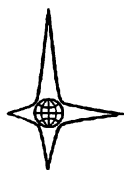


**М**ИНИАТЮРИЗАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

**М**ИНИАТЮРИЗАЦИЯ  
И МИКРО-  
МИНИАТЮРИЗАЦИЯ  
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЫ





ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«МИР»

MINIATURE  
and  
MICROMINIATURE  
ELECTRONICS

By

G. W. A. DUMMER, M. B. E., M. I. E. E.  
Royal Radar Establishment

and

J. W. GRANVILLE, B. Sc., Ph. D.,  
Royal Radar Establishment

L o n d o n

Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd.

1961



# **МИНИАТЮРИЗАЦИЯ И МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

**Перевод с английского**

**Под редакцией**

**Н. А. БАРКАНОВА и М. С. ЛИХАЧЕВА**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»**

**Москва 1965**

В предлагаемой книге рассматриваются методы и приемы миниатюризации, а также образцы миниатюрных конструкций электронного оборудования. Описываются 3 основные системы микроминиатюризации: микромодули или собранные из миниатюрных деталей отдельные узлы; микросхемы, пленочные или полученные вакуумным испарением; твердые схемы или узлы, образованные на монокристаллической полупроводниковой плате. В книге рассматриваются также вопросы перспективного развития разных направлений микроминиатюризации, проблемы, связанные с производством микроэлементов, с их эксплуатацией и надежностью действия.

Книга может служить справочным пособием как для инженеров, приступающих к подобного рода работам, так и для специалистов, имеющих уже опыт в этой области техники.

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Исключительно быстрый прогресс электронной техники и радиоэлектроники за последние 15—20 лет вызван крупнейшими достижениями в исследовании фундаментальных теоретических и практических проблем в области физики и химии. Непрерывное усложнение и увеличение состава аппаратуры в электронных системах искусственных спутников, ракет, космических кораблей, сверхскоростных высотных самолетов при одновременном жестком требовании уменьшения их габаритов и веса привело в передовых по технике странах к новому направлению развития радиоэлектроники — к микроминиатюризации.

К числу преимуществ микроминиатюрной электронной аппаратуры, кроме уменьшения веса, габаритов и потребляемой мощности, относятся также повышенная надежность и простота обслуживания аппаратуры. Технология микроминиатюризации электронной аппаратуры, кроме того, создает условия для полуавтоматического или автоматического ее производства.

Использование дополнительных или дублирующих схем в микроминиатюрной электронной аппаратуре для большей надежности не будет составлять проблемы благодаря весьма незначительному их добавочному весу и объему.

Задача охлаждения микроминиатюрной электронной аппаратуры упрощается почти пропорционально уменьшению ее габаритов; мощность рассеяния в микроминиатюрной аппаратуре измеряется милливаттами. Поэтому для поддержания температуры в нужных пределах и охлаждения малой массы микроэлектронной аппаратуры может быть использован способ, основанный на эффекте Пельтье. Благодаря малой массе устойчивость, а также сопротивляемость микроэлектронной аппаратуры к ударным нагрузкам и вибрациям значительно повышаются.

Многие электронные системы, которые несколько лет назад можно было применять ввиду их громоздкости только в качестве наземной аппаратуры, сегодня благодаря микроминиатюризации могут использоваться в качестве бортовой (самолетной и ракетной) электронной аппаратуры.

За последние 10 лет благодаря развитию полупроводниковой техники электроника сделала большой шаг в направлении миниатюризации и привлекает в настоящее время внимание многих ведущих фирм США по производству радиоэлектронной аппаратуры.

Большинство этих фирм за счет ограничения текущей программы приступили к разработке и организации массового производства микроминиатюрных радиоэлементов, микромодулей, пленочных и твердых схем.

Использование миниатюрных и микроминиатюрных деталей при конструировании бортовой электронной аппаратуры позволило США запустить в космос малогабаритные, облегченные искусственные спутники Земли с разнообразной, многочисленной исследовательской и радиосвязной аппаратурой. Микроминиатюризация открыла широкие возможности создания малогабаритных, высокоэффективных и экономичных электронно-вычислительных и управляющих машин с огромной запоминающей способностью.

В США уже рекламируются портативные электронно-вычислительные машины, уместающиеся в портфеле. По мнению военных специалистов США, уменьшение габаритов, веса и потребляемой мощности играет решающую роль при разработке новых видов радиоэлектронных систем.

Каждый килограмм веса, сэкономленный в ракетах за счет микроминиатюризации, означает большую дальность действия, более экономное расходование горючего, а в армии, где основная масса оружия и аппаратуры переносится обслуживающим персоналом, выигрыш от уменьшения веса в несколько раз был бы огромным.

Микроминиатюризация находит самое широкое применение не только в радиоэлектронике, но и в приборостроении и электротехнике. Так, миниатюрные шарикоподшипники используются в гироскопах, автопилотах, электрокардиографах; анемометрах, сельсинах, сервомеханизмах и высокоскоростных бормашинах. Для массового потребителя в США появились слуховые аппараты размером с ноготь, магнитофоны не больше спичечной коробки, электромоторчики постоянного тока с внешними размерами, измеряемыми миллиметрами. Американская фирма «General Electric» (Кливленд) выпустила 150-ваттную электрическую лампочку размером 5,5 на 1,3 см.

Огромные перспективы микроминиатюризация открывает в области научных изысканий, в частности в медицине. Недалеко то время, когда будет создана миниатюрная телевизионная система, которую человек сможет свободно проглотить, а врач на телевизионном экране будет видеть и исследовать стенки желудочно-кишечного тракта.

В СССР уже созданы миниатюрные радиостанции в пилюле, которые дают телеметрическую информацию о состоянии желудочно-кишечного тракта («Советское фото», № 2, 1963 г.).

Крошечный микроминиатюрный электронный прибор, устроенный по принципу катетера, через вену будет вводиться в сердце и даст хирургу возможность прослушивать шумы сердечных клапанов, как бы находясь в самом сердце.

Людям с острыми сердечными заболеваниями будет обеспечена круглосуточная ох рана сердца с помощью микроминиатюрного микрофона размером с рисовое зерно. Всякое отклонение от нормы вызовет автоматическое лечебное воздействие на сердце и одновременный сигнал, передаваемый по радио сестре или врачу, которые смогут оказать вовремя больному неотложную помощь.

Ученые американской компании «Дженерал электрик» работают над проблемой замены больных органов человека микроминиатюрными электронными эквивалентами. Профессор Фейнман в своем выступлении перед Американским физическим обществом высказал мнение, что скоро появится возможность вводить электронных «хирургов» непосредственно в сердце человека. Такой «хирург» вначале проведет исследование, поставит диагноз, а затем при помощи миниатюрного ножа выполнит необходимую операцию. Микроминиатюризация не знает границ. Самый яркий пример микроминиатюризации — сам человек. Один американский эксперт по электронно-вычислительным и управляющим машинам подсчитал, что тело человека эквивалентно 10-цикловой вычислительно-управляющей машине с мотором мощностью 0,1 л. с.

Можно ли предположить, что человек со временем создаст электронно-вычислительную машину такой сложности и таких размеров, как человеческий мозг? Биоэлектроника открывает заманчивые перспективы на этом пути, позволяющие надеяться на успешное достижение человеком и этой чудесной цели.

Американские экономисты оценивают миниатюризацию как «вторую промышленную революцию».

Однако реализация всех этих заманчивых перспектив использования микроминиатюризации в США связана с значительными трудностями.

Большие материальные средства американские радиоэлектронные фирмы затрачивают на опытные исследования в области металлургии, механики, физики и химии.

Микроминиатюризация потребовала крупных капиталовложений на разработку и приобретение специального технологического оборудования. Даже сырье и материалы для производства микроминиатюрных изделий стоят значительно дороже материалов, применяемых в обычном производстве. Специальная сталь, выплавляемая на вакуумных установках для микроминиатюрных изделий,



стоит в США 5 долл. 67 цент. за фунт, в то время как обычная холоднокатаная сталь стоит приблизительно 24 цента.

Контроль качества становится основной частью производства миниатюрных изделий. Тщательные испытания всех микроминиатюрных изделий требуют огромных производственных затрат и потерь. Например, из каждых 100 транзисторов, предназначенных к использованию американской фирмой «Lockheed» в миниатюрном управляемом снаряде и телевизионном спутнике «Телстар», только 7—10 транзисторов выдерживают весь комплекс испытаний, остальные отбраковываются. Инспекция и контроль качества микроминиатюрных изделий составляет 20—30% стоимости всего процесса их производства.

Над решением сложных задач, возникающих в связи с микроминиатюризацией радиоэлектронной аппаратуры, в настоящее время работают много ученых и инженеров. Действительно, чтобы обеспечить высокую надежность, необходимо, чтобы электронное оборудование было простым, число паяных соединений — минимальным, энергетический уровень — оптимально ограниченным.

В бортовых счетно-решающих устройствах одну треть (по объему) занимают электронные схемы, одну треть — запоминающие устройства и одну треть — соединения. Именно соединения являются главным фактором, отрицательно влияющим на надежность, потенциальным источником отказа действия электронного оборудования. Поэтому совершенствование соединений является основной и обязательной предпосылкой к любым мероприятиям по микроминиатюризации электронной аппаратуры. Самым уязвимым местом в микромодулях является пайка соединений.

Рассеяние тепла — второй фактор, с которым необходимо считаться при микроминиатюризации электронного оборудования. Поэтому особое значение сейчас придается новому разделу теории электронной техники — исследованию надежной работы электронных схем на микромощностях.

Третий фактор, от которого зависит успех микроминиатюризации, — это совершенство технологических процессов и автоматизированного оборудования, предназначенного для массового выпуска дешевых и надежных микромодулей и микросхем. Поэтому многие считают микроминиатюризацию новой областью электронной технологии.

Используя готовые объемные радиодетали и классические методы каркасного монтажа, конструктор может разработать огромное число схемных комбинаций, безотносительно к технологии их изготовления из бесконечного сочетания параметров электронных деталей. Применяя микроэлектронику, инженер-конструктор должен в совершенстве знать не только схемотехнику, но и новую технологию изготовления функциональных микроэлектронных бло-

ков. Это четвертый фактор, который ограничивает быстрое и широкое внедрение микроэлектроники.

Конструировать производственное оборудование под электронную технологию, созданную в лабораторных условиях, бессмысленно, так как опыт показал, что такая технология в массовом производстве не получает практического применения. В то же время установившаяся годами в электронной промышленности технология не пригодна для новых способов массового производства микроминиатюрных электронных приборов и микромодулей. Это противоречие является пятым фактором, с которым приходится считаться при промышленном внедрении микроминиатюризации, и над его преодолением усиленно работают ученые и инженеры всех стран.

Как уже упоминалось, микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры стала возможной в результате широкого применения полупроводниковых приборов и получила особо важное значение в связи с новыми открытиями в области физики твердого тела.

Полупроводниковые приборы работают при низких напряжениях и малых мощностях, что в значительной мере облегчило микроминиатюризацию радиоэлектронной аппаратуры путем изготовления отдельных радиоэлементов на стандартных керамических подложках из очень тонких пленок резистивного, диэлектрического, магнитного, проводящего и полупроводящего материалов.

