – не более 100 нс. Сюда следует добавить требования общего характера, например обеспечение мини-

мально возможной площади поверхности кристалла ИС, а это кроме всего прочего означает, что число внешних выводов схемы с их контактными площадками, занимающими большую площадь, необходимо свести к минимуму. Выше мы уже отмечали значительный уровень затрат на проверку ИС с высокой степенью интеграции. Чтобы снизить их до приемлемого уровня, при разработке топологии ИС следует придерживаться определенных правил. Важнейшим предварительным условием здесь становится выбор одной из возможных технологий. Каждая технология характеризуется своими правилами разработки топологии ИС, которые устанавливают минимально допустимые размеры и расстояния, а также максимально допустимые перекрытия отдельных структурных элементов. Совокупность этих правил и требований дает возможность выполнить все необходимые компоновочные чертежи. Конечно, оптимальным является вариант, когда данную задачу целиком и полностью берет на себя компьютер. Для этого требуется программа, с помощью которой можно задавать координаты тех точек компоновочных чертежей, которые в полной мере отвечают поставленным требованиям. В принципе здесь нет ничего невозможного, однако на практике мы еще очень далеки от такого решения проблемы. Опыт и интуиция проектировщика, проверка различных вариантов и постепенное доведение их до совершенства по-прежнему играют важную роль в разработке топологии ИС, хотя компьютеры и используются для решения прикладных задач частного характера. Такой комбинированный подход получил название *автоматизированная разработка топологии ИС*.

Как правило, разработка топологии ИС ведется на нескольких уровнях. Начинают с логического уровня, т. е. составляют логическую схему, на которой отдельные элементы имеют символические обозначения соответствующих логических операций – И-НЕ, ИЛИ-НЕ и т. д. В предыдущей главе мы познакомились с примерами логических схем. Проверка долж-

на показать, действительно ли спроектированная логическая схема способна выполнять требуемую функцию. Данная проверка называется моделированием логики и выполняется компьютером. Если проверка оказалась успешной, то логическую схему преобразуют в *электронную*, содержащую отдельные ЭК, схемы логических элементов или же более крупные электронные функциональные блоки. По электрическим параметрам элементов можно определить такие параметры схемы в целом, как уровень напряжения питания, потребляемую схемой мощность или время распространения сигнала. Эта задача, т. е. моделирование работы электронной схемы, также решается компьютером. Если же схема рассчитана, а результаты вычислений ее электрических характеристик не полностью согласуются с требуемыми значениями, то возникает необходимость в замене одних электронных компонентов другими и повторении расчетов с введением новых параметров. В некоторых случаях может потребоваться внести изменения в саму логическую схему с целью ее улучшения. Когда после нескольких подобных попыток из схемных элементов, имеющих определенные характеристики, все же удастся построить подходящую электрическую схему, приступают к разработке топологических чертежей отдельных элементов, обеспечивающих достижение заданных характеристик. Эти элементы нет необходимости изготавливать физически. По топологическим чертежам их параметры можно точно рассчитать с помощью компьютера. Однако во многих случаях идут другим путем – обращаются к ранее апробированным топологиям отдельных ЭК, схем логических элементов или более крупных функциональных блоков, которые хранятся в библиотеках стандартных элементов. Когда получены удовлетворительные чертежи отдельных ЭК (или же они имелись с самого начала), то можно приступить к компоновке такой проектируемой схемы в целом. В ИС с высокой степенью интеграции имеются миллионы расчетных точек и отрезков прямых ли-

ний. Поэтому для каждого ее топологического чертежа требуется взять лист бумаги площадью в несколько квадратных метров, т. е. не уступающий по размерам образцам настенной живописи среднего масштаба. По обилию деталей эти компоновочные чертежи во много раз превосходят картины Питера Брейгеля. Лишь однообразие чертежей говорит не в их пользу – видны только прямоугольники различного размера и ориентации. Чертежи должны быть выполнены с точностью до 0,1 мм. Это объясняется тем, что у кристалла ИС, длина и ширина которого равны 4 мм, допуски на размеры структур отдельных элементов не превышают нескольких десятых долей микрометра. Приняв значение такого допуска равным 9,4 мкм и общий размер ИС – 4 мм, мы найдем, что отношение этих величин дает относительную точность исполнения чертежа, равную 10^{-4} . Следовательно, точность выполнения чертежа на листе бумаги размером $1 \times 1 \text{ м}^2$ должна составлять 0,1 мм. Пример простейшего топологического чертежа дан на рис. 52.

Важнейшее значение при выполнении топологических чертежей на бумаге имеют координаты отдельных точек и прямолинейных отрезков. Эти координаты можно зафиксировать не только в виде точек на чертежной бумаге, но и на магнитном носителе данных. Но это вовсе не означает, что предварительно компоновочный чертеж выполняют на бумаге, а затем переносят на магнитную ленту. Дело обстоит иначе. При построении компоновочных чертежей, которые в дальнейшем записываются на магнитные носители информации, с самого начала отказываются от бумаги и карандаша. Вместо них используются экран дисплея, световое перо, магнитный накопитель и компьютер. Контуры, изображенные световым пером на экране, могут быть занесены на хранение в запоминающее устройство, а топологические структуры схемных элементов, ранее введенные в ЗУ, могут воспроизводиться на экране в нужных местах и в требуемом масштабе, причем одновременно их можно модифицировать и

компоновать, создавая различные комбинации. Хранение информации о компоновке схемы в магнитной памяти и использование современных средств микроэлектронной информационной техники позволяют изготавливать топологические чертежи способом, который значительно эффективнее применявшихся прежде методов черчения. Благодаря этому микроэлектроника сама по себе стала важнейшим инструментом разработки новых интегральных схем.

После разработки приемлемого топологического чертежа, записанного на магнитную ленту, на его основе изготавливают фотошаблоны. Этот процесс мы кратко рассмотрим ниже. А пока будем считать, что фотошаблоны уже есть. Они используются для формирования на кремниевом диске первых образцов ИС. Результаты электронных испытаний изготовленной ИС позволяют дать окончательное заключение относительно успешного или неудачного выполнения работ на этапе проектирования топологии ИС. Если созданная ИС не отвечает выдвигавшимся требованиям, то все начинают с самого начала. В большинстве случаев для получения схемы, удовлетворяющей требованиям технического задания, необходимо повторять весь описанный выше процесс пять раз, а иногда и больше. Теперь вряд ли кто-нибудь удивится, если мы скажем, что процесс разработки топологии ИС является весьма трудоемким. Трудозатраты, связанные с проектированием ИС, принято выражать в «человеко-годах». На разработку топологического чертежа одной ИС, насчитывающей несколько тысяч элементов, совсем недавно затрачивался один человеко-год. Сказанное означает, что над разработкой топологии такой схемы обладающий необходимой квалификацией проектировщик трудился целый год. Для разработки по заданной топологии микропроцессора из трех ИС, имеющих в своем составе около 100 000 элементов, требовалось 100 человеко-лет. Хотя благодаря внедрению вычислительной техники трудозатраты на подготовку топологических чертежей ИС

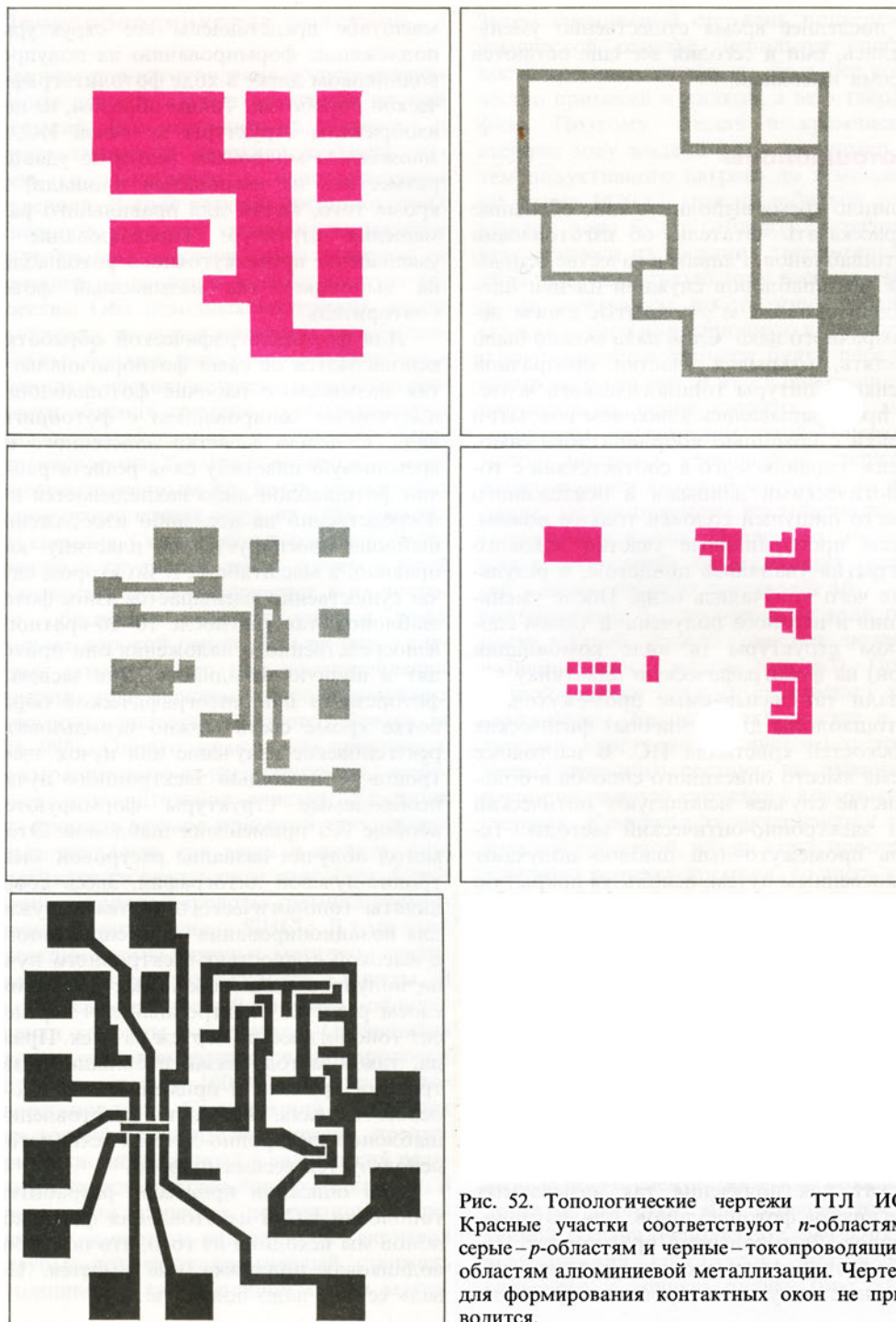


Рис. 52. Топологические чертежи ТТЛ ИС. Красные участки соответствуют n -областям, серые – p -областям и черные – токопроводящим областям алюминиевой металлизации. Чертеж для формирования контактных окон не приводится.

за последнее время существенно уменьшились, они и сегодня все еще остаются весьма высокими.

Фотошаблоны

Пришло время выполнить свое обещание и рассказать читателю об изготовлении фотошаблонов. Раньше в качестве основы для фотошаблонов служили пленки площадью около 1 м², покрытые слоем непрозрачного лака. Слой лака можно было удалять, открывая участки прозрачной пленки. Контуры топологического чертежа процарапывались в лаковом покрытии пленки с помощью координатного самописца, управляемого в соответствии с топологическими данными и оснащенного вместо пишущей головки тонким ножом. Затем процарапанные участки лакового покрытия удалялись пинцетом, в результате чего получались окна. После уменьшения и переноса полученной таким способом структуры (в виде комбинации окон) на фотографическую пластинку получали так называемые промежуточные фотошаблоны для различных физических плоскостей кристалла ИС. В настоящее время вместо описанного способа в большинстве случаев используют оптический или электронно-оптический методы. Теперь промежуточный шаблон получают не косвенным путем, используя покрытую лаком пленку, а непосредственной засветкой фотопластинки, которая нередко дополнительно покрывается слоем окиси хрома (хромированный фотошаблон). Вместо координатного самописца применяют оптические или электронно-оптические генераторы геометрических структур. Только таким путем удастся рационально изготавливать промежуточные шаблоны для ИС с высокой степенью интеграции. Промежуточные шаблоны служат для получения так называемых оригиналов фотошаблонов, или фотооригиналов. Фотооригинал представляет собой фотографическую или хромированную пластинку, на которой в натуральном

масштабе представлены все структуры, подлежащие формированию на полупроводниковом диске в ходе фотолитографической обработки. Таким образом, на ней изображены структуры не *одной* ИС, а *множества* микросхем (которые удается разместить на имеющейся площади) и, кроме того, метки для правильного размещения структур. Тиражирование и уменьшение промежуточного фотошаблона выполняет так называемый фотоповторитель.

Для фотолитографической обработки используются не сами фотооригиналы, а так называемые рабочие фотошаблоны, полученные копированием с фотооригинала. С целью засветки нанесенного на кремниевую пластину слоя резиста рабочий фотошаблон либо накладывается непосредственно на нее, либо изображение шаблона проецируется на пластину — как правило, в масштабе 1 : 1. Во втором случае существенно уменьшается износ фотошаблонов, так как после 10–20-кратного непосредственного наложения они приходят в полную негодность. Для засветки фоторезиста при литографической обработке кроме света можно использовать рентгеновское излучение или пучок электронов. С помощью электронного пучка необходимые структуры формируются вообще без применения шаблонов. Этот метод получил название растровой электронно-лучевой литографии. Здесь координаты топологического чертежа служат для позиционирования сфокусированного с высокой точностью электронного луча на полупроводниковом диске, покрытом слоем резиста. Электронный луч переносит топологический чертеж на диск. Правда, такой метод связан с большими затратами времени и применяется лишь в особых случаях. Однако при изготовлении шаблонов электронно-лучевая технология используется весьма широко.

При описании процессов разработки топологии ИС и изготовления фотошаблонов мы исходили из того, что полупроводниковая подложка уже имеется. Но ведь ее еще надо получить!

Полупроводниковая пластина

Сырьем для изготовления полупроводниковых пластин служит химически чистый кремний. Его получают из кварца, т.е. кристаллической двуокиси кремния, путем восстановления с использованием углерода. В ходе реакции восстановления кислород двуокиси кремния связывается с углеродом, образуя окись углерода, а кремний выделяется в виде чистого вещества. Оба исходных материала, кварц и углерод, имеются в природе в изобилии. Таким образом, пока речь идет об используемых в настоящее время в промышленности объемах кремния, проблемы сырья для микроэлектроники не возникает. После кислорода кремний является самым распространенным на Земле химическим элементом: земная кора на 28% состоит из кремния. Связанные с исходными материалами трудности лежат совсем в иной плоскости. Дело заключается в их чистоте, обеспечить которую удастся лишь весьма дорогой ценой. Тем не менее следует заметить, что при восстановлении кварца с применением углерода получают кремний, чистота которого близка к 98–99%. Однако, прежде чем приступить к выращиванию из него кристалла, требуется дополнительная очистка. Удаление из кремния атомов примесей таких тяжелых металлов, как медь и железо, осуществляется следующим способом. С помощью соляной кислоты кремний превращают в трихлорсилан SiHCl_3 . В ходе этой реакции атомы тяжелых металлов связываются хлором: образуются хлориды. В процессе последующей фракционной перегонки хлориды испаряются. Оставшийся трихлорсилан смешивается с водородом и при температуре 1000°C происходит его восстановление. Сам кремний осаждается на тонкий кремниевый стержень, предварительно помещенный в химический реактор в качестве затравочного материала. В результате процессов, протекающих в реакторе, имеющем вид длинной кварцевой трубы, получают кремниевый стержень толщиной 8 см и длиной около метра.

Затем кремниевый стержень подвергают физической очистке, используя способность кремния поглощать большее количество примесей в жидкой, а не в твердой фазе. Поэтому, создав в кремниевом стержне зону жидкой фазы, например путем индуктивного нагрева до температуры выше 1420°C, можно добиться того, что эта зона будет отбирать загрязняющие примеси из соседних твердотельных областей. Если такую зону расплава медленно перемещать по стержню, передвигая вдоль него индукционную катушку, то и загрязняющие примеси будут передвигаться вслед за ней. В итоге они сконцентрируются на конце стержня. При многократном повторении этой операции можно получить кремниевый стержень, отличающийся высокой чистотой по всей длине, за исключением насыщенного загрязнения конца. Предельно допустимая концентрация загрязняющих примесей в таком стержне составляет 10^{-9} , что соответствует 0,1 миллионной доли процента. Такой способ очистки получил название *зонной плавки* (рис. 53). После зонной плавки следует собственно кристаллизация. Ее цель заключается в получении кристалла из чистого с точки зрения атомного состава, но имеющего неупорядоченную структуру кремниевое стержня. Кристалл характеризуется правильной решеткой, и если взять пространственную решетку кремния, то здесь каждый атом является центром геометрически правильного тетраэдра и окружен четырьмя соседними атомами, находящимися в вершинах этого тетраэдра (рис. 8). Опасность возникновения отклонений от такой структуры идеального кристалла (например, появления дислокаций) в процессе кристаллизации весьма велика. При изготовлении кремниевых стержней, из которых впоследствии получают полупроводниковые подложки, по возможности следует избегать появления дефектов решетки. Для решения поставленной задачи используют два способа выращивания кристаллов: метод Чохральского и зонную плавку (рис. 53). В

обоих случаях берут затравочный кристалл, т. е. небольшой кристалл с идеальной структурой, который в случае применения метода Чохральского погружают в расплав кремния, а затем, непрерывно вращая, медленно извлекают вместе с наплавившимся на него материалом. В ходе последующего охлаждения этот материал кристаллизуется, причем именно таким образом, который определяется зародышевым кристаллом. Если зародышевый кристалл имел идеальную структуру, то ту же структуру будет иметь и выросший из него кристалл—естественно, при соблюдении оптимального режима кристаллизации. Согласно методу Чохральского, скорость извлечения кристалла из расплава лежит в пределах от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров в минуту. В случае метода зонной плавки зародышевый кристалл закрепляют на верхнем конце кремниевого стержня в том положении, которое кристалл будет занимать после завершения очистки и удаления «грязного» конца. Далее зону расплава медленно опускают. Оставшийся после прохождения этой зоны кремний застывает в виде монокристалла. Расплавленный кремний не растекается в стороны, так как этому препятствуют силы поверхностного натяжения, но лишь до тех пор, пока стержень остается достаточно тонким. Если по методу Чохральского сегодня удастся выращивать не имеющие дислокаций кристаллические стержни диаметром до 150 мм, то зонная плавка позволяет получать стержни диаметром до 100 мм, также не имеющие дислокаций. По сравнению с природными кристаллами достигнутые результаты следует признать весьма неплохими. Однако даже при использовании описанных методов не удается полностью исключить нарушения кристаллической решетки—в кристаллах возникают точечные дефекты, например вакансии. Невозможно в полной мере избавиться также и от химических примесей, загрязняющих полупроводник. Кристалл, выращенный по методу Чохральского, в отличие от кремния, полученного зонной плавкой, имеет от-

носительно большое содержание атомов кислорода и углерода (до 10^{18} см^{-3}). Источником таких загрязнений являются необходимый для реализации метода Чохральского кварцевый тигель с расплавом кремния и графитовый нагреватель. На протяжении всего процесса выращивания кристаллов они, естественно, не вступают в контакт с воздухом. Весь процесс идет в среде защитного инертного газа. Благодаря отсутствию тигля зонная плавка позволяет существенно уменьшить содержание примесей кислорода и углерода. Однако в отличие от тяжелых металлов допустимая концентрация этих элементов составляет около 10^{18} см^{-3} . Кислород даже оказывает положительное действие: с его помощью удастся нейтрализовать вредное влияние атомов тяжелых металлов. Этот эффект носит название (внутреннее) *геттерирование*.

Монокристаллические кремниевые стержни разрезают на диски толщиной 0,5–1 мм. Применяемые для такой резки фрезы (например, металлические дисковые фрезы с нанесенной на зубья алмазной пылью) имеют почти такую же толщину, как и сами диски. Следовательно, почти половина материала дорогостоящих кремниевых стержней теряется при резке. Поверхностные слои дисков, которые имеют первостепенное значение для всех процессов цикла 1, вследствие резки оказываются сильно поврежденными. Поэтому, прежде чем приступить к обработке дисков в рамках цикла 1, необходимо удалить с поверхности поврежденные участки. Для этого прибегают к шлифовке, травлению и полированию. В результате появляется кремниевый диск с черной блестящей поверхностью. Такие диски представляют собой готовую продукцию цикла 0 и заготовки для цикла 1, который мы подробно рассмотрели выше.

Итак, теперь нам осталось ознакомиться с циклом 2 полупроводниковой технологии, который включает ряд завершающих операций с полупроводниковыми дисками, содержащими проверенные в ходе предварительных испытаний структуры ИС.

Цикл 2. Изготовление законченных ИС

Первой операцией цикла 2 является разделение кремниевого диска на отдельные кристаллы. Для этого диск скрайбируют алмазом, т. е. вдоль будущих кромок кристаллов наносят царапины, после чего сверху наклеивают полиэтиленовую пленку. Посредством изгиба и растяжения пленки кристаллы разъединяют, как это показано на рис. 54. Затем каждый кристалл подвергается индивидуальной обработке. Если для цикла 1 объектом технологических операций был весь полупроводниковый диск с сотнями сформированных на нем структур ИС, то теперь в цикле 2 каждая операция должна выполняться (в зависимости от процента выхода годных кристаллов) в десятки и сотни раз чаще, чем в цикле 1. Именно по этой причине совершенно особое значение приобретает автоматизация технологических операций цикла 2.

Монтаж кристаллов

После разъединения каждый работоспособный кристалл ИС прикрепляют к прочному кристаллодержателю и заключают в корпус, имеющий выводы для подсоединения ИС к внешним цепям. Если используется керамический корпус, то кристаллодержателем в большинстве случаев служит основание корпуса. Однако сегодня все чаще и чаще отказываются от корпуса как такового и для герметизации кристалла ИС применяют заливку пластмассой. В этом случае полупроводниковый кристалл прикрепляют по центру металлического держателя, или кристаллоносителя, как показано на рис. 55. Здесь хорошо видно, как позолоченные элементы печатного монтажа расходятся от кристалла ИС к внешним выводам схемы. На фотографии показано также, как ряд кристаллов соединен между собой на так называемой ленте-носителе. Вслед за посадкой кристалла на носитель выполня-



Рис. 56. Контакт между золотой проволочкой и контактной площадкой из алюминия на кристалле ИС.

ется *присоединение проволочных выводов*, т. е. обеспечивается соединение контактных столбиков носителя или соединительных контактов керамического корпуса (если таковой предусматривается) с контактными площадками на кристалле. Для этого к последним приваривают тонкие золотые проволочки. Раньше данная операция выполнялась вручную под стереомикроскопом. В настоящее время на этом этапе монтажа широко используются автоматы. В результате сварки контактирует контакт между золотой проволочкой и контактной площадкой из алюминия (рис. 56).

Сборка в корпусе

Во время выполнения следующей операции – сборки ИС в корпусе – соединительный монтаж между отдельными кристаллоносителями сохраняется. При температуре около 300°C носители вместе с прикрепленными к ним кристаллами заливают эпоксидной смолой или какой-либо пластмассой. Внешние контакты ИС при этом, конечно, должны оставаться открытыми. Затем удаляют ставшие ненужными части ленты-носителя вместе с соеди-

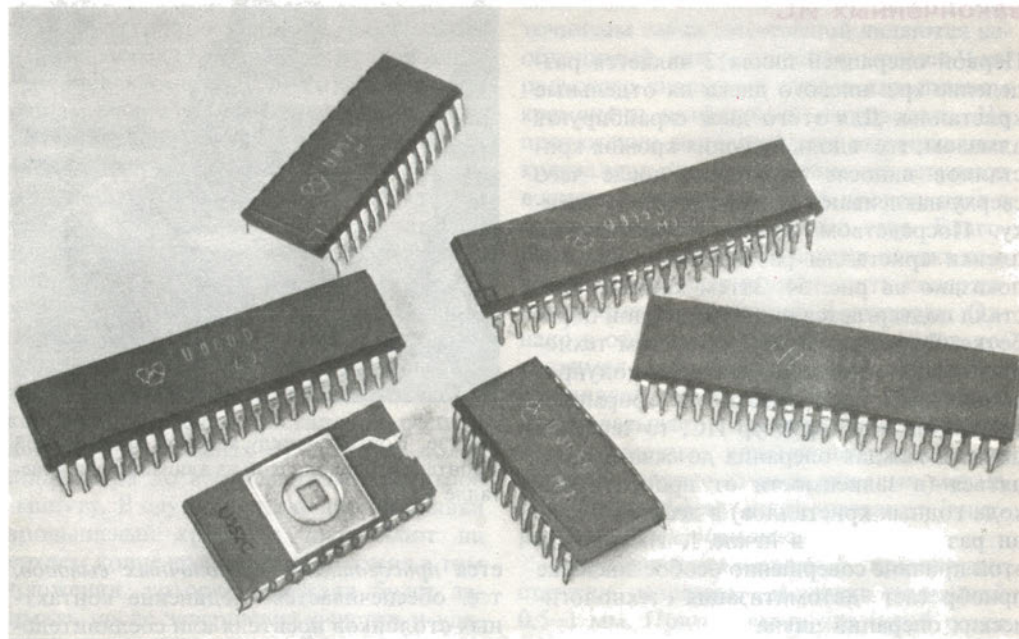


Рис. 57. Интегральные схемы в пластмассовых корпусах U857 (Z80CTC), U880 (Z80), U855 (Z80 PI0) и U856 (Z80 SI0), а также в керамическом корпусе U552 (I702A).

нениями между отдельными носителями. Контактные выводы корпуса отгибают вниз и получают готовую интегральную схему в пластмассовом корпусе. Несколько таких микросхем показано на рис. 57. Теперь приходит черед проведения тщательных испытаний, которые должны не только подтвердить безупречность электрических характеристик ИС, но и удостоверить стабильность ее температурных и механических свойств. ИС считается готовой к продаже только после успешного завершения электрических, тепловых и механических испытаний.

Затраты на изготовление ИС

Перед выпуском ИС в продажу необходимо рассчитать затраты на ее изготовление. Завершая данную главу, мы хотим коротко остановиться на некоторых моментах, которые следует принимать во

внимание при расчете затрат. Общая стоимость изготовления интегральной схемы в основном определяется затратами, связанными с технологическими операциями циклов 1 и 2. Производственные издержки при изготовлении полупроводниковых дисков в цикле 0 учитываются при расчете затрат по циклу 1. Стоимость разработки топологии ИС и изготовления фотошаблонов тем меньше влияет на уровень общих затрат, чем больше общий объем выпуска ИС данного типа. Затраты по циклам 1 и 2 в свою очередь сильно зависят от степени интеграции изготавливаемой ИС. Тот факт, что для схемы с более высокой степенью интеграции они будут больше, обусловлен следующими моментами: выход годных ИС с высокой степенью интеграции ниже (чем для ИС с меньшей степенью интеграции); площадь кристалла, а следовательно, и стоимость исходного полупроводникового диска в пересчете на число ИС больше;

затраты на функциональные испытания такой ИС выше. При этом, однако, ИС с более высокой степенью интеграции обладают и более широкими возможностями. Поэтому для правильной экономической оценки стоимости ИС необходимо исходить не из абсолютной суммы затрат на ее изготовление, а из ее функциональных возможностей, которые определяются в первую очередь степенью интеграции, т. е. количеством элементов на кристалле. В этой связи с точки зрения экономики интересным является такой показатель, как отношение стоимости изготовления ИС к числу имеющихся на кристалле элементов, т. е. удельная стоимость интегрированного элемента.

Для экономической оценки изделий микроэлектроники большое значение имеет зависимость удельной стоимости элемента от степени интеграции (рис. 58). Эта функция имеет явно выраженный минимум, т. е. при некоторой определенной степени интеграции удельные затраты на интегрированный элемент достигают минимума. При отклонении от оптимального уровня интеграции в ту или иную сторону данный показатель начинает возрастать. В том случае, если выбранная степень интеграции меньше оптимальной, увеличение этого показателя будет вести к снижению стоимости ИС. Когда изготавливается схема с оптимальным уровнем интеграции и выход годных изделий увеличивается (а это вследствие «процесса обучения» в ходе изготовления в какой-то мере происходит автоматически), то минимум затрат достигается при более высокой степени интеграции, причем уменьшаются и сами минимальные затраты. Итак, необходимость снижения затрат при одновременном повышении выхода годных изделий диктует переход к более высокому уровню интеграции ИС. Это позволяет объяснить и наблюдающуюся в микроэлектронике тенденцию перехода к использованию ИС все более увеличивающейся степени интеграции. Если проследить развитие микроэлектроники с самого начала, т. е. с 1960 г., то можно будет

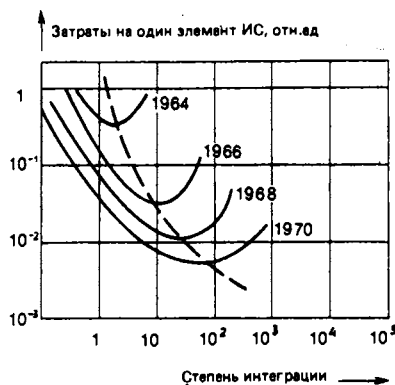


Рис. 58. Удельные затраты на изготовление интегрированного элемента ИС в зависимости от степени интеграции.

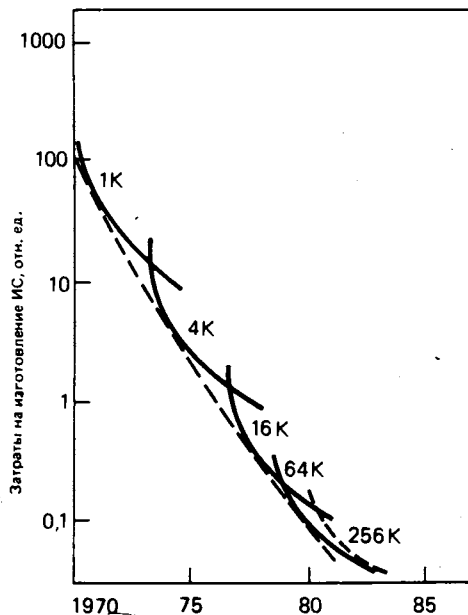


Рис. 59. Изменение затрат на изготовление одного элемента интегральной схемы ЗУ с произвольной выборкой. Разные ветви кривых относятся к ИС ЗУПВ различной емкости, выраженной в килобитах. Вначале затраты снижались только благодаря совершенствованию технологии изготовления; коренной перелом произошел с переходом на ИС с высокой степенью интеграции.

сделать вывод: степень интеграции ИС ежегодно возрастала в два раза. Фантастический прогресс с точки зрения снижения затрат иллюстрируется примером развития интегральных схем запоминающих устройств, где стоимость одного интегрированного элемента в 1980 г. была в тысячу раз меньше, чем в 1970 г. (рис. 59). Если бы процесс снижения цен на продукцию автомобилестроения шел такими же темпами, то сегодня автомобиль стоил бы около 10 марок. Правда, если бы еще

удешевление сопровождалось и аналогичным сокращением размеров, то автомобиль был бы сейчас не больше спичечной коробки. Данное сравнение показывает, что сопоставлять микроэлектронику с другими отраслями промышленности следует лишь в определенных пределах. Используемые в микроэлектронике технологические методы во многих отношениях являются специфичными и не имеют аналогов. Именно к такому выводу подводит нас содержание предшествующих глав.

6. Интегральные схемы и их применение

В предыдущих главах мы познакомились с тем, как функционируют полупроводниковые элементы, как из них можно построить схемы для обработки информации и как изготовить интегральные схемы. В настоящей главе мы обсудим типы интегральных схем, которые промышленность выпускает в настоящее время, и дадим ответ на вопрос, почему изготавливаются именно эти, а не какие-либо другие ИС. Но в данном случае мы будем ориентироваться только на цифровые ИС и даже мимоходом не коснемся аналоговых.

Схема для решения конкретной задачи

Любая задача обработки информации сводится к выполнению элементарных логических операций над сигналами нуля и единицы, для чего между ними необходимо установить соответствующие логические связи. Специфика этой задачи заключается в особенностях способа их установления. Как мы уже могли убедиться, реализовать элементарные логические операции позволяют простые схемы, и установленные между ними связи означают не что иное, как соединение отдельных элементов в одну большую схему, или сборку. Сказанное в равной мере справедливо для всех видов специальной обработки информации, с которыми мы познакомились в предыдущих главах (например, счет импульсов, сложение или запоминание двоичных чисел), и, следовательно, для каждой отдельной задачи обработки информации в принципе должна существовать соответствующая схема, позволяющая ее решить. Если бы микроэлек-

тронная промышленность могла предложить специализированную ИС, предназначенную для решения конкретной задачи пользователя, то лучшего ему и не нужно было бы желать. Он получил бы требуемую ИС, имеющую все необходимые выходы для подключения и сразу готовую к использованию. Оставалось бы только соответствующим образом соединить выходы ИС с линиями ввода-вывода информации и подвода электропитания, и система для решения конкретной задачи обработки информации была бы полностью готова. Эту ситуацию можно сравнить с приобретением автомашины. Автомашина в том виде, в каком она покидает завод, полностью удовлетворяет запросы пользователя в средстве передвижения. Ему не нужно приобретать отдельные компоненты и собирать из них то, что требуется, или же приспособливать выпущенное промышленностью изделие для решения задач передвижения. Однако для микроэлектронной промышленности такой путь в общем и целом является не только неприемлемым, но и неэффективным, и объясняется это прежде всего тремя следующими основными причинами.

Сложность решаемых задач и степень интеграции

Во-первых, многие важнейшие практические задачи обработки информации отличаются слишком большой сложностью, т.е. для их решения с помощью одной-единственной цифровой схемы потребуются выполнить очень большое число следующих друг за другом элементарных логических операций. В крупной электронной вычислительной машине, напри-

мер, выполняются функциональные операции, для реализации которых необходимы десятки миллионов ЭК. Однако ИС с самой высокой степенью интеграции в настоящее время насчитывает менее миллиона ЭК. Поэтому ни сегодня, ни в обозримом будущем на одном полупроводниковом кристалле не удастся построить полную схему для крупной ЭВМ. Такую сборку можно реализовать лишь с помощью большого числа ИС, объединяемых в систему. Все сказанное относительно схемы для ЭВМ остается справедливым и для схем, с помощью которых решаются другие задачи обработки информации. При современном мировом уровне развития микроэлектронной техники и технологии их можно решать только на базе создания общей схемы из целого ряда отдельных ИС, соединенных между собой. Что же касается устройств для обработки информации, поступающих к пользователю в готовом виде, например ЭВМ, то такую сборку выполняет изготовитель – промышленное предприятие. Однако схемы для решения небольших информационных задач может собрать и сам пользователь при условии, что он обладает необходимой для этого квалификацией. Сборку своей системы он осуществляет из тех подходящих для него ИС, которые предлагает промышленность. При таком индивидуальном конструировании систем обработки информации в настоящее время решаются те проектные задачи, которые до появления микроэлектроники решались на уровне сборки в схемы отдельных элементов. Прогресс состоит в повышении производительности создаваемых схем, которая, естественно, резко возрастает при замене отдельных схемных элементов равным числом интегральных схем. Тем не менее и здесь уже вырисовываются границы мирового уровня развития микроэлектронной техники. Конструируемые устройства были бы лучше и дешевле, одновременно отличаясь более высокими быстродействием и надежностью, если бы применяемые для обработки информации схемы собирались не из значительного числа от-

дельных ИС с относительно невысоким уровнем интеграции, а из ИС с более высоким уровнем интеграции, поставляемых промышленностью в готовом виде. При этом речь не идет о принципиальной возможности изготовления таких сложных ИС: увеличив затраты, в этом направлении кое-что можно было бы сделать уже сегодня. На первый план, однако, выдвигаются такие моменты, как затраты на изготовление ИС, ее технические характеристики и надежность. Чтобы наладить промышленный выпуск новой ИС, она должна удовлетворять определенным минимальным требованиям именно в этом отношении. Лишь при соблюдении данного условия с полным основанием можно будет утверждать, что технический уровень промышленности обеспечивает реальную возможность изготовления требуемой схемы.

Многообразие задач и программирование

Но даже если микроэлектронная промышленность выйдет на такой технический уровень, то (здесь мы переходим ко второй основной причине) практически невозможно предоставить в распоряжение пользователя микросхему, подходящую для решения каждой конкретной задачи обработки информации, так как число их слишком велико. Необходимо хорошо представлять себе, что две задачи обработки информации нельзя считать идентичными, даже когда они различаются между собой всего лишь одной-единственной позицией в порядке элементарных логических операций, к которым сводится решение каждой из них. Производственные мощности современной микроэлектронной промышленности окажутся чрезмерно перегруженными, если перед ней поставить задачу выпуска такого числа различных ИС, которое отвечало бы множеству проблем, связанных с обработкой информации. Нереальным является и расширение производственных мощностей в той степени, в какой это требуется для полного удовлетворения спроса на

разнообразные ИС. В таком случае большей части человечества придется перейти на работу в микроэлектронную промышленность. Что же можно сделать в создавшейся ситуации? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно обратиться к понятию *программирования* системы обработки информации. Представим себе еще раз такое положение: определенные задачи обработки информации, например упоминавшиеся ранее операции сложения и вычитания, различаются только порядком выполнения элементарных логических операций, совпадая во многих отношениях. Это означает, что логические схемы для решения обеих задач обработки информации во многом совпадают и только в некоторых местах имеют различия. Так нельзя ли эффективно использовать эти совпадения? Не стоит ли попытаться построить одну-единственную логическую ИС, способную выполнять как сложение, так и вычитание, оставаясь в то же время ненамного сложнее схем сложения и вычитания в отдельности? Понятно, что такая схема станет несколько сложнее каждой из них. Комбинированная схема должна иметь встроенные средства управления, которые позволят ей выполнять команду сложения, когда возникнет необходимость в сложении, и команду вычитания, когда потребуется выполнить вычитание. Следовательно, схема должна быть, как говорят, *программируемой*. Принцип программирования для обработки информации имеет столь важное значение, что на нем целесообразно остановиться более подробно. Попробуем проиллюстрировать основные особенности этого принципа на конкретных примерах. В процессе решения задачи обработки информации исходная информация преобразуется в выходную информацию в соответствии с определенными правилами, которые лежат в основе схемы обработки информации. Нечто похожее встречается и на транспорте. Наиболее распространенная задача здесь следующая: груз из определенного города А требуется доставить в город В. Допустим, что в окрестностях города А располо-

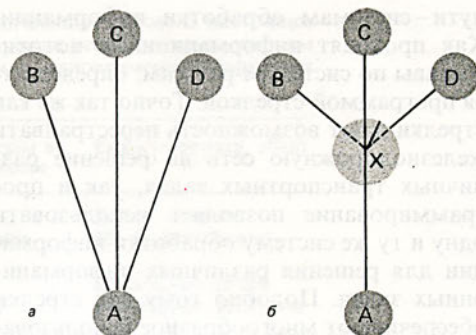


Рис. 60. Принцип программирования.

жены города В, С, Д и т.д., куда грузы перевозят из города А (рис. 60). Перевозку намечается осуществлять по железной дороге. Однако рельсовые пути еще только предстоит уложить. Как в таком случае целесообразно осуществить развитие железнодорожной сети? Существует вариант прокладки железнодорожных веток из города А во все другие города — В, С, Д и т.д. (рис. 60,а). Если города В, С и Д находятся на небольшом удалении друг от друга, такую схему развития железнодорожной сети нельзя считать оптимальной. Избежать прокладки лишних путей и тем самым сэкономить рельсы можно, если протянуть железнодорожную ветку до некоего пункта Х, расположенного в непосредственной близости от городов В, С и Д, а оттуда провести три отдельные ветки к этим городам (рис. 60,б). В последнем случае в пункте Х следует установить стрелку, которая позволит посылать составы в нужном направлении. Благодаря введению стрелки наша железнодорожная сеть в известной степени становится программируемой. В какой из городов — В, С или Д — попадет состав, отправленный из города А, будет зависеть от положения стрелки, которое определено командой, введенной в программу ее работы. Связь между приведенным «железнодорожным» примером и программируемой системой обработки информации не нуждается в особых пояснениях. Железнодорожные составы соответствуют информационным потокам, а рельсовые

пути – системам обработки информации. Как проходят информационные потоки – составы по системам – рельсам, определяется программой-стрелкой. Точно так же как стрелки дают возможность перестраивать железнодорожную сеть на решение различных транспортных задач, так и программирование позволяет использовать одну и ту же систему обработки информации для решения различных информационных задач. Подобно тому как стрелки обеспечивают многообразное использование одного и того же участка дороги и обеспечивают экономию рельсов, в программируемой системе обработки информации определенные участки схем находят разнообразное применение, а их общее число может быть меньше, чем в непрограммируемой системе такой же производительности. Программирование позволяет обеспечить заданную производительность в части обработки информации при меньшем объеме аппаратных средств. Аппаратные средства, т. е. вся совокупность ИС, частично заменяются программными.

Следует обратить внимание еще на один момент, где аналогия между железнодорожной сетью и системой обработки информации дает возможность сделать правильные выводы. Путь из города А в город В через стрелку Х имеет несколько большую длину, чем прямой путь без стрелки. Точно так же и при решении задач обработки информации с помощью программирования мы несколько теряем в скорости по сравнению со специализированной непрограммируемой системой. Нужно сказать, что принцип программируемости систем обработки информации гораздо старше, чем можно предположить. Он был впервые использован в 1833 г. Чарлзом Бэббиджем в ходе проектирования механической вычислительной машины, которая так никогда и не была построена. В своей современной форме, т. е. как хранимая в памяти изменяемая программа, он был впервые предложен Джоном фон Нейманом в 1946 г. и воплощен в электронной вычислительной машине.

Наш краткий исторический экскурс показывает, что существует тесная связь между программированием и вычислительной машиной. По существу программируемая система обработки информации представляет собой не что иное, как вычислительную машину, и, наоборот, вычислительная машина является не чем иным, как системой обработки информации, которая находит разностороннее применение благодаря ее программируемости. В этом смысле программируемая электронная вычислительная машина, или компьютер, сегодня представляет собой техническую систему для обработки информации.

Здесь представляется уместным сделать несколько замечаний относительно компьютеров, что, как нам кажется, будет полезным при дальнейшем изложении. Для ясности следует добавить, что мы будем оперировать термином «компьютер», понимая под ним цифровую ЭВМ. В цифровой ЭВМ используется цифровая форма обработки информации. Кроме того, существуют также так называемые аналоговые вычислительные машины, обрабатывающие информацию, представленную в аналоговой форме. Оба вида обработки информации применяются в гибридных вычислительных машинах. Цифровые ЭВМ получили наиболее широкое распространение и обладают универсальными возможностями. Производительность такого компьютера зависит прежде всего от его центрального процессора, т. е. от числа интегральных схемных элементов, использованных для его построения, и от емкости памяти. В табл. 11 приведена классификация компьютеров по этим признакам. Однако благодаря внедрению микропроцессоров и связанному с этим направлению развития ЭВМ, в частности малых машин, эта классификация стала разваливаться. Вычислительные машины различаются не только своей величиной, но и видом реализации в них схемных элементов. ЭВМ на электронных лампах относятся к машинам первого поколения. Дискретными полупроводниковыми приборами были ос-

Таблица 11. Прежняя классификация компьютеров. В настоящее время границы между классами, прежде всего по компьютерам малых типов, начинают стираться и одновременно сдвигаться вверх

Класс	Число логических схем в центральном процессоре	Емкость памяти, кбайт
Большие ЭВМ	> 100 тыс.	Более тысячи
Малые ЭВМ	Несколько десятков тысяч	Не более тысячи
Мини-ЭВМ	5–10 тыс.	Несколько сотен
МикроЭВМ	Несколько тысяч	Несколько десятков

нащены машины второго поколения. ИС с малой и средней степенью интеграции появились в 1965 г. и составили схемную основу ЭВМ третьего поколения. Применение БИС вплоть до 1975 г., а позднее СБИС знаменует переход к ЭВМ четвертого поколения. Параллельно происходила замена оперативной памяти на ферритовых сердечниках, которые раньше занимали монопольное положение в центральном блоке ЭВМ, полупроводниковой памятью, отличающейся большим быстродействием.

Частота возникновения одинаковых задач и объем производства в единицах изделий

Существует и третья причина, объясняющая, почему микроэлектронная промышленность не может изготовить ИС для решения каждой конкретной информационной задачи. Эта причина носит чисто экономический характер. Представим себе, что двух первых причин не существует, т. е. имеется техническая возможность для интеграции в пределах одного полупроводникового кристалла произвольно большого числа элементов, а производственные мощности микроэлектронной промышленности достаточно велики, так что нет необходимости в сокращении многообразия типов ИС путем использования принципов программирования. Но, даже получив ИС промышленного изготовления, специализирующиеся на решении любых конкретных задач обработки инфор-

мации, в большинстве случаев мы не сможем ими воспользоваться. Дело в том, что эти ИС будут слишком дорогими. Затраты на изготовление ИС, как мы выяснили в предыдущей главе, исключительно велики. ИС могут изготавливаться по доступной для потребителя цене только тогда, когда объем их производства, соответствующий спросу, достаточно велик. Но, как правило, это условие не выполняется для тех ИС, которые спроектированы в расчете на узкоспециальное применение. Об исключениях – специализированных и заказных ИС – речь пойдет несколько позднее. Промышленность, поставленная перед необходимостью выпускать ИС по возможно более низкой цене, следовательно, не может ориентироваться на производство широчайшего ассортимента ИС, т. е. ИС для решения всех возможных задач обработки информации. Напротив, она попытается взять совершенно противоположный курс и будет стремиться удовлетворить все запросы потребителей с помощью максимально узкого ассортимента, наладив – в экстремальном случае – производство ИС *одного-единственного* типа. Если бы удалось создать универсальную ИС, способную решать любые информационные задачи, то таких ИС потребовалось бы чрезвычайно много, а это дало бы возможность наладить сравнительно дешевое производство. Уточнение «сравнительно» возникло в связи с такой характеристикой, как производительность. Поскольку последняя у универсальной схемы должна быть очень высокой (ведь ИС предстоит решать ин-

формационные задачи любой степени сложности), несмотря на большие объемы производства, цену на нее все равно не удастся снизить. Однако при решении большинства задач обработки информации высокая производительность универсальной ИС вообще не будет использоваться. Покупатель будет вынужден платить за то, чем он не сможет воспользоваться в полном объеме. Таким образом, создание универсальной ИС для решения всех проблем обработки информации так же плохо решает задачу удешевления ИС, как и ориентация на колоссальное многообразие типов специализированных ИС, каждая из которых рассчитана на решение *одной* конкретной проблемы.

Подведем итоги. От микроэлектронной промышленности пользователь ждет либо таких ИС, которые могут решать встречающиеся на практике задачи обработки информации непосредственно, либо ИС, пригодных для построения систем, решающих ту же задачу. Разнообразие ассортимента ИС определяется, с одной стороны, техническими возможностями микроэлектронной промышленности, т. е. прежде всего количеством элементов, которые можно разместить на одном кристалле, и, с другой стороны, возможностями многоцелевого применения ИС, для чего они должны быть программируемыми или обеспечивать возможность создания на их основе программируемых систем обработки информации. Кроме того, должен обеспечиваться сбыт большого количества ИС.

Заказные и стандартные ИС

Выпускаемые промышленностью интегральные схемы по сути дела отражают компромиссное решение, учитывающее перечисленные требования. Ассортимент предлагаемых ИС можно разделить на две большие группы. К первой из них следует отнести заказные, или специализированные, ИС, ко второй – стандартные. Конечно, между этими двумя группами нет резкой границы. Существуют, например, полужаказные ИС, так что не-

редко распределение конкретных интегральных схем по заказным и стандартным является делом вкуса. В конце концов, это не столь важно. То обстоятельство, что, несмотря на все сказанное выше, мы подробно останавливаемся на подобных различиях, объясняется прежде всего их косвенной зависимостью от более важного вопроса – выбора подходящей структуры с учетом задач обработки информации и наличия схем, обеспечивающих их решение. В первую очередь различие между заказными и стандартными ИС определяется тем, какие именно схемы промышленности изготавливает по специальным заказам пользователей, а какие – в качестве стандартной продукции. Заказная ИС – это, как правило, схема, способная полностью решать специальную задачу обработки информации в том ее виде, в каком она встает перед пользователем. Понятие «пользователь» здесь не следует понимать буквально. Пользователем ИС может быть, например, целая отрасль промышленности. Примером заказной ИС может служить интегральная схема для электронных часов, выдающая информацию в виде секунд, минут, часов, дней недели и т. д. Подобно ИС для часов, любая заказная схема пригодна для решения одной-единственной задачи обработки информации. По своим возможностям такая схема является крайне односторонней. Широта диапазона ее применения очень невелика. Однако поставленную задачу она решает наилучшим образом и без привлечения каких-либо других ИС. Поэтому выполняемая с ее помощью обработка информации не должна отличаться слишком большой сложностью. При достигнутом на сегодняшний день уровне интеграции схема, требующаяся для решения рассматриваемой задачи, должна быть построена с таким расчетом, чтобы поместиться на *одном* кристалле. Следует все же заметить, что ни в настоящее время, ни в обозримом будущем не представляется возможным реализовать в виде одной заказной ИС схему, способную играть в шахматы на хорошем уровне. Для того чтобы изготовление заказной

ИС было выгодно как для изготовителя, так и для пользователя, задача, на решение которой она ориентируется, должна встречаться на практике достаточно часто и в совершенно идентичной форме. Что здесь понимают под «достаточно часто», зависит от степени интеграции ИС. Если этот показатель велик, то выгодным становится выпуск только большого числа таких ИС. Для схем со средней степенью интеграции нижней границей их рентабельности ориентировочно можно считать выпуск в объеме 10 000 штук в год.

Прямой противоположностью заказным являются стандартные ИС. Они, как правило, полностью не решают сложной задачи обработки информации в том виде, в каком с ней сталкивается пользователь. Обычно стандартные ИС – это схемы, выполняющие часто реализуемые *частичные* операции процесса решения задач обработки информации. Их можно рассматривать как стандартные элементы, из которых собраны полные схемы для решения информационных задач. Для создания такой полной схемы применяют, как правило, большое число стандартных ИС. Однако из подобных ИС можно собирать самые разнообразные устройства. Диапазон применения стандартных ИС, следовательно, весьма широк. Велик и объем производства, определяемый большим спросом на них. К стандартным схемам относятся ИС для выполнения таких элементарных логических операций, как И и ИЛИ, а также ИС для реализации часто встречающихся комбинаций этих операций, например функций сложения, запоминания или счета. Стандартными ИС являются и микропроцессоры. В отличие от упоминавшихся ранее стандартных ИС микропроцессоры относятся к программируемым устройствам, т.е. связи между используемыми в них элементарными логическими схемами не являются установленными раз и навсегда, а могут изменяться программой, которая хранится в ИС памяти, связанной с микропроцессором. При необходимости изменения связей между логическими элементами достаточно изменить лишь программу,

записанную в полупроводниковую память. Принцип программируемости, который в ЭВМ реализуется на уровне системы, построенной из многих ИС, в микропроцессоре находит реализацию на уровне одной-единственной ИС. Микропроцессор, соединенный с ИС памяти, выполняет важнейшие функции программируемой системы обработки информации, т.е. ЭВМ. Он представляет собой центральный процессор ЭВМ и по своей производительности в настоящее время пока еще остается на уровне микроЭВМ. В ходе программирования микропроцессоров определенным способом задают функцию, выбор которой до этого момента оставался свободным. При программировании микропроцессора в аппаратной части ничего не изменяется. Это происходит в случае программирования других стандартных ИС – постоянных запоминающих устройств (ПЗУ) и программируемых логических матриц (ПЛМ). До программирования не все выводы полупроводниковых кристаллов этих ИС нужным образом соединены с внешними цепями через выходные контакты схемы. Требуемые внешние соединения в таких ЗУ реализуются после завершения основного процесса изготовления, который одинаков для всех ИС этого типа. Последующая дифференцированная технологическая обработка отдельных групп кристаллов также может осуществляться промышленным способом, когда необходимые соединения формируются на кристалле в ходе дополнительной металлизации с использованием специальных фотошаблонов. В этом случае говорят о программировании фотошаблонами. В других случаях нужные соединения выполняет сам пользователь. Для этого прибегают к различным приемам: например, ненужные токопроводящие перемычки пережигают сильным током. Постоянные ЗУ, программирование которых пользователь осуществляет самостоятельно именно таким способом, получили название программируемых ПЗУ (ППЗУ).

В отличие от микропроцессоров в ПЗУ, ППЗУ и ПЛМ требуемые токопро-

водящие соединения транзисторов при программировании жестко фиксируются. В известном смысле принцип программирования аппаратными средствами применяется в так называемых матрицах логических элементов (или вентильных матрицах) при условии, что программирование их осуществляется на более ранней стадии изготовления и что в итоге получаются более разнообразные по сравнению с ПЗУ и ПЛМ заказные схемы. Матрицы логических элементов, обычно именуемые базовыми кристаллами, представляют собой такие полупроводниковые кристаллы, чьи переключаемые элементы содержат небольшое число основных типов элементарных логических схем, в совокупности образующих ИС с регулярной логической структурой. Такие ячейки могут иметь вид отдельных транзисторов или транзисторных групп. Путем избирательного формирования металлических соединений кристаллы с матрицами логических элементов можно превращать в различные заказные ИС, изготовленные с учетом требований разных пользователей. В большинстве случаев для этого применяют две операции металлизации: сначала выполняются соединения внутри ячеек, а затем — между ячейками. При такой технологии объем работ по выполнению межсоединений ИС, согласно спецификации пользователя, сокращается до двух операций металлизации. Для обеспечения подобной возможности необходимо лишь разработать топологию, учитывающую новую специфику. В итоге затраты на разработку компоновочных топологических схем оказываются относительно небольшими. ИС, изготовленные на базе матриц логических элементов, с одной стороны, обладают заказной спецификой и остаются, с другой стороны, стандартными ИС, поскольку для их изготовления применяются практически стандартные методы. Благодаря матрицам логических элементов еще больше стирается граница между заказными и стандартными ИС, которая и раньше не была особенно резкой. Матрицы логических элементов занимают промежуточное положение меж-

ду этими двумя категориями ИС. В известной степени они соединяют преимущества и тех и других. Поэтому их также называют *полузаказными ИС*. За последние годы значение матриц логических элементов существенно возросло. С их помощью можно рентабельно изготавливать заказные ИС даже при незначительных объемах заказов (менее 10 000 штук в партии).

Программируемые и непрограммируемые стандартные ИС чаще всего различаются также и по степени интеграции. Программируемые стандартные ИС (БИС и СБИС), как правило, имеют более высокий уровень интеграции, чем ИС непрограммируемые, большинство из которых характеризуется средним и даже более низким уровнем. Причину этого нетрудно понять. Чем выше степень интеграции ИС, тем больше ее специфика. Если ИС спроектирована как многоцелевая, то уровень ее интеграции не должен быть слишком высоким: в противном случае придется предусматривать возможность ее программирования. Программируемость является выходом из положения тогда, когда возникает необходимость использования стандартных ИС с высокой степенью интеграции. Прежде чем перейти к более детальному рассмотрению упомянутых типов ИС, остановимся еще раз на возможностях их использования. На какой ИС следует остановить выбор, если возникает необходимость в схеме, способной решить определенную задачу обработки информации? В принципе на начальном этапе из рассмотрения нельзя исключить ни одну из пяти упомянутых выше категорий ИС, т.е. заказные ИС, непрограммируемые стандартные ИС, программируемые стандартные ИС, программируемые программным методом стандартные ИС, программируемые аппаратными средствами стандартные ИС, включая ПЗУ, ППЗУ и ПЛМ, а также матрицы логических элементов. Любое из пяти возможных решений имеет свои достоинства и недостатки. В табл. 12 дается их обзор применительно к наиболее часто используемым в настоящее вре-

Таблица 12. Достоинства и недостатки трех различных вариантов решения задачи обработки информации

Заказная ИС	Микросборка из непрограммируемых стандартных ИС	МикроЭВМ
Рентабельна при большом объеме спроса	Рентабельна при малом объеме спроса	Рентабельна при любом объеме спроса
Не слишком высокая сложность информационной задачи	Малая сложность информационной задачи	Высокая сложность информационной задачи
Решаемая задача не изменяется	Решаемая задача не изменяется	Предусмотрена возможность изменения задачи
Скорость обработки достаточно высока	Требуется высокая скорость обработки	Не требуется очень высокая скорость обработки
Физический объем и потребляемая мощность минимальны	Физический объем и потребляемая мощность незначительны	Особые требования к физическому объему и потребляемой мощности отсутствуют
Особые требования к срокам разработки отсутствуют	Приемлемы умеренные сроки разработки	На разработку не требуется существенных затрат времени

мя решениям – на базе заказных ИС, на основе сборки из непрограммируемых стандартных ИС или на основе микроЭВМ (микрокомпьютера). Какому из вариантов следует отдать предпочтение, будет зависеть от характера поставленной задачи и требований к системе обработки информации. Применительно к информационным задачам, которые в совершенно одинаковой форме встречаются достаточно часто, устройства на заказных схемах будут не только самыми дешевыми, но и, как правило, наиболее экономичными с точки зрения размеров и потребляемой мощности, а также самыми быстрыми в реализации, если все сопоставляемые варианты ИС имеют одинаковое схемотехническое исполнение. Однако в связи с тем, что для снижения производственных затрат при изготовлении заказных ИС часто обращаются к техническим решениям, снижающим быстродействие по сравнению со стандартными ИС, быстродействие заказных схем нередко ниже, чем стандартных. Задача обработки информации при таком подходе должна быть достаточно простой, чтобы при доминирующих в настоящее время уровнях интеграции ее вообще можно было решить с

помощью одной ИС. Решение, основанное на использовании микрокомпьютера, т.е. построение системы обработки информации на базе микропроцессоров и ИС памяти, имеет явные преимущества перед другими вариантами тогда, когда требуется обработка большого объема информации, которая может изменяться в течение срока использования системы, и когда сама система должна быть быстро предоставлена в распоряжение пользователя. На построение и программирование микрокомпьютера по существу уходит гораздо меньше времени, чем на разработку и изготовление заказной ИС. Вопрос о создании системы обработки информации из непрограммируемых стандартных ИС, как правило, никогда не встает. Если не учитывать больших ЭВМ, при проектировании которых до изобретения микропроцессора не оставалось ничего другого, как прибегать к применению непрограммируемых стандартных ИС, использование последних ограничивается исключительно системами, предназначенными для решения только простейших задач. Их преимуществом является прежде всего высокая скорость обработки данных. Она оказывается достижимой, так как для

создания подобных систем применяют быстродействующие транзисторно-транзисторные логические схемы.

Ниже мы более подробно обсудим отдельные типы ИС, обратившись к конкретным примерам и не пытаясь систематически освещать всю полноту интегральных схем, с которыми сегодня можно встретиться на международном рынке полупроводниковых приборов. Рассматриваемые примеры взяты главным образом из производственной программы Комбината микроэлектроники ГДР. Во всех случаях, когда это оказывается возможным, кроме стандартных обозначений ИС, применяемых в ГДР, приводятся также их международные обозначения.

Итак, начнем с заказных ИС.

ИС для электронных часов

В гл. 4 мы познакомились со схемой счета до двух. Путем последовательного соединения большого числа таких схем можно построить заказную ИС, которая требуется для электронных часов. Примером подобной схемы является ИС U118, которую выпускает Эрфуртский радиозавод (рис. 61). Эта ИС предназначена для использования в простейших наручных часах с аналоговым циферблатом. Схема имеет восемь штырьковых выводов. На выводы 1 и 5 подается напряжение питания. К обоим выводам 7 и 8 подводится переменное электрическое напряжение высокой частоты. Для схемы U118 частота этого напряжения должна равняться $2^{15} = 32\,768$ Гц, чтобы на выходах (выводы 2 и 3) ровно через каждые две секунды формировался импульс. Импульсы на выводе 3 сдвинуты во времени по отношению к импульсам на выводе 1 на секунду, так что каждую секунду в схеме возникает выходной импульс. Эти импульсы используются для управления шаговым двигателем, который при подаче на его вход очередного импульса поворачивает-

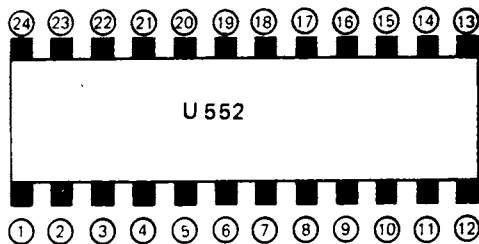
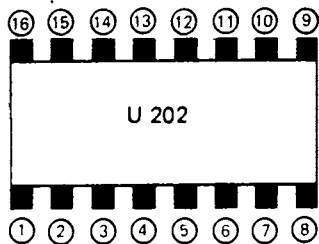
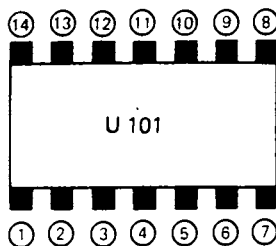
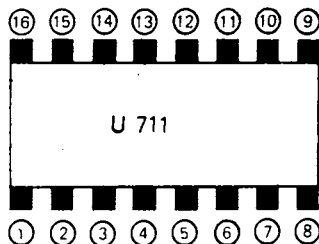


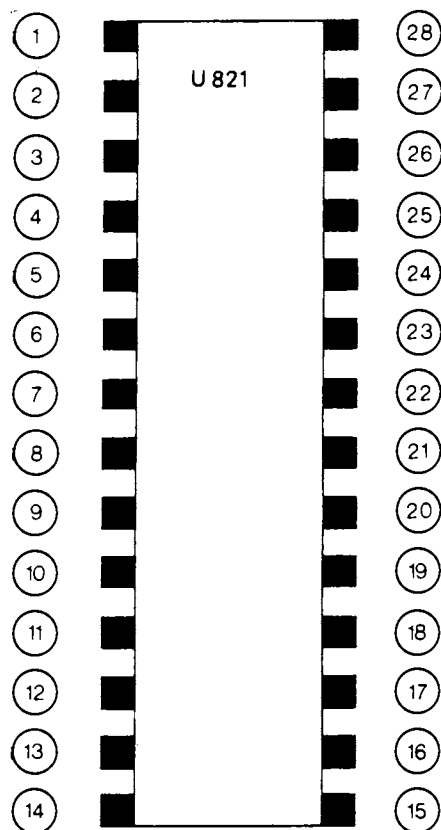
Рис. 61. Схематическое изображение некоторых ИС.

ся на шесть угловых минут. С вывода 6 может сниматься серия последовательных импульсов, следующих с частотой 4096 Гц. Если к этому выводу подключить небольшой микрофон, то в нем будет возникать звуковой сигнал. Вывод 4 служит для установки часов: подача импульса на этот вход вызывает перевод схемы на одну секунду назад. Необходимое для управления работой интегральной схемы часов напряжение высокой частоты генерируется небольшим кварцевым кристаллом. Кварц является пьезоэлектриком, т.е. таким материалом, в котором механические напряжения всегда вызывают появление электрического напряжения. У каждого кварцевого кристалла наблюдается особое «предпочтение» к колебаниям на определенной, так называемой *собственной* частоте. Значение этой собственной частоты практически зависит только от величины кристалла и типа его плоскости среза. И самое главное, собственная частота совершенно не зависит от температуры. Если к двум противоположным граням кристалла приложить электрическое напряжение, частота которого приблизительно совпадает с собственной частотой кристалла, то в нем будут возбуждаться достаточно мощные колебания. Однако частота этих колебаний теперь будет равна собственной частоте кристалла не *приблизительно*, как частота колебаний в возбуждающем электрическом контуре, а совершенно *точно*. Уход частоты в электрическом резонансном контуре, так или иначе имеющийся всегда, будет выравниваться кварцевым кристаллом. Частота колебаний *стабилизируется*. Секрет высокой точности электронных часов связан именно со стабилизацией частоты. В механических часах частота колебаний маятника или крутильных колебаний подвергается влиянию различных внешних возмущений. Соответствующие частоты колебаний именно поэтому не отличаются стабильностью, в чем и кроется причина намного более низкой точности механических часов по сравнению с электрическими, имеющими кварцевую стабилизацию. В настоящее время интегральные

схемы для часов выпускаются в различных конструктивных вариантах и с разнообразными дополнительными схемами (будильники, секундомеры, часы с радиоприемником, часы с микрокалькулятором). Если в часах предусмотрены выходы для звуковых тонов разной частоты, то часовая схема может быть использована для генерации мелодии.

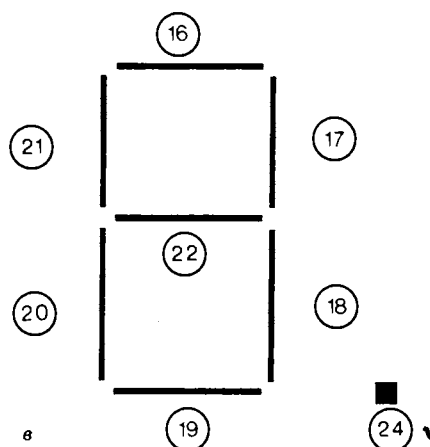
ИС карманного микрокалькулятора

Росту популярности микроэлектроники кроме электронных часов с кварцевой стабилизацией способствовал также микрокалькулятор карманного типа. Простейший микрокалькулятор, рассчитанный на выполнение четырех основных арифметических операций и нескольких дополнительных действий (например, функций памяти и вычисления процентов), уже давно построен на базе одной ИС. В настоящее время на основе одной-единственной ИС создают более удобные программируемые микрокалькуляторы. Для обсуждения принципа работы микрокалькулятора возьмем ИС U821, выпускаемую Эрфуртским радиозаводом. Общий вид этой микросхемы со штырьковыми выводами показан на рис. 62. Через вывод 1 в схему вводятся тактовые импульсы. Тактовая частота может лежать в пределах 100–270 кГц. Более подробно значение тактовых импульсов мы рассмотрим при обсуждении принципов работы микропроцессора. Входы 14, 15 и 28 соединяются с внешними источниками напряжения питания. Выводы 3–13 являются цифровыми входами. Вывод 26 представляет собой вход для двоичного числа. Он должен быть соединен с выводами 3 (выход десятичной цифры 1), 4 (выход десятичной цифры 2),, 11 (выход десятичной цифры 9), 12 (выход десятичного нуля) и 13 (выход знака). Эти соединения прерываются цифровыми клавишами микрокалькулятора (см. рис. 62,б). При нажатии на клавишу «2» происходит восстановление соединения между выводом 4 и входом 26, т.е. вводится цифра 2. Через вывод 25 в ИС

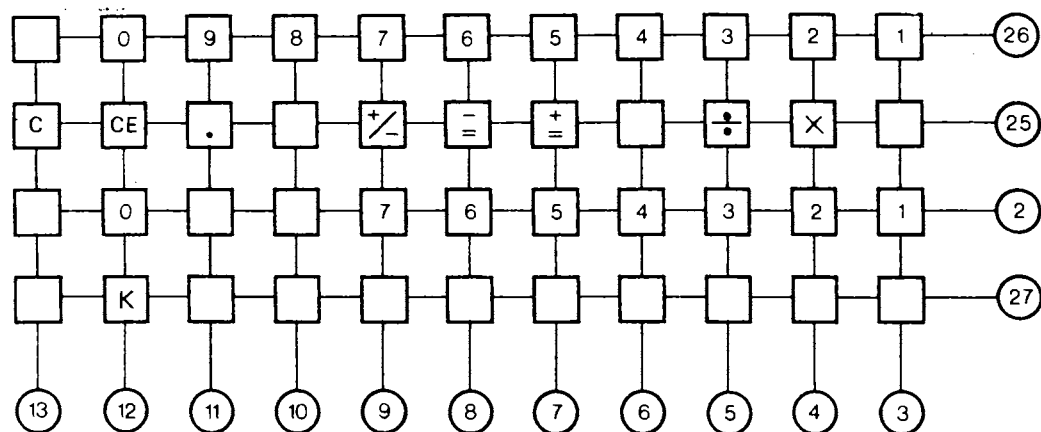


а

Рис. 62. Схемы, поясняющие принцип работы простейшего микрокалькулятора, построенного на основе ИС U821. а – разводка выводов ИС U821; б – клавишное поле микрокалькулятора с указанием связей между клавишными контактами и выводами ИС U821; в – расположение сегментов светодиодного индикатора (указаны связи с выводами ИС).



в



б

вводится задаваемая вычислительная операция, через вывод 2 – запятая, отделяющая целую часть от дробной, а через вывод 27 – команда операции над постоянной величиной. Как реализуются соединения этих выводов с десятичными цифровыми выходами, можно проследить, обратившись к рис. 62,б. В случае выполнения операции \times (умножение) нужно, например, установить соединение между выводами 7 и 25, что обеспечивается нажатием на клавишу \times . Результат операции будет выдан на семь выводов, начиная с 16-го и кончая 22-м. Сигналы с этих выводов управляют отдельными сегментами цифрового индикатора микрокалькулятора (рис. 62,в). Через вывод 24 выдается десятичная запятая показаний. Вывод 23 не используется.

ИС для фотоаппарата

Целый ряд задач обработки информации, для решения которых могут применяться заказные ИС, возникает в области автоматизации управления бытовыми электроприборами, фотоаппаратами, звуко- и видеозаписывающей и воспроизводящей аппаратурой. Для того чтобы все эти приборы и аппараты функционировали правильно, с ними надо уметь обращаться. Так, например, при пользовании фотоаппаратом необходимо измерить освещенность снимаемого объекта и расстояние до него, выбрать, соблюдая определенные правила, величину диафрагмы, определить экспозицию. Выполнение тех механических операций регулировки, которые обычно делают вручную, можно поручить специальному механизму, имеющему привод от миниатюрного электродвигателя. Такой механизм способен выполнять любые операции регулирования, однако сам он не «знает», какие из возможных условий являются правильными, и поэтому в свою очередь нуждается в управлении. Такое управление осуществляет электронная ИС фотоаппарата, которая функционирует в комбинации с фотоэлементом. На фотоэлемент поступает первичная информация об освещенности объекта съемки и расстоянии до него, ко-

торая преобразуется в аналоговые электрические сигналы. В фотоаппаратах наиболее совершенных моделей управляющая ИС, обрабатывая поступающие сигналы и ориентируясь на определенные установки, вводимые фотографом и задающие чувствительность пленки и режим съемки, вычисляет значения расстояния до объекта, освещенность и диафрагму. Кроме того, схема генерирует коммутационные импульсы, которые, воздействуя на шаговые электродвигатели или электромагниты, обеспечивают установку правильных величин. Благодаря этому обеспечивается весьма высокая степень автоматизации работы фотоаппарата. Достаточно направить объектив на объект съемки, нажать на спуск – и можно не сомневаться, что будет получен снимок, качество которого с точки зрения резкости и правильной экспозиции удовлетворит самого взыскательного критика, чего вряд ли удалось бы добиться при ручной установке выдержки, диафрагмы и наводке на резкость. Автоматизация операций управления достигается путем использования не только микроэлектронной схемы. Вместе с ней работают датчик для приема первичной информации (фотоэлемент) и исполнительный орган, позволяющий реализовать механические функции регулировки (механизм с приводом от шагового двигателя или электромагнита). Электронная ИС является «мозговым центром» этого управляющего устройства. Для примера можно кратко описать такую схему, используемую в зеркальном фотоаппарате «Практика» В 200. Эта схема состоит из двух частей – аналоговой и цифровой. Яркость объекта съемки (освещенность) измеряется с помощью фотоэлемента из арсенид-фосфида галлия. Помимо чувствительности фотопленки в аппарат необходимо вручную ввести также значение диафрагмы. По этим данным ИС вычисляет экспозицию и выдает результат на шкалу индикатора, выполненного из 16 светозлучающих диодов. Наводка на резкость производится вручную. Управляющая ИС позволяет использовать фотоаппарат в четырех режимах ра-

боты. Так, например, в режиме «Автоматика» при нажатии на спуск затвор с помощью электромагнитного привода открывается на время, соответствующее высвечиваемому на индикаторе значению экспозиции.