Однако широкое использование полупроводниковых приборов долгое время ограничивалось их чувствительностью к влажности, окружающей температуре и радиоактивности, относительно высоким уровнем шумов, сложностью механизации и автоматизации технологии их производства, применением металлов, кристаллов и химикатов сверхвысокой чистоты, поддержанием высокой технологичной культуры производства, совершенством методов измерения и регулирования количества примесей при их содержании порядка  $10^{-6} \div 10^{-8}$ .

В настоящее время эти сложные проблемы конструктивно и технологически решаются или в самих полупроводниковых приборах, или путем создания непосредственно в электронной аппаратуре необходимых для них нормальных условий эксплуатации.

Транзисторы считаются еще новыми, прогрессирующими приборами с еще не установившимися параметрами и технологией производства, поэтому в этой книге, посвященной микроминиатюризации, значительное место уделяется рассмотрению физических процессов, протекающих в полупроводниковых приборах.

В настоящее время за рубежом и у нас имеется много хороших книг по теории полупроводниковых приборов, но эти книги, как правило, написаны физиками для физиков и поэтому являются слишком подробными и сложными для специалистов, работающих

в области конструирования радиоэлектронной аппаратуры и интересующихся физическими явлениями, происходящими в полупроводниковых приборах.

С этой точки зрения предлагаемая книга Даммера и Грэнвилла представляет несомненно большой интерес для советских специалистов.

Теория полупроводниковых приборов, которая считается весьма сложной, поскольку она базируется на квантовой механике и физике твердого тела, в настоящей книге описывается упрощенно, а физические процессы даются в форме движения зарядов в кристалле.

Заряды в транзисторе движутся не в вакууме, как это имеет место в обычной электронной лампе, поэтому в книге даются прежде всего некоторые основные понятия о процессах проводимости в полупроводнике.

Описав структуру кристалла чистого полупроводника, авторы дают понятия об основных и неосновных носителях и показывают, как из чистого германия с собственной проводимостью можно получить германий  $n$ - и  $p$ -типа.

В книге весьма просто и вместе с тем правильно описываются способы получения  $p$  —  $n$ -переходов, из комбинации которых и создаются различные полупроводниковые приборы.

Один  $p$  —  $n$ -переход образует по существу выпрямляющее устройство, т. е. диод. Авторы подробно описывают характеристики  $p$  —  $n$ -перехода, смещенного в прямом и обратном направлении, давая понятия лавинного пробоя и пробоя Зенера, используемых в полупроводниковых приборах.

Для правильного проектирования транзисторных схем необходимо знание основных параметров транзисторов. Инженеру-радисту не обязательно глубоко знать физические процессы, объясняющие эти параметры. Однако для того, чтобы иметь общее представление о физическом смысле основных параметров, в книге дается упрощенная теория и приводятся основные параметры транзисторов.

Авторы книги почти энциклопедически рассматривают все существующие типы полупроводниковых приборов, кратко излагая теорию их работы и их свойства, приводят примеры промышленного производства диодов и транзисторов.

В книге рассматриваются специальные требования к миниатюрным компонентам, вызванные уплотненным печатным монтажом элементов в аппаратуре.

В книге обращается внимание на правильные приемы пайки миниатюрных деталей. Практика показывает, что процесс пайки будет почти идеальным при высокой температуре и минимальной продолжительности пайки, так как при быстром плавлении сплава наиболее полно используются лучшие свойства флюса и не прои-

войдет повреждения компонента или транзистора от избыточного перегрева.

В книге дается краткое описание миниатюрных сопротивлений, конденсаторов, трансформаторов, реле, переключателей, разъемов и других радио- и электрокомпонентов. Описываются также миниатюрные батареи и аккумуляторы, включая солнечные и атомные батареи.

Подробно рассматриваются вопросы технологии изготовления печатного монтажа и герметизированных (залитых) схем.

Большой интерес представляют описанные в книге залитые схемы, которые имеют повышенную стойкость к влаге, ударам и вибрации. Однако такие схемы практически невозможно ремонтировать, что сдерживает их применение, особенно для бытовой аппаратуры радио и телевидения. Применение залитых электронных схем способствует миниатюризации, позволяя обходиться без шасси и монтажных держателей.

При выборе заливочных материалов рекомендуется учитывать воздействие их на миниатюрные детали как во время процесса заливки, так и впоследствии во время эксплуатации залитых схем.

В книге освещаются также общие вопросы миниатюризации электронного оборудования. Строгой терминологии в определении миниатюризации в настоящее время не существует. На ранних ступенях развития электроники было невозможно предвидеть будущий уровень миниатюризации, поэтому термины «миниатюрный» и «сверхминиатюрный» применялись с точки зрения современного уровня микроминиатюризации далеко не в миниатюрных конструкциях.

В книге применяются следующие определения конструкций электронных узлов:

1. «Нормальная» конструкция — конструкция, в которой используются лампы довоенного типа (соответствующие советским лампам 6К7, 6Ж7 и т. д.) и крупные детали (например, соответствующие советским сопротивлениям типа ВС).

2. «Миниатюрная» конструкция — с использованием миниатюрных ламп и миниатюрных деталей.

3. «Сверхминиатюрная» конструкция — состоящая из сверхминиатюрных радиоламп, транзисторов и сверхминиатюрных деталей (соответствующих, например, советским сопротивлениям типа УЛМ, УЛИ и т. п.).

4. «Микроминиатюрная» конструкция — подразделяемая на:

а) «микромодули» — из отдельных плоских транзисторов и радиодеталей;

б) «микросхемы» — объединенные в схемы микротранзисторы и пленочные элементы;

в) «твердые схемы» — сверхминиатюрные схемы, изготовленные в одном кристаллическом блоке германия или кремния.

Первые три определения конструкций можно в основном принять, однако четвертое определение микроминиатюрных конструкций требует уточнения.

Более правильными, по нашему мнению, надо принять следующие определения:

1. Микромодули — электронные узлы, состоящие из отдельных плоских деталей специальной одинаковой формы, набранных в столбик — «этажерку» и соединенных по граням столбика с помощью соединительных проводников или печатных плат.

2. Микросхемы — электронные узлы, выполненные на одной общей диэлектрической подложке методами пленочной технологии.

3. Твердые схемы — электронные узлы, выполненные в объеме полупроводника методами молекулярной электроники.

4. Гибридные схемы — комбинированные электронные узлы, использующие как обычные элементы, так и элементы микросхем и твердых схем.

Интересно сравнить постепенный рост плотности заполнения деталями электронных узлов на различных уровнях развития миниатюризации.

Если при переходе от нормальной к сверхминиатюрной ламповой конструкции плотность заполнения увеличилась примерно в 7 раз (от 0,06 деталей в  $1 \text{ см}^3$  до 0,4 деталей), а при переходе от сверхминиатюрной ламповой конструкции к транзисторной конструкции со сверхминиатюрными элементами в 5 раз (от 0,4 до 2 деталей в  $1 \text{ см}^3$ ), то микромодули дают увеличение плотности в 10 раз, микросхемы в 50 раз и твердые схемы в 600 раз по отношению к сверхминиатюрным транзисторным конструкциям.

Конечно, эти данные по плотности заполнения являются идеализированными, так как они дают плотность заполнения без учета потери объема на промежутки между узлами и блоками, необходимости обдува, установки теплоотводов, удобства ремонта и эксплуатации и т. п. Но с помощью этих данных удобно оценивать тенденцию к уменьшению размеров аппаратуры.

В книге даются полезные советы по технологии изготовления микросхем, микромодулей и твердых схем.

Поскольку габариты как микросхем, так и микромодулей определяют в основном полупроводниковые приборы, в книге подробно рассматриваются их конструкция и способы изготовления.

Имеются два подхода к решению вопроса изготовления транзисторов или диодов для использования в микросхемах и микромодулях: а) уменьшить размеры корпуса до такой степени, что последний будет сравним по величине с активным элементом самого полупроводникового устройства и б) отказаться от корпуса вообще,



обеспечив непосредственно защиту активного элемента устройства от внешних воздействий.

Преимущества небольших, полностью закрытых корпусом полупроводниковых приборов заключаются в их надежной герметизации и возможности использовать их как самостоятельные изделия в любых микроминиатюрных конструкциях. Удастся получить корпуса диаметром 3,2 мм и высотой 1,3 мм.

Предпринимались попытки капсулировать транзисторы и диоды без применения металлических или стеклянных корпусов. В некоторых конструкциях транзисторов активный элемент заделывался в эпоксидную смолу.

Для кремниевых полупроводниковых устройств хорошим защитным покрытием может служить специальное стекло с низкой точкой плавления. Это низкоплавкое стекло не оказывает вредного воздействия на характеристики полупроводниковых устройств и обеспечивает их надежную герметизацию.

Микроминиатюрные кремниевые диоды, для герметизации которых используется низкоплавкое стекло, имеют размеры просяного зернышка: диаметр таких диодов при длине 2 мм составляет лишь 0,9 мм. Наиболее «громоздкой» частью этих приборов являются их выводы.

Еще меньшие размеры имеют «точечные» диоды: при толщине пилочки 0,76 мм они имеют диаметр 0,27 мм. Их конструкция состоит из двух золоченых торцовых дисков, низкоплавкого стекла и кристалла вплавного диода.

В книге описываются различные методы изготовления микросхем. Однако во всех случаях рекомендуется выполнять следующие основные правила:

1. Схема должна быть максимально простой, чтобы количество необходимых деталей было минимальным.
2. Схема должна конструироваться с расчетом на малое потребление мощности.
3. Конструкция схемы должна допускать широкий разброс (желательно не менее  $\pm 20\%$ ) параметров входящих в нее деталей.
4. Количество выводов, вводов и монтажных проводников должно быть сведено к минимуму.
5. Для обеспечения высокой надежности микросхему необходимо изготавливать за один технологический цикл, не разделяя отдельные технологические операции большими промежутками времени.

Большое внимание авторы уделяют микромодульному способу микроминиатюризации. Принцип микромодульной конструкции заключается в компоновке отдельных весьма малых элементов одинаковой формы и размера в столбик — «этажерку». Имеющие такую форму сопротивления, конденсаторы, транзисторы и другие детали

называются «микроэлементами». Группу микроэлементов собирают в соответствии с заданной схемой, соединяют электрически и герметизируют, получая в результате «микромодуль». Микромодули с помощью печатного монтажа соединяют в узлы и блоки.

На плате микроэлемента можно располагать не одну, а несколько деталей, например четыре сопротивления, четыре диода или даже целую микросхему. Поэтому конструкция микромодуля является в этом отношении перспективной, так как позволяет использовать все последующие микроминиатюрные конструкции, включая и твердые схемы.

Полагают, что до 70—80 процентов всех электронных схем смогут в конечном счете выполняться непосредственно в форме микромодулей. Эффективность микромодульного устройства не будет снижаться и в случае необходимости использования специальных крупногабаритных деталей, необходимо только, чтобы размеры этих деталей были кратны основному размеру квадратной платы элемента микромодуля. Такая геометрическая совместимость всех элементов в микромодульных узлах является большим преимуществом микромодулей.

Полупроводниковые твердые схемы представляют собой электронные устройства, образованные на монокристаллической полупроводниковой плате. Каждая такая плата выполняет функции какой-либо схемы, состоящей из нескольких обычных активных и пассивных элементов. Твердые схемы дают наибольший выигрыш в размерах и весе по сравнению с любым, описанным ранее методом микроминиатюризации.

В книге кратко описываются методы и приемы обработки, используемые при изготовлении твердых схем, а также приводится описание ряда твердых схем.

Особое внимание обращается на способы межсхемных соединений и сборки твердых схем в блоки. Требуется большие усилия для того, чтобы сконструировать такую систему, в которой межсхемные соединения не занимали бы объем, больший объема самих твердых схем.

Вообще проблема рассеяния тепла накладывает определенные ограничения на плотность монтажа твердых схем, и поэтому теоретически высокие плотности монтажа твердых схем (до 1000 эквивалентных деталей в  $1\text{ см}^3$  и выше) пока что не могут быть практически реализованы в больших объемах.

Более высокая по сравнению с обычными схемами стоимость твердых схем определяет целесообразность их применения в тех случаях, когда первостепенное значение приобретает резкое снижение веса и объема.

Однако, имея в виду преимущества, которые дают твердые схемы и еще неиспользованные физические принципы для получения более

широкой номенклатуры схемных элементов в твердых схемах, можно предполагать, что недалеко то время, когда твердые схемы можно будет так же широко применять, как сейчас применяют приборы полупроводниковые.

Многие американские фирмы строят прогнозы относительно времени, когда твердые схемы по цене станут доступными для применения в промышленности и бытовой электронной аппаратуре. Однако даже по оптимистическим оценкам требуется еще несколько лет, прежде чем твердые схемы получат заметное распространение не только в бортовой (самолетной и ракетной) электронной аппаратуре.

В заключение необходимо отметить, что с момента осуществления американской программы микроминиатюризации в микромодульном исполнении, которое является сейчас главенствующим в США, за прошедшие 5 лет на разработку этого метода затрачено 18 млн. долл. В осуществлении программы участвовало более 50 фирм. На микромодульное исполнение было переведено более 675 различных схем как цифрового, так и линейного типа. Надежность микромодульных ячеек подтверждается испытаниями в рабочих режимах с наработкой более чем 57 млн. элемент/час.

В микромодульном исполнении в США проектируются сотни различных типов аппаратуры военного назначения.

Современные американские микромодули обеспечивают использование в них как схем на сверхтонких пленках, так и твердых полупроводниковых схем.

Применение новых методов электрических соединений существенно улучшит рабочие характеристики и надежность микромодулей новейшего типа с 20-контактными штырьковыми выводными головками, образующими сетку  $1,9 \times 1,9$  мм. Герметичность кожуха микромодуля обеспечивается приваркой электронным лучом и составляет менее  $10^{-9}$  см<sup>3</sup>/сек.

Американская программа создания усовершенствованных микромодулей полностью учитывает ожидаемые достижения в области технологии тонких пленок и твердых схем.

В конце книги в приложении приведены 4 статьи из книги *Miniaturization*, ed. H. D. Gilbert, Reinhold Publishing Corporation, N. Y., Chapman and Hall, Ltd., London, 1961. Первые 3 статьи (в сокращенном переводе) освещают общие вопросы микроминиатюризации, а также вопросы, касающиеся организации производства микроминиатюрных изделий. В 4-й статье, принадлежащей перу известного американского физика Фейнмана, затронуты интересные проблемы возможного перспективного развития микроминиатюризации.

Н. А. Барканов  
М. С. Лихачев



*Даммер Дж. У. А., Грэнвилл Дж. У.*

**МИНИАТЮРИЗАЦИЯ И  
МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИЯ  
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЫ**





## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРОВ

Настоящая книга является первой среди написанных специально о миниатюрных конструкциях электронного оборудования; в ней рассматриваются также методы и приемы миниатюризации оборудования, поскольку они играют важную роль в дальнейшем развитии радиоэлектроники.

Габариты электронного оборудования с течением времени по многим причинам все уменьшаются. Усложнение конструкций, необходимость уменьшения занимаемого объема, веса и т. д. — все это потребовало конструирования множества миниатюрных и субминиатюрных ламп и других элементов, входящих в различные устройства. Потребителями миниатюрных электронных деталей являются передвижные электронно-вычислительные устройства, настольные счетные машины, системы для контроля за производственными процессами, самолеты и управляемые снаряды, спутники и медицинское оборудование.

В предлагаемой книге рассматриваются вопросы миниатюризации, рационального использования отведенного пространства и конструирования миниатюрных устройств, таких, как транзисторные приемники, усилители для слуховых аппаратов, медицинские электронные устройства и т. д. Одна из глав посвящена печатному монтажу и технике изготовления схем, залитых компаундом, поскольку они играют важную роль в вопросах миниатюризации. Описываются образцы миниатюрных, залитых компаундом конструкций.

Ввиду того что транзисторы играют важную роль в миниатюризации и микроминиатюризации, в книге в доступной форме приведено описание конструкций 34 типов транзисторов и диодов. Хотя имеется много полезных книг по теории транзисторов и диодов, большая часть из них написана специалистами-физиками, вследствие

чего они слишком подробны для большинства инженеров электронной промышленности, желающих получить общее представление о работе транзисторов. Авторы поэтому ввели раздел упрощенной теории, в котором исключены математические выкладки, а физические процессы объясняются на примере движения заряда в кристалле.

В книге описываются три основные системы микроминиатюризации: микромодули из отдельных элементов (собранные на стандартных галетах); микросхемы (пленочные или «гибридные»); твердые схемы (интегральные схемы или молекулярные электронные устройства). Хотя эти системы и развиваются очень быстро, можно предполагать, что эта книга послужит основой для изучения приобретающего все большую важность вопроса миниатюризации.

*Дж. У. А. Даммер*

*Д. У. Грэнвилл*

## **Глава 1**

### **ТРАНЗИСТОР И ЕГО ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ**

#### **ПОЛУПРОВОДНИКИ И ТРАНЗИСТОРЫ**

Как показывает само название, полупроводник обладает величиной проводимости, средней между проводимостью металла и изоляционного материала. Согласно общепринятой теории, металл имеет очень низкое удельное сопротивление порядка миллионов долей *ом·см*, что объясняется наличием в нем большого числа свободных электронов, образующих электрический ток. Удельное сопротивление изоляционного материала измеряется большим числом *Мом·см*, так как он обладает малым количеством свободных электронов, способных образовать электрический ток. Величина удельного сопротивления полупроводника оказывается средней между этими пределами. Очень важно помнить, что наличие тока в полупроводнике можно объяснить лишь движением электронов.

Транзистором называется полупроводниковый элемент с тремя выводами, который, будучи включенным в соответствующую схему, дает усиление мощности по переменному току. Этим транзистор отличается, например, от трансформатора, который может давать увеличение либо напряжения, либо силы тока, но всегда с потерей мощности.

Обычно для промышленного изготовления транзисторов применяют германий или кремний. (В специальном разделе книги рассматриваются преимущества кремния перед германием при изготовлении транзисторов.)

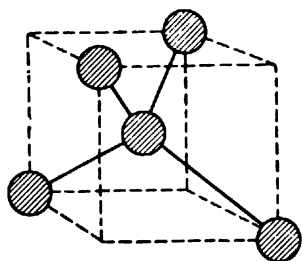
#### **СТРУКТУРА КРИСТАЛЛА ГЕРМАНИЯ**

Атом можно представить в виде миниатюрной солнечной системы, в которой положительно заряженное ядро является как бы солнцем, а электроны — планетами. Следует, однако, помнить, что в отличие от солнечной системы на одной орбите может находиться несколько электронов. Вокруг одного ядра может быть несколько орбит, и чем ближе к нему орбита, тем сильнее электростатическое притяжение, действующее на электроны; и наоборот, электроны, находящиеся на внешней орбите, слабее всего притягиваются к ядру. Это объясняется, во-первых, тем, что они расположены дальше от

ядра, и, во-вторых, тем, что электроны, находящиеся на внутренних орбитах, действуют как электростатический экран.

Для атома характерно то, что он стремится иметь на своей внешней орбите определенное число электронов. Элементы отличаются друг от друга тем, что составляющие их атомы содержат различные количества электронов. В германии имеется 32 электрона, расположенных на четырех орбитах. На внешней орбите находятся 4 электрона, однако в связи с тем, что атом

стремится иметь на этой орбите 8 электронов, он будет притягивать другие атомы. Если это будут атомы германия, то в результате получится кристалл германия. Внешние электроны, свободные для обмена, называются *валентными электронами*.



Ф и г. 1. 1. Тетраэдральное расположение атомов в кристалле германия.

В  $1 \text{ см}^3$  германия содержится  $10^{23}$  атомов, образующих правильную периодическую структуру, которая носит название кристаллической решетки. Поскольку атом германия имеет 4 валентных электрона, он соединяется с 4 другими атомами (фиг. 1.1). В полной кри-

сталлической решетке каждый атом является центром связи с другими 4 атомами; такая структура характерна для всего кристалла в целом. На фиг. 1.1 изображена элементарная ячейка атомов, которая повторяется во всей решетке и носит название тетраэдральной структуры. Каждый атом германия соединен с соседним атомом связью, образованной двумя валентными электронами, по одному электрону от каждого атома. Эта электронная связь и является той силой, которая удерживает кристалл как единое целое.

Германий представляет собой твердый, хрупкий материал с металлическим блеском и температурой плавления  $936^\circ \text{C}$ . Кремний тоже твердый и хрупкий материал. Он плавится при температуре  $1420^\circ \text{C}$  и может быть получен в сверхчистом виде.

### ЧИСТЫЙ ГЕРМАНИЙ

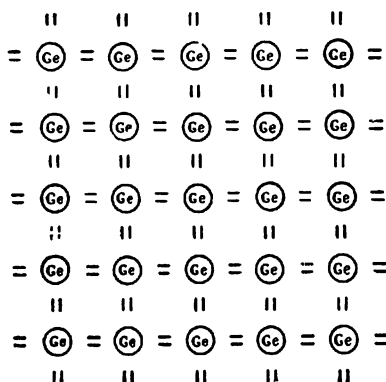
Графическое изображение структуры кристалла германия, приведенное на фиг. 1.1, слишком сложно для использования его в теории транзисторов, и обычно оно выполняется в плоскости (фиг. 1.2). Каждая пара атомов германия образует валентные связи двумя внешними электронами, изображенными здесь двумя сплошными черточками. Кружочками обозначены ядра германия вместе с электронами, находящимися на внутренних орбитах и играющими в образовании кристалла незначительную роль. Как видно из фиг. 1.2



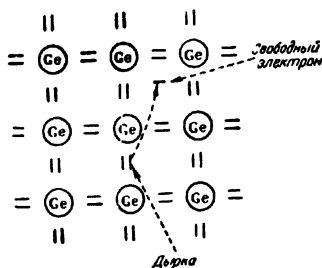
каждое ядро германия окружено 8 электронами, такая структура весьма стабильна. На фиг. 1.2 представлен кристалл чистого германия с идеально правильной кристаллической решеткой, не содержащей посторонних атомов. Чистый германий нередко называют германием I-типа (в разделе «Основные и неосновные носители» дается другое определение чистого германия).

### ЭЛЕКТРОНЫ И ДЫРКИ

Идеальная электронная структура, показанная на фиг. 1.2, имеет место только при температуре абсолютного нуля. Тепло является одним из видов энергии, и при нагревании до комнатной



Фиг. 1. 2. Схематическое изображение в плоскости кристаллической решетки германия при температуре абсолютного нуля.