Таким автоматическим управлением, которое мы кратко рассмотрели на примере фотоаппарата, сегодня оснащают многие бытовые приборы и промышленные установки. Не всегда для этой цели используют заказные ИС, часто применяют микрокомпьютеры. Во многих случаях подлежащая обработке входная информация поступает не от внешних датчиков, как это было в случае с управляющей ИС фотоаппарата, а из программной или управляющей памяти, которая либо входит в состав самой управляющей ИС, либо является отдельной ИС памяти. В такой памяти могут храниться различные программы, из которых владелец данного прибора выбирает нужную. В таком случае все управление сводится к нажатию на клавишу выбора требуемой программы: все остальное происходит по управляющим сигналам ИС. Подобный вид управления применяется, например, в бытовых стиральных машинах, оснащенных заказной управляющей ИС или микрокомпьютером.

Аналоговые ИС

К числу заказных относятся и многие аналоговые ИС. Для этого они должны обладать свойствами, характерными для заказных интегральных схем, о чем мы говорили ранее. Такая схема должна быть рассчитана на полное решение специальной задачи обработки информации. При этом не имеет никакого значения, получено ли решение цифровым или аналоговым способом. Поскольку исходная информация поступает от реальных источников нередко в аналоговой форме, то и аналоговые ИС часто являются исключительно удачными заказными схемными устройствами. Кроме того, здесь уместно вспомнить и о более высокой скорости обработки информации аналоговыми

средствами, на что указывалось в гл. 4. К типичным заказным аналоговым ИС относится усилитель для бытовой электронной аппаратуры. Интегральная схема А211, выпускаемая заводом полупроводников во Франкфурте-на-Одере, представляет собой усилитель низких частот мощностью 1 Вт, предназначенный для усиления речевых и музыкальных сигналов в радио- и телевизионных приемниках, проигрывателях и магнитофонах, а ИС типа А283 того же завода является полностью оснащенный СВЧ-приемником с фильтром и катушками индуктивности. В распоряжение конструкторов телевизионной аппаратуры промышленность предоставляет аналоговые ИС, предназначенные для декодирования сигналов цветности и яркости изображения. Универсальным устройством, так называемым операционным усилителем, является ИС В081, выпускаемая тем же заводом во Франкфурте-на-Одере (международное обозначение TL 081).

Однако в этом случае лучше говорить о стандартных, а не о заказных ИС. Аналоговые ИС обеспечивают также хорошую стабилизацию и эффективное ограничение электрических напряжений и токов. В качестве важнейшей аналоговой ИС, входящей в состав аналого-цифрового преобразователя, в гл. 4 мы уже рассмотрели схему компаратора. Завод полупроводников во Франкфурте-на-Одере выпускает, например, ИС компараторов типа А110. И эту схему правильнее считать стандартной аналоговой ИС. Связующими звеньями между аналоговыми и цифровыми схемами являются, с одной стороны, аналого-цифровые (АЦП) и, с другой стороны, цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи. Эти ИС в настоящее время выпускаются в виде стандартных схем и представлены разнообразными типами. Так, например, интегральная схема С520, выпускаемая заводом полупроводников во Франкфурте-на-Одере (AD 2020), обеспечивает преобразование аналоговых сигналов в трехзначные двоично-десятичные числа.

Итак, на примере перечисленных ИС

мы познакомились со стандартными интегральными схемами. Но это были стандартные *аналоговые* ИС. Рассмотрим теперь стандартные *цифровые* ИС – сначала непрограммируемые ИС малой и средней степени интеграции, а затем программируемые ИС с высокой степенью интеграции.

Логические элементы

Типичными представителями ИС малой степени интеграции являются различные логические элементы. В большинстве применяемых вариантов таких схем в одном приборном корпусе размещается несколько логических элементов. Широкое распространение получили логические элементы типа И, И-НЕ, ИЛИ, ИЛИ-НЕ, имеющие более двух входов каждый. Для того чтобы на выходе логического элемента И появился сигнал высокого уровня, на все его входы должны быть поданы сигналы высокого уровня, так как в противном случае выходной сигнал будет низкого уровня. На выходе логического элемента ИЛИ имеется сигнал низкого уровня, если на все его входы поступают сигналы низкого уровня; в противном случае на выходе будет сигнал высокого уровня. К наиболее часто применяемой серии логических элементов следует отнести транзисторно-транзисторную логику (ТТЛ). Так, завод полупроводников во Франкфурте-на-Одере использует серию ТТЛ D10 в своих биполярных ИС (SN74). ИС D100 (SN7400) (рис. 45) содержит четыре независимых двухвходовых логических элемента И-НЕ. В состав ИС D204 (SN74H04) входят шесть независимых логических элементов НЕ (инверторов).

Стандартные ИС со средней степенью интеграции

Представителем ИС со средней степенью интеграции может служить схема декодирования U711 типа «1 из 8», выпускаемая Эрфуртским радиозаводом. Она предназначена для преобразования трехзначно-

го двоичного числа. Эта схема напоминает рассмотренный на рис. 35 декодер типа «1 из 4». Корпус схемы U711 с его 16-штырьковыми выводами изображен на рис. 61. Выводы 5–8 представляют собой четыре двоичных входа, выводы 1–4 и 13–16 являются восемью выходами. На выводы 10 и 11 соответственно подаются напряжения питания и входное. Вывод 12 соединен с корпусом, вывод 9 не используется. К стандартным ИС со средней степенью интеграции относятся также запоминающие устройства малой емкости, так называемые регистры. Они служат для краткосрочного хранения небольших объемов информации. Примером таких схем является ИС D181, которая представляет собой 16-разрядный регистр и выпускается заводом полупроводниковых приборов во Франкфурте-на-Одере (международное обозначение SN7481). Регистр имеет 2×4 адресных входов, два входа записи и два выхода считывания. Он применяется в качестве высокоскоростного буфера или промежуточного накопителя. Накопитель малой емкости с последовательным доступом к хранимым данным называется сдвиговым регистром. ИС D191 того же завода (SN7491) представляет собой 8-разрядный сдвиговый регистр. Перед запоминающим входом этого регистра имеется двухвходовый элемент И. Сдвиговый регистр применяется также в качестве схемы задержки. Так, например, у триггерной схемы задержки D174 (SN7474) импульс на выходе появляется через один такт после подачи тактового сигнала на вход. Выбрав длину тактового периода, задают длительность задержки.

К стандартным схемам со средней степенью интеграции относится также и ИС сумматора. Эрфуртский радиозавод выпускает, например, ИС U101, состоящие из двух независимых одноразрядных сумматоров, каждый из которых позволяет суммировать три одноразрядных двоичных числа. Эта ИС имеет 14 выводов, которые показаны на рис. 61. Выводы 1 и 4 используются для подачи напряжения питания на оба одноразрядных сумматора, а вывод 11 соединен с землей. На

выводы 2, 3 и 4 подаются три двоичных сигнала, сумма которых выдается с выводов 6 (1-й знак) и 7 (2-й знак, перенос); на выводы 14, 13 и 12 можно подавать три других одноразрядных двоичных числа, а суммму считывать с выводов 10 (1-й знак) и 9 (перенос).

Этими примерами мы ограничимся в нашем обзоре широкого спектра стандартных ИС со средней степенью интеграции, выпускаемых микроэлектронной промышленностью, чтобы перейти к программируемым стандартным ИС с высокой степенью интеграции. Основное внимание мы хотим уделить интегральным схемам, используемым для создания микрокомпьютеров. Ранее уже отмечалось, что между микрокомпьютером и ИС с высокой степенью интеграции существует тесная связь. Итак, теперь мы знаем, что понятие «микрокомпьютер» нельзя понимать буквально. В данном случае подразумевается малая программируемая система обработки информации в широком смысле этого слова. Такая система предназначена не только для осуществления операций над числами, но и для управления технологическим процессом, перевода отдельных слов с одного языка на другой, генерации устных речевых сообщений или реализации роли партнера в электронной игре. Общность между широкой и узкой интерпретацией понятия микрокомпьютеров, выполняющих числовые операции, заключается в том, что в обоих случаях имеют в виду микрокомпьютеры, представленные микропроцессором и устройством памяти, которые входят в состав общей интегральной схемы.

ИС памяти

Теперь мы хотим перейти к схемам запоминающих устройств (ЗУ). Во избежание недоразумений сразу же оговоримся, что речь пойдет только о полупроводниковых ЗУ. Кроме полупроводниковых ЗУ имеются, конечно, и другие виды памяти, например на магнитных сердечниках, на магнитных дисках, на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД), оптические

ЗУ и т. д., которые по своей емкости, как правило, значительно превосходят полупроводниковые ЗУ. Так, например, на оптическом диске диаметром всего 30 см с помощью тончайшего лазерного луча может быть записана информация объемом 10^{10} бит. Такое количество данных превышает объем информации, заключенной в 1000 томах книг по 1000 страниц. Однако большинство подобных ЗУ, или накопителей, при их совместном использовании с ЭВМ выступают лишь в качестве периферийных накопителей данных, не являясь оперативной или основной рабочей памятью, функционально объединенной с компьютером. Причина в первую очередь заключается в том, что периферийные ЗУ, если учесть высокую скорость обработки информации, отличаются чересчур большим временем доступа к хранящимся в них данным. Легко можно себе представить, что при использовании, например, накопителя на магнитной ленте место с запрошенными данными можно найти только путем прямой или обратной перемотки ленты. Даже в случае использования быстродействующих магнитных ЗУ, например ферритовых или на основе ЦМД, время доступа к памяти составляет от одной микросекунды и больше. И по сегодняшний день ЗУ с такими характеристиками все еще применяются как основная память ЭВМ, а ведь раньше использовались только ферритовые ЗУ. Следовательно, если мы хотим полностью использовать высокое быстродействие устройств обработки информации, нам потребуются ЗУ со временем доступа намного меньше 1 мкс. Такой рубеж в настоящее время уже достигнут в полупроводниковых ЗУ. Информация в них хранится в той же форме, что и в ИС, применяемых для обработки данных, или в виде электрических импульсов, т. е. в форме, наиболее удобной для обработки в этих ИС. Время доступа к хранящейся в таких ЗУ информации лежит в пределах от нескольких десятых до нескольких тысячных долей микросекунды.

Принцип функционирования полупроводниковой памяти нами уже был рас-

смотрен в гл. 4, где отмечалось и то особое положение, которое занимает постоянная память. Собственно говоря, по своей схеме постоянная память вовсе не является памятью: она представляет собой схему комбинационной логики, которая в ответ на определенный входной импульс генерирует серию соответствующих выходных импульсов (рис. 34). Содержимое постоянной памяти можно лишь считывать – изменять его нельзя. Эту память называют также постоянным запоминающим устройством, или сокращенно ПЗУ. Если, к примеру, требуется вычислить синусы определенных углов, то соответствующую информацию вводят в ПЗУ микрокомпьютера. Пока микрокомпьютер решает специальную прикладную задачу, в которой нужно вычислить синусы, нет никакого повода изменять эту информацию. Если от хранящего ее ПЗУ отключить напряжение питания, то информация не исчезнет и не исказится. Несмотря на то что при отсутствии напряжения питания данные нельзя получить из ПЗУ, информация сохраняется, а при восстановлении питания ее снова можно считывать.

Параллельно с ПЗУ используется и память данных, которые должны поступать в электронную ИС для обработки или же являются результатами этой обработки. После их использования данные в памяти стираются и вместо них может быть записана новая информация. ИС памяти, с которыми мы познакомились в гл. 4, обладают такими возможностями благодаря особенностям своей структуры. При обращении к ним можно осуществить доступ к любой ячейке по ее адресу для считывания или записи требуемой информации. Такие устройства называются оперативными ЗУ или ЗУ с произвольной выборкой (ЗУПВ). ЗУПВ со статическими ячейками относятся к ЗУПВ статического, а с динамическими ячейками – к ЗУПВ динамического типа (об этом уже говорилось в гл. 4). Если, например, микрокомпьютеру предстоит вычислить синус 33° , то в ЗУПВ следует ввести «33°». При отключении питания от ЗУПВ его

содержимое через более или менее длительный промежуток времени окажется утерянным. Промежуточное положение между ПЗУ и ЗУПВ занимают программируемые постоянные ЗУ (ППЗУ). Это название закрепилось за запоминающими устройствами, в которые пользователь вводит нужную ему информацию один раз, после чего оно используется как постоянное ЗУ. В случае применения СППЗУ (стираемое ППЗУ) хранящуюся информацию можно стирать (например, ультрафиолетовым излучением) и заменять новой. Другим вариантом исполнения ПЗУ является электрически стираемое ППЗУ (ЭСППЗУ), в котором стирание и последующая запись информации осуществляются мощными импульсами напряжения положительной или отрицательной полярности. Такие стирающие и записывающие импульсы создают условия, при которых через адресуемую ячейку памяти осуществляется заряд или разряд конденсатора. Конденсаторные пластины (затвор и скрытый электрод полевого транзистора) настолько хорошо изолированы друг от друга, что находящийся на них заряд может сохраняться неизменным в течение длительного времени – по данным изготовителей, на протяжении 10 и более лет. СППЗУ, следовательно, имеет сходство с ЗУПВ, отличаясь от него лишь тем, что для записи в СППЗУ, образно говоря, требуется более твердый карандаш, чем для записи в ЗУПВ.

Для пользователя важнейшими техническими характеристиками ИС ЗУ являются емкость памяти и время доступа к хранимым данным. Для использования в микрокомпьютерах применяют ЗУ емкостью 1 кбит и более. Промышленность предлагает изготовителям вычислительных систем разнообразные ЗУ с широким диапазоном емкостей – на 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 и 256 кбит, причем в последнее время появились ЗУ емкостью 1 Мбит. В лабораториях уже созданы ЗУ на 4 Мбит. Вспомним, что 1 кбит равен 2^{10} , или 1024 бит, т. е. округленно 1000 бит. Время выборки для такого ЗУ составляет от 10 нс до 1 мкс. Так, например, японская

фирма «Хитати» выпускает ЗУПВ динамического типа емкостью 64 кбит с временем выборки 18 нс. Во всем мире широкое распространение получили динамические ЗУПВ емкостью 64 кбит, имеющие международное обозначение 4164 и выпускаемые различными фирмами. В 1983 г. было продано 3000 млн. таких приборов на сумму около 3 млрд. марок ГДР. На Комбинате микроэлектроники ГДР налажен выпуск схем памяти U264, которые представляют собой динамические ЗУПВ на 64 кбит, сходные с прибором 4164. ИС U256 Эрфуртского радиозавода представляют собой динамические ЗУПВ на 16 кбит, а ИС U202, знакомая нам по рис. 45, где показан ее полупроводниковый кристалл, является статическим ЗУПВ на 1 кбит. На рис. 61 схематически показан корпус ИС U202 с 16 штырьковыми выводами. Выводы 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 14, 15, 16 служат для выборки ячеек памяти по адресам. С их помощью можно осуществлять прямую выборку всех $2^{10} = 1024$ запоминающих ячеек. Через вывод 3 в ЗУ поступает сигнал, указывающий, какую операцию следует произвести – считывание или запись. Подача на этот вход сигнала единицы означает считывание, а сигнала нуля – запись. Считывание данных осуществляется через вывод 11, запись – через вывод 12. На вывод 10 подается напряжение питания, а вывод 9 соединен с землей. Вывод 13 используется для адресной выборки именно этого ЗУ в том случае, если параллельно используется несколько таких устройств памяти (операция выбора кристалла). Время выборки хранимых в ЗУ данных составляет 400 нс. В качестве примеров СППЗУ можно назвать ИС U552 (1702A7) и U555 (12708), изготавливаемые Эрфуртским радиозаводом. Емкость памяти U552 равна 2 кбит, а U555 – 8 кбит. Оба ЗУ имеют пословную организацию, т.е. осуществляется прямая адресная выборка не отдельных ячеек, а их групп, составляющих целые машинные слова. Длина одного слова равна 8 разрядам (битам), т.е. 1 байту. При использовании ИС U552 (рис. 61) в общей сложности можно ввести в память

256 машинных слов длиной по восемь разрядов, т.е. $256 \times 8 = 2$ кбит. Поскольку $256 = 2^8$, то для обращения к такой памяти требуются 8-разрядные адреса. Адреса подаются на выводы 1, 2, 3, 17, 18, 19, 20, 21. Выводы 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 11 предназначены для считывания и записи 8-разрядных машинных слов. Для программирования содержимого памяти через вывод 13 в ЗУ вводят программирующий импульс напряжения амплитудой примерно 50 В, а для стирания используют ультрафиолетовое излучение. Выводы 12, 25, 16 и 24 служат для ввода различных напряжений питания, выводы 22 и 23 являются входами тестирующих сигналов, а вывод 14 используется для выбора кристалла. Время выборки данных для U552 составляет 1 мкс.

Мы привели достаточное число примеров ИС ЗУ, необходимых для построения микрокомпьютера. Теперь можно перейти к его центральному устройству, осуществляющему обработку информации, – микропроцессорной ИС, или просто микропроцессору.

Микропроцессор

Об этой интегральной схеме мы уже кое-что рассказывали. Она представляет собой программируемую с помощью программных средств стандартную ИС высокой степени интеграции, предназначенную для выполнения арифметических и логических операций. Тот объем работы, который в крупных ЭВМ выполняется только с помощью узла, включающего в свой состав большое число различных ИС, в микрокомпьютере берет на себя одна интегральная схема – микропроцессор. Впервые микропроцессоры появились в 1971 г., когда фирме «Интел» в США удалось построить центральный процессор микрокомпьютера в виде одного кристалла. С этого первого микропроцессора и начал свое развитие процесс, итогом которого стал мощный «прорыв» микроэлектроники по всему «фронту» информационной обработки. Появилась возможность создания «всеобъемлющей и

общедоступной» системы обработки информации. Чтобы понять принцип работы микропроцессора, необходимо разобраться в основах функционирования программируемых ЭВМ. Подобная машина в процессе работы выполняет серию операционных циклов, повторяющихся во временной последовательности. Такой цикл складывается из определенного числа машинных тактов, причем каждый из них имеет постоянную длительность. Такты задаются тактовыми импульсами, генерируемыми колебательным контуром, частота которого стабилизирована кварцевым кристаллом. Это синхронизирующее устройство называется тактовым генератором. Каждый тактовый импульс переключает ЭВМ в другое состояние. После выполнения определенного числа тактов машина возвращается в исходное состояние. Это возвращение говорит о том, что цикл завершился. Число тактов, составляющих один цикл, меняется в зависимости от особенностей машины. Ниже мы рассмотрим цикл, состоящий из четырех тактов. Таким образом, наша ЭВМ будет четырехтактной. После окончания каждого четвертого такта машина возвращается в исходное состояние. Задания, которые машина получает, она решает в пошаговом режиме. В каждом цикле осуществляется подготовка к выполнению одного следующего шага. Какие шаги машина должна выполнить в данном цикле, она первоначально не знает – точнее, этого не знает ее центральный процессор (ЦП). Данная информация хранится в виде команд, предварительно помещенных в память. Совокупность этих команд образует программу. В первом такте каждого цикла центральный процессор должен обратиться к памяти, чтобы иметь возможность во втором такте цикла выбрать команду, которую ему предстоит выполнить за оставшуюся часть цикла. В третьем и четвертом тактах непосредственно выполняются выбранные из программы команды, после чего первый машинный цикл завершается. Для упрощения мы в данном случае принимаем, что выборка и выполнение команды осуществляются в

пределах одного-единственного цикла. В действительности же такая схема справедлива только для простейших команд, тогда как большинство из них выполняется за ряд машинных циклов. Однако будем и дальше считать, что процессор работает по предложенной нами упрощенной схеме. Во втором машинном цикле ЦП должен снова обратиться к памяти, чтобы, выбрав команду, «узнать», что ему следует сделать за оставшуюся часть цикла. После каждой выборки команды из ЗУ (в первом такте цикла) она выполняется в обоих последних тактах. Центральный процессор знает только о том, что ему предстоит сделать в текущем цикле. Какие действия должны будут выполняться в дальнейшем, ему неизвестно, а что он делал раньше, ЦП уже «забыл». О прошлых своих действиях процессор помнит лишь постольку, поскольку получает сообщения о числе пройденных машинных циклов, т. е. о числе выполненных команд. Такое сообщение он получает от специальной входящей в состав ЦП схемы, которая называется счетчиком команд. Для ЦП эта информация имеет важное значение. На ее основе, т. е. опираясь на число уже выполненных команд, счетчик генерирует адреса тех ячеек памяти, из которых нужно извлечь следующие команды программы. Команды представляют собой двоичные коды, т. е. память содержит не собственно команды, а соответствующие им двоичные числа. Именно эти двоичные числа и поступают в ЦП по его вызову. Там они подвергаются декодированию специальной схемой, так называемым декодером команд. Если команда требует осуществить сложение двух чисел, то в действие вступает арифметико-логическое устройство, которое сокращенно обозначается АЛУ. Оно тоже входит в состав ЦП и предназначается для реализации всех арифметических и логических операций. АЛУ является собственно вычислительной схемой ЭВМ. Остальные ранее перечисленные составные части ЦП, т. е. счетчик команд, регистр команд и декодер, включая и другие не упомянутые здесь дополнительные схе-

мы, а также тактовый генератор управляют работой АЛУ в соответствии с программой, хранящейся в памяти. Все эти компоненты вместе взятые носят общее название устройства управления.

Команда – это требование выполнить определенную операцию над определенным числом или числами. Разумеется, речь здесь идет о двоичных числах. Как и команды, числа, которые должен подвергнуть обработке компьютер, предварительно вводят в память. Команда может, например, представлять собой требование осуществить выборку числа из памяти и последующую его передачу в специальный внутренний накопитель центрального процессора, так называемый регистр данных. В распоряжении ЦП находится целый ряд подобных регистров, служащих для кратковременного хранения операндов арифметических и логических операций, а также полученных результатов. Если, например, к содержимому определенного регистра необходимо прибавить заданное число, то соответствующая команда должна, во-первых, содержать требование выполнить операцию сложения, во-вторых, число, которое следует прибавить, или указание на то, где это число следует искать. Таким указанием является адрес числа в памяти. Следовательно, команда делится на две части – код заданной операции и адрес операнда. После выборки из памяти команда целиком или ее части также помещаются на кратковременное хранение в один из регистров ЦП – так называемый регистр команд.

Познакомившись с АЛУ, устройством управления и регистрами ЦП, мы получили представление о важнейших устройствах, составляющих центральный процессор программируемой ЭВМ. Если все эти устройства объединить в составе одной интегральной схемы, то она станет именно тем прибором, которому мы уже дали определение микропроцессора. Итак, теперь мы знаем, как устроен и работает микропроцессор. Остается только внести еще одно дополнение. До сих пор мы не определили, какова длина, или разрядность, двоичных чисел, которыми опери-

рует микропроцессор, и какова длина адресов, которые он генерирует. Двоичные числа называют также машинными словами, а двоично-кодированные адреса – адресными словами. Микропроцессор конкретной конструкции всегда оперирует машинными и адресными словами одной определенной длины. При этом длина машинного слова и длина адресного слова совсем не обязательно должны совпадать. Микропроцессоры могут различаться между собой длиной своих машинных и адресных слов. В настоящее время выпускаются микропроцессоры с длиной машинных слов в 4, 8, 16 и даже 32 разряда. Чем длиннее машинные слова, тем больше числа, которые они представляют обработке в АЛУ, и тем быстрее должен работать микропроцессор. Скорость его работы, однако, зависит и от времени, требующегося для выполнения одной команды. Как мы и думали, это время равно продолжительности одного машинного цикла при условии, что выполнение команды занимает один машинный цикл. В других случаях время выполнения команды выражается величиной, равной общей длительности соответствующего числа машинных циклов. Поскольку в нашем примере машинный цикл состоит из четырех тактов, а его продолжительность, следовательно, равна четырехтактному периоду, то по выбранной тактовой частоте можно судить о быстродействии микропроцессора. В принципе чем выше тактовая частота, тем более быстродействующим является микропроцессор. По длине адресного слова можно установить, выборку какого числа ячеек памяти, или соответственно групп таких ячеек, можно осуществить прямым путем. При длине адреса 8 разрядов это число равно $2^8 = 256$, а 16 разрядов – $2^{16} = 65\,536$. В настоящее время максимальная длина адреса превышает 20 разрядов. При этом имеется возможность для прямой адресной выборки более миллиона ячеек памяти. Команды кодируются точно так же, как и машинные слова, однако могут применяться и такие команды, которые состоят из нескольких машинных слов. Микро-

процессоры самых разных конструкций в настоящее время выпускают многие фирмы. По производительности эти приборы можно разделить на несколько классов. Примером микропроцессора низшего класса производительности является U808, который выпускается Эрфуртским радиозаводом. Длина его машинного слова составляет 8, а адресного – 14 разрядов. Он выполняет 48 различных команд. Время выполнения одной команды составляет 12–44 мкс. Для изготовления U808 используется технология *p*-канальных МОП-транзисторов. Другой микропроцессор того же завода – прибор U880 (Z80). Он относится к классу средней производительности, оперирует 8-разрядными машинными и 16-разрядными адресными словами и обладает набором из 158 команд. Время выполнения одной команды составляет несколько микросекунд при минимальном значении 1,6 мкс. На рис. 47 приведена увеличенная фотография полупроводникового кристалла микропроцессора U880. Эта ИС выпускается в пластмассовом корпусе, имеющем 40 штырьковых выводов. Готовый микропроцессор изображен на рис. 57.

На 16 выводов прибора выдается адрес для обращения к внешней памяти, восемь выводов служат для ввода-вывода данных, один предназначен для подвода рабочего напряжения (5 В), еще один используется для соединения с внешним тактовым генератором, задающим частоту следования тактовых импульсов, равную 2,5 МГц (при максимальном значении 6 МГц). Через остальные выходы в микропроцессор вводятся специальные служебные команды, например требование прекратить выполнение текущей программы (запрос прерывания). Другие выходы служат для выдачи информации о состоянии микропроцессора. Ниже приводятся некоторые команды микропроцессора U880.

- Команды, с помощью которых 8- или 16-разрядное слово передается из внешнего ЗУ во внутреннюю память микропроцессора.
- Команды обмена содержимым регист-

ров, с помощью которых осуществляет обмен информацией между двумя регистрами памяти микропроцессора.

- Команды выполнения арифметических и логических операций с двумя 8- или 16-разрядными числами.
- Команды передачи управления, с помощью которых можно изменять порядок выполнения серии команд программы.
- Команды ввода и вывода.

Увеличение быстродействия микропроцессора U880 по сравнению с микропроцессором U808 достигнуто за счет перехода от технологии *p*-канальных МОП-транзисторов на технологию *n*-канальных МОП-приборов. В связи с этим полезно вспомнить замечание из гл. 3 о том, что электроны обладают более высокой скоростью, чем дырки.

Примером микропроцессора высшего класса производительности может служить прибор 8086 фирмы «Интел» (США). Он осуществляет обработку 16-разрядных машинных слов, причем длина адресных слов здесь также равна 16 разрядам. Работая на тактовой частоте 5 МГц, микропроцессор 8086 выполняет сложение двух 8-разрядных чисел за 0,6 мкс. К числу других высокопроизводительных 16-разрядных микропроцессоров можно отнести приборы 68 000 фирмы «Моторола» и Z80 фирмы «Зайлог». Эрфуртский радиозавод в свою очередь приступил к выпуску 16-разрядных микропроцессоров, носящих обозначение U8000. Первыми поступившими в продажу 32-разрядными микропроцессорами были iAPX432 фирмы «Интел» и Z80000 фирмы «Зайлог». 16-разрядные микропроцессоры представляют собой такие ИС, которые по всем признакам оптимально подходят для решения многих практических задач в области обработки информации. Несмотря на это, им не удалось вытеснить 8-разрядные микропроцессоры, по-прежнему занимающие доминирующее положение, и сдержать рост спроса на другие, в первую очередь 32-разрядные, микропроцессоры. В то же время 4-разрядный микропроцессор, по всей видимости, полностью поте-

рял свое значение. В общем объеме продаж еще совсем недавно 90% приходилось на 8-разрядные и 10% – на 16-разрядные микропроцессоры.

МикроЭВМ

Микропроцессор может выполнять функции центрального процессора (ЦП) программируемого компьютера. У крупных ЭВМ уже сегодня ЦП представляет собой сборку из большого числа отдельных ИС, среди которых, возможно, имеются и микропроцессоры. Эти ИС объединяются в сборку с целью построения одной большой схемы, в том числе и схемы центрального процессора. Если же ЦП состоит лишь из одной интегральной схемы, а именно микропроцессора, то такой компьютер называют микроЭВМ. Если взять 16-разрядный микропроцессор и на его основе собрать ЦП, то его производительность практически сравняется с производительностью мини-ЭВМ. Рассмотрим теперь более подробно структуру микроЭВМ. Кроме микропроцессора в ее состав входят ЗУ для хранения информации и программы. Память может состоять из одной или нескольких ИС. В микроЭВМ используются также заказные ИС ввода и вывода данных, передачи управления и обмена данными о состояниях. И наконец, для обеспечения работы микроЭВМ требуется тактовый генератор, если в микропроцессоре отсутствует такая внутренняя схема. Следовательно, микроЭВМ может быть построена из небольшого числа интегральных схем (рис. 63). Созданием микроЭВМ, безусловно, должны заниматься специалисты, однако те отрасли промышленности, которые занимаются выпуском ЭВМ, просто не в состоянии выполнять работы по проектированию и изготовлению микроЭВМ. Поэтому рассматриваемую нами микроЭВМ можно охарактеризовать как устройство, изготовить которое, не прибегая к помощи фирм-изготовителей компьютеров, способна сама микроэлектронная промышленность, оставив на долю потребителя лишь выполнение ряда

монтажных операций. В качестве памяти микроЭВМ используются только ЗУПВ, так как данные требуется и считывать, и снова записывать. Во всех тех случаях, когда программа меняется относительно редко или же вообще не меняется, программная память может быть организована в виде ПЗУ, ППЗУ и СППЗУ. Применение постоянных ЗУ гарантирует сохранность программы при выключениях микроЭВМ. Нередко программная память представлена ЗУПВ, что позволяет применять в микроЭВМ общую память для хранения данных и команд. В любом случае в качестве архивной памяти приходится обращаться к магнитному накопителю, который гарантирует сохранность программы в случае выключения компьютера. Связь между памятью, устройствами ввода-вывода и микропроцессором осуществляется через *общую шину* и сводится к обмену информацией в форме управляющих сигналов, данных и адресов. Конфигурация этой шины может быть разной. В настоящее время большинство микроЭВМ оснащено отдельными шинами для каждого из перечисленных трех видов информации, т.е. *управляющей, информационной и адресной* шинами. Схема потоков информации в микроЭВМ с тремя отдельными шинами показана на рис. 64.

Теперь на примере сложения двух 8-разрядных двоичных чисел попробуем детально рассмотреть порядок работы микроЭВМ (рис. 65). В данном случае мы не будем ориентироваться на какую-либо конкретную модель микроЭВМ. Кроме того, придется принять ряд упрощений относительно особенностей ее работы: нам ведь важно разобраться в *принципах* функционирования. Но для того чтобы все же придать нашей гипотетической микроЭВМ реальные черты, будем считать, что длина машинного слова составляет 8 разрядов, длина адресного слова – 16 разрядов, в качестве памяти для хранения данных используется ЗУПВ, а для программы – ПЗУ. Как и в схеме на рис. 64, в рассматриваемой микроЭВМ информационная и адресная шины являются раз-

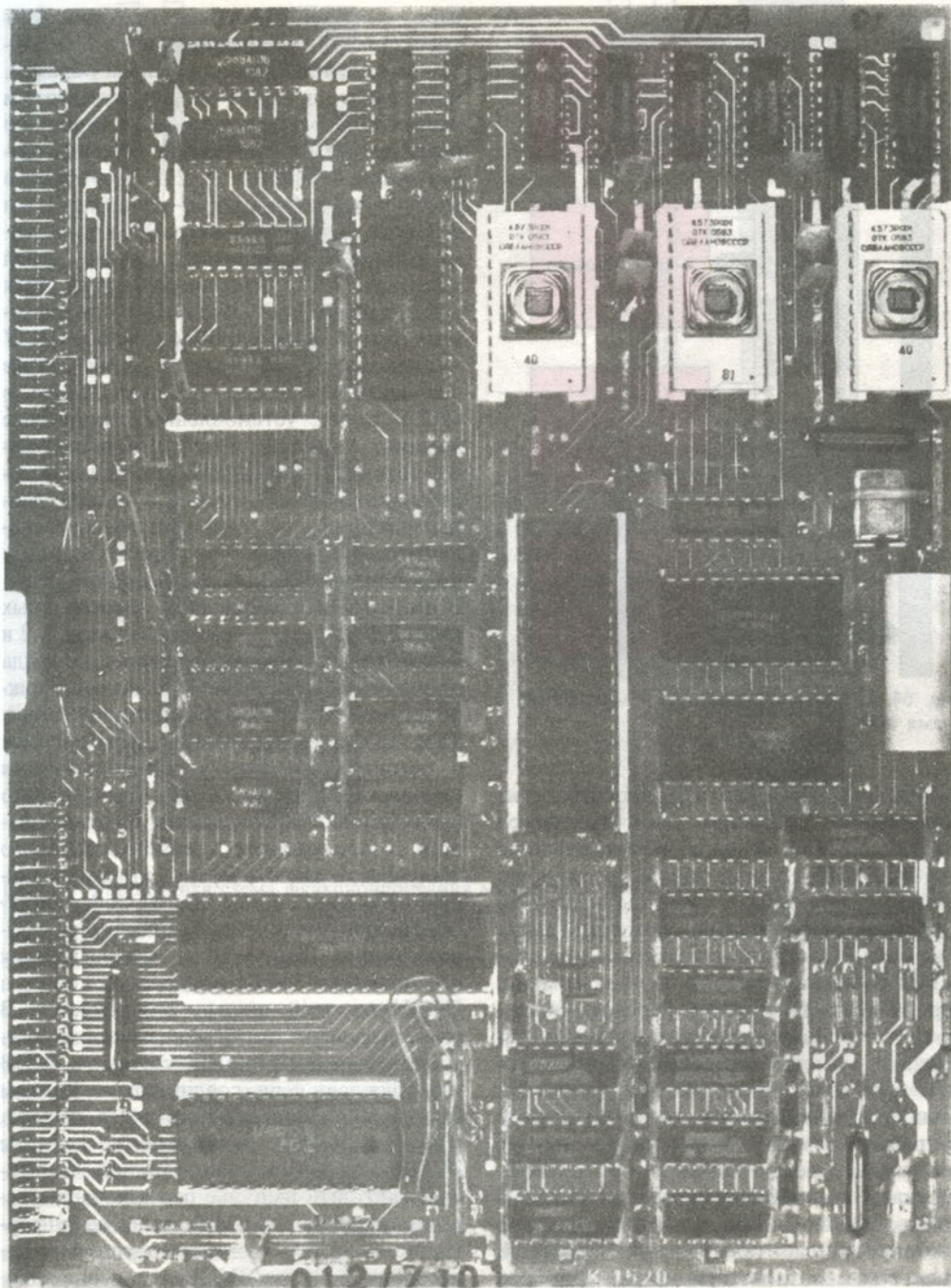


Рис. 63. Печатная плата микроЭВМ. Схема является модулем комплекта К1520, выпускаемого комбинатом «Роботрон» (ГДР).