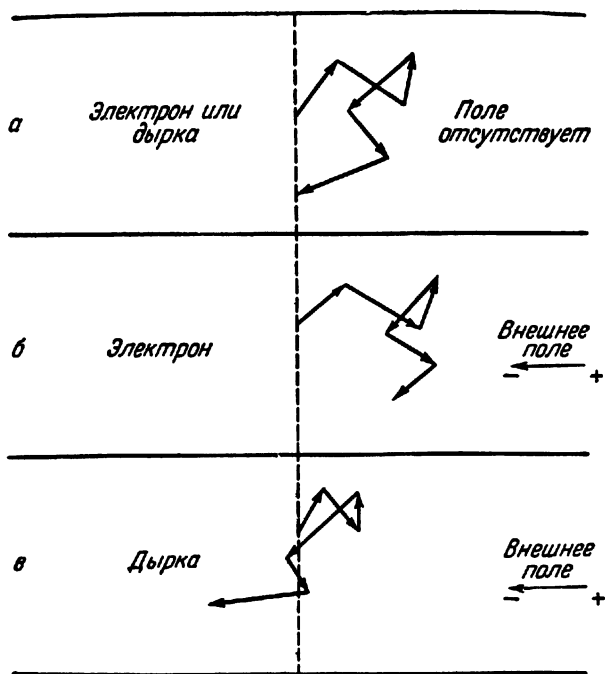


Фиг. 1. 3. Схематическое изображение кристаллической решетки чистого германия, иллюстрирующее образование свободного электрона и дырки при смещении валентного электрона под действием тепловой энергии.

температуры кристалл германия получает количество тепловой энергии, достаточное для смещения некоторого числа валентных электронов с занимаемых ими позиций. Это возможно потому, что в германии валентные электроны имеют слабую связь со своими атомами. С увеличением температуры все больше и больше валентных электронов смещается со своих орбит. В  $1 \text{ см}^3$  германия содержится  $10^{23}$  атомов, но уже при комнатной температуре около  $10^{13}$  атомов теряют по 1 электрону из окружающих их 8. При температуре  $936^\circ \text{C}$  не остается достаточного количества валентных электронов, необходимых для сохранения кристалла как единого целого, и он плавится. Свет является другим видом энергии, и его луч, попадая на кристалл германия, также отрывает валентные электроны от их атомов.

Теперь рассмотрим более подробно случай, когда один валентный электрон отрывается от своего атома. Как показано на фиг. 1.3,

этот валентный электрон может находиться в любом месте кристаллической решетки, а там, где прежде было 2 валентных электрона, теперь будет находиться лишь 1. Освобожденный электрон движется по кристаллической решетке со скоростью, определяемой температурой кристалла ( $\sim 10^7$  см/сек при комнатной температуре), и, сталкиваясь с атомными ядрами, непрерывно меняет направление движе-



Фиг. 1. 4. Схематическое изображение движения токоносителей в германии.

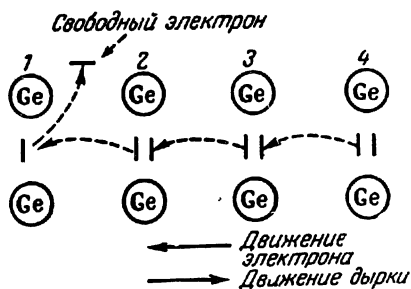
а — схематическое изображение случайного движения электрона или дырки при отсутствии внешнего электрического поля; б — движение того же электрона, что и в случае а, но в присутствии внешнего поля; в — движение дырки по тому же пути, что и в случае а, но в присутствии внешнего поля, аналогичного случаю б.

ния. Однако в среднем он движется равномерно в обоих направлениях, не удаляясь на большое расстояние от своего первоначального положения. При комнатной температуре свободные электроны ведут себя точно так же, как электроны в медной проволоке, и если к кусочку чистого германия приложить разность потенциалов, то электроны будут дрейфовать в направлении к положительному полюсу со скоростью, равной  $3,8 \cdot 10^3$  см/сек/в/см (фиг. 1.4, б).

Германий при наличии свободных электронов может проводить ток точно так же, как металл, однако он обладает еще и другим механизмом передвижения электронов в кристалле. Чтобы пояснить это явление, следует вернуться опять к связям, потерявшим один электрон, как об этом говорилось ранее. Обозначим цифрами ряд атомов, как показано на фиг. 1.5, и пусть первая пара атомов связана одним валентным электроном, в то время как второй электрон свободно перемещается по решетке. Вторая пара атомов соединена двумя валентными электронами, однако при комнатной температуре один из этих валентных электронов легко может перейти в связь с первой парой. Таким образом, вторая пара окажется связанной одним валентным электроном, а первая — двумя. Тогда один из валентных электронов третьей пары перейдет во вторую и т. д. вдоль всей цепочки. Электроны, двигаясь влево, поменялись местами. Однако с таким же успехом можно сказать, что местоположение недостающего валентного электрона переместилось вправо. Электрон — это отрицательный заряд, и если он покинул не имевшую прежде заряда область, то эта область станет положительной. Таким образом, дырка, оставленная валентным электроном, будет заряжена положительно. Наличие положительных дырок и является тем свойством, которое отличает полупроводник от металла.

На фиг. 1.5 движение дырки изображается прямой линией, но на самом деле в кристалле дырка движется с большой скоростью в разных направлениях, точно так же, как и свободный электрон. На месте каждого валентного электрона, освобожденного под воздействием тепловой энергии, образуется дырка. В чистом германии имеется одинаковое количество положительных дырок и отрицательно заряженных электронов и, следовательно, кристалл в целом не имеет заряда. Если к куску чистого германия приложить разность потенциалов, то положительные дырки будут дрейфовать к отрицательному контакту, а электроны — к положительному, как видно из фиг. 1.4.

Очень важно помнить, что положительная дырка является лишь местом, где находился отсутствующий в данный момент валентный электрон. Работу транзистора можно было бы выразить с помощью меняющихся местами валентных электронов, но такое объяснение



Фиг. 1. 5. Схема обмена валентными электронами и движения положительной дырки.

было бы очень сложным и трудным для понимания, поэтому для упрощения мы пользуемся положительными дырками, которые мысленно можно представить себе как положительно заряженные частицы. Для большинства случаев дырка может быть математически выражена теми же уравнениями, что и свободный электрон. Однако физические свойства дырки несколько отличаются от свойств свободного электрона: например, под напряжением дырка в кристалле дрейфует вдвое медленнее, чем электрон, поскольку механизм их движения различен.

До сих пор образование пар дырка — электрон под воздействием тепла или света рассматривалось упрощенно, без учета конца этого процесса, однако эти пары не могут существовать бесконечно, иначе кристалл заполнился бы токоносителями (электронами и дырками) до полного нарушения всех валентных связей и превращения германия по своим свойствам в металл. Фактически электрон рекомбинирует с дыркой и восстанавливает связь, ранее нарушенную теплом или светом. Пары дырка — электрон образуются, существуют непродолжительное время, а затем снова рекомбинируют; при этом каждый электрон не обязательно рекомбинирует с той дыркой, которую он оставил. В течение какого-то промежутка времени рекомбинируют ровно столько же электронов и дырок, сколько образовалось их пар, и таким образом устанавливается динамическое равновесие. Этот процесс будет подробнее разбираться в разделе «Продолжительность существования неосновных носителей».

Электроны и дырки в чистом германии образуются под воздействием тепловой энергии, и их количество сильно растет с повышением температуры. Это обстоятельство является причиной высокой чувствительности германия к температуре среды, окружающей кристалл.

### ГЕРМАНИЙ *n*-ТИПА

За исключением некоторых особых случаев, чистый германий непригоден для изготовления транзисторов, он должен преимущественно обладать либо электронной, либо дырочной проводимостью. Это достигается путем добавления к расплавленному германию во время процесса выращивания кристалла небольшого количества примесей.

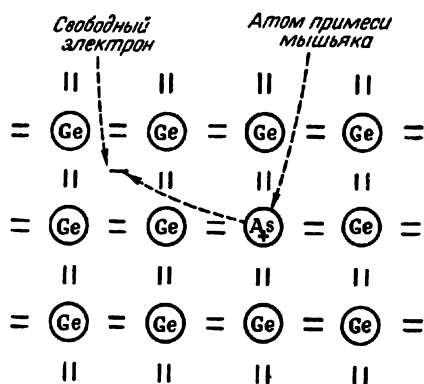
Для получения германия с электронной проводимостью в качестве примеси добавляют, например, мышьяк. Атом мышьяка имеет 5 валентных электронов, а не четыре, как атом германия, и способен занимать в кристаллической решетке место атома германия, как показано на фиг. 1.6. Четыре валентных электрона мышьяка удерживают атом мышьяка на месте, а пятый электрон остается свободным. Этот свободный электрон слабо связан с атомом мышьяка и при ком

натной температуре будет двигаться в различных направлениях кристаллической решетки германия со скоростью, соответствующей температуре окружающей среды. Заряд атома мышьяка будет положительным в результате потери одного электрона, и этот положительный заряд будет находиться в связанном состоянии. Такое сочетание неподвижных и подвижных зарядов и обеспечивает работу транзистора.

На каждый атом мышьяка в решетке германия имеется один свободный электрон, что и поддерживает нейтральность внутри кристалла германия. Тщательно регулируя концентрацию примеси мышьяка, для различных случаев применения можно подбирать удельную проводимость германия, пропорциональную количеству свободных электронов. Количество мышьяка, которое нужно добавить к германию, очень мало. Например, германий сопротивлением  $2 \text{ ом} \cdot \text{см}$  содержит около  $10^{15} \text{ электрон/см}^3$ , следовательно, на каждые  $10^8$  атомов германия в кристалле приходится только один атом мышьяка. И надо отдать должное мастерству специалистов по выращиванию кристаллов, регулирующих добавление примеси к германию с такой большой точностью.

Примесный атом мышьяка в германии отдает для целей проводимости один электрон, поэтому его и называют *донорной примесью*.

Германий, проводимость в котором осуществляется с помощью отрицательно заряженных электронов, называется германием *n*-типа. Германий *n*-типа можно также получить и с помощью примеси фосфора или сурьмы, так как они, имея пять валентных электронов, соответствуют кристаллической решетке германия.



Фиг. 1.6. Схематическое изображение кристаллической решетки германия *n*-типа с атомом мышьяка, отдавшим один электрон и находящимся в связанном состоянии в качестве положительно заряженной примеси.

### ГЕРМАНИЙ *p*-ТИПА

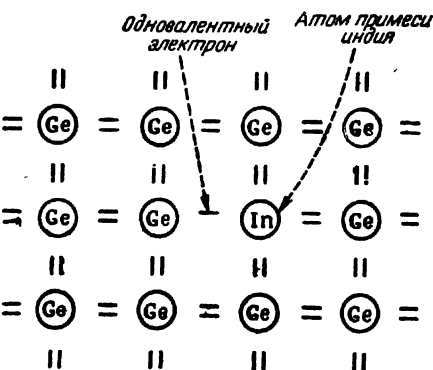
При добавлении к германию определенного количества индия можно получить дырочную проводимость. Индий имеет три валентных электрона и обладает способностью занимать место атома германия. На фиг. 1.7 атом индия окружен семью валентными электронами и поэтому не заряжен. При комнатной температуре один из

валентных электронов соседнего атома германия может вступить в связь с атомом индия и получить отрицательный заряд, создав вблизи себя положительную дырку. Эта положительная дырка, так же как и дырка, описанная в разделе «Электроны и дырки», передвигаясь в различных направлениях по решетке германия, будет в качестве токоносителя обеспечивать проводимость. Отрицательно

заряженный атом индия находится в решетке в связанном состоянии и не принимает прямого участия в проводимости.