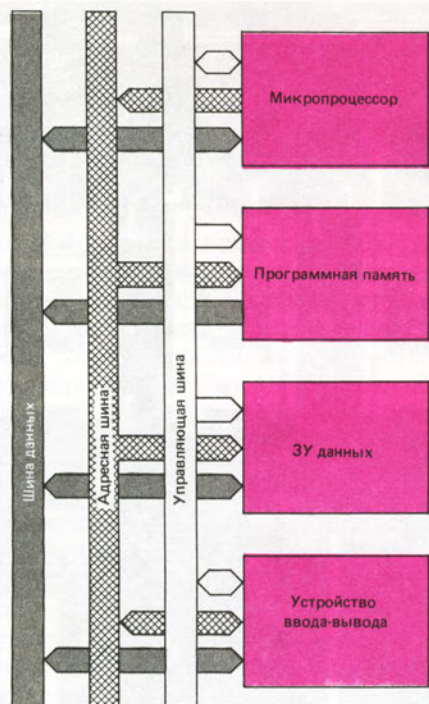


Рис. 64. Поток информации в микроЭВМ с тремя шинами.

дельными. Будем считать, что первое из подлежащих сложению двоичных чисел было записано в первую 8-разрядную ячейку ЗУПВ, второе число – во вторую ячейку, а результат должен быть получен в третьей. Переноса при сложении может и не быть. Программное обеспечение операции сложения состоит из трех команд: первая команда требует передать содержимое первой 8-разрядной ячейки в заданный регистр микропроцессора, вторая – прибавить число из второй ячейки памяти к содержимому этого регистра и направить результат операции в тот же регистр, а третья команда приказывает передать содержимое этого регистра в третью ячейку. Эти три команды, т.е. закодированные обозначения операций, вместе с соответствующими адресами операндов в виде серии данных записываются в ППЗУ. Для записи одной команды достаточно трех 8-разрядных машинных

слов, т.е. три байта памяти. Один байт требуется для кода операции и два байта – для адреса операнда. Таким образом, программу сложения можно поместить в девяти 8-разрядных ячейках – с первой по девятую. При этом первая команда размещается в ячейках 1, 2 и 3, вторая – в ячейках 4, 5 и 6 и третья – в ячейках 7, 8 и 9. После включения микроЭВМ в счетчике команд устанавливается адрес первой команды, т.е. содержимое первых трех 8-разрядных ячеек ППЗУ. Первым тактовым импульсом микропроцессор и ППЗУ подключаются к адресной шине. Через нее микропроцессор передает далее в ППЗУ адрес, установленный в счетчике команд. Адресный импульс отпирает цепи, соединяющие выходы считывания адресованных ячеек памяти с шиной данных. Второй тактовый импульс отсоединяет микропроцессор от адресной шины и подключает его к информационной шине. В результате содержимое адресованных ячеек ППЗУ, т.е. 8-разрядных ячеек 1, 2 и 3, в которых содержится первая команда программы сложения, передается в микропроцессор по информационной шине. Там эта считанная команда запоминается в регистре команды и обрабатывается декодером. Теперь может быть начато выполнение самой команды. Оно начинается с поступления третьего тактового импульса, в свою очередь снова отсоединяющего микропроцессор от информационной шины и подключающего его к адресной шине. Кроме того, осуществляется подключение ЗУПВ к адресной шине, а ППЗУ от этой шины отсоединяется. В итоге адресный импульс от микропроцессора по адресной шине поступает в ЗУПВ и возбуждает цепи, соединяющие выходы считывания адресованных ячеек памяти, т.е. первой 8-разрядной ячейки ЗУПВ, с информационной шиной. Четвертый тактовый импульс переключает микропроцессор с адресной шины на информационную. В результате содержимое адресованной ячейки ЗУПВ, т.е. первое двоичное число, через информационную шину передается в микропроцессор. Здесь оно направляется в регистр, который ука-

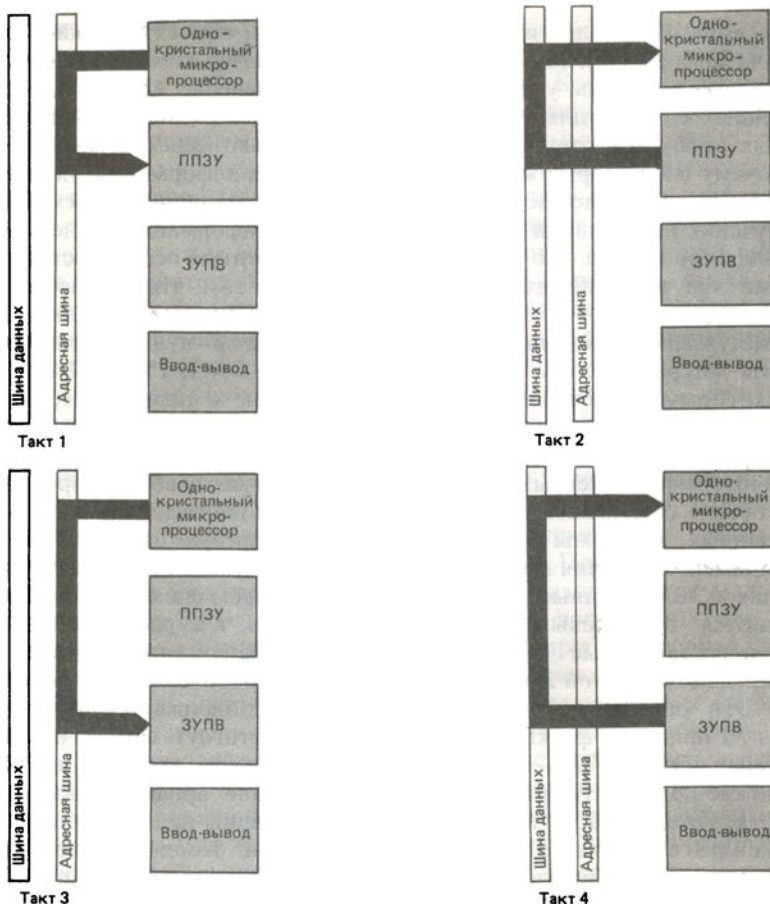


Рис. 65. Упрощенная схема функционирования микроЭВМ. Управляющая шина не показана. В первых двух тактах из ЗУ микроЭВМ вызывается команда, после чего осуществляется ее декодирование; в обоих последних тактах из ЗУ микроЭВМ вызываются данные, необходимые для выполнения команды, и микроЭВМ выполняет команду.

зан в той части команды, которая представляет операнд. Тем самым первая команда оказывается выполненной, а первый машинный цикл завершенным. Следует добавить, что второй тактовый импульс на единицу увеличивает содержимое счетчика команд. Следовательно, к началу второго машинного цикла в счетчике команд оказывается установленным адрес второй команды. В первом такте второго цикла микропроцессор по адресной шине передает этот адрес в ППЗУ. Содержимое адресованной ячейки, т.е. вторая команда, по информационной ши-

не поступает в микропроцессор и там декодируется, после чего и начинается собственно выполнение второй команды. Дальнейшее описание порядка операций можно опустить, так как повторяются все рассмотренные выше шаги до тех пор, пока не будет выполнена вся программа. Если же к микропроцессору через устройства параллельного или последовательного ввода-вывода подключают печатающее или какое-либо иное выходное устройство, то с помощью ряда дополнительных команд можно организовать выдачу результата в определенной форме.

Как и при выполнении других команд, такая выдача информации осуществляется под микропроцессорным управлением. В определенных случаях для такого вывода данных требуется слишком много времени, почему в некоторых микроЭВМ и предусматривается возможность скоростного получения информации из памяти в обход микропроцессора. Но для этого нужна схема так называемого прямого доступа к памяти.

Наши рассуждения, касающиеся принципа работы микроЭВМ, мы хотим закончить некоторыми замечаниями общего характера, в большей или меньшей степени относящимися ко всем современным компьютерам. Во-первых, все они обладают общей спецификой обработки команд и данных, в чем мы смогли убедиться на примере описания простейшего варианта микроЭВМ. Данные и команды обрабатываются одинаковым образом. Команды, представленные машинными словами, передаются по той же шине, что и данные. Это определенным образом сказывается на принципе функционирования подобных ЭВМ. Так, например, команды можно подвергать арифметической обработке, и одну часть программы можно изменять с помощью другой ее части. Открыл эту особенность Джон фон Нейман, почему современную ЭВМ нередко и называют «вычислительной машиной с архитектурой фон Неймана». И все же с этим принципом связана главным образом не аналогичность обработки команд и данных, а другая особенность, с которой мы уже сталкивались, знакомясь с простейшим компьютером, а именно последовательная во времени очередность выполнения отдельных операций. В любой определенный момент времени такая ЭВМ всегда выполняет только одну операцию, объектом которой является одно машинное слово. В следующей главе мы еще раз вернемся к этому вопросу. Третьей особенностью нашей микроЭВМ, да и других электронных вычислительных машин, является то, что кроме обработки машинных слов в ЦП там же должен выполняться целый ряд других операций,

к которым относятся такие, как управление передачей команд и данных из памяти, определение адресов ячеек памяти и т. д. На выполнение этих операций, служащих только для организации процесса обработки информации, уходит примерно две трети машинного времени. Сама обработка информации, и здесь мы затрагиваем четвертую особенность компьютера, состоит в том, что логические и арифметические операции выполняются лишь с единицами и нулями, например 0 или $1 = 1$, $1 + 0 = 1$, $1 + 1 = 2$ и т. д., т. е. мы имеем дело с такими операциями, которые не представляют сложности даже для ребенка. Несмотря на это, компьютер способен, как известно, проявлять удивительные «умственные» способности. Однако тут требуются некоторые пояснения. Решая поставленную задачу, компьютер шаг за шагом снижает ее первоначальную сложность, т. е. расчленяет на ряд менее сложных задач, каждая из которых в свою очередь дробится на еще более простые и т. д. Это продолжается до тех пор, пока не будет достигнут самый низкий уровень сложности, на котором все сводится к выполнению арифметических и логических операций над двоичными нулями и единицами. Количество таких операций чрезвычайно велико, а потому данный подход приемлем при одном условии: все это огромное число действий должно осуществляться с исключительно высокой скоростью и совершенно без ошибок. Секрет удивительных «интеллектуальных» способностей компьютера, следовательно, заключается в том, что простейшие операции он выполняет невообразимо быстро, с предельной точностью и в громадном количестве. Человеческий мозг справляется с элементарными операциями намного медленнее, однако сами эти операции гораздо сложнее.

Рассказав о построении и принципах функционирования компьютеров, в первую очередь, конечно, микроЭВМ, рассмотрим теперь вопросы их применения, начав с программирования. Затраты на программирование микроЭВМ весьма велики – во всяком случае, значительно вы-

ше, чем те, к которым мы привыкли, имея дело с программируемыми микрокалькуляторами и бытовыми компьютерами. При работе с микроЭВМ в ходе написания даже небольших программ не считаются высокими затраты времени на программирование всего одной команды, составляющие 30 мин и более. Можно сказать, что в среднем с учетом всех подготовительных и дополнительных работ один программист для программирования 5–10 команд тратит целый рабочий день. Столь высокие трудозатраты связаны с тем, что программирование микроЭВМ необходимо вести на машинном языке. Сказанное означает, что в процессе программирования могут использоваться только те команды, которые входят в систему команд микропроцессоров и рассчитаны на непосредственное выполнение ими самими. Как мы уже видели при разборе особенностей работы микропроцессора, команды его репертуара в основном ориентированы на операции над двоичными числами. И если, например, предусмотрена команда сложения двух двоичных чисел, то команда сложения двух десятичных чисел отсутствует. Именно для решения таких простейших задач и необходимо составлять небольшие программы, состоящие из большого числа отдельных шагов. При этом специфические команды выражаются либо соответствующими двоичными кодами микропроцессора, либо мнемоническими сокращениями на естественном – в большинстве случаев английском – языке (например, ADD – сложение, JMP – передача управления), имеющими однозначное соответствие с двоичными кодами. Вся совокупность этих сокращений именуется языком ассемблера. Таким образом, язык ассемблера в сущности представляет собой не что иное, как мнемонически удобную форму машинного языка для общения с микроЭВМ.

Для программирования больших ЭВМ вместо машинного языка могут, как известно, применяться языки программирования более высокого уровня – так назы-

ваемые языки прикладной ориентации, среди которых можно назвать Фортран, Паскаль и Кобол. Такие компьютеры имеют хранящуюся в их внутренней памяти программу-транслятор, с помощью которой прикладные программы переводятся с языка программирования высокого уровня на машинный язык, понятный данному компьютеру. Если ЭВМ полностью переводит прикладную программу перед ее выполнением на машинный язык и в этой форме помещает на хранение в память, то в таком случае программа-транслятор носит название *компилятора*. Если же каждая команда прикладной программы выполняется сразу после ее преобразования без промежуточного помещения в память, то тогда программу-транслятор называют *интерпретатором*. Поскольку компилятор вместе с преобразованной в машинный код прикладной программой или соответственно интерпретатор необходимо разместить в основной памяти ЭВМ, то это заставляет увеличивать ее емкость. Кроме того, время преобразования обходится тем дороже, чем меньше обрабатывающие «мощности» ЦП компьютера и чем меньше степень временного параллелизма используемых ИС, который вводится для по крайней мере частичной компенсации теряемой скорости обработки. В итоге возрастают и объем аппаратных средств компьютера, и их стоимость. В отношении больших ЭВМ уже давно доказано, что эти деньги себя оправдывают. Тот факт, что данный подход оказался приемлемым и для микроЭВМ, подтверждается существованием бытовых, конторских и персональных компьютеров. Эти компьютеры содержат гораздо больше ИС, чем простейшие микроЭВМ, программируемые только на машинном языке, которые мы рассмотрели выше. Однако, как и в случае с простейшей микроЭВМ, центральный процессор бытового, конторского или персонального компьютера состоит из одной-единственной ИС, а именно из микропроцессора с разрядностью обрабатываемой информации 8, 16 или 32

бит, что позволяет отнести их к классу микроЭВМ. Ниже мы еще вернемся к обсуждению этого вопроса.

МикроЭВМ как компонент системы

Бытовые, конторские и персональные компьютеры предназначены для обмена информацией непосредственно с человеком. Однако нам хорошо известно, что существует множество задач обработки информации, например управление станками на промышленных предприятиях, где на первом плане стоит обмен информацией между компьютером и станком, а контакты с человеком ограничива-

ются всего несколькими командами. Если для решения подобных задач используется микроЭВМ, то ее применение имеет две отличительные особенности. Во-первых, такая микроЭВМ не нуждается в полном наборе служебных средств, которые разработаны для обеспечения ее взаимодействия с человеком. Большой объем программирования на машинном языке не может быть препятствием в данном случае (кроме того, программирование можно осуществлять с помощью другого компьютера), если, как это нередко бывает, сама решаемая задача обработки информации вообще не изменяется или изменяется нечасто. Клавиатура для ввода данных может иметь очень небольшие

Таблица 13. Области применения микроЭВМ

Промышленные установки	Станки с ЧПУ, ткацкие станки, контрольно-испытательное оборудование, конвейерные системы, поточные линии с заданным ритмом работы, автоматические взвешивающие устройства с цифровой индикацией, системы оптимального распределения электроэнергии, типографские наборные машины, копировальные установки, промышленные роботы
Приборостроение	Кассовые аппараты, автоматы для продажи билетов на пассажирском транспорте, устройства управления лифтами, устройства измерения расхода топлива на колонках и расчета с клиентами бензозаправочных станций, радиолокационные станции, аппаратура для контроля состояния окружающей среды, приборы для сбора и обработки результатов измерений научного назначения
Средства обработки данных и конторское оборудование	Периферийные устройства больших ЭВМ, автоматизированные рабочие места с терминалами, программируемые настольные ЭВМ научного назначения, электронные пишущие машинки, конторские компьютеры, персональные компьютеры
Связь	АТС, системы измерений, регулирования и контроля
Автотранспорт	Электронное зажигание, приборы контроля скорости, системы диагностики автомобиля, автоматические коробки передач, антиблокировочные системы торможения, системы впрыска топлива, бортовая радиолокационная станция, бортовое вычислительное устройство, микрокомпьютерная система управления светофорами, системы управления дорожным движением
Медицинская техника	Контроль за состоянием пациентов, управление рентгеновской аппаратурой, интерпретация электроэнцефалограмм и электрокардиограмм, автоматические системы выполнения анализов, лучевая дозиметрия, системы проведения психологических тестов, компьютерная томография
Бытовая техника	Стиральные машины, электрические кухонные плиты, швейные машины, посудомоечные автоматы, радиоприемники и телевизоры, видеоигры, телевизионные информационные системы, игровые автоматы, фото- и киноаппаратура с электронным управлением, бытовые компьютеры

размеры; в определенных случаях от нее можно вообще отказаться. Следовательно, в микроЭВМ такого назначения не требуется многое из того, что обычно считается типовым оснащением ЭВМ. Во-вторых, требования к возможностям и производительности микроЭВМ могут изменяться в широких пределах в зависимости от особенностей управляемого станка или установки. МикроЭВМ, например, можно поручить управление стиральной машиной, когда требуется обработка относительно небольшого объема информации с довольно низкой скоростью, или прокатным станом, где нужно осуществлять операции с высокой скоростью над очень большим числом данных. Необходимость принимать во внимание эти обстоятельства привела к тому, что подобные микроЭВМ лишь в редких случаях выпускаются промышленностью в полном комплекте. В большинстве своем они представляют собой набор отдельных компонентов, так называемых модулей, из которых изготовитель комплексного технологического оборудования может самостоятельно собрать микроЭВМ, отвечающую его специфическим потребностям. В данном случае говорят о системе модулей для сборки микроЭВМ. К таким модулям относятся простейшие микросборки на одной плате (рис. 63) – снабженные штепсельными разъемами блоки из интегральных схем для ЭВМ, включая ЦП, к которым остается только подключить необходимые периферийные устройства. Примером может служить комплект модулей K1520, выпускаемый комбинатом «Роботрон» на базе микропроцессора U880 (рис. 63). С помощью таких модулей можно создавать микроЭВМ для использования в самых разных областях. Некоторые из возможных вариантов применения перечисляются в табл. 13.

Изложив эти соображения относительно выпускаемых промышленностью модульных систем для микроЭВМ, мы снова возвращаемся к микроЭВМ, оснащенным более удобными для человека средствами общения. Этими машинами являются бы-

товые, конторские и персональные компьютеры. Здесь речь пойдет о микроЭВМ, обладающих теми возможностями, с которыми у лиц «непосвященных» ассоциируются все представления об ЭВМ. Эти машины обеспечивают пользователю большие удобства в работе и в зависимости от производительности пригодны как для выполнения достаточно сложных вычислительных операций, так и для обработки данных.

Бытовые, конторские и персональные компьютеры

Основными частями таких компьютеров наряду с базовой микроЭВМ являются клавиатура для ввода данных, дисплей с экраном для выдачи информации и накопитель на гибких магнитных дисках в качестве внешнего носителя данных и программ. На гибком магнитном диске, представляющем собой пластмассовый диск диаметром обычно 89 или 133 мм с магнитным покрытием, можно хранить информацию объемом в несколько сотен килобайтов. Скорость ввода-вывода данных составляет 100–500 кбайт/с. В качестве устройств вывода данных, кроме того, можно подключать высокоскоростные печатающие устройства (принтеры). Во всем мире широкое распространение получили персональные компьютеры фирмы ИБМ, которая и ввела в обиход сокращенное обозначение РС для компьютеров этого класса, а также фирм «Эппл», «Шнайдер», «Атари», «Коммодор» и др. Комбинат «Роботрон» выпускает компьютеры аналогичных типов, а именно А5120 (рис. 66), АСА7100 и РС1715. Упрощенным вариантом конторского и соответственно персонального компьютера является бытовой компьютер. Здесь в большинстве случаев вместо дисплея используется обычный телевизор, вместо накопителя на магнитных дисках (НМД) – кассетный магнитофон, а в качестве внешнего носителя данных служит стандартная магнитофонная компакт-кассета.

Для того чтобы с персональным ком-



Рис. 66. Конторский компьютер типа А5120, выпускаемый комбинатом «Роботрон».

пьютером можно было работать, сначала с помощью специальной программы, так называемой операционной системы, его нужно познакомить с «правилами игры», т. е. ввести соответствующие указания на то, какими должны быть интерпретация отдельных знаков и знаковых комбинаций клавиатуры, взаимодействие с дисплеем и НМД и толкование команд Бейсика. В данном случае говорят о системном программном обеспечении, так как система обработки информации в виде микроЭВМ без такой программы вообще не способна работать вне зависимости от того, какую прикладную задачу намерен решить пользователь. Для решения такой задачи необходимо иметь комплект специальных программ, получивший название прикладного программного обеспечения. Программирование микроЭВМ выполняется на языке, ориентированном на особенности применения: к числу таких языков относятся, например, Бейсик,

Фортран и Паскаль. Упомянутые выше системные программы, а именно интерпретатор и компилятор, являются составными частями операционной системы, которая поставляется изготовителем на гибком магнитном диске или компакт-кассете в комплекте с микроЭВМ в том случае, если эта система не введена в ППЗУ компьютера (в качестве «микропрограммного» обеспечения). Широкое распространение получили операционные системы CP/M и PC-DOS (MS-DOS). Наряду с системным программным обеспечением существует ряд стандартизованных прикладных программ, которые пользователь может получить в свое распоряжение. В их число входят, к примеру, программа обработки текста (распространенной является такая программа, как WordStar), программа управления базой данных (dBase) и программа наглядного графического представления данных на экране (Graphics). Диапазон возможно-

стей и качество доступного программного обеспечения в существенной степени скажутся на стоимости приобретаемой микроЭВМ.

Использование микроЭВМ в типографской наборной машине

Завершая эту главу, посвященную интегральным схемам и возможностям их применения, мы хотим кратко остановиться хотя бы на одном конкретном примере использования микроЭВМ, в данном случае в типографской наборной машине. Прообразом наборного автомата является электронная пишущая машинка. Чтобы ввести страницу печатного текста на хранение в память микроЭВМ, ее емкость должна составлять 2 кбайт. Ввод данных, т.е. запись текста в память электронной пишущей машинки, осуществляется нажатием на печатающие клавиши. Кроме текста в систему необходимо также ввести указания, определяющие, как следует расположить текст на листе бумаги, какие поля оставить, какой должна быть печать – одно- или двухколонной и т.д. При необходимости помещенный в память текст затем может быть распечатан в нужном формате на листе бумаги или выдан на экран дисплея. При распечатке литерные рычаги машинки действуют не от ударов по клавишам, а притягиваются миниатюрными электромагнитами, которые включаются по командам микроЭВМ. Если при выдаче первой копии обнаруживается, что во время первоначального ввода текста через клавиатуру была допущена опечатка, то не составляет труда внести необходимое исправление, в результате чего ошибочное содержимое памяти путем перезаписи заменяется на правильное. От электронной пишущей машинки до типографского наборного автомата с компьютеризованным управлением остается всего один шаг. При свинцовой печати компьютер берет на себя управление наборной машиной, в которой собираются матрицы из отдельных литер для последующей отлив-

ки печатной формы. При офсетной печати компьютер управляет фотомеханическим процессом изготовления фотонаборных форм, т.е. фотографической пленки, которая служит оригиналом для печатной формы, как правило, имеющей вид металлической пластинки со специальным покрытием. При компьютерном управлении набором различные типы и размеры шрифтов можно вводить средствами программного обеспечения, что позволяет отказаться от более трудоемкой реализации подобного набора аппаратными средствами. С переводом фотонабора и офсетной печати на компьютерное управление удалось полностью автоматизировать изготовление книг, т.е. создать такой полиграфический комплекс, на входе которого мы имеем управляющую программу, бумагу и прочие необходимые материалы, а на выходе – упакованные и готовые к отгрузке книги. Текст книги вводится в запоминающее устройство, связанное с управляющей микроЭВМ. При переходе к печати другой книги достаточно сменить содержимое ЗУ.

Знакомство с автоматизацией технологического процесса изготовления книг дает представление о том, какую рационализацию промышленного производства обеспечивает внедрение микроЭВМ. Они выступают здесь в роли представителей широкого ассортимента интегральных схем, выпускаемых в настоящее время микроэлектронной промышленностью. Познакомить читателя с этими ИС и было задачей данной главы.

Во введении к книге отмечалось, что микроэлектроника носит очень сложный характер и ознакомиться с ней можно, только рассмотрев самые разные аспекты. В предыдущих главах мы разобрали целый ряд специфических особенностей микроэлектроники, которые, по нашему мнению, имеют наиболее важное значение для создания первого представления о ней. Однако один важный аспект остался вне поля зрения – вернее, мы его лишь едва коснулись. Это будущее развитие микроэлектроники. О нем и пойдет речь в последней главе.

7. Перспективы развития микроэлектроники

Возникновение микроэлектроники явилось ответом на потребность человеческого общества в более современных технических средствах обработки информации; в свою очередь микроэлектроника стимулирует дальнейшее развитие информации. Микроэлектронику нельзя отождествлять с информационной техникой; для последней она является основой, своего рода строительным материалом, из которого строится здание этой техники. Сама микроэлектроника не дает ни проекта здания, ни программы его использования: всем этим занимаются специалисты других направлений информационной техники, обозначаемых общим понятием «теория вычислительных машин и систем» или «информатика». Прогресс методов обработки информации не определяется успехами одной микроэлектроники – он должен сочетаться с движением вперед самой информатики. Так, например, когда в середине 70-х годов производительность компьютеров возросла настолько, что появилась возможность выполнения программ, насчитывающих сотни тысяч команд, в полной мере проявились принципиальные трудности, связанные с программированием. Даже у лучших программистов число ошибок в составленных программах не опускалось ниже пяти неправильных команд на тысячу шагов программы. Таким образом, в программе из ста тысяч команд в среднем встречалось несколько сотен ошибок. С помощью тестирования оказалось невозможным выявлять такое большое количество ошибочных команд с целью их устранения. В те времена заговорили о кризисе в области программного обеспечения. Его помогла преодолеть информа-

тика. Были разработаны правила, упорядочившие процесс программирования, что привело к уменьшению частоты ошибок в десять раз. Теперь, когда информационная техника главное внимание уделяет созданию более производительных больших ЭВМ, снова встает вопрос о разработке новых принципов построения таких ЭВМ. Компьютерная архитектура, предложенная фон Нейманом и являющаяся основой почти всех современных ЭВМ, стала предметом критического обсуждения. Причина, вызвавшая к жизни столь оживленную дискуссию, заключается в том, что ЭВМ подобного типа способны выполнять только одну операцию над *одним* машинным словом в определенный момент времени. Высказывались мнения, что сама архитектура фон Неймана стала препятствием на пути развития информационной техники. Именно архитектура ограничивает быстродействие компьютера. Чтобы обойти это препятствие, необходимо либо усовершенствовать архитектуру фон Неймана, либо полностью отказаться от нее. И именно от информатики ждут помощи: например, было бы хорошо иметь компьютер, способный выполнять определенную операцию одновременно над несколькими машинными словами или подвергать одно слово нескольким различным операциям, или, что еще лучше, параллельно осуществлять и то и другое. Первым результатом на пути к достижению временного параллелизма в обработке данных явилось создание компьютера так называемого конвейерного типа. Процессор такого компьютера состоит из ряда подпроцессоров, образующих обрабатывающую цепочку. С выхода одного подпроцессора

данные передаются непосредственно на вход следующего, минуя этап предварительной записи в основную память ЭВМ (как это предусматривает архитектура фон Неймана), откуда в ходе следующей операции их приходится извлекать. Таким образом, данные движутся через процессор, как по конвейеру. Принцип функционирования конвейерных процессоров напоминает принцип работы заводского сборочного конвейера, а отдельные подпроцессоры – рабочих сборочного цеха, занявших свои места вдоль него. Точно так же как с помощью сборочного конвейера можно ускорить процесс сборки изделий, посредством конвейерного компьютера можно ускорить выполнение вычислений. В архитектуре самых быстродействующих современных ЭВМ, например в машине «Крей-2», выполняющей свыше миллиарда операций в секунду, конвейерный принцип уже нашел свое практическое воплощение. Однако следует учесть, что этот принцип не ведет автоматически к повышению скорости выполнения операций (по сравнению с архитектурой фон Неймана) при решении абсолютно всех задач обработки информации; он дает выигрыш лишь при обработке специальных задач, например, связанных с перемножением векторов. Более универсальный характер по сравнению с конвейерным принципом имеет так называемый принцип *потока данных*. Он состоит в фактическом выполнении всех операций, которые требуются на определенном этапе решения поставленной задачи. Операцию, естественно, можно выполнить, только если есть все необходимые данные. Вообще говоря, такое условие с самого начала вычислений выполняется не для всех операций. Многие данные, подлежащие дальнейшей обработке, появляются лишь в процессе решения задачи – как результат выполнения предшествующих операций. Однако если имеются все нужные данные, то над ними могут быть одновременно выполнены все требующиеся операции. В соответствии с такой стратегией последовательность вычислительных операций зависит не от введенной

заранее программы, как это имеет место в архитектуре фон Неймана или конвейерном процессоре. При заданном алгоритме решения задачи порядок выполнения операций определяется самой машиной, которая таким образом становится генератором рабочей программы. Однако, несмотря на всю привлекательность принципа потока данных, практическая реализация его связана с очень серьезными проблемами. В настоящее время еще нет ЭВМ, использующих данный принцип и пригодных вместе с тем для практического применения. Специалисты по информатике работают над этим. Идет поиск и других типов архитектуры вычислительных машин, причем определенное внимание уделяется также изучению возможностей использования принципов эволюции и самоорганизации в биологии.

Мы сделали эти замечания для того, чтобы читатель мог правильно сориентироваться, знакомясь с нашими дальнейшими рассуждениями, касающимися микрозлектроники и того большого вклада, который *она* вносит в развитие информационной техники. Интегральные схемы, выпускаемые в настоящее время микронэлектронной промышленностью, способны на многое уже сегодня. Кроме того, они отличаются дешевизной, надежностью при решении сложнейших задач обработки информации, быстродействием и малым энергопотреблением, а также широким диапазоном применений. Но и это далеко не все. Надежность, быстродействие, экономичность, широта применения и дешевизна – понятия относительные. Если большие интегральные схемы (БИС) и сверхбольшие ИС (СБИС), выпускаемые сегодня, сравнить с электронными аппаратными средствами для обработки информации в недавнем прошлом, не говоря уже о соответствующих механических или электромеханических системах, то все наши восторги становятся вполне понятными. Если же обратиться к требованиям, вытекающим непосредственно из практики решения сегодняшних информационных проблем, то оценка, естественно, будет иной. Причем главными

здесь являются не занимаемый интегральными схемами физический объем, не энергопотребление и не надежность. По всем этим показателям уже достигнут уровень, который пока нас вполне удовлетворяет. Однако, конечно, многое можно улучшить. Но для этого совершенно не обязательно внедрять ИС другой конструкции или переходить на принципиально новые технологии изготовления. Многого можно достичь путем более эффективного использования технологий, уже освоенных в промышленных масштабах. Ситуацию, сложившуюся сегодня в микроэлектронике, можно сравнить с тем, что наблюдается в автомобилестроении. Теперешние автомобили не отличаются особой надежностью, дешевизной и экономичностью. Однако цена делает машины все же доступными, и они в целом неплохо справляются со своей задачей, т. е. в первую очередь обеспечивают достаточно высокую скорость передвижения. Чтобы необходимый процесс развития не замедлялся, автомобилестроению нет необходимости «изобретать» совершенно новые транспортные средства—можно попытаться подойти к намеченной цели путем разработки улучшенных моделей машин и совершенствования имеющихся технологий изготовления. Аналогичным образом выглядит и ситуация с ИС в отношении занимаемого физического объема, энергоемкости и надежности. Главное отличие заключается совсем не в этом.

Интеллектуализация обработки информации

Можно с уверенностью сказать, что автомобиль полностью и окончательно решает проблему быстрого передвижения по дорогам и городским улицам. В то же время существующие сегодня интегральные схемы и создаваемые на их основе системы обработки информации позволяют решать лишь часть информационных задач, и при этом не все решения отличаются той эффективностью, в которой нуждается потребитель. Стоит только задуматься над тем, насколько сложные

задачи может решать и решает сегодня человек, как станет ясно, насколько скромным остается уровень «интеллекта» ИС и построенных на них систем обработки информации, не способных справиться с этими задачами. Сегодня, например, даже самые лучшие компьютеры в состоянии выполнить перевод с одного естественного языка на другой только при ограниченном словарном запасе, используемом в тексте, причем полученный перевод страдает крупными стилистическими огрехами. Производительность современного компьютера недостаточна, чтобы выиграть у гроссмейстера шахматную партию. Вообще современная вычислительная машина способна решить задачу лишь тогда, когда предварительно в нее ввели описание всего пути с уточненными до известного уровня подробностями, выполнив все это на языке программирования, понятном компьютеру и сильно отличающемся от естественного языка. Можно уверенно сказать, что способность компьютеров решать сложные задачи обработки информации, т. е. его искусственный интеллект, сегодня сильно уступает естественному интеллекту человека. И это является далеко не последней причиной того, что создание компьютеров с растущим уровнем интеллекта представляет собой актуальную задачу информатики. Уровень интеллекта компьютера зависит—если не полностью, то в большой степени—от числа, быстродействия и степени интеграции ИС, используемых в нем, так как большое число таких высокоскоростных БИС обеспечивает высокий уровень интеллекта. И из этого вытекают непосредственные требования к самой микроэлектронике. Уже в течение ряда лет в Японии, СССР и других странах ведутся работы по созданию компьютеров, которые будут отличаться невиданным до сих пор уровнем интеллекта. Такая машина сможет понять задание, написанное на естественном языке или введенное на этом языке в устной форме. Компьютер будет самостоятельно обнаруживать и устранять ошибки в постановке задания. Если в ходе решения конкрет-

ной задачи он обнаружит новые данные, правила или закономерности, то зарегистрирует их и направит на хранение в свою память. Следует подчеркнуть, что компьютер должен быть рассчитан на обработку не только информации, но и знаний. Согласно имеющимся оценкам, такая ЭВМ должна располагать памятью объемом в миллионы байтов и быть в состоянии выполнить в течение одной секунды 10^{11} команд. Все это ставит перед микроэлектроникой новые задачи. Требуются микропроцессоры с временем выполнения команд на уровне наносекунд, с большей разрядностью обрабатываемых команд, чем у современных моделей, т. е. процессоры с 32-разрядными и более длинными словами, полупроводниковые ИС ЗУ емкостью намного больше 256 кбайт (вплоть до нескольких миллионов байт) при времени выборки меньше, чем у существующих моделей. Для создания японской ЭВМ пятого поколения предполагается использовать сначала ИС, насчитывающие 10^6 элементов каждая, доведя затем число элементов в одной ИС до 10^7 . Без применения ИС со столь высокой и сегодня пока еще нигде не реализованной степенью интеграции или ИС с совершенно новыми функциональными элементами, о которых речь еще пойдет, процесс создания компьютеров пятого поколения зайдет в тупик.