Индий, который [принимает один электрон атома германия, создавая при этом положительную дырку, называют *акцепторной примесью*. Акцепторными примесями к германию могут быть и другие трехвалентные элементы, такие, как галлий и алюминий. Германий с акцепторной примесью называется германием *p*-типа.

Германий, который содержит одновременно донорную и акцепторную примеси, в зависимости от того, какой примеси будет больше, может



Фиг. 1. 7. Схематическое изображение кристаллической решетки германия *p*-типа с атомом примеси индия.

Когда одновалентная связь получает валентный электрон от соседнего атома германия, атом индия становится отрицательно заряженным и возникает дырка, служащая проводником.

стать германием *n*- или *p*-типа. Свободный электрон донорного атома, вступая в связь с акцепторным атомом, образует две заряженные примеси, находящиеся в решетке в связанном состоянии. Донорные и акцепторные примеси компенсируют друг друга, и только избыточная часть примеси того или другого типа будет образовывать токоносители.

## ОСНОВНЫЕ И НЕОСНОВНЫЕ НОСИТЕЛИ

В чистом германии образование электронов и дырок под действием тепловой энергии происходит парами. Добавляя в германий соответствующие примеси, его можно преобразовать в материал *n*- или *p*-типа, в зависимости от преобладания токоносителей того или другого типа. Однако точно так же, как и в чистом германии, пары дырка — электрон продолжают образовываться и в материале с примесью, только количество этих пар будет меньше за счет наличия токоносителей примеси. Рассмотрим германий *n*-типа, имеющий

при комнатной температуре сопротивление  $2\text{ ом}\cdot\text{см}$ . В этом материале содержится  $10^{16}$  электрон/см<sup>3</sup>, образуемых донорными примесями, и около  $10^{11}$  пар электрон — дырка, возникших под воздействием тепловой энергии. Следовательно, на каждые 10 000 донорных электронов приходится только одна пара электрон — дырка, образованная тепловой энергией. Электрон этой пары фактически не увеличивает общей концентрации электронов, и поэтому им можно пренебречь. Однако дырка пары дырка — электрон, как будет видно дальше, играет очень большую роль. В общем количестве носителей дырки составляют меньшинство и поэтому носят название *неосновных носителей*, а электроны, поскольку их большинство, — *основных носителей*. По аналогии электроны в германии *p*-типа будут неосновными носителями, а дырки — основными. Неосновные носители могут быть образованы в германии с помощью тепловой энергии, видимого спектра света или с помощью подачи напряжения на *p* — *n*-переход (см. раздел «Введение неосновного носителя»). Неосновные носители в транзисторах играют такую же первостепенную роль, как электроны в радиолампе.

О чистом германии выше говорилось как о материале с идеально правильной кристаллической решеткой, не имеющей никаких дефектов. Такой идеальный случай редко встречается на практике. Поэтому чистота полупроводника определяется наличием пар электрон — дырка, образованных под действием тепловой энергии, число которых должно значительно превышать число носителей, образованных примесями. Точнее, чем больше примесей (т. е. чем ниже удельное сопротивление), тем выше должна быть температура, до которой надо нагреть полупроводник, чтобы его можно было считать «чистым».

Если кристалл полупроводника не подвергается другим внешним воздействиям, кроме тепловой энергии, число неосновных носителей в нем будет обратно пропорционально числу основных носителей, причем соотношение будет зависеть от температуры внешней среды. Чем больше удельное сопротивление германия *n*-типа, тем ниже концентрация электронов и тем выше концентрация дырок. При максимальном удельном сопротивлении, равном при комнатной температуре примерно  $60\text{ ом}\cdot\text{см}$ , наступает предел, когда концентрация дырок равна концентрации электронов. Это и есть чистый германий.

Важное значение при конструировании транзисторов и диодов имеет зависимость концентрации неосновных носителей от концентрации основных носителей в тех случаях, когда необходимо понизить чувствительность полупроводниковых приборов к изменениям температуры внешней среды. Вредный эффект высоких температур выражается в нежелательном образовании в полупроводнике неосновных носителей, число которых начинает составлять значитель

ную долю от общего числа носителей. Чем меньше неосновных носителей имеется вначале, т. е. чем меньше удельное сопротивление кристалла полупроводника, тем выше будет предел температуры, до которого можно нагревать кристалл без того, чтобы неосновные носители, образовавшиеся под воздействием тепловой энергии, начали создавать вредный эффект. Однако в реальном приборе для достижения его полной нечувствительности к высоким температурам удельное сопротивление германия нельзя сделать бесконечно малым, так как для сохранения других необходимых параметров прибора требуется большое удельное сопротивление. Чтобы удовлетворить эти противоречивые требования, необходимо найти оптимальное решение.

### ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ

Неосновные носители, непрерывно образующиеся под действием тепловой энергии или каким-либо другим способом, существуют некоторое время, затем рекомбинируют с основными носителями и создают динамическое равновесие. Средняя продолжительность существования неосновного носителя носит название *времени жизни* носителя.

Рассмотрим процесс, происходящий в германии *n*-типа при комнатной температуре. Под действием тепловой энергии непрерывно образуются дырки, причем каждой дырке, вновь появившейся в кристалле, соответствует исчезновение ранее образовавшейся дырки, рекомбинирующей с электроном. Дырки в полупроводнике можно сравнить с пузырьками воздуха в сосуде с кипящей водой, которые образуются на дне, поднимаются на поверхность через слой жидкости и там исчезают, соединяясь с окружающим воздухом. Эта аналогия далеко не идеальна, но она дает возможность показать, что в сосуде с кипящей водой наблюдается постоянное выделение воздушных пузырьков, срок жизни которых относительно короткий. Образовавшаяся в германии дырка движется в кристалле в различных направлениях до тех пор, пока не встретит электрон, с которым она рекомбинирует, и тогда они оба перестают быть токоносителями (напомним, что дырка — это отсутствие электрона).

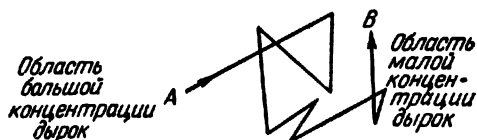
Время жизни неосновного носителя в германиевом транзисторе составляет около 25 *мксек*. Чем больше примесей содержит германий (не обязательно доноров или акцепторов), тем дефектнее его кристаллическая решетка и тем короче время жизни неосновного носителя. Рекомбинация происходит преимущественно с посторонними атомами в местах наличия дефектов решетки кристалла, поэтому срок жизни неосновного носителя является верным показателем качества кристалла полупроводника. Необходимо отметить и другое



явление: чем меньше время жизни неосновного носителя из-за дефектности решетки кристалла и наличия в нем примесей, тем больше неосновных носителей будет возникать при нагреве. Это является следствием динамического равновесия, при котором число рекомбинаций должно быть равно числу образований неосновных носителей.

### ДИФфуЗИЯ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ

Процесс диффузии возникает в тех случаях, когда имеется разница в концентрации неосновных носителей в каких-либо соседних областях кристалла полупроводника. Одним из способов создания градиента концентрации неосновных носителей является облучение какого-либо участка поверхности кристалла. Неосновные носители, образовавшиеся под действием света, движутся во всех направлениях со скоростью, зависящей от температуры, однако их больше движется из области с высокой концентрацией к соседней области с меньшей концентрацией, чем в обратном направлении. Носители стремятся распространиться по всему кристаллу, чтобы создать постоянную концентрацию, которая обеспечивает состояние равновесия. Однако они не достигают этого, так как срок их жизни ограничен.



Фиг. 1. 8. Типичная траектория движения диффундирующей дырки.

На фиг. 1.8 показана типичная траектория движения неосновного носителя. Неосновной носитель образуется в точке А, сталкивается с различными ядрами и рекомбинирует в точке В. Средняя величина расстояний АВ, взятая по всем носителям, называется *длиной диффузии неосновного носителя*. Эта величина пропорциональна корню квадратному из времени жизни неосновного носителя. Таким образом, если на определенном участке кристалла происходит непрерывное образование неосновных носителей, то они будут диффундировать наружу на расстояние, равное длине диффузии в данном участке. В германиевом транзисторе это расстояние равно 1 мм. Диффузия является важным механизмом проводимости в транзисторе.

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРИСТАЛЛА

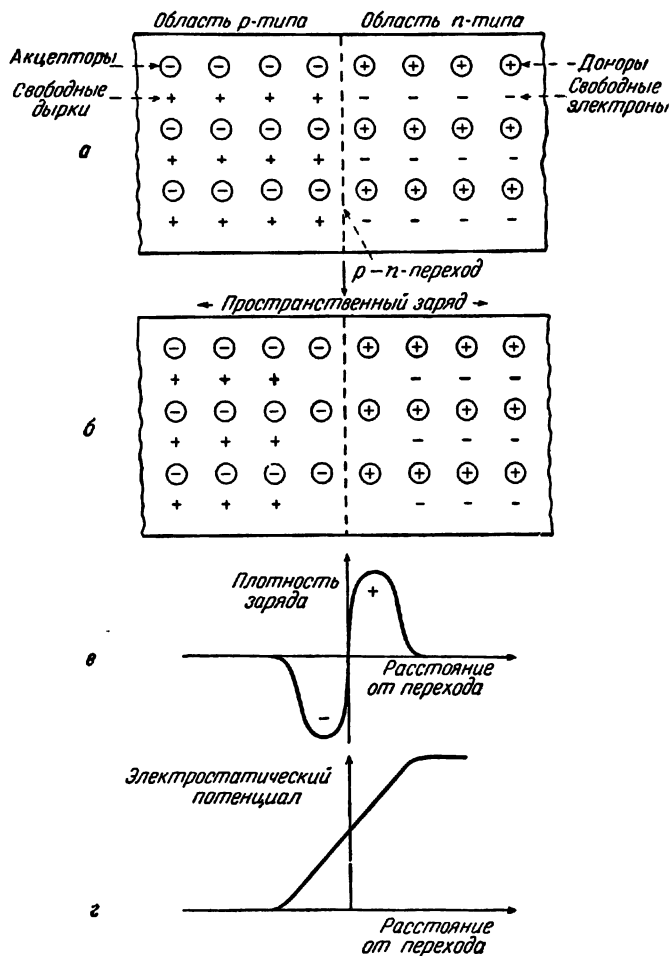
Современные способы изготовления кристаллов германия и кремния для транзисторов весьма совершенны и сложны и являются предметом особого изучения, поэтому здесь не дается описание при-

меняемых для этой цели технологических процессов. Достаточно констатировать тот факт, что кристаллы, обладающие заданными удельными сопротивлениями, типами проводимостей и временем жизни неосновных носителей, могут быть изготовлены в виде монокристаллов. Монокристалл, как свидетельствует само название, имеет однородную структуру кристаллической решетки по всему объему слитка, которая может быть сохранена даже в том случае, если проводимость по его длине будет меняться. Важно помнить, что при рассмотрении в последующих разделах вопроса о переходах между германием  $n$ - и  $p$ -типа слово «переход» относится только к изменению типа проводимости; структура же кристаллической решетки германия остается правильной и равномерной по всему кристаллу. Действительно, если бы это было не так, то функция транзистора либо вовсе отсутствовала бы, либо была бы очень слабо выражена. Германий, имеющий точку плавления  $936^\circ \text{C}$ , легче изготовить, чем кремний, плавящийся при  $1420^\circ \text{C}$ , поэтому и технология изготовления германиевых устройств была разработана на несколько лет раньше, чем технология изготовления кремниевых устройств.