Максимальный уровень искусственного интеллекта за невысокую цену

Если японская концепция обернется удачей – правда, многие в этом сомневаются, – то созданные на ее основе компьютеры будут, естественно, очень дорогими. Но когда главной целью является достижение высокого уровня искусственного интеллекта, стоимость отодвигается на второй план. Для менее экзотических компьютеров, которые в большом количестве применяются в разных областях народного хозяйства, цена, однако, приобретает решающее значение. Здесь требуется по возможности максимально вы-

сокий уровень искусственного интеллекта, но за наиболее низкую цену. Если бы такие интеллектуальные ресурсы на базе интегральных схем можно было приобрести по ценам, в десять раз меньшим, чем существующие сегодня на мировом рынке, то целый ряд всех текущих задач обработки информации в различных областях деятельности решался бы на более высоком качественном уровне. Однако этот уровень пока еще нигде не достигнут, и причина заключается не в том, что на рынке отсутствуют необходимые средства искусственного интеллекта, а в том, что они остаются слишком дорогими. Обратимся, например, к автоматизации управления производственными процессами в промышленности. Здесь исходная информация поступает в аналоговой форме, затем преобразуется в цифровую, подвергается обработке и в заключение претерпевает еще одно преобразование, на этот раз в аналоговую форму. Все операции здесь должны выполняться весьма быстро, чтобы результат своевременно оказал влияние на дальнейший ход процесса. Такую обработку данных называют обработкой в реальном масштабе времени, имея в виду, что она и реальный управляемый процесс протекают параллельно, так сказать, в одном масштабе времени. Чем быстрее развивается реальный процесс и чем больший объем информации при этом нужно обработать, тем более быстродействующей должна быть система обработки информации. Здесь быстродействие приобретает решающее значение, примерно такое же, как и скорость, с которой ЭВМ выполняет математическое задание. Чтобы обеспечить принципиальную возможность обрабатывать данные в реальном масштабе времени, необходимо перейти через определенный барьер – попросту говоря, через пороговую минимальную скорость; только тогда обработка в реальном масштабе времени станет возможной. Если система обработки информации не отвечает этому требованию, т. е. ее искусственный интеллект остается на слишком низком уровне, или если стоимость системы, обладающей необхо-

димым уровнем интеллекта, слишком велика, то качество информационной обработки, а следовательно, и управления процессом будет снижено по сравнению с тем, которое предполагалось обеспечить. По существу в настоящее время за приемлемую цену можно приобрести лишь настолько слабые по своим возможностям средства искусственного интеллекта, что во многих случаях они не позволяют создать устройства для оптимального управления производственными процессами. Это относится, например, к промышленным роботам третьего поколения, которые должны быть оснащены датчиками, обладающими широчайшими возможностями для сбора информации о состоянии обрабатываемого объекта и окружающей среды. При этом значительные затраты связаны с обработкой изображений, поскольку последние, как правило, отличаются высокой степенью информационной насыщенности. Вообще для быстрой цифровой обработки аналоговых сигналов требуется система обработки информации, в состав которой входят средства искусственного интеллекта достаточно высокого уровня. Причину этого мы рассмотрели в гл. 4. Тем не менее существует необходимость перехода от аналоговой обработки информации к цифровой. И этого вопроса мы тоже касались. Когда в распоряжении системотехников появляются интегральные схемы с более высокими быстродействием и степенью интеграции, а среди них и аналого-цифровые преобразователи, на цифровую обработку будут переведены многие системы, используемые для решения тех информационных задач, которые сегодня еще приходится решать аналоговыми средствами. Далеко не в последнюю очередь сюда относятся задачи из обширной сферы развлекательной электроники. Так, например, для цифровой обработки аналоговых сигналов цветного телевизионного изображения необходим аналого-цифровой преобразователь, способный за одну секунду преобразовать 10^7 аналоговых сигналов в 7-разрядные машинные слова. Кроме того, в телевизоре требуется еще и заказная

ИС с высокой степенью интеграции для цифровой обработки информации. Если попытаться использовать для этого микропроцессор, что в принципе возможно (но весьма нерационально с практической точки зрения), то при разрядности 8 бит частота его тактовых импульсов должна составлять 100 МГц. Демонстрационный показ первых частично цифровых телевизионных приемников уже состоялся. По сравнению с приемниками аналогового типа весьма улучшилась резкость изображения, а мерцания совершенно отсутствуют. На подходе и цифровой радиоприемник с высококачественным воспроизведением звуковых сигналов. Наиболее широкое распространение, однако, цифровая техника получила в проигрывателях на оптических дисках. Обрабатываемый сигнал (он считывается с диска лазерным лучом, а сама запись представляет собой дорожку из светлых и темных участков) в отличие от телевизионных и радиосигналов с самого начала является цифровым. Первые цифровые проигрыватели на оптических дисках уже поступили в продажу. Безусловно, они будут не последними цифровыми изделиями электронной индустрии развлечений. Переход на цифровую технику наблюдается в настоящее время и в области передачи информации. Как известно, цифровой сигнал может иметь только два значения – ноль или единица, – так что после прохождения по каналу связи со всеми неизбежными в данном случае помехами его гораздо легче распознать, чем аналоговый сигнал во всех его градациях. Когда мы говорим по телефону, то сейчас лишь часть информации передается по медному коаксиальному кабелю с помощью аналоговых сигналов. Телефонные сети многих стран в настоящее время переводятся на цифровую передачу сигналов. Если вместо традиционного канала связи в виде медного кабеля использовать световод, то практически не остается ничего иного, как перейти на цифровую технику передачи информации. При длине световой волны 1,3 мкм информацию по световоду теоретически можно передавать со скоростью, равной

10^{14} бит/с. Чтобы максимально использовать эту колоссальную пропускную способность канала связи, необходимы быстродействующие электронные схемы, позволяющие вводить закодированную цифровым способом информацию в передающее устройство (на базе светоизлучающего или лазерного диода) и затем считывать ее с приемного устройства (фотодетектора). Цифровая техника имеет очень большое значение и для развития беспроводной связи с помощью как направленного, так и ненаправленного электромагнитного излучения. Частично такая техника уже используется в системах спутниковой СВЧ-связи с прямым распространением радиоволны между станциями. Однако и для занимающей сейчас доминирующее положение аналоговой СВЧ-связи требуются более мощные ИС по сравнению с выпускаемыми промышленностью. Из-за отсутствия таких мощных схем в СВЧ- и ВЧ-технике приходится по-прежнему применять быстродействующие электронные лампы, например магнетроны и клистроны. Это делает высокочастотное оборудование громоздким, дорогостоящим и сложным в изготовлении и препятствует дальнейшему расширению области его применения, скажем совершенствованию систем прямого приема сигналов со спутников.

Повышение степени интеграции и быстродействия

Обеспечение оптимального управления производственными процессами, перевод аналоговой информации в цифровую, внедрение волоконно-оптической связи, а также более широкое использование и дальнейшее развитие систем СВЧ-связи – вот лишь немногие примеры из тех областей информационной техники, которые испытывают острую потребность в более дешевых и в то же время обладающих более высоким уровнем интеллекта системах обработки информации. Выйти на более высокий уровень интеллекта можно путем увеличения числа скоростных схем-

ных элементов или же путем повышения быстродействия схемных элементов. Чисто арифметически увеличить число элементов можно, если применить большее число ИС с прежним уровнем интеграции. Однако такое решение во многих случаях является дорогостоящим. Это как раз тот путь, который в настоящей книге мы уже назвали принципиально возможным, но практически неприемлемым из-за цены. Фактически остается несколько увеличить количество используемых элементов, одновременно снизив их цену. Но для этого требуются ИС с более высокой степенью интеграции. Здесь полезно вспомнить рассуждения из гл. 4 о том, почему и при каких условиях снижается стоимость изготовления ИС при переходе на схемы с более высокой степенью интеграции. Микроэлектроника может и должна воспользоваться именно такой возможностью, когда перед ней встанет задача организации производства дешевых приборов, имеющих более высокий уровень интеллекта. Есть и еще один момент, из-за которого приходится отдавать предпочтение варианту с меньшим числом ИС более высокой степени интеграции, а не увеличению количества ИС низкой степени интеграции. Дело в том, что в первом случае обеспечивается более высокая надежность. Межсоединения, которые необходимо выполнить в варианте с ИС низкой степени интеграции, вообще имеют относительно высокую частоту отказов – во всяком случае по сравнению с теми соединениями, которые формируются между отдельными схемными элементами ИС в процессе изготовления в цикле 1. Чтобы повысить надежность, необходимо свести к минимуму число вызывающих отказы соединений, т. е. использовать интегральные схемы, обладающие максимально высоким уровнем интеграции.

Подведем некоторые итоги. Переход на микросхемы с высокой степенью интеграции обусловлен не только необходимостью создания систем обработки информации с максимальным уровнем интеллекта, о чем шла речь в начале этой главы, но и потребностью в более надеж-

ных системах, соотношение между уровнем интеллекта и ценой у которых было бы более сбалансированным. Это вызвало к жизни поколение микроЭВМ, состоящих из малого числа ИС с высокой степенью интеграции. Однако развитие ИС для микроЭВМ и мини-ЭВМ идет дальше – в сторону создания однокристалльных компьютеров. Первые образцы подобных машин уже поступили в продажу. Пока еще однокристалльные микроЭВМ и мини-ЭВМ по производительности уступают своим аналогам, собранным из большого числа ИС. Если потребуются сократить число ИС в компьютерах, более крупных, чем микроЭВМ и мини-ЭВМ, то возникнет необходимость в микропроцессорах, оперирующих 32-разрядными словами, а также в интегральных схемах памяти емкостью более 62 кбит каждая. Один такой компьютер уже разработан фирмой «Хьюлетт-Паккард» и носит обозначение HP9000. 32-разрядный микропроцессор данной ЭВМ содержит 450 000 элементов, размещенных на одном полупроводниковом кристалле. Предназначенное для данного компьютера ЗУПВ на 128 кбит является однокристалльным, однако содержит еще больше элементов – 600 000. То, что наиболее высокая степень интеграции достигнута как раз в ИС памяти компьютера, вполне закономерно. Причина тому – относительно простая структура ИС памяти: один и тот же базовый элемент и запоминающая ячейка емкостью 1 бит в этой структуре повторяются такое число раз, которое соответствует емкости ЗУ. Поступившее в продажу в 1986 г. ЗУПВ динамического типа на 1 Мбит представляет собой однокристалльное устройство, в котором на площади около 80 мм² размещено несколько миллионов элементов – свыше миллиона транзисторов и такое же количество конденсаторов. В 1987 г. появилось насчитывающее более 10 млн. элементов ЗУПВ динамического типа на 4 Мбит, а в начале 90-х годов будут созданы такие ЗУ на 16 Мбит. Мегабитовые ЗУПВ представляют интерес в качестве компонентов не только для будущих компьютеров, но и других

прикладных систем. Так, например, в ИС ЗУ на 4 Мбит можно поместить на хранение содержание книги, насчитывающей несколько сотен страниц. Повышенные требования привели к увеличению степени интеграции и таких интегральных схем, как АЦП и ЦАП. Возьмем, например, 10-разрядный АЦП на 100 МГц. Если бы его схема была построена на принципе параллельного преобразования (мы рассматривали его в гл. 4), позволяющем поднять скорость обработки данных, то нам потребовалось бы $2^{10} - 1 = 1023$ компаратора. Если принять, что в одном компараторе насчитывается 100 элементов, то в общей сложности в нашей схеме было бы свыше 100 000 элементов, причем в это число не входят те, которые необходимы для цифрового кодирования. Особенно высоки требования к быстродействию АЦП. Если, к примеру, требуется обеспечить 10^8 выборок аналогового сигнала в секунду, то в этом случае время задержки, т.е. время распространения сигнала, в одной логической схеме должно быть намного меньше 10^{-8} с.

Повышение быстродействия интегральных схем заслуживает более подробного обсуждения. Тогда как уровень интеллекта и цена одного элемента ИС прямо связаны со степенью интеграции, т.е. уровень интеллекта повышается при увеличении степени интеграции, в отношении быстродействия ситуация выглядит несколько иначе. В определенных пределах степень интеграции и быстродействие не зависят друг от друга. Можно увеличить степень интеграции и при этом сохранить быстродействие ИС на прежнем уровне. Следовательно, повышение быстродействия должно осуществляться прямым путем. В предыдущих главах мы вскользь упоминали о таких возможностях. Они связаны с заменой кремния полупроводниковыми материалами с более высокой подвижностью носителей заряда, в частности арсенидом галлия и фосфидом индия, с переходом к более низким рабочим температурам и с уменьшением размеров электронных компонентов. При использовании ЭК меньших размеров в одной ИС

их поместится больше. Таким образом, снова возникает определенная зависимость между быстродействием и степенью интеграции ИС. Прямая зависимость станет более наглядной, если вместо быстродействия ИС рассматривать скорость обработки информации в процессоре. Последняя зависит не только от скорости обработки каждого бита, но и в решающей степени от того, какое число разрядов обрабатывается одновременно. Устройства с более высокой степенью интеграции обеспечивают более высокий уровень такого параллелизма и тем самым более высокую скорость обработки информации.

После того как мы разобрались в причинах, заставляющих разработчиков стремиться к более высокой степени интеграции, необходимо познакомиться с возможными путями достижения этой цели. Теоретически сделать это можно не менее чем пятью способами:

- 1) уменьшить размеры ЭК;
- 2) увеличить площадь полупроводникового кристалла;
- 3) осуществить интеграцию на многих уровнях, т.е. не только по горизонтали, но и по вертикали;
- 4) объединить в одном ЭК несколько функций, например использовать биполярный транзистор с несколькими эмиттерами;
- 5) разработать схемы, позволяющие уменьшить площадь кристалла и сократить затраты на технологию изготовления.

Что касается двух последних возможностей, то здесь мы ограничимся только их упоминанием. О трехмерной интеграции речь пойдет ниже. Увеличение поверхности кристалла (микроэлектронная промышленность, начав в 1960 г. с полупроводниковых кристаллов площадью менее 1 мм^2 , в настоящее время оперирует кристаллами площадью в несколько десятков квадратных миллиметров), безусловно, является основным резервом повышения степени интеграции. Однако, как мы уже упоминали в гл. 5, выход годных изделий уменьшается с увеличением площади кри-

сталла, и, чтобы выполнить поставленную задачу, потребуются полупроводниковые диски с меньшим числом дефектов на площадь в 1 см^2 . Если этого удастся добиться, то степень интеграции возрастет по крайней мере в десять раз. И все же главный путь к более высоким уровням интеграции сегодня, вне всяких сомнений, лежит через субмикронную технологию, т.е. через дальнейшее уменьшение размеров отдельных ЭК.

Субмикронная технология

В 1960 г. минимальная ширина структуры, которую удавалось сформировать, составляла 20 мкм (рис. 67). Сегодняшним рекордом полупроводниковой промышленности являются 1–2 мкм. Структуры такого размера можно встретить в больших интегральных схемах, уже выпускаемых серийно, например одномикронные структуры в динамических ЗУПВ на 256 кбит и 1 Мбит. Когда степень интеграции превысит 10^6 элементов, промышленности придется овладевать методами формирования структур шириной менее 1 мкм. Так, например, в динамическом ЗУПВ на 4 Мбит ($8 \cdot 10^6$ элементов) предусматривается минимальный размер структур 0,7 мкм. Для микроэлектроники реализация субмикронных структур является ключевой задачей, без решения которой дальнейшее развитие невозможно. Для этого необходимо переработать всю полупроводниковую технологию, которую мы рассмотрели в гл. 5, вскрыть резервы в тех технологических процессах, где они еще имеются, и перейдя на новые технологии там, где исчерпаны все принципиальные возможности.

Возможности *фотолитографии*, например, ограничены длиной волны света. При использовании света в фиолетовой части спектра с длиной волны 400 нм можно получать структуры размером до 1 мкм, а с помощью ультрафиолетового излучения – с длиной волны 200 нм – до 0,5 мкм. При генерации ультрафиолетового излучения хорошие перспективы открываются для эксимерного лазера. Если

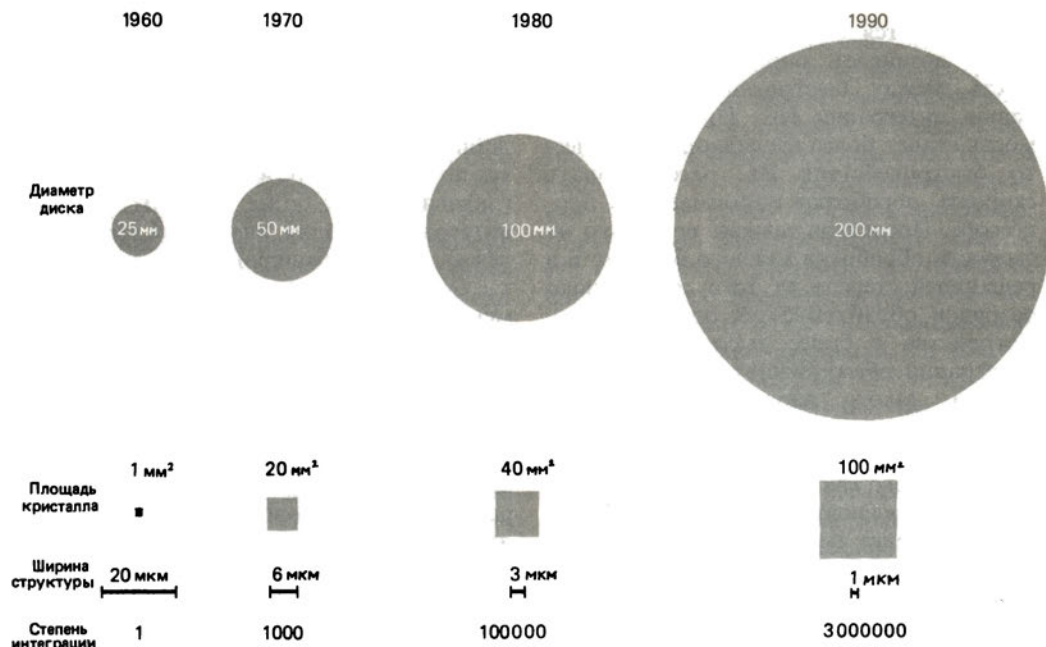


Рис. 67. Эволюция основных показателей микроэлектронной технологии (диаметр полупроводникового диска, площадь поверхности кристалла, ширина элементарной структуры и степень интеграции) через интервалы в 10 лет. Цифровые данные – ориентировочные. (Масштаб выдержан только в горизонтальном направлении.)

же вместо светового использовать рентгеновское, электронное или ионное излучение, то можно формировать структуры размером до сотых долей микрометра. В настоящее время наряду с работами по развитию рентгеновской, ионной и электронной литографии предпринимаются шаги, направленные на более полное использование всех возможностей фотолитографии. В рентгеновской литографии источником излучения служит электронный синхротрон, который был создан для исследований в области ядерной физики.

Совершенно иным подходом к решению проблемы размеров структур характеризуется созданная некоторое время назад так называемая технология вертикальных МОП-структур. Определение «вертикальных» означает, что направление канала МОП-транзистора, обычно расположенного в горизонтальной плоскости кристалла, в соответствии с этой технологией изменяется на вертикальное.

Поскольку вертикальные размеры полупроводниковых структур определяются толщиной различных слоев, равной 1 мкм и менее, таким путем можно формировать очень короткие каналы. При использовании данной технологии изготовления биполярных транзисторов ширина базы, т. е. такой же критический параметр, как и длина канала полевого транзистора, будет определяться не горизонтальными, а вертикальными размерами структур и четкостью границы профиля легированной области материала, которую необходимо сформировать для получения базы. Рассмотрение элементов обоих типов показывает, что при уменьшении горизонтальных размеров можно и должно также уменьшить вертикальные размеры, т. е. толщину слоев, из которых формируются эти элементы. Переход на структуры с элементами меньшего размера ужесточает требования ко всем стадиям процессов полупроводниковой технологии, т. е. к

процедурам легирования, оксидирования, травления, промывки, пассивации и металлизации. *Ионная имплантация* с последующей ликвидацией образовавшихся в материале дефектов начинается по своему значению превосходить диффузию как метод легирования. Не в последнюю очередь это связано с тем, что в результате уменьшения вертикальных размеров структур оказывается вполне достаточной та небольшая глубина легирования, которую обеспечивает ионная имплантация. По сравнению с диффузией ионная имплантация позволяет получить более резкий профиль легирования. Однако главное достоинство этого метода заключается в том, что он позволяет отказаться от необходимого при диффузии длительного нагрева полупроводниковых дисков до температуры 1000°C и выше. Если имплантация осуществляется с помощью сведения ионов в тонкий пучок, то требуемые структуры могут быть сформированы и без фотолитографии – путем избирательного фокусирования пучка ионов на определенных участках полупроводникового диска. Поскольку в процессе применения ионной имплантации стремятся избежать длительного воздействия высокой температуры на полупроводниковый диск, здесь возникает проблема формирования оксидного слоя перед каждой операцией легирования. Если ориентироваться на то, что термическое окисление должно протекать при более низких температурах, т.е. в соответствии с режимом ионной имплантации, то следует или полностью отказаться от термического окисления или обратиться к другой технологии. Следующей проблемой является водная *промывка* полупроводникового диска и *травление* жидкими химикатами. Эти операции никогда органично не вписывались в полупроводниковую технологию. При переходе на микронные и субмикронные структуры они становятся абсолютно неприемлемыми, т.е. должны быть заменены процессами, лучше поддающимися управлению, например процессом очистки и травления с помощью плазмы или ионных пучков. Оба эти метода, кроме

того, обеспечивают возможность прямого избирательного травления определенных структур без фотолитографии. При плазменном травлении, например, с помощью определенных приемов можно добиться удаления с полупроводникового диска лишь тех участков, которые предварительно засвечивались ультрафиолетовым излучением эксимерного лазера. Для пассивации, маскирования и создания изоляции кроме двуокиси кремния все шире используют и другие материалы, в первую очередь нитрид кремния, который по ряду свойств превосходит двуокись кремния. Все чаще и другие слои формируются на базе технологии, основанной на обработке при относительно низких температурах. К их числу относится, например, химическое осаждение из паровой фазы, эффективность которого дополнительно можно увеличить путем использования газового разряда или лазерного облучения. По мере того как уменьшаются горизонтальные размеры структур, более узкими становятся токопроводные линии из алюминия или поликремния. В результате возрастает электрическое сопротивление, что отрицательным образом сказывается на быстродействии ИС. Плотность проходящих по ним токов становится очень большой, и это приводит к возникновению дефектов структуры материала в результате электромиграции. Следовательно, требуются межсоединения, обладающие более высокой механической прочностью и электропроводностью. В этой связи необходимо отметить возрастающее значение силицидов тяжелых металлов, например титана, вольфрама и молибдена, вводимых вместо поликремния в качестве проводников, расположенных на более глубоком уровне. При металлизации поверхностных проводников заметны тенденции к замене чистого алюминия алюминием, легированным медью или тяжелыми металлами.

Приведенные примеры развития полупроводниковой технологии, связанного с переходом на субмикронные структуры, позволяют получить общее представление о состоянии дел в данной области. Подво-

дя итоги, можно сказать, что этот переход ведет к исключению из полупроводниковой технологии высокотемпературных и влажных химических процессов и их замене операциями, протекающими при более низких температурах, а также сухими процессами. Чтобы выполнить отдельные операции с необходимой высокой точностью, технологическое оборудование должно быть оснащено диагностическими средствами и микропроцессорным управлением, позволяющими следить за всем ходом производственного процесса. В связи с этим особое значение приобретает внедрение в полупроводниковую технологию современных электронных, ионных, рентгеновских и оптических методов диагностики. Одновременно с переходом на субмикронную технологию в очередной раз резко возрастают требования к чистоте используемых материалов и технологического оборудования, которые и сегодня непомерно высоки. В то время как, например, при «надмикронной» технологии достаточно следить за тем, чтобы число частиц величиной более 0,5 мкм в атмосфере чистых помещений не выходило за определенную границу, при переходе на субмикронную технологию из чистых помещений необходимо практически полностью удалить пыль, частицы которой крупнее одной десятой доли микрометра. Образно говоря, положение с чистыми помещениями можно описать так: если до настоящего времени в этих помещениях не должно было быть бактерий – длина туберкулезной палочки равна 1 мкм, – то в будущем их потребуется полностью очистить даже от вирусов: размер вируса оспы составляет 0,15 мкм. Однако эти и рассмотренные ранее требования к будущей субмикронной технологии можно будет выполнить надлежащим образом, лишь когда произойдет переход на полностью автоматизированное выполнение всех операций цикла 1 в герметически изолированном пространстве, возможно в вакууме. Благодаря этому будет предотвращена возможность любого нарушения технологического процесса со стороны обслуживающего персонала; например,

будут ликвидированы причины возникновения вибраций и внесения загрязнений. Автоматизация технологических процессов практически исключает и ошибки по вине персонала. По оценкам экспертов, одно только исключение таких ошибок в цикле 1 может привести к повышению выхода годных изделий в 3–4 раза. Однако переход в цикле 1 к полностью автоматизированному вакуумному процессу, если таковой вообще возможен, должен происходить поэтапно. Пока же существует реальная возможность автоматизации только отдельных операций, например фотолитографии.

Субмикронные элементы

Серьезные задачи перед микроэлектронной технологией ставит необходимость изготовления ИС со степенью интеграции отдельных элементов от 10^6 до 10^7 и даже больше при размере структур менее 1 мкм, что неизбежно при таком уровне плотности элементов. Потребуются коренное улучшение всех технологических операций цикла 1. На это накладываются проблемы, связанные непосредственно с функционированием самого элемента. Можно ли заранее считать, что при последовательном уменьшении физических размеров МОП-транзистор будет работать по-старому? Безусловно, нет. По меньшей мере он, к примеру, должен иметь один атом кремния. Но одного этого недостаточно. Нужны участки полупроводникового материала с электропроводностью *p*- и *n*-типа, а это значит, что *p*- и *n*-области должны иметь такие размеры, чтобы там мог находиться по крайней мере один атом легирующей примеси. Поэтому концентрации легирующих примесей порядка 10^{18} могут быть обеспечены лишь при объеме исходного полупроводникового материала около 10^{-18} см³. Такой объем имеет кубик с длиной ребра 0,01 мкм. Однако одного атома легирующей примеси явно недостаточно, в действительности их должно быть много. Если взять, к примеру, 1000 атомов, то это приведет к десятикратному увеличению

линейных размеров легируемой области, т. е. до 0,1 мкм. Но уже при длине канала меньше $\frac{1}{4}$ мкм статистическая флуктуация значений концентрации легирующей примеси в канале сказывается на пороговом напряжении, т. е. в ИС оно начинает колебаться неконтролируемым образом от транзистора к транзистору. Другая проблема состоит в том, что число электронов в канале (мы имеем в виду n -канальный МОП-транзистор) уменьшается настолько, что количество электронов, порожденных радиоактивным излучением самой ИС или окружающей среды, в определенных условиях может стать таким, что приведет к включению или выключению транзистора. Чтобы сформировать p -область между истоком и стоком, длина канала должна превышать определенную величину (быть кратной дебаевскому радиусу), так как в противном случае будет наблюдаться «смыкание» канала. Кроме того, необходимо обеспечить некоторую минимальную длину (равную средней длине свободного пробега носителей заряда), чтобы перенос заряда в канале носил «нормальный» характер, иначе он станет «баллистическим». Если длину волны электронов в n -канальном МОП-транзисторе нельзя больше считать пренебрежимо малой по сравнению с глубиной канала, то необходимо принимать во внимание квантовый эффект: электроны превращаются в канале в двумерный электронный «газ». Для надежного переключения МОП-транзистора из запертого состояния в проводящее изменение напряжения на затворе должно быть значительно больше тепловых колебаний напряжения. При комнатной температуре эти колебания равны $\frac{1}{40}$ В. Взаимная электрическая развязка элементов, реализованная с помощью обратносмещенных $p-n$ -переходов, действует лишь до тех пор, пока туннелируемые электроны и дырки не преодолеют запрещенную зону полупроводника, т. е. пока толщина слоя объемного заряда превышает длину волны электронов или дырок. В настоящее время при проектировании топологии ИС с высокой степенью интеграции широко использует-

ся метод так называемого пропорционального уменьшения элементов. Он позволяет прогнозировать изменения свойств отдельных элементов, когда осуществляют уменьшение их линейных размеров. Так, например, время переключения транзистора должно уменьшиться вдвое, если все его размеры сокращаются наполовину. Этот прогноз опирается на результаты, полученные в ходе решения математических уравнений, с помощью которых описываются элементы. Метод пропорционального уменьшения применим, пока справедливы используемые уравнения (выше мы уже говорили об эффектах, которые частично ограничивают область их применения). Однако он непригоден, когда краевые условия, используемые при решении уравнений, не допускают соответствующего масштабирования. Более серьезная проблема состоит в том, что напряжение, приложенное к стоку, не может быть выбрано произвольно малым: по соображениям физического плана его значение должно превышать величину, равную примерно 2 В, а если необходимо обеспечить совместимость с ТТЛ ИС, то его следует поддерживать равным 5 В. В результате в канале длиной 0,5 мкм возникает электрическое поле напряженностью 10^7 В/м. В столь сильных полях происходит «разогрев» электронов, и их средняя скорость возрастает настолько, что они проникают в оксид затвора и там попадают в ловушки зарядов (отчего пороговое напряжение транзистора изменяется) или же проходят туннельно через всю толщину затворного оксида, что также вызывает резкое искажение функциональных характеристик МОП-транзистора. Физические ограничения, определяющие пределы дальнейшего уменьшения размеров элементов и необходимых для их изготовления вспомогательных структур средствами полупроводниковой технологии, в настоящее время хорошо изучены. Однако на ближайшем этапе уменьшения размеров – по крайней мере до тех пор, пока минимальные размеры структур еще превышают 0,1 мкм, – будут сказываться лишь те ограничения, которые

имеют относительный характер. Они позволяют отодвинуть эту границу вверх путем внесения структурных изменений в элементы, например путем введения в КМОП-технологии изолирующих канавок, заполненных оксидом, применения других материалов (нитридов, силицидов, тяжелых металлов) или использования интегральных схем, работающих при низких температурах. На этом основании можно сделать вывод, что в кремниевой микроэлектронике удастся перейти к ИС, в которых отдельные элементы имеют размеры около $0,1 \text{ мкм}$, а степень интеграции достигает 10^{10} элементов. Эти цифры мы получили, приняв площадь кремниевого кристалла равной 1 см^2 и разделив ее на площадь отдельного элемента, принятую равной $0,1 \times 0,1 \text{ мкм}$. Выше мы уже говорили о том, что интегральные схемы уже сейчас потребляют довольно мало энергии. Это касалось ИС, содержащих 10^5 элементов каждая. Но даже если ИС содержит $10^7 - 10^8$ отдельных элементов, проблема заключается не в чересчур большом энергопотреблении, а в том, что эта энергия превращается в тепло и вызывает сильный нагрев ИС, если не обеспечивается достаточно интенсивный отвод тепла. Существуют физические пределы теплопередачи. В соответствии с выполненными расчетами от корпуса ИС при предельно допустимых температурах нагрева в режиме непрерывной работы невозможно отвести тепловую мощность более 10 Вт . Именно отсюда и вытекает требование дальнейшего сокращения потерь мощности в ИС, например путем перехода на более низкие напряжения питания. Пределы помимо всего прочего определяются также тепловыми колебаниями эффективного напряжения, о чем мы уже говорили выше.

Дальнейшее уменьшение размеров элементов вплоть до принципиально возможного физического предела не является, как мы знаем, самоцелью. Это лишь средство для достижения определенной цели, т.е. увеличения степени интеграции и повышения быстродействия. Чтобы овладеть технологией изготовления ИС с

более высокой степенью интеграции, необходимо решить не только рассмотренные нами проблемы в цикле 1, но и задачи, связанные с циклом 0. Уже говорилось о том, что для перехода на полупроводниковые кристаллы с большей площадью при приемлемом выходе годных изделий необходимо наладить производство полупроводниковых дисков с меньшей плотностью дефектов и нарушений структуры. Решить эту задачу пытаются за счет совершенствования отдельных операций изготовления полупроводниковых дисков и кристаллов без какого-либо перехода на принципиально новую технологию. Что касается получения кремниевых кристаллов-стержней, то здесь доминирующее положение по-прежнему занимает метод Чохральского. Его недостатки связаны с тем, что в кремниевом расплаве, из которого вытягивается кристалл, возникают паразитные потоки, обусловленные термическими и гидродинамическими эффектами, а это ведет к нарушению структуры материала. Хотя устранить влияние этих закономерных эффектов совсем не просто, можно создать условия, когда воздействие магнитного поля на расплав позволяет регулировать характер их проявления. В результате существенно уменьшается интенсивность потоков, что дает возможность выращивать идеальные кристаллы. В ходе предварительной подготовки полупроводниковых дисков к дальнейшей обработке в цикле 1 в перспективе более широкое применение найдут процессы геттерирования, с помощью которых нежелательные дефекты активного тонкого слоя лицевой поверхности диска вытесняются в глубь материала или на противоположную поверхность. В этом случае говорят о *технологии контроля дефектов*. Увеличение диаметра кремниевого монокристаллического стержня, а следовательно, и диаметра полупроводникового диска до 150 мм и более, ставшее сейчас одной из первоочередных задач совершенствования этого этапа производственного процесса, хотя и не ведет непосредственно к повышению степени интеграции, все же позво-

ляет увеличить общее число кристаллов на одном диске, т.е. поднять процент выхода годных изделий в цикле 1. Однако косвенным путем увеличение диаметра полупроводникового диска все же способствует повышению степени интеграции. Переход на ИС с высокой степенью интеграции весьма ужесточает требования к функциональным испытаниям и качеству разработки топологии ИС. Часто исходят из того, что затраты на разработку топологии интегральных схем имеют экспоненциальную зависимость от степени интеграции. Выполнить эти сверхжесткие требования пытаются не только путем компьютеризации работ, но и путем разработки новых принципов топологического проектирования ИС, включая создание новых концепций построения отдельных элементов. Ранее мы уже говорили о проектировании ИС на базе стандартных элементов. Этот метод находит применение прежде всего при разработке заказных ИС. Говорили мы также и о логических матрицах, использование которых дает возможность заметно сократить объем проектных работ до этапа подготовки топологической документации на изготовление верхних одного-двух слоев формируемой структуры. К одной из последних концепций следует отнести самопроверку ИС. Эта концепция опирается на следующие факторы. Во-первых, функциональные испытания представляют собой не что иное, как решение специальной задачи обработки информации. Во-вторых, сама ИС способна обрабатывать информацию. Следовательно, ИС может самостоятельно проверить саму себя, т.е. осуществить самопроверку. В случае с ИС, характеризующихся очень высокой степенью интеграции, в определенных обстоятельствах некоторые функциональные элементы, например ячейки памяти, следует увеличить количественно, т.е. отойти от технического задания. В нормальном режиме эти части схемы не используются, т.е. остаются, как принято говорить избыточными. Однако при выходе из строя какого-либо активно работающего элемента схема автоматически

подключает избыточный. Таким путем можно существенно увеличить выход годных изделий, а также поднять эксплуатационную надежность ИС с высокой степенью интеграции. Решить те же задачи позволяет и метод, ориентирующийся на *интеграцию на уровне полупроводниковой пластины*. В этом случае на пластине (диске) уже формируют не большое число однотипных ИС, а только их части, соединяемые непосредственно на пластине в общую схему, причем такая сборка занимает площадь всего диска. Чтобы при таком подходе добиться приемлемого выхода годных изделий, практически невозможно обойтись без избыточных секций внутри общей схемы. Сегодня еще нельзя сказать с полной уверенностью, когда мы выйдем на технологический уровень, позволяющий изготавливать ИС со степенью интеграции 10^7 – 10^8 отдельных элементов. Вне всякого сомнения, предстоит преодолеть еще более серьезные трудности по сравнению с теми, с которыми микроэлектроника сталкивалась в своем развитии до сегодняшнего дня. Пока мы могли говорить о том, что степень интеграции удваивается каждый год. Если принять 1960 г. за отправную точку, т.е. с нулевым уровнем интеграции, когда на одном кристалле помещается один элемент, то в 1970 г. степень интеграции должна была бы составить 2^{10} , или около 10^3 , а в 1980 г. – 2^{20} , или около 10^6 элементов. Однако последний показатель в то время еще не был достигнут. Нельзя не заметить, что в конце 70-х – начале 80-х годов в противовес прогнозам стало наблюдаться замедление темпов развития. Причиной здесь можно считать возникновение качественно новых требований к технологии, обусловленных необходимостью перехода к субмикронной технологии, изменение концепции построения отдельных элементов интегральных схем, а также разработку связанной с этим топологии и проведение функциональных испытаний. Впервые субмикронный порог удалось преодолеть в 1987 г. Этот успех связан с изготовлением динамического ЗУПВ на 4 Мбит, в интегральной схеме

которого ширина наименьшего структурного элемента равна 0,8 мкм. Согласно прогнозам японских ученых, реализация структурных элементов шириной 0,1 мкм, которую несколько ранее в этой главе мы охарактеризовали как предельно возможную в кремниевой микроэлектронике и которая обеспечит практическое изготовление ИС со степенью интеграции около 10^{10} отдельных элементов, позволит создать динамические ЗУПВ емкостью 1 Гбит (10^9 бит). Некоторым эти прогнозы кажутся слишком смелыми. Если, однако, принять во внимание снова ускорившиеся темпы роста степени интеграции (например, еще совсем недавно появление динамического ЗУПВ емкостью 4 Мбит ожидалось не ранее 1990 г.), то следует признать, что они имеют реальную основу. Необходимо также подчеркнуть, что увеличение степени интеграции имеет важное значение не только для ИС памяти, но и для интегральных схем, ориентированных на обработку информации. Имеющие более высокую степень интеграции ИС процессоров позволяют выйти на повышенный уровень параллелизма в обработке информации, а следовательно, и поднять ее скорость. Именно параллелизм, а не быстроедействие отдельных элементов имеет решающее значение с точки зрения увеличения скорости обработки информации. Однако эти удивительные возможности кремниевой микроэлектроники не должны затушевывать те огромные препятствия, лишь преодолев которые можно реализовать практически то, что возможно в принципе. О некоторых из препятствий, стоящих на нашем пути, мы говорили выше. Значительное ужесточение требований, выполнить которые предстоит при переходе на субмикронную электронику, легче оценить на примере автомобилестроения. Прогнозируемый качественный скачок в микроэлектронике применительно к автомобилестроению будет означать создание автомобилей, способных передвигаться в 10 раз быстрее и вмещать в 100 раз больше людей и грузов. Автомобильной промышленности остается только радоваться тому, что перед

ней такие задачи не возникают. Микроэлектронике предстоит справиться с проблемой создания новых интегральных схем, занимающих по отношению к существующим на сегодняшний день ИС примерно такое же положение, какое занимает самолет по отношению к автомобилю, оставаясь при этом ненамного дороже. Тем не менее микроэлектроника в состоянии справиться с подобными трудностями, хотя это потребует весьма больших затрат и коренного изменения технологии. И все же, по всей видимости, даже не придется отказываться от полупроводниковой электроники в ее современном виде.