### **$p$ — $n$ -ПЕРЕХОД**

После рассмотрения общих теоретических вопросов перейдем к описанию свойств  $p$  —  $n$ -перехода и к разъяснению принципов работы транзистора.  $p$  —  $n$ -Переход — это граница раздела между двумя уровнями с противоположными проводимостями в одном кристалле. Одним из способов его изготовления является введение в какой-либо из участков кристалла  $n$ -типа избыточного количества акцепторной примеси. Акцепторы превращают часть материала  $n$ -типа, в который они были введены, в материал  $p$ -типа, и, таким образом, возникает  $p$  —  $n$ -переход. Избыточные акцепторы или доноры вводятся в определенные области полупроводника с помощью различных методов. (Некоторые из этих методов описаны в гл. 2.)

Чтобы представить себе процессы, происходящие в  $p$  —  $n$ -переходе, предположим, что он образован соединением брусков материала  $p$ - и  $n$ -типа. Сперва разберем, что происходит до того, как в плоскости соединения начнется обмен дырками или электронами. Схематически это состояние изображено на фиг. 1.9, *а*. (Здесь показаны лишь примесные атомы в виде кружочков, расположенных для большей наглядности правильными рядами. В действительности в кристалле примеси распределяются беспорядочно и распространяются по всей решетке в любых направлениях. Точно так же расположены свободные дырки и электроны.) Однако состояние, изображенное на фиг. 1.9, *а*, является нестабильным. В зоне  $p$ -типа при комнатной температуре имеются свободные дырки и связанные отрицательно заряженные ионы акцепторов, а в зоне  $n$ -типа — свободные



Ф и г. 1. 9. Схематическое изображение процессов, происходящих в области р-п-перехода.

а — нестабильное состояние в момент образования р-п-перехода; б — состояние равновесия в области р-п-перехода; в — распределение пространственного заряда вблизи р-п-перехода; з — электростатический потенциал вблизи р-п-перехода.

электроны и связанные положительно заряженные ионы доноров. Свободные дырки и электроны находятся в непрерывном движении, и некоторые дырки перейдут пограничную плоскость из  $p$ -области в  $n$ -область. Точно так же некоторые электроны перейдут из  $n$ -области в  $p$ -область. Этот обмен не может продолжаться бесконечно, поскольку связанные доноры и акцепторы образуют на каждой из сторон перехода местный пространственный заряд, как видно из фиг. 1.9, б и в.

Подобно тому как противоположные заряды на противоположных пластинах конденсатора образуют разность потенциалов между двумя пластинами, точно так же и области с противоположными пространственными зарядами в  $p$  —  $n$ -переходе образуют разность потенциалов в этом переходе, аналогичную разности контактных потенциалов двух металлов. Когда в  $p$  —  $n$ -переходе установится динамическое равновесие, его потенциал будет достаточным, для того чтобы предотвратить дальнейший переход дырок или электронов в кристаллической решетке через плоскость соединения. На фиг. 1.9, г дано графическое изображение электростатической разности потенциалов, образованной пространственным зарядом. В  $n$ -области потенциал будет положительным, поэтому дырки не попадают в эту область, а электроны не выходят за ее границы.

Область пространственного заряда часто называют запиорным слоем, потому что в нем доноры и акцепторы теряют свойства свободных носителей. Эту область называют также потенциальным барьером, препятствующим перемещению дырок и электронов через  $p$  —  $n$ -переход. Ширина пространственного заряда является функцией удельного сопротивления германия. В германии с сопротивлением  $5\text{ ом}\cdot\text{см}$  ширина пространственного заряда в состоянии равновесия равна примерно  $10^{-4}\text{ см}$ . Для получения требуемой ширины запиорного слоя нужно иметь определенное количество примесей. Чем больше примесей на единицу объема (иначе говоря, чем меньше удельное сопротивление), тем меньше ширина потенциального барьера, содержащего достаточное количество примесей.

До сих пор рассуждения велись для перехода с резким изменением от  $n$ -германия к  $p$ -германию. У более плавного  $p$  —  $n$ -перехода свойства несколько отличаются от свойств резкого перехода, но эта разница второго порядка и здесь рассматриваться не будет.

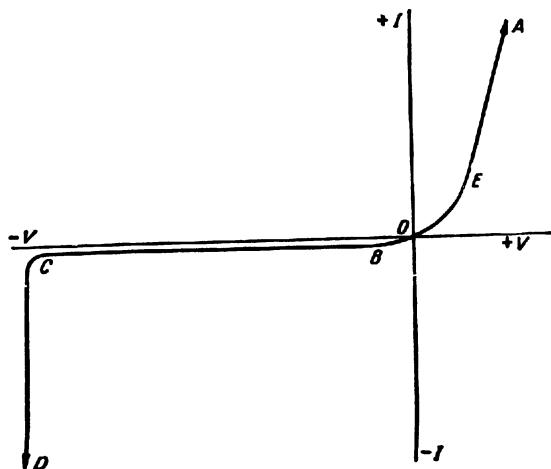
### ОМИЧЕСКИЙ КОНТАКТ

В полупроводниковом диоде  $p$  —  $n$ -переход является местом выпрямления. Переход находится в теле кристалла, и, для того чтобы использовать его свойства, требуется установить электрические вводы, позволяющие поддерживать на них при прохождении тока пренебрежимо малое падение напряжения. При этом необхо-

димо, чтобы припой не содержал примесей, способных изменить тип германия, образующего  $p-n$ -переход вблизи контакта ввода. Для строгого выполнения этого требования берут припой, содержащий ту же примесь, что и германий; так, например, припой, применяемый для германия  $n$ -типа, может содержать фосфор в качестве одного из элементов, составляющих этот припой. Такие контакты носят название омических в отличие от выпрямляющих. Изготовление омического контакта является важным фактором в технологии производства транзисторов, так как, если не принять необходимые предосторожности, трудно получить контакт без выпрямляющего действия.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛОСКОСТНОГО ДИОДА

Плоскостной германиевый диод состоит, по существу, из германиевого кристалла, одна часть которого  $p$ -типа, а другая  $n$ -типа. Через омические контакты к каждой из областей подводится напряжение и в  $p-n$ -переходе происходит выпрямление. На фиг. 1.10

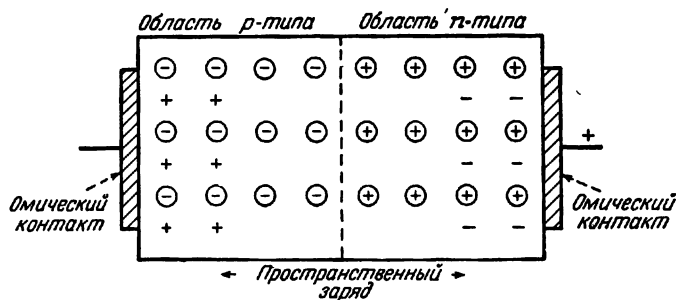


Фиг. 1. 10. Типичная форма вольтамперной характеристики диода с  $p-n$ -переходом в прямоугольной системе координат.

представлена типичная вольтамперная характеристика плоскостного германиевого диода, изображенная в прямоугольной системе координат. Как видно, кривая характеристики делится на три отдельных участка.

### ПЕРЕХОД, СМЕЩЕННЫЙ В ОБРАТНОМ НАПРАВЛЕНИИ

Прежде всего рассмотрим участок кривой характеристики диода  $OC$  (фиг. 1.10), на котором диод имеет высокое сопротивление. К пластинке германия с  $p-n$ -переходом, схематически изображенной на фиг. 1.11, посредством омических контактов прикладываются напряжения, причем предполагается, что контакты несколько отдалены от перехода (не менее 5 мм). Пусть  $p$ -область будет иметь отрицательное смещение по отношению к  $n$ -области (фиг. 1.11). Рассмотрим, что в этом случае происходит в переходе. Немедленно после



Фиг. 1.11. Процессы, происходящие в области смещенного в обратном направлении  $p-n$ -перехода.

Область пространственного заряда здесь шире, чем у несмещенного перехода на фиг. 1.9.

приложения напряжения дырки из германия будут двигаться к отрицательному выводу (иначе говоря, в него будут поступать валентные электроны), а электроны — к положительному. Так как носители покидают область германия вблизи пространственного заряда, то запиорный слой будет расширяться, а потенциал пространственного заряда увеличиваться до тех пор, пока не станет равным приложенному напряжению и тем самым не прекратится движение носителей тока через переход. Таким образом, в случае приложения напряжения в рассматриваемом направлении, называемом обратным или запирающим направлением, пластинка германия будет представлять собой очень большое сопротивление, при котором происходит полное падение приложенного напряжения в слое пространственного заряда. Явление расширения пространственного заряда в обратно смещенном  $p-n$ -переходе можно сравнить с поведением конденсатора с изменяемым расстоянием между обкладками. Если такой конденсатор зарядить до определенного постоянного напряжения и затем удалить источник последнего, то между обкладками будет существовать потенциал. Если теперь увеличивать расстояние между обкладками, потенциал будет возрастать. (Это явление поло-

жено в основу изготовления некоторых высоковольтных генераторов.)

В случае обратного смещения  $p-n$ -перехода через переход протекает некоторый ток (см. фиг. 1.10, где на отрезке кривой  $OC$  имеет место ограниченный постоянный ток в обратном направлении). Этот ток возникает благодаря движению неосновных носителей, которые в этом случае должны быть введены в модель фиг. 1.11. Потенциал  $p-n$ -перехода в состоянии равновесия таков, что он предотвращает переход положительных дырок из области  $p$  в область  $n$ . Неосновные носители возникают под действием тепловой энергии в области  $p$ , и так как они представляют собой отрицательные электроны, то тот же потенциал будет способствовать их переброске из области  $p$  в область  $n$ . Эти же рассуждения можно провести для перехода неосновных носителей — дырок из материала  $n$  в материал  $p$ . Таким образом, для потока неосновных носителей не существует потенциального барьера. Как уже установлено, при обратном смещенном  $p-n$ -переходе почти все приложенное напряжение падает на переходе, и, следовательно, области германия вне перехода в данном случае будут электрически нейтральны. Отсюда вытекает, что создателями потока зарядов являются только те неосновные носители, которые возникают в пределах диффузионной длины от перехода. Если они не рекомбинируют перед тем, как проникнут в запорный слой, то они будут «протянуты» через него существующим в нем полем и превратятся в основных носителей.

Неосновные носители, генерированные в пределах диффузионной длины от запорного слоя и диффундирующие в запорный слой проходят через него в том случае, если приложенное напряжение будет несколько превышать малое «пороговое» значение, примерно равное 0,1 в. При больших значениях обратного напряжения величина тока остается постоянной. Этот ток, часто называемый током насыщения, не зависит от напряжения, но, поскольку он состоит из неосновных носителей, образовавшихся под действием тепловой энергии, он очень чувствителен к изменениям температуры и удваивает свое значение (в германиевых диодах) при повышении температуры на каждые  $8^{\circ}\text{C}$ . Этим и объясняется быстрое увеличение обратного тока с повышением температуры, ограничивающее верхний температурный предел, при котором может работать полупроводниковый диод.

Как и следовало предполагать, величина обратного тока насыщения зависит при заданной температуре от скорости генерации неосновных носителей по обе стороны перехода. Одной из задач при проектировании диода является получение по возможности минимального тока насыщения. Часто это требование можно выполнить, применяя германий с большим временем жизни неосновных носителей, а следовательно, с малой скоростью генерации (см. раздел

«Продолжительность существования неосновных носителей» стр. 30). Ток насыщения плоскостного маломощного диода для слабых сигналов равен примерно 1  $\mu\text{A}$ , а его обратное сопротивление составляет 1  $\text{M}\Omega$  и более. Максимальное обратное рабочее напряжение в этом случае может достигать более 100  $\text{В}$ .

Поскольку  $p-n$ -переход обладает пространственным зарядом, он является конденсатором. При увеличении обратного напряжения область пространственного заряда расширяется и емкость перехода падает, изменяясь пропорционально корню квадратному из приложенного напряжения в случае резкого перехода и корню кубическому в случае плавного перехода. Емкость перехода и эффект ее изменения при колебаниях напряжения используются в параметрических усилителях.

### ЛАВИННЫЙ ПРОБОЙ И ПРОБОЙ ЗЕНЕРА

На втором участке обратной ветви характеристики диода (отрезок  $CD$  на фиг. 1.10) величина обратного тока быстро растет при практически постоянном напряжении. Это напряжение, приложенное к  $p-n$ -переходу в обратном направлении, распространяется на очень тонкий слой пространственного заряда ( $\sim 10^{-4} \text{ см}$ ) или потенциальный барьер и вызывает, как указано выше, постоянный ток насыщения. Однако с увеличением напряжения неосновные носители, являющиеся причиной возникновения этого тока, будут приобретать все большие и большие скорости, а следовательно, и энергии. Когда поле в запиорном слое будет обладать достаточной величиной ( $8 \times 10^4 \text{ В/см}$ ), оно может сообщить одному неосновному носителю количество энергии, способное разорвать валентную связь в момент столкновения в кристаллической решетке с атомом германия. Таким путем образуются электрон и дырка, которые, находясь в области с высокой напряженностью поля, в свою очередь приобретают такие большие скорости, что при столкновении с атомами германия генерируют новые электроны и дырки. Эти электроны и дырки в свою очередь сталкиваются с атомами германия и образуют нарастающий процесс. Это явление носит название *лавинного пробоя*, а начальное напряжение (точка  $C$  на фиг. 1.10) — *лавинного напряжения*. До тех пор пока приложенное напряжение превышает лавинное напряжение, лавинный ток диода практически не зависит от напряжения на переходе и ограничивается сопротивлением германия, включенным последовательно с переходом.

Когда германий имеет малое удельное сопротивление, пробой в обратном направлении обуславливается иным процессом. Вспомним (см. раздел « $p-n$ -Переход», стр. 32), что ширина пространственного заряда является функцией удельных сопротивлений  $n$ - и  $p$ -областей и становится тем уже, чем меньше будут удельные



сопротивления. Если к узкому слою пространственного заряда приложить большое обратное напряжение, возникает процесс, носящий название внутренней эмиссии под действием электрического поля. Поле большой напряженности на переходе отрывает электроны от связей между атомами германия и порождает свободные электроны и дырки. Последние, находясь в поле большой напряженности, мгновенно отделяются друг от друга, и электроны направляются к  $n$ -области, а дырки — к  $p$ -области, где они становятся основными носителями. Единственным препятствием неограниченному потоку, как и прежде, является сопротивление германия, включенное последовательно с  $p$  —  $n$ -переходом. Это явление называется *эффектом Зенера*, а начальное напряжение — *напряжением Зенера*.

Эффект Зенера получается в случае узкого пространственного заряда. При увеличении удельного сопротивления  $n$ - или  $p$ -области зона пространственного заряда расширяется, и при достижении определенной ширины основным источником проводимости становится лавинный пробой. Зависимость пробивного напряжения от температуры в обоих случаях различна: она отрицательна для эффекта Зенера и положительна для лавинного эффекта. При переходе от одного эффекта к другому температурный коэффициент будет равен нулю, что является желательным в том случае, когда область пробоя используется для целей ограничения напряжения.

Когда явления в области пробоя в плоскостном диоде разбирались впервые, они были приписаны эффекту Зенера, и диоды, ограничивающие напряжение, были названы диодами Зенера. Позже было обнаружено, что лавинный процесс имеет место во многих диодах, однако было уже слишком поздно менять название, и в настоящее время все диоды, применяемые для ограничения напряжения, называются диодами Зенера независимо от истинной причины пробоя.

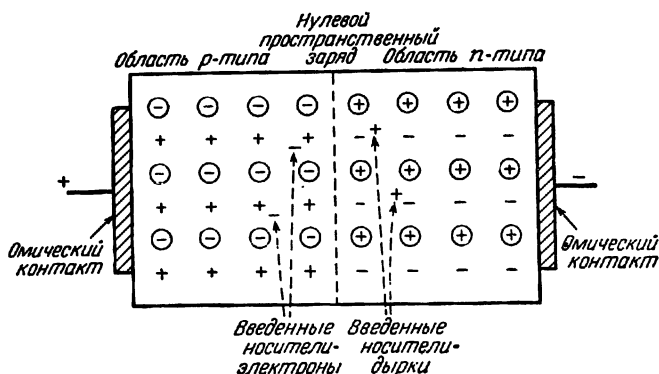
Эффект Зенера объяснялся здесь на примере германиевого диода, однако на практике применяются лишь кремниевые диоды Зенера. Температурный коэффициент пробивного напряжения в кремниевом диоде равен нулю при напряжении Зенера 6 в, что является величиной, вполне подходящей для транзисторной схемы.

### ДИОД С ПРЯМЫМ СМЕЩЕНИЕМ

Рассмотрим третий участок характеристики диода, представленный на фиг. 1.10 отрезком  $OA$ . Он носит название прямой ветви характеристики и имеет место в том случае, когда  $p$ -область имеет положительное смещение по отношению к  $n$ -области.

Условие равновесия для  $p$  —  $n$ -перехода описано в разделе « $p$  —  $n$ -Переход» (стр. 32), где показано (фиг. 1.9), что в состоянии

равновесия количество дырок, диффундирующих через  $p-n$ -переход в одном направлении, равно количеству электронов, диффундирующих в обратном направлении. Пусть к диоду приложено напряжение смещения (фиг. 1.12). Рассмотрим, как будут вести себя в этом случае дырки (поведение электронов будет таким же, но с обратным знаком). Полярность приложенного напряжения



Фиг. 1. 12. Процессы, происходящие в области  $p-n$ -перехода, смещенного в прямом направлении.

такова, что она заставляет дырки двигаться по направлению к переходу, где они стремятся «разрядить» емкость перехода, иначе говоря, положительные дырки нейтрализуют некоторые из неподвижных отрицательных акцепторных примесей. Уменьшение пространственного заряда сопровождается уменьшением задерживающего потенциала на переходе. В результате уменьшенный потенциал не в состоянии удерживать дырки в  $p$ -области, и некоторые из них диффундируют в  $n$ -область, где образуют ток (диффузия происходит при обратном знаке поля перехода). При увеличении приложенного напряжения все больше и больше дырок скапливается у перехода, постоянные примеси постепенно полностью нейтрализуются, отрицательный пространственный заряд исчезает. Участок кривой  $OE$  характеристики (фиг. 1.10) имеет экспоненциальный характер и образуется в период скопления носителей у перехода и уничтожения области пространственного заряда. Динамическое сопротивление при этом уменьшается с увеличением напряжения от нулевого значения, и для небольшой площади германиевого перехода оно может равняться 25 ом. Напряжение в точке  $E$  составляет примерно 0,5 в.

## ВВЕДЕНИЕ НЕОСНОВНОГО НОСИТЕЛЯ

Когда плоскостной диод имеет прямое смещение, дырки (основные носители) оставляют  $p$ -область и переходят в  $n$ -область, где становятся неосновными носителями. Аналогично электроны переходят из  $n$ -области в  $p$ -область и тоже становятся там неосновными носителями. Этот процесс, при котором неосновные носители вводятся в германий под воздействием прикладываемого напряжения, носит название *введение неосновного носителя* (инжекция), а носители, которые были введены, — *введенные носители*.

Рассмотрим сперва введение дырок. При подаче прямого смещения дырки путем диффузии и под влиянием поля смещения пересекают переход и входят в  $n$ -область, где они диффундируют во всех направлениях, причем некоторые возвращаются обратно к переходу, а другие углубляются в  $n$ -область. Диффузия является основным механизмом продвижения введенных дырок, поскольку поле в  $n$ -области мало, хотя оно помогает оттягивать дырки от перехода. Через некоторое время, называемое временем жизни, введенные дырки рекомбинируют с электронами. Поток должен быть непрерывным, следовательно, на каждую рекомбинацию дырки и электрона другой электрон входит со стороны отрицательного омического контакта и другая дырка входит со стороны положительного контакта, чтобы занять места исчезнувших носителей. Поскольку электроны в германии движутся вдвое быстрее дырок, то очевидно, что для поддержания постоянного прямого тока необходимо некоторое сложное движение электронов и дырок.

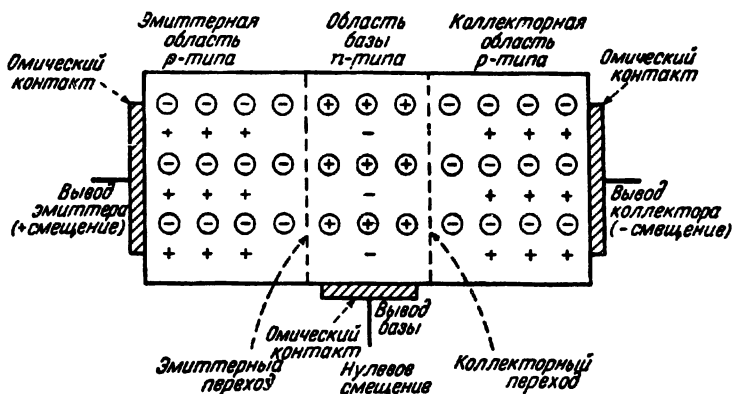
Переход  $p - n$  с прямым смещением будет в этом случае иметь вид перехода между материалами  $n$  и  $p$ , в котором будет существовать уменьшенный или нулевой пространственный заряд. На каждой стороне перехода имеется слой введенных носителей, толщиной слоя на стороне  $n$ -типа будет диффузионная длина дырки (см. стр. 31), а на стороне  $p$ -типа — диффузионная длина электрона.

С помощью введения носителей их плотность может быть увеличена в сотни, если не в несколько тысяч раз по сравнению с ее значением в условиях равновесия. Одинаково увеличиваться будет не только плотность неосновных носителей, но и плотность основных носителей, что необходимо для обеспечения нулевого суммарного заряда в слое и отсутствия пространственного заряда. Таким образом, в слое введенных носителей удельное сопротивление германия значительно понижено; этот эффект носит название *модуляции проводимости*. При проектировании диодов это явление имеет большое значение в том случае, когда требуется получить по возможности минимальное прямое последовательное сопротивление. Эффект модуляции проводимости увеличивает крутизну кривой  $EA$  на фиг. 1.10.