Однако все это произойдет не на первом этапе обновления. Полупроводниковая микроэлектроника обладает рядом еще не раскрытых возможностей. Например, в принципе не ясно, почему единственным материалом остается кремний и почему для изготовления интегральных схем не могут быть найдены новые пути и средства, позволяющие использовать и другие полупроводниковые материалы, превосходящие кремний по некоторым характеристикам. Мы уже упоминали арсенид галлия, в котором электроны обладают гораздо более высокой подвижностью — $8800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ по сравнению с электронами в кремнии $1350 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ — и который обладает рядом других свойств, представляющих интерес для микроэлектроники.

Арсенид-галлиевая микроэлектроника

В настоящее время параллельно с кремниевой фактически уже существует и успешно развивается *арсенид-галлиевая* микроэлектроника. Из-за малой подвижности дырок в арсениде галлия — $460 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ — такая электроника отличается *униполярным* характером и «имеет дела» только с электронами. Биполярные транзисторы здесь отсутствуют, хотя и в этом направлении проводились лабораторные эксперименты. Важнейшим схемным элементом электронных устройств на основе арсенида галлия является полевой тран-

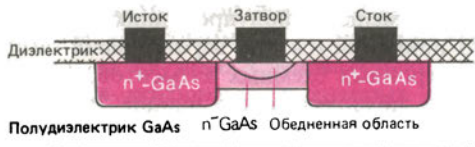


Рис. 68. Арсенид-галлиевый полевой транзистор с затвором Шотки.

зистор, который в отличие от подобного прибора кремниевой микроэлектроники реализуется не в виде полевой структуры типа металл–оксид–полупроводник (МОП), а как полевая структура типа металл–полупроводник (МП). У МП-транзистора, который называется также полевым транзистором с затвором Шотки (рис. 68,а), металлический электрод-затвор располагается непосредственно на области арсенида галлия с электропроводностью n -типа. Под затвором лежит обедненный слой, в который при подаче на затвор положительного электрического напряжения могут «втягиваться» электроны. В результате слой становится токопроводящим. Таким образом, принцип работы полевого транзистора с затвором Шотки несколько отличается от принципа работы МОП-транзистора. Арсенид-галлиевый прибор является полевым транзистором с встроенным каналом. Чтобы полностью использовать преимущества более высокой подвижности носителей заряда для сокращения времени прохождения сигнала через полевой транзистор с затвором Шотки, длина канала в арсенид-галлиевом приборе должна быть менее 1 мкм. Кроме того, база МОП-транзистора сделана из арсенида галлия, а как известно, оксид этого материала не обладает такими же свойствами, какими характеризуется оксид кремния. Поэтому для изоляции токопроводящих линий, а также для пассивации и маскирования в арсенид-галлиевой электронике приходится использовать другие материалы. Несмотря на все эти трудности, сегодня промышленность освоила серийное производство приборов на полевых транзисторах с затвором Шотки. Правда, пока они имеют малую и среднюю степени

интеграции, и главное место среди них занимают аналоговые переключатели для СВЧ-устройств, хотя выпускаются и цифровые ИС. Первые лабораторные интегральные схемы на основе арсенида галлия были созданы в 1980 г. В настоящее время изготавливают также ЗУПВ емкостью 1 и 4 кбит с минимальным временем выборки 3 нс. Для схем, которые должны отличаться высоким быстродействием и малыми потерями (рис. 72), кроме высокой подвижности электронов важное значение имеет и такое свойство арсенида галлия, которому нет аналога среди свойств кремния: арсенид галлия можно сделать и изолятором, например путем легирования (до соответствующей концентрации) атомами хрома или, что делают чаще, включения любого, в том числе и случайного, легирования. Если использовать в качестве подложки диэлектрик или полудиелектрик из арсенида галлия, то отпадет необходимость во всех операциях по развязке элементов, которые неизбежно осуществляются для кремниевых ИС, вызывая существенное ухудшение такой характеристики, как рассеяние мощности. При работе с кремнием задача частично облегчается за счет изоляции подложки материалом иного рода, в качестве которого чаще всего применяют сапфир (технология КНС). Несмотря на перечисленные достоинства арсенида галлия, с полной уверенностью можно утверждать, что ему не удастся потеснить кремний, по-прежнему занимающий в микроэлектронике доминирующее положение. Представление о действительном значении арсенид-галлиевой электроники по сравнению с кремниевой дает следующая справка: если в 1975 г. годовой объем обработки пластин из арсенида галлия составил 300 тыс. шт., то в 1985 г. он достиг 1 млн. шт. Сравнив эти показатели с объемами обработки кремния, когда уже в 1980 г. было изготовлено 100 млн. пластин, вы поймете, что арсенид галлия занимает весьма скромное место. Никаких серьезных изменений в этом отношении не предвидится и в будущем. Вероятность того, что арсенид галлия вытеснит кремний, так же мала,

как и вероятность того, что в металлургии алюминий вытеснит сталь. Однако электроника на основе арсенида галлия, несомненно, будет существенно дополнять кремниевую микроэлектронику, расширяя ее возможности.

Интегральная оптоэлектроника

Особое преимущество арсенида галлия заключается в том, что его с успехом можно смешивать с другими полупроводниками, например арсенидом алюминия или фосфидом галлия. Подбирая соотношение компонентов такой смеси, можно получать полупроводниковые материалы, обладающие — конечно, в известных пределах — требуемыми электрическими и оптическими свойствами. Такие полученные

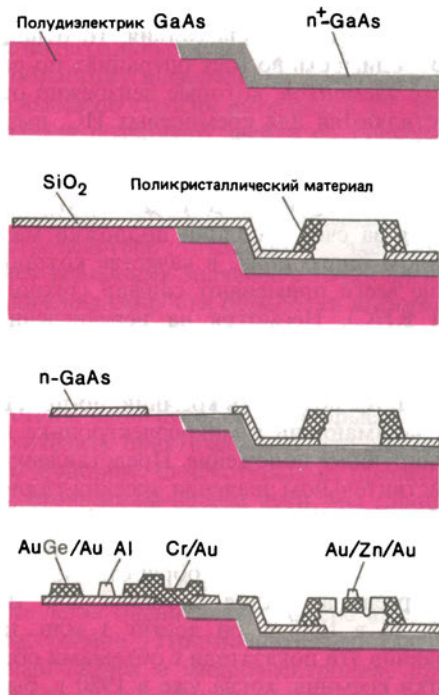


Рис. 69. Гетероструктурный лазер на основе арсенида галлия и арсенида галлия-алюминия (справа) вместе с арсенид-галлиевым полевым транзистором (слева) в виде микроструктуры на одном кристалле. На рисунке показаны различные этапы изготовления.

путем смешения полупроводники уже давно применяются для изготовления оптоэлектронных схемных элементов, в частности люминесцентных диодов, лазерных диодов и фотодиодов. Благодаря этому возникает возможность формирования на одном и том же полупроводниковом кристалле из арсенида галлия как электронных элементов, в первую очередь полевых транзисторов с затвором Шотки, так и оптоэлектронных элементов. Первые опытные образцы такой интегральной микроструктуры уже получены в лабораториях (рис. 69).

Для интегральных схем как микроэлектроники, так и оптоэлектроники характерным является использование полупроводниковых *гетероструктур*. В данном случае речь идет о структурах из ряда последовательных слоев различных полупроводниковых материалов, например арсенида галлия и арсенида галлия-алюминия. Если отдельные слои выполнить очень тонкими, а разделяющие поверхности сделать чрезвычайно гладкими, то возникнут так называемые полупроводниковые микроструктуры.

Искусственные полупроводниковые микроструктуры

На основе таких структур можно получить электронные схемные компоненты совершенно нового типа. Показательным примером является сверхбыстродействующий транзистор, получивший название транзистора с высокой подвижностью электронов. Первые сообщения о нем появились в 1981 г., а в настоящее время уже существуют приборы с временем переключения 17 нс при комнатной температуре и 5 пс при температуре жидкого азота. Сегодня транзисторы с высокой подвижностью электронов выпускаются серийно. Лабораторным путем создано также устройство умножения 4×4 двоичных разрядов, насчитывающее в общей сложности 1000 элементов. Не менее сенсационные характеристики имеют и так называемые полупроводниковые лазерные диоды

с несколькими квантовыми ямами, отличающиеся высокими КПД, надежностью и сроком службы. Следовательно, они являются приборами, в которых остро нуждаются проектировщики волоконно-оптических линий связи. Чем же определяются великолепные характеристики этих и других схемных элементов, построенных на основе искусственных полупроводниковых микроструктур?

Чтобы ответить на этот вопрос, необходимы кое-какие предварительные пояснения. В конечном итоге отличные свойства таких полупроводников с точки зрения реализации электронных схемных элементов обусловлены особенностями их *микроструктуры*, т.е. природой атомов и специфической упорядоченностью пространственной решетки. Микроструктура жестко регламентирует прежде всего структуру энергетических зон полупроводника, конфигурация и расположение которых в свою очередь решающим образом влияют на свойства материала. Здесь следует вспомнить наши рассуждения из гл. 3. В то же время сама микроструктура в значительной степени «запрограммирована» физическими свойствами полупроводникового материала. Кремний, например, отличается тетраэдрической микроструктурой кристаллической решетки (как и алмаз), где расстояние между атомами составляет 0,235 нм. Кристаллическая решетка арсенида галлия также имеет тетраэдрический характер: в ней соседние атомы мышьяка и галлия располагаются на расстоянии 0,244 нм. Обычным путем эти структуры изменить нельзя. Если же на них повлиять каким-то искусственным способом, то результат окажется очень интересным. Сформировав искусственным путем структуру, размер которой, например, равен длине волны электрона или соответственно дырки, т.е. в диапазоне нескольких нанометров, можно оказать воздействие на энергетические зоны полупроводника. Тогда появится возможность таким образом изменить энергетические зоны, чтобы итоговая структура была оптимальной для построения схемных элементов с заданными свойствами.

Но сколь ни проста эта идея, впервые высказанная в начале 70-х годов японским физиком, лауреатом Нобелевской премии Эсаки, ее весьма трудно реализовать на практике. Необходимо хорошо представлять себе, насколько сложными являются современные полупроводниковые микроструктуры, в большинстве случаев остающиеся горизонтальными. Но и в том случае, когда размеры микронные (1 мкм = 0,001 мм), это все еще *макροструктуры*, пусть и миниатюрные. Чтобы овладеть технологией изготовления микроструктур, необходимо оперировать размерами, сравнимыми с расстоянием между атомами, т.е. в диапазоне нанометров – в 1000 раз меньше размеров, привычных в современной микроэлектронике. Сегодняшние достижения являются наиболее значительными в современной науке и технике. Так, например, за последние 15 лет разработаны методы, с помощью которых удается осадить один на другой слои различных кристаллических полупроводниковых материалов каждый толщиной всего в несколько межатомных расстояний. Эти методы появились в ходе совершенствования технологии эпитаксиального выращивания, которая давно применяется в микроэлектронике и оптоэлектронике для формирования слоев толщиной в несколько микрометров. В искусственных микроструктурах область перехода от слоя одного материала к слою другого должна иметь глубину, не превышающую одного-двух межатомных расстояний, причем исключается заметное смещение атомов соседних слоев, скажем, вследствие диффузии. Наиболее удобными здесь оказались два процесса – химическое осаждение из паровой фазы металлоорганических соединений и молекулярная эпитаксия. Последняя является наиболее гибким и универсальным процессом. Компоненты наращиваемых слоев в этом случае осаждаются на монокристаллическую подложку в сверхглубоком вакууме из так называемых ячеек Кнудсена. Сегодня метод эпитаксиального выращивания обеспечивает возможность серийного изготовления микро-

структур, начиная с двухслойных и кончая периодическими многослойными структурами из двух разных материалов, называемыми *сверхрешетками*.

Сверхрешетки. Квантовые ямы

Изменение структуры энергетических зон и прочие их особенности приводят к появлению физических эффектов, отсутствующих в традиционных полупроводниковых материалах и структурах. Так, например, принцип работы упомянутого ранее транзистора с высокой подвижностью электронов, схематически показанного на рис. 70, основывается на использовании одного из подобных эффектов – введении электронов в слой материала, в энергетической структуре которого имеется *квантовая яма*. В транзисторе с высокой подвижностью электронов слой, содержащий квантовую яму, выполнен из нелегированного арсенида галлия. Оба смежных слоя, состоящие из арсенида галлия-алюминия и из арсенида галлия, легированы донорной примесью и имеют электропроводность *n*-типа. Выделяемые ими электроны «скатываются» в слой арсенида галлия, как в лунку. Из-за отсутствия атомов, мешающих их движению, электроны в яме обладают очень высокой подвижностью в направлении, параллельном стенкам слоя. Зарегистрированные на сегодня рекордные показатели подвижности достигают нескольких миллионов $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Благодаря этому транзистор с высокой подвижностью электронов обладает весьма большим быстродействием.

В принципе электроны такого транзистора могут свободно перемещаться только параллельно стенкам квантовой ямы, т.е. способны двигаться только в двух плоскостях. Таким образом, они представляют собой *двумерный электронный газ*. В таком газе было обнаружено несколько неожиданное явление – *квантовый эффект Холла*. Как известно, обычный эффект Холла характеризуется тем, что поперечное электрическое поле и соответствующее напряжение, возникаю-

щие в материале при прохождении электрического тока и одновременном воздействии магнитного поля, нормального к направлению тока, растут линейно с увеличением напряженности магнитного поля (вспомним по этому поводу сказанное в гл. 3). В квантовом же эффекте Холла кривая напряжения носит ступенчатый характер, т.е. в определенных областях изменения напряженности магнитного поля холловское напряжение остается постоянным, тогда как на границе между ними оно скачкообразно возрастает до уровня следующей ступени. Если холловское напряжение разделить на величину тока, то мы получим холловское сопротивление (рис. 71). Ступени холловского напряжения при этом соответствуют сопротивлениям, каждое из которых определяется как целое число некоторых долей сопротивления, зависящего от фундаментальных физических постоянных и не зависящего от свойств и формы измерительного зонда. Элементарное сопротивление при этом равняется постоянной Планка (h), деленной на квадрат элементарного электрического заряда (e^2). Совершенно неожиданной оказалась точность, с которой результаты измерения напряжений отдельных ступеней позволили определить значение h/e^2 ; оно равно 25812,81 Ом. Итак, с одной стороны, мы получаем естественную меру для определения единицы Ом, а с другой – новый метод для измерения фундаментальных физических постоянных e и h . Квантовый эффект Холла был открыт в 1980 г. фон Клитцингом, который в 1985 г. получил за эту работу Нобелевскую премию по физике. Следующее не-

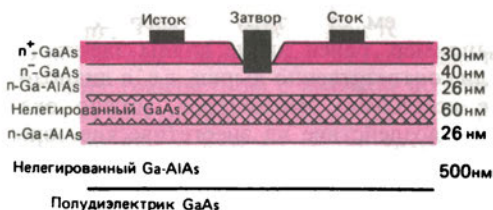


Рис. 70. Транзистор с высокой подвижностью электронов.

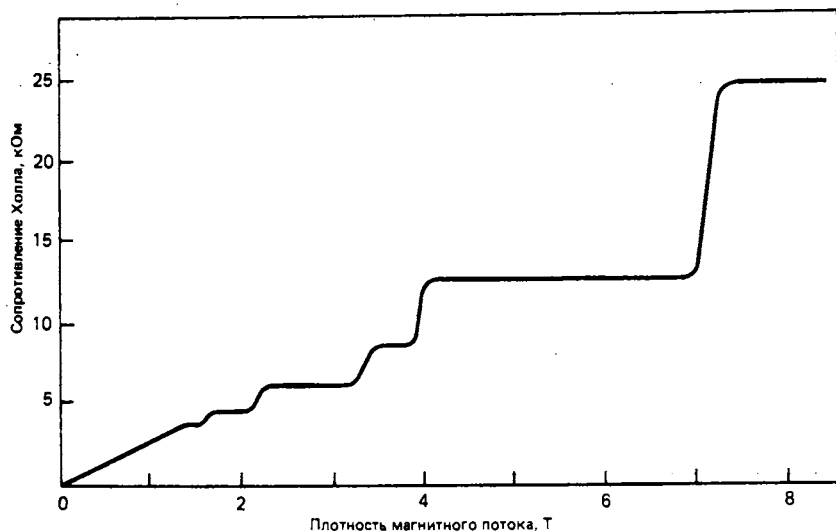


Рис. 71. Квантовый эффект Холла в гетероструктуре арсенида галлия–арсенида галлия–алюминия. Температура составляет 8 мК (по К. фон Клитцингу и Г. Эберту).

ожиданное явление, обнаруженное в ходе работы, можно охарактеризовать как дробный квантовый эффект. Значение холловского сопротивления в данном случае выражается не целым, а дробным числом некоторых долей h/e^2 . Здесь электроны ведут себя так, как будто их электрический заряд равен не целому элементарному дискретному заряду e , а лишь его части. Конечно, такое толкование данного эффекта не соответствует действительности, поскольку наименьший наблюдаемый в природе заряд остается равным e . Однако и этому явлению нужно найти правильное объяснение. Теоретики, работающие в области физики полупроводников, в настоящее время заняты изучением данного вопроса. В целом сверхрешетки и другие искусственные микроструктуры открывают широкое поле деятельности в области фундаментальных исследований физики полупроводников, результаты которых позволят создать новые электронные и оптоэлектронные элементы. Благодаря построению схемных элементов из искусственных микроструктур и внедрению процессов их формирования в производство сейчас вырисовывается новое направление дальнейшего развития микро-

электроники, которое будет носить фундаментальный характер. Его материальная основа не ограничится одним арсенидом галлия — сюда добавятся и другие полупроводниковые соединения, например фосфид индия, что обязательно скажется на всех технологических процессах кремниевой микроэлектроники. Уже сегодня в отдельных лабораториях изготавливают сверхрешетки из слоев кремния и кремния-германия. В связи с тем что вместе с другими элементами эти структуры можно встраивать в кремниевый кристалл, им уделяется особое внимание.

Функциональная электроника

На основе арсенида галлия можно спроектировать и изготовить элемент, который, возможно, станет предшественником электроники совершенно иного рода — так называемой *функциональной электроники*. Электронный элемент, о котором здесь идет речь, названный диодом Ганна по фамилии ученого, открывшего используемый в нем эффект, позволяет осуществлять прямое возбуждение электромагнитных колебаний в диапазоне сверхвысоких частот. То, что обычно удавалось осуществить с помощью схемы, состоящей из

резисторов, конденсаторов, диодов и транзисторов, способен выполнить один элемент. Требуемая функция – возбуждение колебаний – реализуется *непосредственно* одним диодом Ганна. Особенность микроэлектроники заключается в том, что она позволяет с помощью межсоединений объединить в составе одной микросборки большое число элементов. Однако причина использования большого числа таких элементов состоит в том, что выполняемая всей схемой функция должна быть реализована с помощью элементарных функций отдельных элементов. Функциональная электроника ближе подошла к прямой реализации общесхемной функции. Работающие в этой области специалисты заняты поиском элементов, способных самостоятельно выполнять более сложные цифровые функции, например логические или арифметические операции. Функциональная электроника поднимает интеграцию еще на одну ступень вверх, если проводить сравнение с уровнем современной микроэлектроники. Прежде всего, однако, необходимо заменить, что в настоящее время функциональная электроника является скорее перспективной программой, нежели четко оформившимся направлением развития электронной технологии. Чем она станет в действительности, покажет время. Во всяком случае, внедрение интегральной инжекционной логики в современную кремниевую микроэлектронную технологию можно считать шагом к практическому осуществлению этой концепции. Описанные выше приборы, выполненные на основе структур арсенида галлия с квантовыми ямами, также могут представлять интерес для функциональной электроники. Подобные надежды подкрепляются следующими соображениями. Если, например, две квантовые ямы будут располагаться достаточно близко друг к другу, то электроны смогут переходить из одной ямы в другую даже тогда, когда между ними не будет металлических проводников: начнет осуществляться *туннельный переход* сквозь потенциальные барьеры между ямами. Если в обеих ямах энергетические уров-

ни совпадают, туннельный переход осуществляется практически без сопротивления. В таком случае говорят о *резонансном туннельном эффекте*. Резонанс можно вызвать или устранить путем изменения электрического напряжения. Конструируя устройства, содержащие многие квантовые ямы, между которыми осуществляются туннельные переходы, можно будет действительно подойти к выполнению сложных цифровых функций. Необходимо, правда, заметить, что этот процесс находится в начальной фазе.

Трехмерная интеграция

Такое же принципиальное значение для микроэлектроники имел бы переход от двумерной интеграции элементов, которая, за некоторыми малыми исключениями, остается доминирующей в современной микроэлектронной технологии, к *интеграции с охватом одновременно нескольких расположенных друг над другом плоскостей*, т. е. к интеграции в трехмерном пространстве. Тогда удалось бы заметно увеличить число элементов в единице объема. Для перехода к трехмерной интеграции необходимо, в частности, овладеть технологическими методами, позволяющими на пассивирующем слое, который покрывает определенную плоскость интегральной схемы, путем осаждения создавать слой монокристаллического кремния, предназначенного для формирования следующей схемной плоскости. В настоящее время ведутся работы по созданию таких методов. Если пассивирующий слой состоит из аморфной двуокиси кремния, которая в настоящее время используется практически во всех случаях, то здесь можно применить графоэпитаксию. С помощью этой технологии на поверхность аморфной двуокиси кремния наносят тонкоструктурированные канавки. Если на обработанной таким образом поверхности осаждать кремний, то наращивание его происходит аналогично росту кристаллического слоя на затравке. Другой метод предусматривает «очистку» кремниевого слоя, первоначально осажденного в аморфном виде: здесь восста-

новление происходит аналогично тому, как вслед за завершением ионной имплантации восстанавливается нарушенная структура подложки. Изучаются, кроме того, возможности эпитаксиального выращивания кремниевого слоя на кристаллических пассивирующих слоях, например из дифторидов кальция и стронция. В последнее время для этого стали применять молекулярную эпитаксию.

Криомикроэлектроника

Ассортимент полупроводниковых материалов, которыми можно будет пользоваться в микроэлектронике, расширится при переходе на *низкие температуры*. Так, например, материалы типа антимонида индия, которые вследствие сравнительно узкой запрещенной зоны, отделяющей валентную зону от зоны проводимости, имеют при комнатной температуре (273 К) слишком большую концентрацию носителей заряда или недостаточно высокую их подвижность, при температуре жидкого азота (77 К) или жидкого гелия (4 К) приобретают свойства, делающие их приемлемыми для микроэлектроники. Исходя из этого, в настоящее время ведутся исследования режимов работы различных электронных элементов и интегральных схем при низких температурах, причем эксперименты осуществляются также с элементами и ИС из кремния и арсенида галлия. Поэтому и возникло понятие криомикроэлектроники. Помимо всего прочего переход к низким температурам дает еще одно преимущество: становятся меньше пороговые напряжения транзисторов, что позволяет снизить рабочие уровни напряжения и мощности рассеяния. Благодаря увеличению подвижности носителей заряда существенно повышается быстрдействие элементов при низких температурах.

Электронные приборы на переходах Джозефсона

Радикальным отходом от микроэлектроники в ее привычном для нас понимании можно считать технику *электронных приборов, работающих на эффекте Джозеф-*

сона, которая также нуждается в низких температурах. Здесь используется эффект, открытый в 1962 г. английским физиком Б. Джозефсоном. Эффект Джозефсона возникает в твердотельном приборе, состоящем из двух сверхпроводящих металлических слоев и разделяющего их слоя диэлектрика (рис. 72). Если слой диэлектрика сделать очень тонким (менее 0,01 мкм), то электроны обоих сверхпроводящих слоев получают возможность «проскакивать» сквозь него в результате туннельного эффекта. В этом случае говорят о туннельном переходе. Поскольку всю совокупность электронов в сверхпроводнике можно рассматривать как макроскопическую волну с определенной фазой, то туннельный переход сопоставим с взаимным наложением света от двух когерентных источников, которое ведет к возникновению интерференции: вследствие наложения электронных волн друг на друга через переход начинает проходить электрический ток, наблюдающийся и тогда, когда к сверхпроводникам не приложено напряжение. Прохождение тока через диэлектрик без приложения напряжения – удивительное явление, которое можно объяснить только на основании квантовой теории сверхпроводимости, и именно поэтому в данном случае трудно найти наглядное толкование. Тем не менее этот эффект вполне реален и подтверждается соответствующими экспериментами. У нормальных проводников электронные волны не имеют определенной фазы, так что подобные волны, проходящие через переход в обоих направлениях, взаимно гасятся в результате интерференции. Таким образом, при отсутствии напряжения в нормальных проводниках электрический ток не идет через переход. Когда же ток существует, на переходе наблюдается относительно большое падение напряжения. Если нам удастся с помощью небольшого изменения напряжения обеспечить переключение обоих проводников, между которыми происходит туннельный переход, из сверхпроводящего в нормальное проводящее состояние и, кроме того, иметь источник

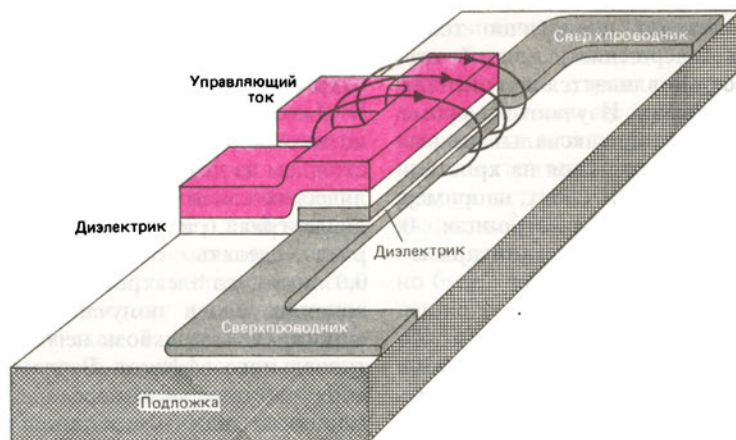


Рис. 72. Элемент на туннельном переходе Джозефсона. Пояснения даются в тексте.

тока, обеспечивающий постоянное прохождение электрического тока через переход вне зависимости от состояния проводимости, то мы получим элемент, способный, подобно транзистору, усиливать изменения напряжения. Но ведь электрический способ переключения из нормального состояния в сверхпроводящее давно известен: если сила тока в сверхпроводнике превысит определенную критическую величину или же сверхпроводник подвергнется воздействию магнитного поля с напряженностью выше критической, то он перестанет быть сверхпроводящим и перейдет в нормальное проводящее состояние. Если магнитное поле создается током, протекающим по какому-то второму контуру, то появляется возможность управлять значительным напряжением на туннельном переходе с помощью малого напряжения на этом втором контуре. А ведь это именно то, в чем нуждается техника цифровой обработки информации. Описанный прибор получил название элемента на туннельном переходе Джозефсона. Кроме таких элементов с одним переходом применяют также элементы с двумя и несколькими переходами – так называемые сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики (сквиды). Из элементов Джозефсона, как и из полупроводниковых компонентов, можно строить логические схемы, схемы, памя-

ти и вычислительные схемы. Переключательные схемы, основанные на использовании эффекта Джозефсона, можно построить с помощью интегральной планарной технологии, применяемой в полупроводниковой микроэлектронике. Так как сверхпроводник практически не оказывает никакого сопротивления прохождению электрического тока, то схемы, в которых используются туннельные переходы Джозефсона, потребляют исключительно малую электрическую мощность. Кроме того, при анализе энергетического баланса работы таких схем нельзя не учитывать следующее: они достигают работоспособного состояния только после того, как их охлаждают до температуры 4 К, и затем поддерживают температуру на этом уровне. Расход энергии практически полностью компенсируется ее малым рассеянием в процессе работы схем. Тем не менее намного меньшие потери в схемах памяти, построенных на переходах Джозефсона, чем в полупроводниковых схемах, приобретают большое значение. Это позволяет поднять степень интеграции, которая определяется предельными возможностями отвода тепла. Благодаря этому большое число ИС, необходимых для создания крупных универсальных ЭВМ, можно будет разместить в меньшем физическом объеме. Отсюда вытекают определенные преимущества с точки

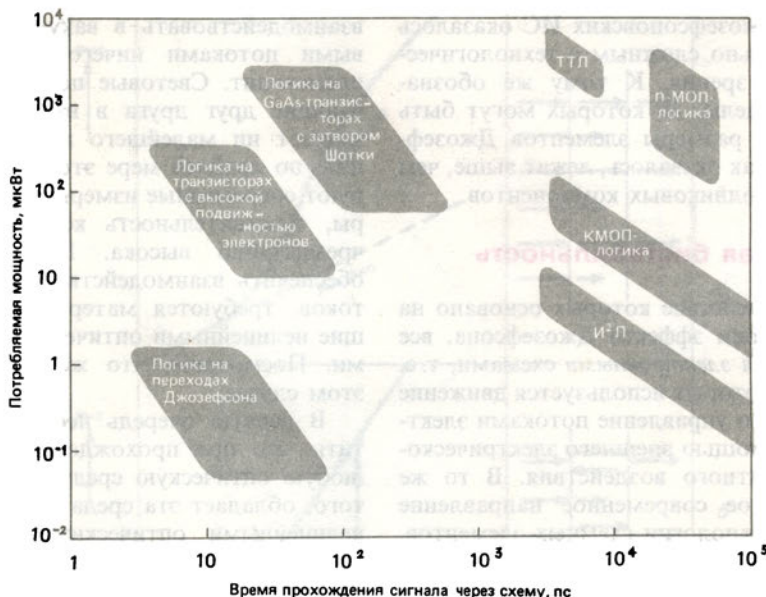


Рис. 73. Потребление мощности и время прохождения сигнала через логические элементы из арсенида галлия и элементы, основанные на эффекте Джозефсона. Для сравнения приведены характеристики некоторых логических элементов кремниевой электроники.

зрения повышения быстродействия компьютеров. Необходимо принять во внимание и то обстоятельство, что, хотя распространение импульсов электрического напряжения происходит со скоростью света, для прохождения отрезка длиной 30 см все же требуется время 1 нс. При использовании схем на элементах Джозефсона можно сократить задержку распространения сигнала до 0,01 нс (рис.73). Следовательно, чтобы в полной мере использовать быстродействие применяемых ИС, компьютеры должны быть построены весьма компактно. Снижение уровня потерь в схемах на элементах Джозефсона делает возможным создание подобных машин.

Среди всех альтернативных вариантов полупроводниковой микроэлектроники, основанная на использовании эффекта Джозефсона, несомненно, добилась самого большого прогресса. Это тем более заслуживает внимания, так как принцип функционирования — эффект Джозефсона — теоретически был обнаружен только в 1962 г. и экспериментально

подтвержден год спустя. Теоретическое предсказание этого эффекта основано, в частности, на принципе нарушения симметрии, заимствованном из физики элементарных частиц. За открытие этого эффекта Джозефсон вместе с двумя другими учеными получил в 1973 г. Нобелевскую премию по физике. В настоящее время уже существуют, как было сказано выше, интегральные схемы, основанные на эффекте Джозефсона. На нас всегда большое впечатление производит, когда результаты на первый взгляд совершенно абстрактных фундаментальных исследований приобретают важное прикладное значение и в течение сравнительно короткого времени приводят к появлению устройств, находящихся практическое применение. И все же пока невозможно в полной мере оценить то значение, которое в будущем может приобрести электроника, основанная на использовании эффекта Джозефсона. Пока еще нет и джозефсоновских компьютеров, если не считать узкоспециальных и не вышедших из стадии лабораторных испытаний образцов. Изго-

товление джозефсоновских ИС оказалось исключительно сложным с технологической точки зрения. К тому же обозначились пределы, до которых могут быть уменьшены размеры элементов Джозефсона; они, как оказалось, лежат выше, чем у полупроводниковых компонентов.

Оптическая бистабильность

Приборы, действие которых основано на использовании эффекта Джозефсона, все же остаются *электронными* схемами, т.е. такими, в которых используется движение электронов и управление потоками электронов с помощью внешнего электрического и магнитного воздействия. В то же время другое современное направление развития технологии схемных элементов, предназначенных для обработки информации, целиком и полностью выходит за пределы электроники. Оно связано с созданием оптических элементов, и носителем информации здесь служит свет. Во всем этом нет ничего удивительного, поскольку с информацией, представленной световыми сигналами, мы сталкиваемся довольно часто — достаточно назвать все виды визуального восприятия, включая восприятие изображений и знаков, фотографию, управление различными установками с помощью световых клапанов или волоконно-оптическую связь. В перечисленных случаях свет используется для реализации разных информационных процессов — передачи и приема, а также хранения информации. Единственной областью, где он пока не применяется, остается обработка информации, которая как раз прежде всего нас и интересует. Чтобы свет можно было использовать для обработки информации, необходимо выполнение главного условия, которое применительно к электронной обработке информации означает способность потоков электронов взаимодействовать друг с другом. В отношении света это означает, что необходимо реализовать возможность изменять с помощью *одного* светового потока интенсивность *другого* светового потока. Тогда как потоки электронов способны

взаимодействовать в вакууме, со световыми потоками ничего подобного не происходит. Световые потоки, пронизывающие друг друга в вакууме, не оказывают ни малейшего взаимного влияния — по крайней мере этого не регистрируют современные измерительные приборы, чувствительность которых, однако, чрезвычайно высока. Поэтому чтобы обеспечить взаимодействие световых потоков, требуются материалы, обладающие нелинейными оптическими свойствами. Посмотрим, что же происходит в этом случае.

В первую очередь необходимо заметить, что при прохождении света через любую оптическую среду независимо от того, обладает эта среда линейными или нелинейными оптическими свойствами, интенсивность выходящего из кристалла светового потока $I_{\text{вых}}$ зависит от интенсивности светового потока $I_{\text{вх}}$, падающего на данный кристалл. Таким образом, обычно чем больше световой поток на входе, тем больше он и на выходе. Если между $I_{\text{вых}}$ и $I_{\text{вх}}$ существует линейная зависимость, т.е. увеличение $I_{\text{вх}}$ в 2 раза приводит к удвоению $I_{\text{вых}}$, то говорят о линейной оптической среде (рис. 74). В нелинейной оптической среде интенсивность светового потока на выходе, естественно, не является линейной функцией светового потока на входе. Поясним это на примере рис. 74,а. В определенном диапазоне значений интенсивности светового потока $I_{\text{вх}}$ наблюдается сверхлинейное нарастание $I_{\text{вых}}$. Однако в большинстве случаев требующаяся для этого интенсивность входного светового потока настолько высока, что даже при фокусировании светового пучка в пятно диаметром 10 мкм нелинейность проявляется только при использовании мощного лазера. Для обработки информации такие большие световые мощности совершенно не подходят. Поэтому решающую роль здесь имело то обстоятельство, что в распоряжении инженеров появились такие обладающие специфическими оптическими свойствами материалы, как арсенид галлия и другие полупроводники, в которых

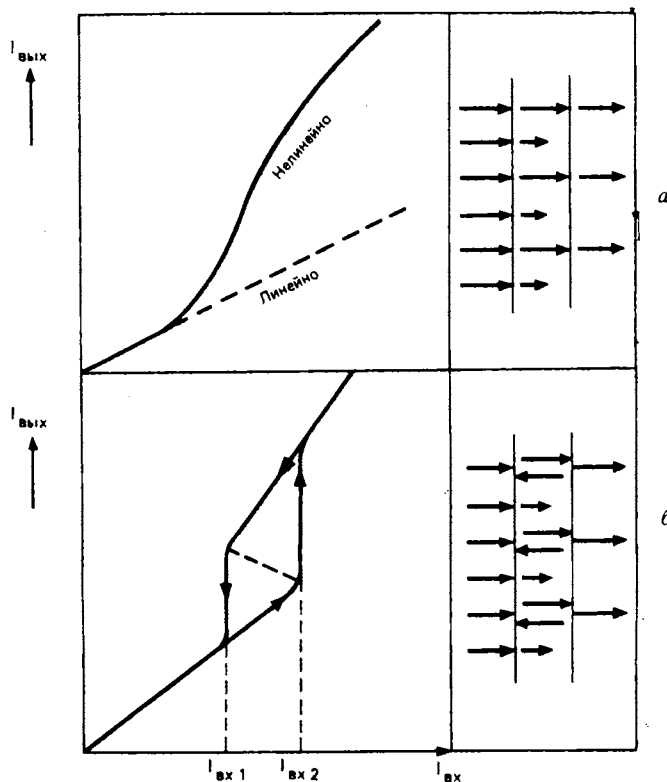


Рис. 74. Зависимость интенсивности светового потока на выходе пластины с нелинейными оптическими свойствами от интенсивности светового потока на входе. *а* – без обратной связи; *б* – с обратной связью.

нелинейность проявляется при мощности светового потока в несколько милливатт, а такие световые потоки способны генерировать полупроводниковые лазерные диоды. Для усиления нелинейного эффекта полупроводниковому материалу придают форму так называемого резонатора Фабри–Перо, т.е. пластинки, где углы наклона граней подобраны с таким расчетом, чтобы падающий на нее свет частично отражался, а частично мог проходить сквозь пластинку. Благодаря этому (как и в случае с электронным переключателем) между выходом и входом пластинки устанавливается обратная связь. В результате изменяется (по сравнению с рис. 74,а) зависимость интенсивности светового потока на выходе от интенсивности на входе. Действительная

кривая этой зависимости показана на рис. 74,б, причем она наводит на интересные мысли. Если интенсивность светового потока на входе начинает расти с нуля, то сначала интенсивность на выходе также возрастает почти линейно, но лишь до тех пор, пока не будет достигнута точка $I_{вх2}$. После того как кривая, показанная на рис. 74,б штриховой линией, будет действительно пройдена, то, начиная с этой точки, увеличить $I_{вых}$ можно также за счет повторного уменьшения интенсивности светового потока на входе. Это будет продолжаться до тех пор, пока в точке $I_{вх1}$ кривая не уйдет вправо, изменив направление. Начиная с этой последней точки, для увеличения $I_{вых}$ снова потребуется увеличивать $I_{вх}$. Рассмотренный вид кривой позволяет пред-

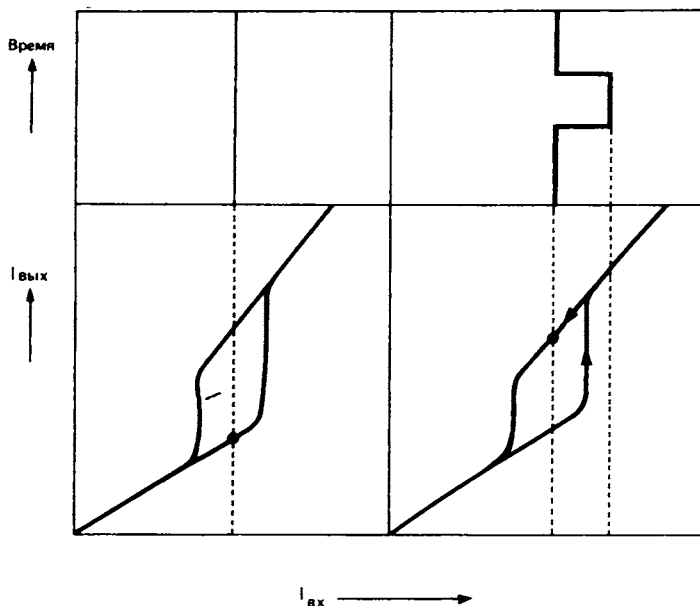


Рис. 75. Хранение информации в виде световых импульсов, эквивалентных единицам, с помощью оптического элемента с двумя устойчивыми состояниями.

положить, что происходит в действительности, когда при увеличении интенсивности светового потока на входе с нуля мы не останавливаемся в точке $I_{вх2}$, а продолжаем двигаться дальше. Скачкообразное изменение светового потока на выходе скажется на верхней ветви кривой, что и видно по вертикальному отрезку на рис. 74,б. Нечто похожее наблюдается и тогда, когда, начав с больших значений интенсивности светового потока, мы будем двигаться в сторону ее уменьшения. Сначала перемещение происходит по верхней ветви кривой. В точке $I_{вх1}$ интенсивность светового потока на выходе падает, переходя на нижнюю ветвь кривой. Если пройти эту кривую в сторону снижения интенсивности светового потока на входе, то мы окажемся на нижней ветви, имеющей отрезки, обращенные вправо. Если же проходить ту же кривую по направлению растущих значений интенсивности светового потока на входе, то мы выйдем на верхнюю ветвь с отрезками, обращенными влево. Между

точками $I_{вх1}$ и $I_{вх2}$ на кривой каждому значению интенсивности светового потока на входе соответствуют два возможных значения интенсивности светового потока на выходе. Пластика имеет, так сказать, два устойчивых оптических состояния — одно с большим, а другое с малым коэффициентом пропускания света. В этом случае говорят об оптической бистабильности. Какое из двух устойчивых состояний установится, зависит от того, что было с пластикой раньше. Если раньше интенсивность светового потока на входе была высокой, то на выходе установится большее из двух значений интенсивности светового потока, и наоборот. Нетрудно себе представить, что такие свойства пластики позволяют хранить информацию в форме световых импульсов, как это и демонстрируется на рис. 75. Пластика с двумя устойчивыми состояниями сначала находится в исходном, «нулевом», положении, показанном в левой части рисунка и отмеченной точкой. В результате подачи на ее вход ко-

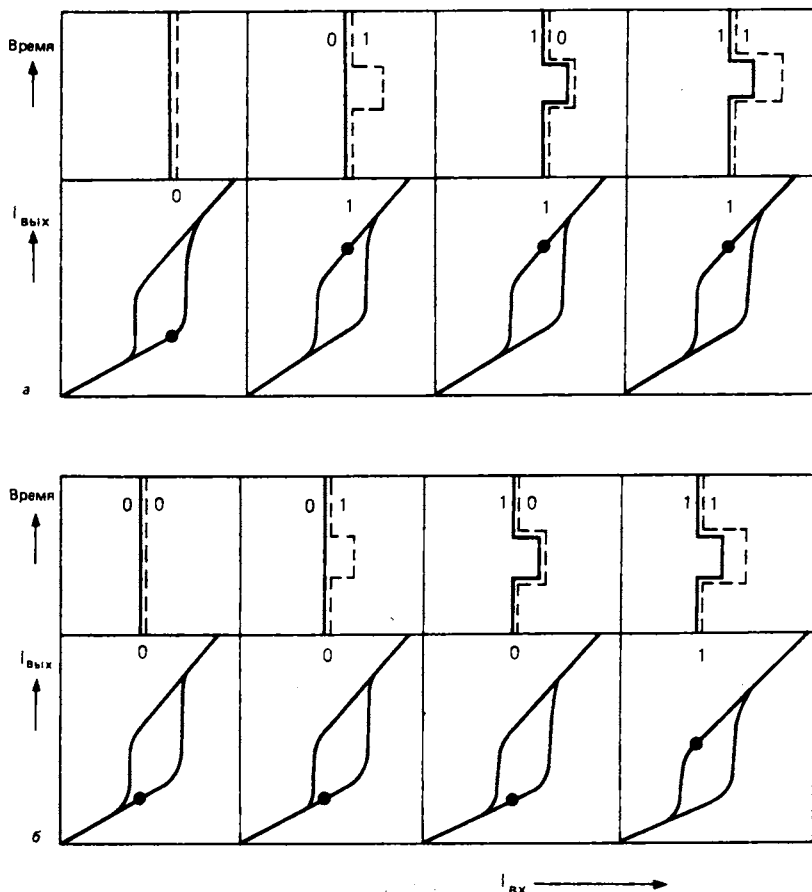


Рис. 76. Реализация элементарных логических операций ИЛИ (а) и И (б) с помощью оптического элемента с двумя устойчивыми состояниями.

роткого светового импульса пластинка переключается в состояние, изображенное справа. С помощью такой оптической пластинки с двумя устойчивыми состояниями легко можно реализовать также элементарные логические операции ИЛИ и И. Принцип построения таких схем показан на рис. 76. В схеме ИЛИ (рис. 76,а) исходное состояние подбирают таким образом, чтобы одного импульса было достаточно для переключения в светопроводящее, т.е. прозрачное, состояние. В схеме И (рис. 76,б) исходное состояние выбрано с таким расчетом, что для переключения в светопроводящее состояние требуются два отдельных оп-

тических импульса. Необходимо подчеркнуть, что логические элементы И и ИЛИ построены на основе одного и того же прибора, а выбор исходного состояния определяет то, какую логическую операцию он будет выполнять. Следует также отметить, что после окончания логической операции интенсивность светового потока на короткое время снижается до нуля, а затем опять возрастает до уровня, соответствующего входной интенсивности при нулевом положении логического элемента. Лишь после этого пластинка снова готова к выполнению следующей логической операции. Все процессы здесь протекают чрезвычайно быстро. В плас-

тинке, изготовленной из арсенида галлия по специальной технологии, интервалы времени, разделяющие две последовательные логические операции, составляют около 70 нс, а продолжительность выполнения самой операции равна 20 пс. Производство времени прохождения сигнала на рассеянную мощность, являющееся характеристикой оптического логического элемента и равное нескольким пикоджоулям, соответствует параметрам кремниевой микроэлектроники. В результате появляется возможность обеспечить непрерывную работу схем без дополнительного отвода теплоты. Однако способности оптических пластинок с двумя устойчивыми состояниями далеко не ограничиваются только выполнением отдельных логических операций в заданные моменты времени. Одновременно, например, можно выполнять несколько логических операций в разных точках пластинки. Пары световых пучков, между которыми требуется установить логическую связь, должны, кроме того, направляться на пластинку параллельно, а вся лучевая структура на входе должна иметь матричную конфигурацию. Расчет показывает, что при диаметре пучка 10 мкм и промежутке между соседними пучками 20 мкм число пар каналов на пластинке площадью 1 см² может доходить до $(10^4 \times 10^4)$ мкм²/(30 × 30) мкм² ≈ 10⁵. Если ориентироваться на выполнение 10¹⁰ логических операций в секунду в одном канале, то такая оптическая пластинка обеспечивает невероятную скорость обработки, достигающую 10¹⁵ логических операций в секунду. Эти цифры не из области фантастики, а отражают то, к чему сейчас вплотную приблизились исследователи, работающие с оптическими пластинками из арсенида галлия. Такая пластинка отлично подойдет, например, для распознавания знаков чисто оптическим путем. Предварительно на ней потребуется сформировать оптический образ знака, записав его с помощью мощного лазерного импульса. Такая запись означает, что подвергнутые засветке участки пластинки становятся прозрачными, т. е. будут про-

пускать свет. После этого на пластинку записывается знак, образ которого предстоит распознать. Если образы знаков совпадают, то интенсивность проходящего сквозь пластинку света после ввода обрабатываемого знака не возрастает; если же она увеличивается, то образы знаков не совпадают. Оптическое распознавание знаков является специфическим, но сравнительно простым видом обработки информации. Для создания оптического компьютера требуется решить гораздо более серьезные задачи. Необходимо, например, реализовать возможность каскадного включения большого числа оптических пластинок, т. е. построить из них схему последовательной обработки информации. Как для этого, так и для изучения других оптических материалов с двумя устойчивыми состояниями необходимы дальнейшие широкие исследования и эксперименты. Сегодня уже почти никто не сомневается в возможности создания оптических компьютеров, хотя нельзя с уверенностью сказать, будут ли они, подобно современным ЭВМ, универсальными или же ориентированными на решение тех особых задач, где требуется очень высокая скорость обработки информации.

Практической реальностью сегодня стало использование света как носителя информации в волоконно-оптических системах. Однако эта техника, во многих отношениях превосходная, все же имеет *один* недостаток: в случае необходимости обрабатывать оптические сигналы их следует предварительно преобразовать в электрические. Было бы гораздо удобнее обработку сигналов также осуществлять оптическим способом. Для этого нет никакой нужды в создании универсальных оптических компьютеров: требуются лишь простые нелинейные оптические элементы, сходные с оптической пластинкой и предназначенные для обработки аналоговых и цифровых сигналов. В качестве примера можно назвать лазерный диод, чей световой выход управляется с помощью другого менее мощного лазера. В этом приборе, созданном в 1983 г. японскими исследователями, видны черты,

аналогичные характерным особенностям транзистора. Разница состоит лишь в том, что один оперирует электрическими сигналами, а другой – оптическими, т.е. лазерный диод представляет собой оптический транзистор.

Интегральная оптика

Особое значение для оптической обработки сигналов имеют интегральные оптические структуры из световодов, оптических клапанов, призм, модуляторов и других пассивных элементов оптоэлектроники, совместно сформированные на твердотельной пластинке. Такие структуры называют компонентами *интегральной оптики*. Если же в качестве материала использовать арсенид галлия или некоторые другие полупроводники, то появится возможность ввести в тот же кристалл как электронные, так и оптоэлектронные элементы, например лазерные диоды и фотодетекторы.

Молекулярная электроника

Еще более далекому будущему принадлежат идеи и замыслы, которые можно объединить под общим названием «молекулярная электроника» или «биоэлектроника». Под молекулярной электроникой понимают один из вариантов электроники будущего, или, правильнее сказать, будущей техники обработки информации (хотя и не ясно, какую же роль здесь будут играть электроны), которая оперирует функциональными элементами на молекулярном уровне и на уровне других микроскопических составных частей материи. Если при этом обращаются к молекулам белков или других биологических соединений, то, как правило, речь идет о биоэлектронике. В то же время понятие «биоэлектроника» относится и к такому типу электроники, где обработка информации построена на принципах функционирования биологических систем, которые сейчас пытаются реализовать традиционными методами. Этой темы мы не будем касаться подробно, а потому будем

избегать термина «биоэлектроника» и воспользуемся понятием «молекулярной электроники». Сегодня молекулярной электроники как таковой еще не существует и никто не может с уверенностью сказать, какую конкретную форму она примет и станет ли реальностью вообще. Сейчас она представлена своего рода принципиальной концепцией, набором интересных идей и экспериментальных результатов, ее никак нельзя считать сложившимся направлением, имеющим практический выход, такой, как, например, электронные приборы на переходах Дюжесона или приборы, основанные на эффекте оптической бистабильности. Однако главная идея молекулярной электроники остается весьма привлекательной. Если в микроэлектронике в настоящее время предпринимаются усилия, направленные на дальнейшее уменьшение размеров функциональных элементов, правда, на макроскопическом уровне (т.е. в микронном диапазоне, когда эти элементы состоят из миллиардов атомов), то молекулярная электроника предлагает принципиально иное решение. Ее базовыми элементами являются мельчайшие составленные частицы материи – атомы и молекулы размером порядка нанометра. «Нанотехнология» синтезирует элементы путем упорядоченной «сборки» конструкций из отдельных атомов, доводя до минимума количество вещества, необходимого для получения элемента, обеспечивающего обработку информации. В данном случае схема создания прибора – движение от мельчайшего к малому, но имеющему достаточно крупные размеры для достижения поставленной цели. В нанотехнологии интегральные схемы создаются не так, как в микроэлектронной технологии, поскольку технологическая цепочка исходит как бы из глубин материи, используя присущую молекулам и атомам «склонность» к образованию определенных *микроскопических* структур. Важнейшим инструментом молекулярной электроники, который используется для создания схемных структур, являются химические связи. Конечная цель здесь, как

и у микроэлектроники, — создание устройств обработки информации. При этом в начальной стадии безразлично, в какой форме осуществляется такая обработка — в двоичной или десятичной системе счисления либо в аналоговой форме. Возможно, даже окажется, что в отличие от микроэлектроники созданные методами нанотехнологии функциональные элементы будут способны оперировать информацией, представленной в цифровой системе с недвоичным основанием или в аналоговой форме, а не в чисто двоичном виде. И это нельзя будет рассматривать как недостаток, ибо уже сегодня существуют сложные задачи обработки информации, например распознавание речи и зрительных образов или принятие решений в неоднозначной ситуации (т.е. задачи искусственного интеллекта), с которыми плохо справляются системы двоичной обработки информации. Если с помощью молекулярной электроники будут найдены эффективные решения именно таких задач, то значение этого будет трудно переоценить. Ведь в таком случае могут появиться недвоичные или аналоговые компьютеры, функционирующие на основе совершенно иных принципов, нежели современные двоичные ЭВМ. Вероятно, такие машины оказались бы способными справляться с интеллектуальными задачами, которые вряд ли когда-нибудь будут «по плечу» цифровым компьютерам. Правда, эти выводы скорее всего не предопределены изначальным назначением молекулярной электроники. Но они подчеркивают, что молекулярная электроника может внести определенный вклад в развитие информационной техники, связанное с поиском новых компьютерных архитектур и принципов построения ЭВМ, с которыми мы познакомились в начале этой главы. Здесь мы намерены прежде всего обратиться к проблеме *аппаратных средств* молекулярной электроники.

Остановимся сначала на возможностях использования тех или иных систем обработки информации, которые могут пребывать в различных состояниях и спо-

собны переключаться из одного такого состояния в другое в результате внешнего воздействия. Кроме макроскопических устройств, например структурированных полупроводниковых ИС, в эту категорию входят и микроскопические системы, т.е. системы, функционирующие на атомном и молекулярном уровнях. Сами такие частицы также могут находиться в разных состояниях, совершая движения, которые характеризуются ограниченным числом возможных состояний. Для электрона это движение можно представить как вращение вокруг некоторой оси, произвольно расположенной в пространстве, со скоростью, определенной одним из фундаментальных законов. Однако никаким законом не определяется направление вращения, т.е. оно может совершаться как по часовой стрелке, так и против нее. Связанный с этим круговым движением момент количества движения, так называемый спин, может принимать значения $+h/2$ (h — постоянная Планка) и $-h/2$; следовательно, магнитный момент будет

равен $\frac{eh}{2mc}$ и $-\frac{eh}{2mc}$ (m — масса электрона).

Направление оси вращения в пространстве может быть задано внешним магнитным полем. Электромагнитное излучение в диапазоне высоких частот позволяет изменять направление вращения электрона. Сходными свойствами обладают и другие известные в настоящее время элементарные частицы, которых в общей сложности насчитывается примерно три сотни. Однако для фиксации и изменения их возможных состояний требуются иные способы воздействия. Микроскопические системы, начиная с атома водорода, состоящего из одного протона и одного электрона, и кончая неорганическими и органическими молекулами, в том числе молекулами белков, включающими десятки тысяч атомов, по понятным причинам характеризуются большим многообразием внутренних состояний, нежели отдельные частицы. Так, например, электрон атома водорода может находиться на одной из бесконечного множества боровских

орбит, располагающихся вокруг протона. В молекуле белка одни и те же атомы могут иметь различное пространственное расположение и т.д. Внешнее воздействие, например облучение светом, позволяет изменить внутреннее состояние молекул. Учитывая огромный выбор микроскопических систем, обладающих различными устойчивыми состояниями, не приходится удивляться, что эту перспективную область лишь недавно стали рассматривать как потенциальный «источник» разнообразных вариантов новых средств обработки информации. Есть целый ряд причин, объясняющих, почему в этом направлении еще ничего не сделано и почему в обозримом будущем вряд ли можно рассчитывать на успех. Главной причиной является то, что, хотя возможность приведения системы в различные устойчивые состояния и является необходимым условием для ее использования в целях обработки информации, одного этого недостаточно. Требуется выполнение ряда других условий.

В первую очередь отметим, что наличие одного-единственного функционального элемента микроскопических размеров еще не позволяет реализовать систему обработки информации: требуется множество таких элементов, которые по определенной схеме нужно упорядочить в пространстве и соединить между собой. Кроме того, должна существовать и возможность для передачи информации с выхода *одного* функционального элемента на вход *другого* такого элемента с эффективным ее использованием в качестве входной информации. Для этого требуется носитель информации, т.е. некая материальная субстанция, во-первых, способная вступать во взаимодействие с функциональными элементами и, во-вторых, информация, пригодная для передачи от одного такого элемента к другому по специальным соединительным элементам или же непосредственно через окружающее пространство. Сами функциональные элементы должны иметь такое строение, чтобы с помощью одной и той же материальной субстанции, выступаю-

щей в качестве носителя информации, можно было производить как переключение функционального элемента из одного состояния в другое, так и удерживать его в установившемся состоянии, а также считать текущее состояние. Это оказывается возможным, лишь когда у каждого функционального элемента носитель информации, имеющийся на выходе, аналогичен носителю информации на входе. Данное требование выполняется для электрического, но не для механического переключателя. Применительно к атому подобное условие соблюдается, если с помощью света с определенной длиной волны, который здесь как раз и является носителем, атом переводится в возбужденное состояние и если светом с той же длиной волны с него может быть считана информация, позволяющая определить, находится ли он в данном состоянии. Поскольку подобный носитель информации при переключении элемента в определенное состояние и удержании его в таком состоянии должен совершать известную работу и при этом частично теряется при прохождении через ряд функциональных элементов, то в каком-то месте схемной цепочки он оказывается настолько ослабленным, что уже не может вызвать изменение состояния следующего элемента. Поэтому сами функциональные элементы или связи между ними необходимо снабдить внутренним механизмом усиления, обеспечивающим постоянное возобновление расходуемого носителя информации. В транзисторе, например, обеспечивается автоматическое усиление мощности. При использовании света реализовать усиление носителя информации позволяет так называемое индуцированное излучение. При соблюдении всех перечисленных требований к функциональным элементам и наличии между ними соответствующих связей говорят о пригодности элементов для каскадного включения. Интегральную схему для обработки информации можно построить только из функциональных элементов, пригодных для каскадного включения. Такой характеристикой обладают

транзисторы, элементы на переходах Джозефсона и приборы, основанные на эффекте оптической бистабильности. Теперь можно рассмотреть соответствующие перспективы для случая, если такие же характеристики удастся получить и у функциональных элементов молекулярной электроники.

В первую очередь необходимо отметить, что в отличие от упоминавшихся ранее элементов функциональные молекулярно-электронные элементы в настоящее время «существуют» только в виде идей и предложений и ни один из них пока не реализован на практике. Идет обсуждение возможностей создания функциональных элементов, основанных на использовании различных физических явлений, среди которых можно назвать *резонансный туннельный переход* электронов и распространение *солитона* в цепочках с химическими связями. Туннельное прохождение электронов через потенциальный барьер между двумя квантовыми ямами мы уже обсуждали. В молекулярном варианте резонансного туннельного перехода квантовые ямы предполагается создавать на основе одинаковых атомов, например атомов азота, связанных в атомную цепочку с другими атомами, образующими потенциальный барьер. Путем «переплетения» большого числа таких цепочек в принципе можно получить функциональные элементы, пригодные для каскадного включения. Сказанное справедливо и в отношении атомных цепочек, по которым могут распространяться солитоны. Под солитоном понимают локализованное возбужденное состояние, способное перемещаться в пространстве с сохранением неизменной геометрической формы. В молекулярной электронике особый интерес представляет, например, солитон в виде возбужденного состояния химически связанной цепочки из линейно упорядоченных атомов углерода, в которой регулярно чередуются простые и двойные связи типа углерод–углерод. В этом случае возбужденное состояние представлено нарушением регулярной по-

следовательности чередования простых и двойных связей.

Пригодные для каскадного включения функциональные элементы, где используются солитоны или туннельные электроны, в принципе должны обеспечить возможность сборки интегральных схем для обработки информации. Однако то, что это возможно *в принципе*, никак не может нас удовлетворить. Необходимо найти вариант практической реализации таких схем. С точки зрения изготовления интегральных схем молекулярной электроники процессы последовательного нанесения слоев и их структурирования, применяемые в микроэлектронике, несомненно, относятся к макроскопическим. Здесь нам ничем не сможет помочь и весь мощный арсенал методов макроскопической химии. В этой области технология нуждается в значительно более тонких методах. На начальной стадии, к примеру, может найти применение известный из биохимии метод Мэрифилда, с помощью которого на подложке в результате определенных манипуляций (проще говоря, путем капельной обработки и промывки подложки) строят аминокислотные цепочки, «нанизывая» молекулу за молекулой. Благодаря переносу этого метода на молекулы других типов, возможно, удастся реализовать схемные структуры из молекулярных функциональных элементов, например в виде хромофоров, а межсоединения из полинитридов серы. В качестве других базовых методов можно было бы применять процессы создания мономолекулярных слоев, скажем метод Ленгмюра–Блоджетта, когда мономолекулярный слой получают на поверхности жидкости, а затем снимают и переносят на подложку. Нельзя в упоминуть и молекулярную эпитаксию, с которой мы познакомились при описании изготовления полупроводниковых микроструктур. Если же обратиться к специальным интегральным схемам на основе белковых молекул, то здесь в принципе можно привлечь на помощь современную биотехнологию. Как известно, с помощью ме-

тодов генной инженерии бактерии можно заставить создавать из отдельных аминокислот белковые молекулы заданного состава. Свойства молекулы белка определяются определенной последовательностью аминокислот. Если мы научимся конструировать аминокислотные цепочки, обладающие нужными свойствами, то, возможно, удастся получить комплексы из белковых молекул, способные решать задачи обработки информации.

Несмотря на фундаментальный характер проблем, которые еще только предстоит решить на пути к реализации интегральных элементов молекулярной электроники, определенные шансы на успех существуют. Предположим теперь, что нами уже налажено производство интегральных элементов молекулярной электроники. В этом случае правомерно задать вопрос: а будет ли превосходство новых средств обработки информации над современными интегральными схемами действительно настолько большим, что оправдаются те колоссальные затраты, которые, безусловно, потребуются для их разработки? На первый взгляд так и хочется без каких-либо оговорок дать утвердительный ответ. Может показаться, что переход от макро- к микроскопическим функциональным элементам в миллионы раз меньших размеров вне зависимости от особенностей изготовления как их самих, так и соединений между ними автоматически должен привести к появлению более эффективных средств обработки информации. Бытует представление о том, что такие функциональные элементы должны иметь большее быстродействие и надежность, отличаться меньшими размерами, стоимостью и энергопотреблением по сравнению с макроскопическими полупроводниковыми аналогами. Однако эти представления обманчивы. Вообразим, что функциональными элементами являются атомы, связь между которыми реализуется с помощью света. В таком случае расстояние между соседними атомами должно превышать длину световой волны, т.е. быть более 0,5 мкм.

А это как раз те расстояния, на которые почти удалось выйти в современной кремниевой микроэлектронике. Возьмем другой пример. Если попробовать построить переключающие схемы, аналогичные современным ИС, путем соединения белковых молекул, играющих существенную роль в обработке информации у живых организмов, то результат нас весьма разочарует. Белковые схемы будут работать на несколько порядков медленнее, чем современные полупроводниковые интегральные схемы, так как передача информации в белковых молекулах осуществляется не электронами, а ионами. Средняя скорость ионов составляет около 10 м/с, тогда как у электронов в ИС она равна почти 10^5 м/с. Если использовать белковые молекулы в качестве микроскопических функциональных элементов для обработки информации, то придется обратиться к иным принципам построения переключающих схем, отличных от применяемых в традиционной микроэлектронике, например к таким, которые природа использует в нервной системе высших организмов. Или же надо будет найти такие белки, которые имеют не ионную, а электронную электропроводность. В природе таких белков не существует, и их придется синтезировать искусственно. Определенного внимания заслуживает протонная электропроводность, пусть она и не столь эффективна, как электронная. Известно, в частности, что в определенных белковых молекулах протоны способны с высокой скоростью туннельно проходить через потенциальный барьер, разделяющий две квантовые ямы. Таким образом, они вносят свой вклад в обеспечение электропроводности белков. Серьезные проблемы связаны и с надежностью интегральных элементов молекулярной электроники. Если еще учесть, что в биологических и других сложных системах довольно часто возникают дефекты, то придется считаться и с относительно высокой интенсивностью отказов белковых интегральных элементов. Живые организмы решают эту проблему с помо-

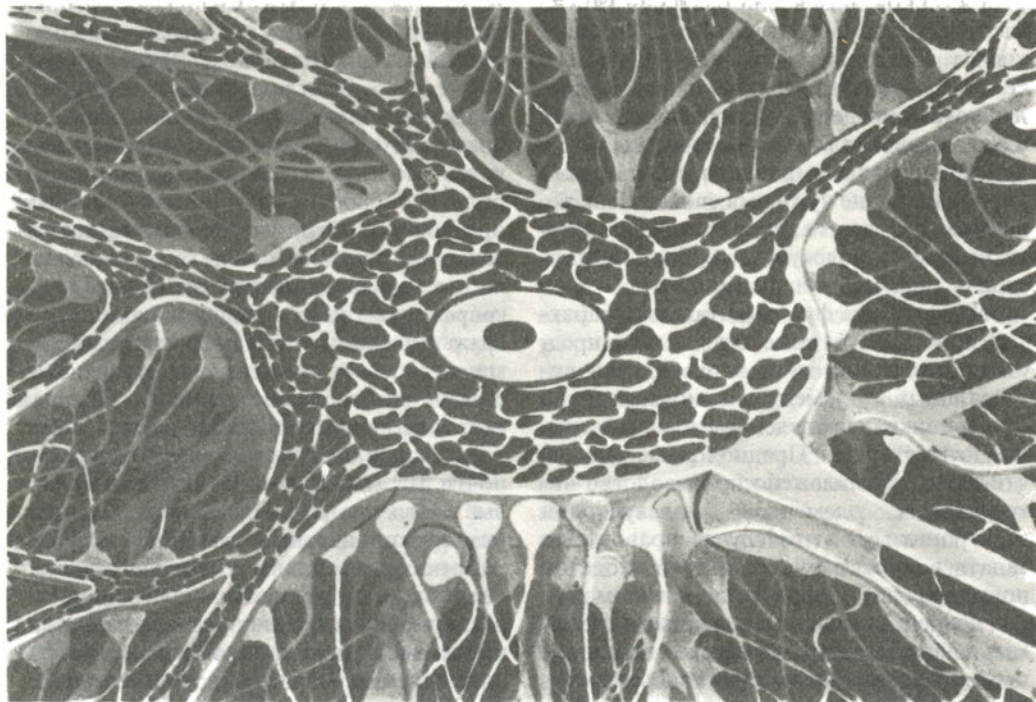


Рис. 77. Схематическое изображение нейрона человеческого мозга.

стью многочисленных механизмов коррекции и восстановления. И если для практической реализации будет выбран этот вариант молекулярной электроники, то подобными механизмами придется воспользоваться и в новых интегральных элементах, чтобы обеспечить необходимый уровень надежности.

Тот факт, что в процессе поиска методов построения систем обработки информации на молекулярной основе мы снова и снова обращаемся к живой материи, не является случайностью. Дело в том, что именно в живой материи природа реализовала единственную естественную форму универсальной обработки информации. Следует отметить, что функциональными элементами нервной системы являются нейроны, состоящие из миллионов молекул, причем размеры нейронов составляют десятки микрометров, т. е. превышают размеры микроэлектронных элементов. Нейроны, или нервные

клетки (рис. 77), соединены между собой совсем не так, как элементы микроэлектроники, где для этого используется небольшое число проводников. Между нейронами имеется много каналов связи. Каждый нейрон обладает тысячами отростков, как коротких, так и довольно длинных (эти отростки называются соответственно дендритами и аксонами). Соединения между нейронами реализуются с помощью дендритов и аксонов, образующих контакты с аналогичными отростками других нейронов и непосредственно с их телами. Собственно активным элементом является так называемая мембрана, т. е. оболочка, в которую заключены нейроны и их отростки и которая изолирует их от внешней среды. Благодаря различным концентрациям ионов Na^+ , K^+ и Cl^- — внутри и снаружи нейронов и их отростков — на такой мембране возникает разность электрических потенциалов. Нарушение профиля концентрации ионов во-

зникает вследствие локального изменения проницаемости мембраны для этих ионов, обусловленного в свою очередь локальным возбуждением. Такое нарушение концентрации изменяет разность потенциалов на мембране как раз в том месте, где произошло возбуждение. Как следствие этого образуется электрическое поле с силовыми линиями, *параллельными* мембране. Поле вызывает движение ионов и препятствует дальнейшему распространению изменения разности потенциалов. В синапсе – именно так называется место контакта двух нейронов – электропроводная цепь прерывается. Однако через имеющуюся здесь синаптическую щель нависает «мостик», роль которого выполняет химический механизм передачи возбуждения. При электрическом возбуждении пресинаптическая структура выделяет через свою мембрану химическое вещество передачи возбуждения (нейромедиатор), которое диффузионным путем преодолевает синаптическую щель и по другую ее сторону проникает в структуру нейрона-адресата, где и вызывает возбуждение. Отсюда возбуждение распространяется дальше, т.е. протекает процесс, основанный на электропроводности, с той лишь разницей, что теперь электрический импульс не передается от возбуждающего нейрона, а проходит через приемный нейрон. Он, однако, вызывает указанное изменение не самостоятельно, а совместно с многими другими электрическими импульсами, которые поступают в нейрон через другие синапсы или дендриты. Изменение мембранного потенциала и в итоге генерация электрических импульсов, передаваемых по отросткам нейрона в другие клетки нервной системы, являются, следовательно, комплексной функцией поступающих сигналов. Тем самым осуществляется объединение различных импульсов, несущих информацию, т.е. выполняется операция обработки информации. Но в отличие от электроники, в которой функциональные элементы чаще всего объединяют лишь два сигнала, в нейронах происходит объединение множества сигналов. Если же говорить о ко-

дировании информации в рамках нейронной активности, то все сказанное выше наглядно показывает, что в подобном процессе участвуют многие носители информации (в отличие от электроники, где используется один носитель), как электрические, так и химические, и что кроме двоичных методов кодирования применяются цифровые недвоичные и аналоговые алгоритмы.

В целом эти различия сводятся к гораздо более высокой степени сложности и параллелизма в обработке информации у живых организмов по сравнению с электронными системами и устройствами. Благодаря этому достигается более высокая скорость обработки информации, несмотря на использование сравнительно медленных ионных и элементарных химических процессов. Быть может, именно такая организация обработки информации и является основной непревзойденных способностей человеческого мозга. Тот факт, что для решения задач информационной обработки природа воспользовалась белками, а не стала изобретать и применять нечто сходное с полупроводниковой микроэлектроникой, объясняется кардинальными различиями между двумя этими классами химических соединений. Весьма примечательны и те огромные различия, которые наблюдаются между функциональными принципами обработки информации в живых организмах и микроэлектронных устройствах. Но нет ли каких-нибудь признаков того, что в ходе эволюции все же «испытывались» функциональные принципы, близкие к принципам микроэлектроники, например передача сигналов с помощью электронов, а не ионов? Может быть, оказавшись неприемлемыми, такие принципы были отброшены, или же природа просто еще не дошла в своем развитии до «проверки» вариантов, сходных с теми, которые существуют в микроэлектронике, и «обоснования» их пригодности для живых организмов? Возможно, где-то в космосе уже есть форма живой материи, в которой осуществляется информационная обработка, основанная на использовании мо-

лекул или других микроскопических функциональных элементов и в большей степени присущая живым организмам; принципы такой обработки было бы легче заимствовать и освоить в техническом плане. Подобных вопросов можно задавать сколько угодно, но ответы на них мы едва ли когда-нибудь получим. В молекулярной электронике есть только один путь – творческий труд ученых и инженеров. И здесь недооценка еще нерешенных проблем и чрезмерные восторги по поводу уже доступного – когда у многих из нас по существу складывается впечатление, будто мы стоим буквально на пороге создания интегральных биоэлементов и биокомпьютеров, – приносят столь же мало пользы, что и слишком пессимистические прогнозы, базирующиеся только на возможностях сегодняшнего дня. Нельзя упускать из виду также то, что, хотя органические молекулы в настоящее время и считаются наиболее перспективным видом соединений для построения микроскопических функциональных элементов для обработки информации, они не являются единственно возможными. Как мы уже говорили, в принципе для этой цели могут подойти неорганические молекулы, а также атомы и элементарные частицы. Сегодня, однако, никто не может с полной уверенностью сказать, чем закончатся работы по созданию систем обработки информации, где будут использоваться микроскопические функциональные элементы, – успехом или неудачей. Но все эти усилия оправдывает высокая цель, стоящая перед исследователями, цель создания такой информационной техники, которая превзойдет современную микроэлектронику точно так же, как в свое время последняя превзошла ламповую электронику.

Роль микроэлектроники в жизни общества

В гл. 2 мы рассказали о том, на что способна микроэлектроника: она позволяет решить одну из важнейших задач нашего времени – вооружить человека тех-

ническими средствами для эффективной обработки информации. Нет никаких сомнений в том, что существуют реальные потребности в подготовке все более эффективных средств и способов решения информационных проблем, касающихся любых сфер нашей жизни, а также в создании новых подходов к обработке все усложняющейся информации, основанных на базе создания новой техники и технологии, и так до тех пор, пока не будет найдено удовлетворительное решение самой последней из подобных задач. Но такое время вряд ли наступит, поскольку развитие как самого общества, так и его материальной базы продолжается. Следовательно, требующие своего разрешения информационные проблемы будут возникать снова и снова. В то же время ряд моментов, а именно: какие задачи обработки информации придут на смену сегодняшним, какие из них будут разрешимы с помощью технических средств, какая шкала приоритетов установится, определяется ходом социально-политического развития.

Сегодня микроэлектроника играет решающую роль в военной технике. По оценкам специалистов, на применение микроэлектроники в военных целях сейчас расходуется около 20% средств, выделяемых во всем мире на научные исследования. Если удастся покончить с гонкой вооружений, то эти громадные средства можно будет направить на мирное использование микроэлектроники. Однако, что еще важнее, только на мирной Земле то, о чем мы рассказали в этой главе, может вообще стать реальностью. Когда речь идет о будущем микроэлектроники, то его невозможно отделить от уровня социально-политического развития. Именно *потому*, что микроэлектроника способна оказывать столь сильное влияние на все стороны жизни общества, общество в свою очередь воздействует на эту область техники, определяя главные направления ее развития. В данном смысле будущее электроники – это гораздо больше, чем просто техническое воплощение новых идей.

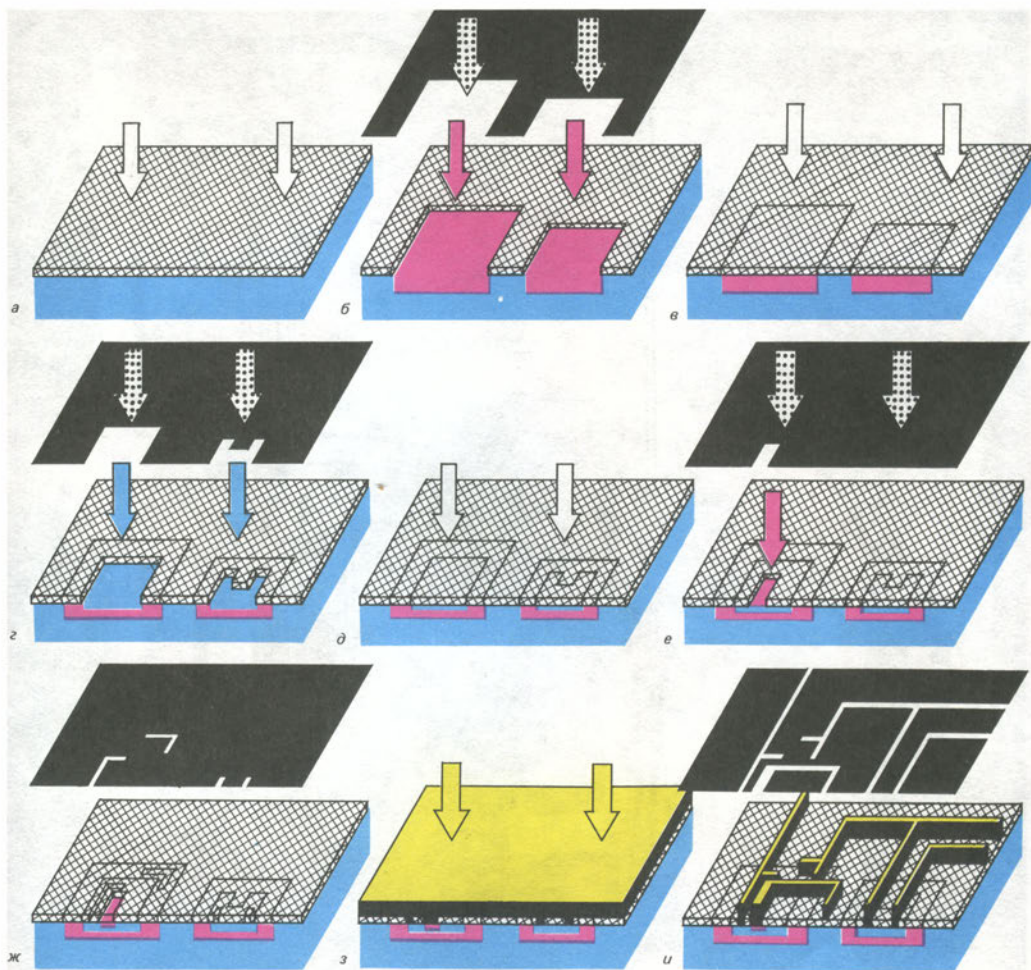


Рис. 42. Процесс изготовления интегральной схемы по планарной технологии.



Рис. 43. Работа в чистом помещении: загрузка кремниевых дисков в диффузионную печь.

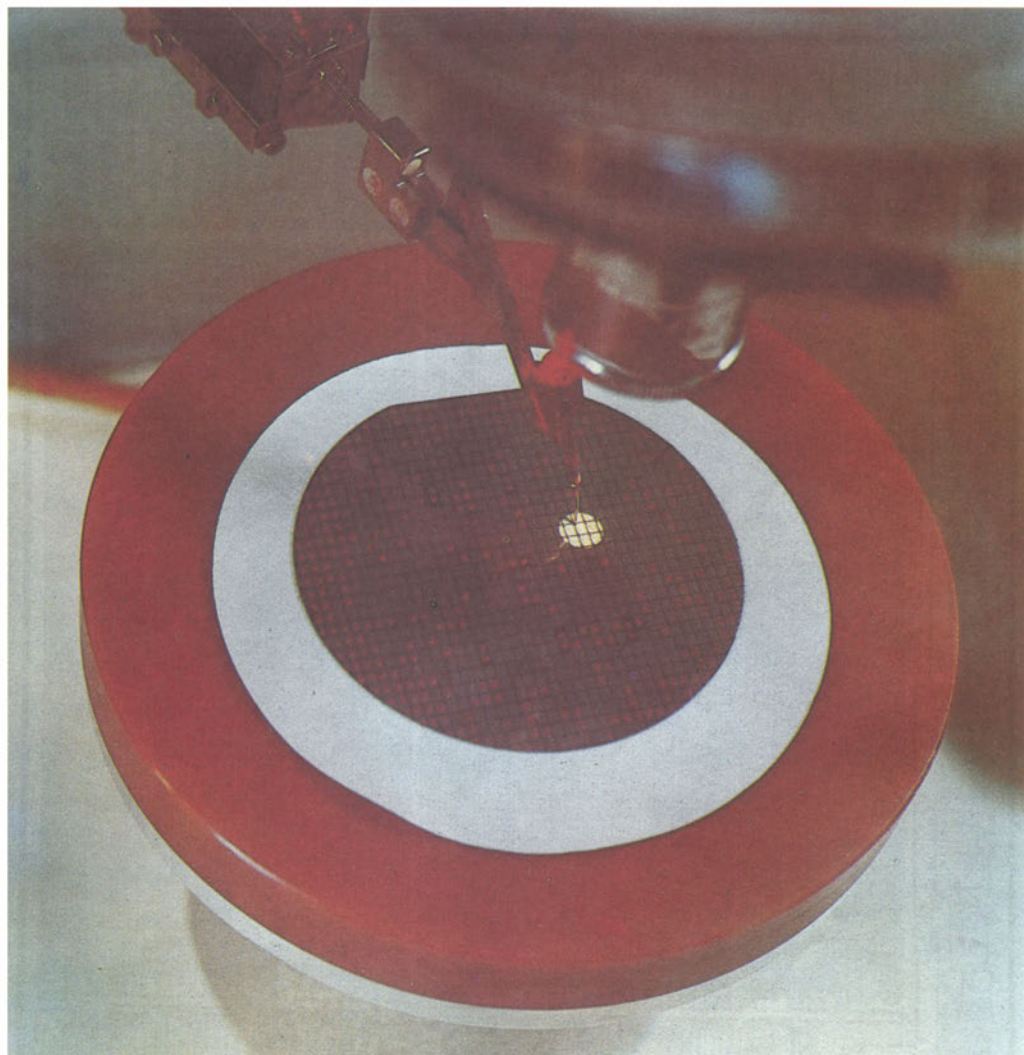


Рис. 44. Кремниевый диск с размеченными скрайбером кристаллами ИС.

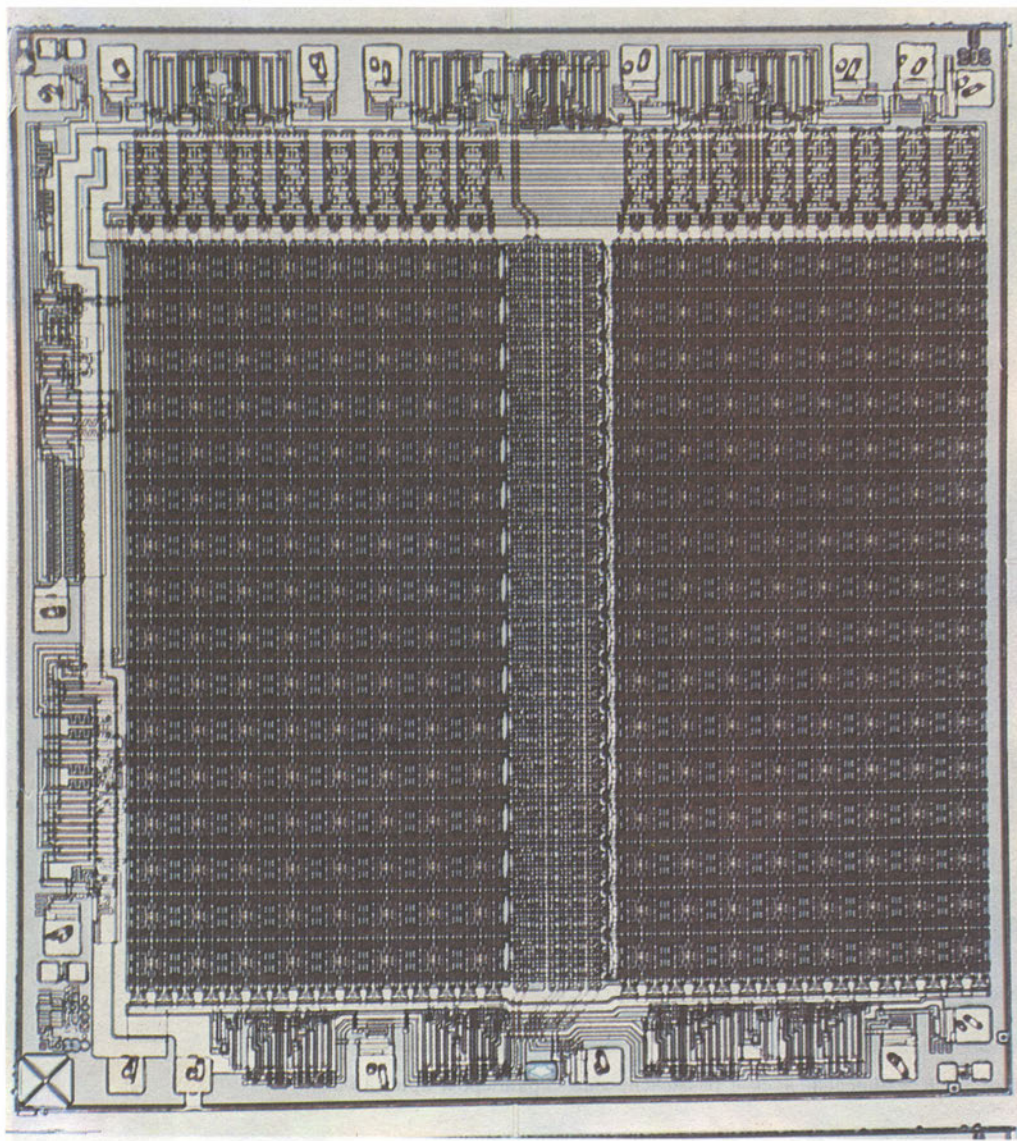


Рис. 46. Полупроводниковый кристалл ИС 3У типа U202 (202).

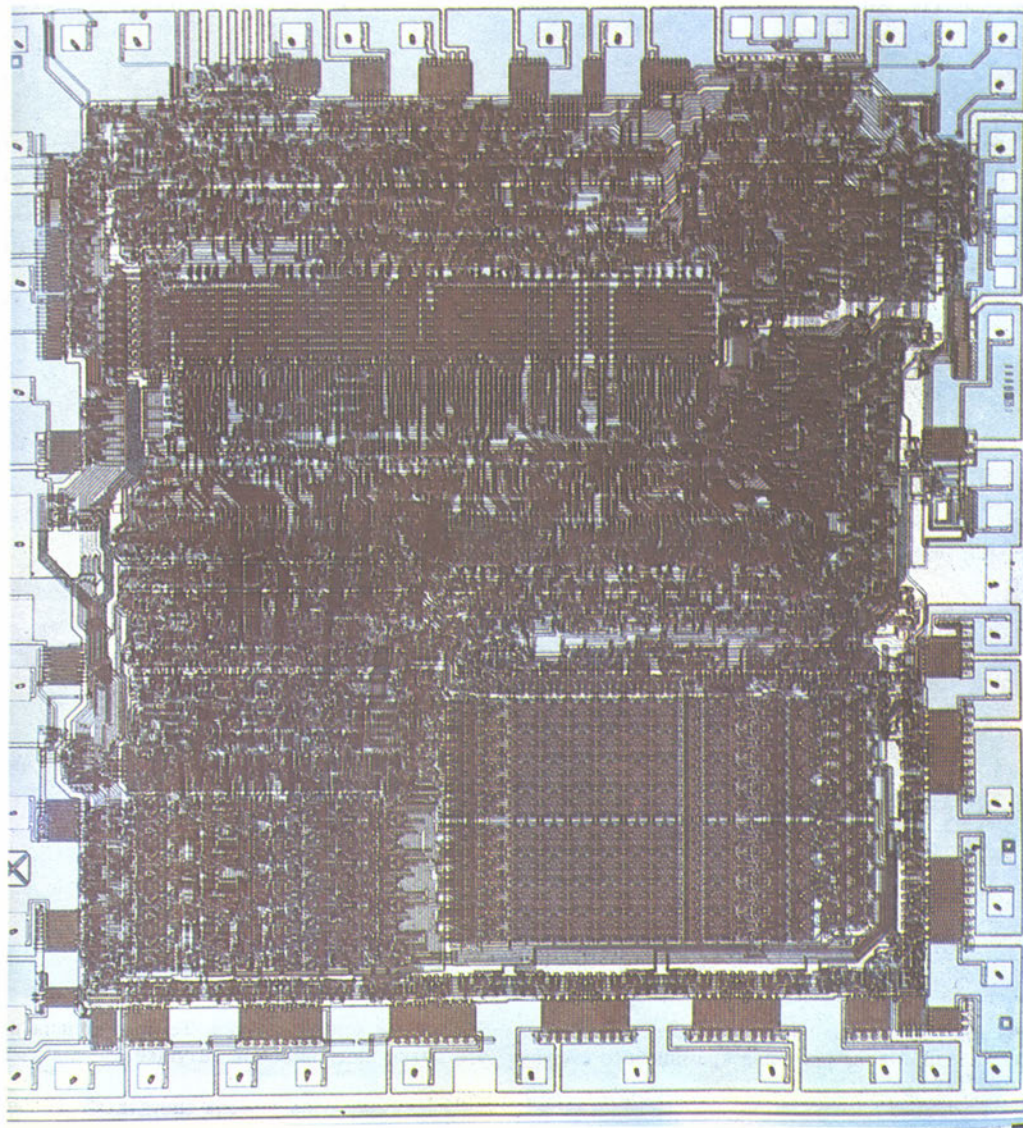


Рис. 47. ИС микропроцессора U880 (Z80).

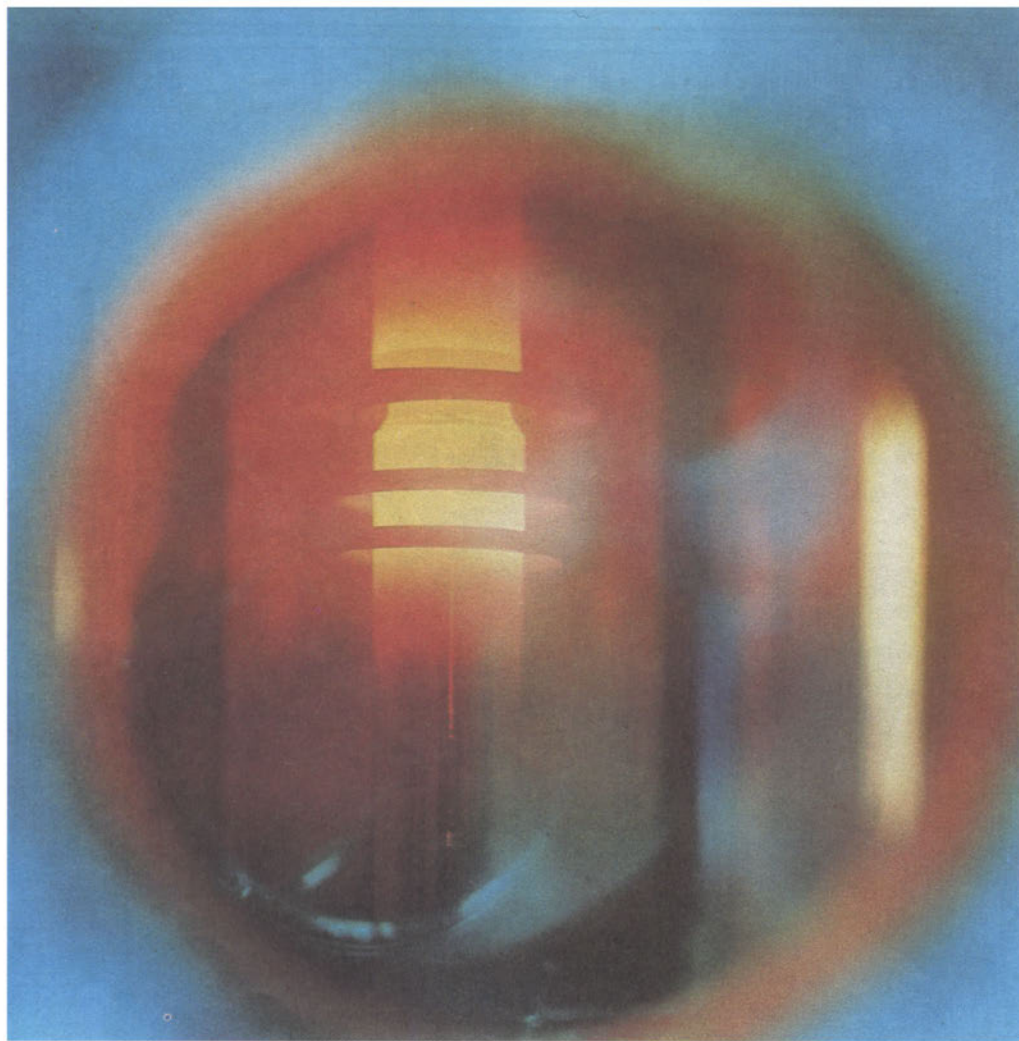


Рис. 53. Выращивание кремниевого монокристалла методом зонной плавки. Темные кольца в раскаленной зоне расплава кремниевого стержня—это витки индукционной катушки.



Рис. 54. Разделение кремниевого диска на отдельные кристаллы.

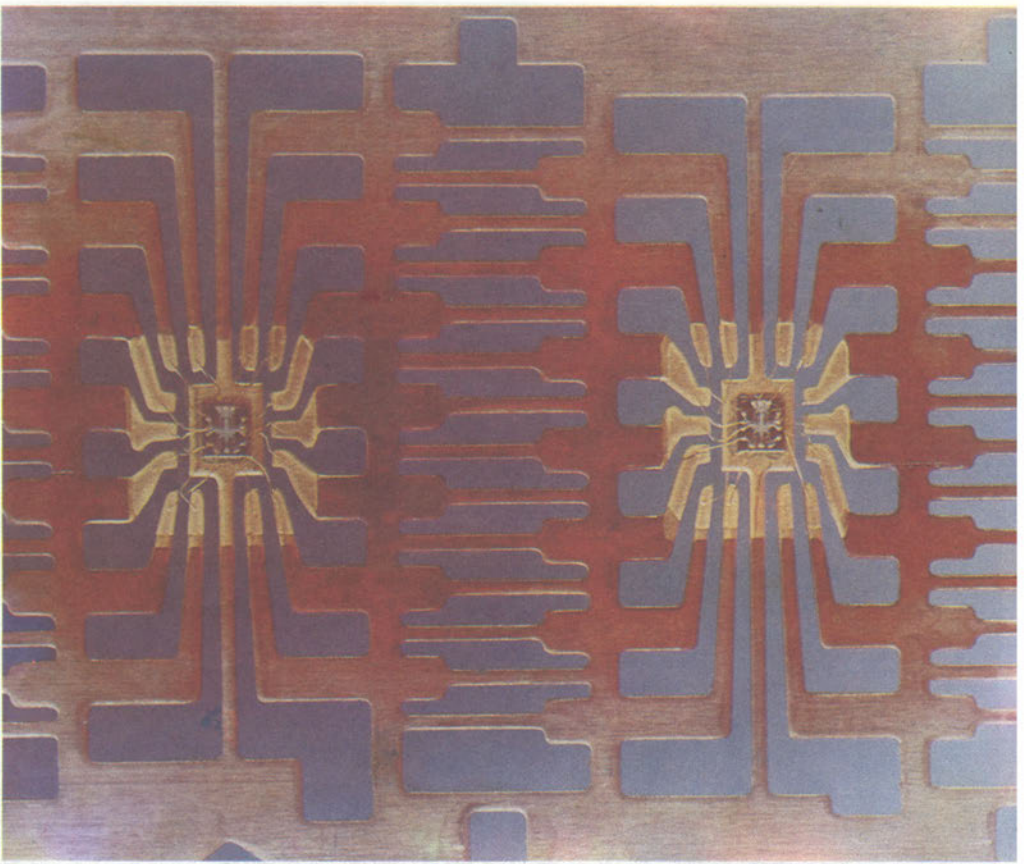


Рис. 55. Кристаллы ИС на ленте-носителе. Посадка кристаллов на носителе уже выполнена. Контактные площадки кристаллов тонкими золотыми проволочками соединены с концами проводников печатной монтажной схемы, связывающих кристаллы с выходными контактами схемы.

Литература ¹⁾

- Völz H. Elektronik. Grundlagen, Prinzipien, Zusammenhänge. 2. Auflage.– Berlin: Akademie-Verlag 1979.
- Möschwitzer A. Integration elektronischer Schaltungen und Mikrorechner. 3. Auflage.– Berlin: VEB Verlag Technik, 1981.
- Eckhard D., Hadamowski H.-F., Junghans B., Schneider H.G. Mikroelektronik. Stand und Entwicklung.– Berlin: Akademie-Verlag, 1982.
- Schäde K. Halbleitertechnologie, Bd. 1.– Berlin: VEB Verlag Technik, 1983.
- Möschwitzer A. Grundkurs Mikroelektronik. Standardschaltkreise, Kundens Schaltkreise.– Berlin: VEB Verlag Technik, 1984.
- Kühn E., Schmied H. Handbuch integrierter Schaltkreise. 2. Auflage.– Berlin: VEB Verlag Technik, 1980.
- Probleme der Festkörperelektronik, Bd. 9–12.– Berlin: VEB Verlag Technik, 1979–82.
- Rost A. Grundlagen der Elektronik.– Berlin: Akademie-Verlag, 1983.
- Weißmantel Ch., Hamann C., u.a. Grundlagen der Festkörperphysik. 2. Auflage.– Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1981.
- Бонч-Бруевич В. Л., Калашиков С. Г. Физика полупроводников.– М.: Наука, 1977.
- Völz H. Information I und II. 1. Auflage.– Berlin: Akademie-Verlag, 1982.
- Schwarz W., Meyer G., Eckhardt D. Mikrorechner.– Berlin: VEB Verlag Technik, 1980.
- Kieser H., Meder U. Mikroprozessortechnik.– Berlin: VEB Verlag Technik, 1982.
- Franke K. Einführung in die Mikrorechentechnik.– Berlin: VEB Verlag Technik, 1984.
- Hesse S. Kleines Lexikon der Industrierobotertechnik.– Berlin: VEB Verlag Technik, 1984.
- Dubrau J., Netzschwitz W. Mikroelektronik. Wie verändert sie unser Leben?– Berlin: Dietz-Verlag, 1983.
- * Епифанов Г. И. Физические основы микроэлектроники.– М.: Советское радио, 1971.
- * Зи С. Физика полупроводниковых приборов, т. I и II: Пер. с англ.– М.: Мир, 1984.
- * Степаненко И. П. Основы микроэлектроники.– М.: Советское радио, 1980.

¹⁾ Звездочкой * отмечена литература, добавленная переводчиком.– Прим. ред.

Оглавление

Предисловие редактора перевода	5
Предисловие автора к русскому изданию	7
Предисловие	8
Глава 1. Электроника	12
Электроны	12
Преобразование электрической энергии	13
Промышленная и информационная электроника	14
Глава 2. Микроэлектроника, информация и общество	16
Информационные процессы и общество	16
Получение информации	16
Хранение информации	17
Передача информации	18
Обработка информации	18
Информация как понятие	22
Информация и биологические процессы	23
Обработка информации микроэлектронными средствами	25
Новое должно быть лучше старого	28
Технические решения для неразрешимых в прошлом задач. Автоматизация	29
Влияние на другие информационные процессы. Новые виды связи	32
Единая информационная система	34
Микроэлектроника и научно-техническая революция	35
Глава 3. Полупроводниковые приборы	37
Полупроводники	37
Энергетические зоны	38
Электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне – носители заряда в полупроводниках	38
Легирование	40
Примеси и структурные дефекты кристаллической решетки	42
Мелкие и глубокие уровни	42
Генерация неравновесных носителей заряда	43
Рекомбинация носителей заряда	44
$p-n$ -переход. Полупроводниковый диод	45
Инжекция носителей заряда	46
Биполярный транзистор	48
Полевой транзистор. МОП-транзистор	50
Резисторы. Конденсаторы	55

Оптоэлектронные индикаторы. Полупроводниковые датчики	55
Солнечные элементы	57
Глава 4. Электронная обработка информации	58
Аналоговая и цифровая обработка информации	58
Двоичная система счисления	60
Элементарные логические операции	63
Схемы реализации элементарных логических операций	65
Схемы логических элементов	68
Логические схемы	69
Схемы памяти	71
Триггерные схемы памяти	71
Конденсаторные схемы памяти	72
Адресная выборка ячеек ЗУ	73
Счетные схемы	74
Постоянная память	77
Схемы кодирования и декодирования	77
Мультиплексор	78
Суммирующие схемы	79
Аналоговые интегральные схемы	80
Аналого-цифровой преобразователь	81
Глава 5. Технология промышленного производства изделий микро- электроники	84
Интегральные схемы	84
Планарная технология	88
Цикл 1. Оксидирование	89
Формирование структур методом фотолитографии	89
Травление	89
Легирование	90
Эпитаксия	90
Металлизация	91
Пример изготовления ИС	91
Степень интеграции	92
Промышленная технология изготовления ИС	95
Чистота и точность	98
Цикл 0. Разработка топологии ИС	100
Фотошаблоны	104
Полупроводниковая пластина	105
Цикл 2. Изготовление законченных ИС	107
Монтаж кристаллов	107
Сборка в корпусе	107
Затраты на изготовление ИС	108
Глава 6. Интегральные схемы и их применение	111
Схема для решения конкретной задачи	111
Сложность решаемых задач и степень интеграции	111
Многообразие задач и программирование	112
Частота возникновения одинаковых задач и объем производства в единицах изделий	115

Заказные и стандартные ИС	116
ИС для электронных часов	120
ИС карманного микрокалькулятора	121
ИС для фотоаппарата	123
Аналоговые ИС	124
Логические элементы	125
Стандартные ИС со средней степенью интеграции	125
ИС памяти	126
Микропроцессор	128
МикроЭВМ	132
МикроЭВМ как компонент системы	138
Бытовые, конторские и персональные компьютеры	139
Использование микроЭВМ в типографской наборной машине	141
Глава 7. Перспективы развития микроэлектроники	142
Интеллектуализация обработки информации	144
Максимальный уровень искусственного интеллекта за невысокую цену	145
Повышение степени интеграции и быстродействия	147
Субмикронная технология	149
Субмикронные элементы	152
Арсенид-галлиевая микроэлектроника	156
Интегральная оптоэлектроника	158
Искусственные полупроводниковые микроструктуры	158
Сверхрешетки. Квантовые ямы	160
Функциональная электроника	161
Трехмерная интеграция	162
Криомикроэлектроника	163
Электронные приборы на переходах Джозефсона	163
Оптическая бистабильность	166
Интегральная оптика	171
Молекулярная электроника	171
Роль микроэлектроники в жизни общества	178
Литература	179

Уважаемый читатель!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, издательство «Мир».

Рольф Эндерлайн

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ДЛЯ ВСЕХ

Введение в мир интегральных микросхем:
основы функционирования, технология
изготовления и применение

Заведующий редакцией Ю. А. Кузьмин

Ст. научный редактор Е. И. Майкова

Младший редактор И. А. Гревцова

Художник В. Н. Конюхов

Художественные редакторы М. Н. Кузьмина, Н. И. Заботина

Технический редактор О. Г. Лапко

Корректор В. С. Соколов

ИБ № 6695

Сдано в набор 14.10.87. Подписано к печати 20.10.88. Формат 70 × 100^{1/16}.
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Объем 6 бум. л. Усл.печ.л. 15,60.
Усл.кр.-отт. 35,92. Уч.-изд.л. 15,59. Изд. № 8/5866. Тираж 100 000 экз.
Зак. 1131. Цена 1 р. 10 коп.

Издательство «Мир» В/О «Совэксспорткнига» Государственного комитета
СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 129820,
ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., 2.

Можайский полиграфкомбинат В/О «Совэксспорткнига» Государственного
комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
143200, г. Можайск, ул. Мира, 93.

1 р. 10 к.

"МИКРОЭЛЕКТРОНИКА — НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ДОСТИЖЕНИЕ НАШЕГО ВЕКА, ВО МНОГИХ ОТНОШЕНИЯХ НОСЯЩЕЕ ЯРКО ВЫРАЖЕННЫЙ ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР. УЧЕНЫЕ РАЗНЫХ СТРАН ВНЕСЛИ СВОЙ ВКЛАД В СОЗДАНИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ, ВАЖНЕЙШЕЙ ИЗ КОТОРЫХ ЯВЛЯЕТСЯ ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ."

(ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ)

ISBN5-03-000727-X