Если диод изготовлен таким образом, что в области  $p$ -типа у него больше введено примесей, чем в области  $n$ -типа, то поток, пересекающий переход при прямом смещении, будет в основном состоять из дырок, движущихся из  $p$ -области, где они имеются в избытке, в  $n$ -область. Наоборот, если примесей больше в  $n$ -области, чем в  $p$ -области, прямой ток будет состоять в основном из электронов. В обоих случаях ток одного какого-либо типа введенных носителей равен полному току, проходящему через диод, что является условием, часто необходимым при проектировании транзисторов.

### ПЛОСКОСТНОЙ ТРАНЗИСТОР

Активный элемент транзистора представляет собой небольшой кусочек монокристалла германия, содержащий две области одного типа проводимости, разделенные тонким слоем с противоположной проводимостью. Существует два основных типа такой структуры:  $p-n-p$  и  $n-p-n$ . Омические контакты подводятся к каждой из областей.



Фиг. 1. 13. Схематическое изображение транзистора с  $p-n-p$ -переходом без смещения.

Когда к коллектору и эмиттеру прикладывают смещения, область коллекторного пространственного заряда расширяется, а область эмиттерного пространственного заряда сокращается до нуля и дырки из области эмиттера вводятся в область базы.

На фиг. 1.13 схематически изображен транзистор  $p-n-p$  и показаны как примеси различных типов, так и свободные носители, появляющиеся в случае нулевого напряжения на выводах. Три области носят название соответственно эмиттера, базы и коллектора. Для получения большего эффекта от введения носителей (см. стр. 41) в реальном транзисторе область эмиттера  $p$ -тип а

всегда имеет больше введенных примесей, чем область  $n$ -типа. Ширина базы должна быть значительно меньше длины диффузии ее неосновных носителей (обычно 25 мк и менее).

Теперь рассмотрим движение носителей в германии в том случае, когда эмиттер имеет положительное смещение, а коллектор — отрицательное (по отношению к базе), как показано на фиг. 1.13. Эмиттерный переход представляет собой диод с прямым смещением и, как уже объяснялось в разделе «Диод с прямым смещением» (стр. 39), он вводит дырки в область базы  $n$ -типа. Большинство дырок диффундирует к коллекторному переходу, который во всех транзисторах должен быть ближе к эмиттерному переходу, чем базовый контакт. Коллекторный переход — это диод с обратным смещением, получающимся при подаче на вывод коллектора отрицательного напряжения. Таким образом, дырки, достигающие коллекторного перехода, «протягиваются» через него существующим в нем полем и становятся основными носителями в  $p$ -области коллектора. В правильно сконструированном транзисторе 95—99% тока, поступающего на эмиттерный переход, вытекает через коллекторный переход, остаток представляет поток, идущий к базовому контакту. Ток поступает в транзистор через эмиттерный переход (с прямым смещением), имеющий низкое сопротивление, примерно равное 50 ом, и выходит через коллекторный переход (с обратным смещением), имеющий высокое сопротивление, равное  $\sim 500\,000$  ом. Таким образом, поскольку мощность равна  $I^2R$ , транзистор дает усиление по мощности, причем избыточная мощность потребляется от источника питания. В этом и заключается работа транзистора.

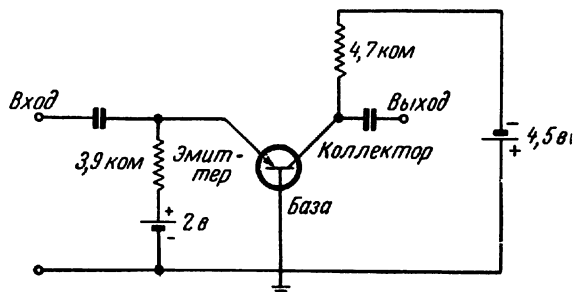
Транзистор в противоположность электронной лампе обладает низким входным сопротивлением, поэтому при изучении транзисторных цепей проще рассматривать ток, чем напряжение.

### ПРОСТАЯ ТРАНЗИСТОРНАЯ ЦЕПЬ

В задачу настоящего раздела не входит описание различных транзисторных схем (см. литературу по этому вопросу). Здесь мы рассмотрим только простую схему усилителя на  $p-n-p$ -транзисторах (фиг. 1.14), чтобы показать, как изложенные выше физические принципы согласуются с работой транзистора в цепи.

Вывод базы транзистора соединен как с эмиттерной, так и с коллекторной батареей смещения, как этого требует теория транзисторов. К эмиттерному выводу приложен положительный потенциал, смещающий эмиттерный переход в прямом направлении. Большое сопротивление, включенное последовательно с батареей, обеспечивает режим питания эмиттера по току. Для того чтобы получить обратное смещение коллекторного перехода, к коллекторному выводу прикладывается отрицательный потенциал. Под влиянием этих

напряжений дырки вводятся через эмиттерный переход в область базы. Большая часть их концентрируется у коллекторного перехода, где имеет место изменение внутреннего сопротивления. На эмиттерный вывод подается слабый сигнал, который модулирует поток дырок, протекающий через эмиттерный переход с малым внутренним сопротивлением. Модулированный поток дырок проходит через коллекторный переход, обладающий большим сопротивлением, и поступает в нагрузочное сопротивление в цепи коллектора. Так как в транзисторе имеет место усиление мощности, то сигнал в нагрузке коллекторной цепи получается усиленным по сравнению



Ф и г. 1. 14. Простая схема, иллюстрирующая работу транзистора с общей базой.

с входным сигналом. Следует отметить, что ток в  $p-n-p$ -транзисторе является преимущественно дырочным, в то время как во внешней цепи носителями тока являются электроны.

Транзистор, изображенный на фиг. 1.14, работает по схеме с общей базой, тогда как в транзисторных схемах большинство транзисторов используется по схеме с общим эмиттером. Параметры транзисторов для этих двух случаев отличаются друг от друга, однако это различие относится только к внешним условиям, работа транзистора в обоих случаях одинакова. Для простоты изложения теория транзисторов обычно рассматривается по схеме с общей базой.

Существенным различием между транзисторами и электронными лампами является наличие транзисторов с противоположными типами проводимости. Можно сделать транзистор типа  $n-p-n$  с характеристиками, аналогичными характеристикам транзистора типа  $p-n-p$ , за исключением того, что при нормальной работе полярности всех напряжений и токов будут обратными. Благодаря этому можно сконструировать много цепей, которые нельзя было бы сделать с электронными лампами (лампа не может работать с отрицательным анодным напряжением).

## ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРОВ

Для правильного проектирования схемы необходимо знать ряд параметров транзистора. Эти параметры имеются в таблицах, составляемых заводами — изготовителями транзисторов. Инженеру-конструктору не обязательно знать физические процессы, объясняющие эти параметры, поскольку транзистор может рассматриваться просто как активный четырехполюсник. Однако чтобы дать общее представление о физических процессах, в настоящей главе излагается упрощенная теория некоторых наиболее важных параметров транзисторов (для германиевого  $p-n-p$ -транзистора с общей базой).

### Усиление по току

Усиление по току  $\alpha$  определяется отношением тока, поступающего в коллектор с постоянным смещением, к общему току эмиттера. В идеальном транзисторе весь ток, протекающий через эмиттер, поступает в коллектор, тогда  $\alpha$  будет равно единице. Практически же часть эмиттерного тока теряется. Хороший транзистор имеет  $\alpha$  в пределах  $0,95 \div 0,99$ .

Величина  $\alpha$  зависит в основном от эффективности эмиттерного перехода и скорости рекомбинации в области базы.

В идеальном эмиттерном переходе весь ток, проходящий через переход, переносится дырками, движущимися в область базы, как описано в разделе «Введение неосновных носителей» (стр. 41). Чем больше примесей в области эмиттера по отношению к области базы, тем ближе эффективность к идеальному случаю. Рекомбинация в области базы определяется качеством кристалла. Поэтому конструктор стремится сделать срок жизни дырок как можно более продолжительным, чтобы максимальное количество введенных (инжектированных) эмиттером дырок могло бы достичь коллектора, не рекомбинируя в пути. Из этого следует, что при прочих равных условиях чем уже база, тем меньше шансов на рекомбинацию дырок и, следовательно, тем выше  $\alpha$ . При больших эмиттерных токах  $\alpha$  начинает падать; это случается тогда, когда число дырок, инжектированных в область базы  $n$ -типа, становится больше числа первоначально находящихся там электронов.

Коэффициент усиления по току  $\alpha$  в цепи с общей базой связан с усилением по току в цепи с общим эмиттером  $\beta$  следующим соотношением:  $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ .

Значения  $\alpha$  и  $\beta$  обычно берутся из таблиц параметров транзисторов.

### Предельная частота

Для сравнения частотных характеристик двух транзисторов обычно используется предельная частота  $f_a$ , определяемая как частота, при которой  $\alpha$  падает до 0,7 от своего значения на низкой частоте. В зависимости от типа транзистора  $f_a$  может иметь значение от нескольких килогерц для низкочастотных до многих сотен меггерц для высокочастотных транзисторов.

Коэффициент  $\alpha$  начинает падать, когда частота входного сигнала становится настолько высокой, что инжектированные дырки не успевают за половину периода пересечь область базы и вместо того, чтобы собраться на коллекторе, протягиваются обратно к эмиттеру. Емкости эмиттерного и коллекторного переходов также могут влиять на частотную характеристику. Первая из них обычно не имеет большого значения, что касается второй, то ее влияние на частотную характеристику транзистора может оказаться весьма существенным благодаря постоянной времени  $\tau = r_b C_c$ , определяемой емкостью коллекторного перехода  $C_c$  и базовым сопротивлением  $r_b$ , включенным последовательно с коллекторной емкостью. Для высокочастотных транзисторов ширина базы,  $r_b$  и  $C_c$  должны быть по возможности минимальными. К сожалению, узкая база и малое  $r_b$  являются противоречивыми требованиями, и, чтобы как-то их совместить, потребовалось внести некоторые изменения в простую структуру транзистора.

### Коллекторный ток утечки

Через отрицательно смещенный коллекторный переход протекает ток даже в том случае, когда эмиттерный ток равен нулю. Этот ток является током насыщения коллекторного диода и, как уже указывалось в разделе «Переход, смещенный в обратном направлении» (стр. 36), создается генерацией неосновных носителей в областях базы и коллектора. В германиевом низкочастотном транзисторе ток  $I_{c0}$  равен примерно 5 мка и очень чувствителен к температуре. Установившийся ток коллектора  $I'_{c0}$  в схеме с общим эмиттером будет больше, чем в схеме с общей базой, вследствие того что ток утечки усиливается транзистором. В этом случае  $I'_{c0} \approx I_{c0}\beta$ .

### Максимальная рассеиваемая мощность

Максимальная мощность, которая может быть рассеяна в любом транзисторе, определяется максимальной температурой, до которой без повреждений можно нагреть коллекторный переход. В рабочем режиме ток в коллекторе состоит из эмиттерного тока и  $I_{c0}$ . Последний быстро возрастает с увеличением температуры и при оп-



ределенном ее значении становится настолько большим, что рассеиваемая мощность значительно увеличивает температуру перехода, что в свою очередь увеличивает  $I_{c0}$  и т. д. Процесс становится нарастающим и может вывести транзистор из строя. Очевидно, чем ниже окружающая температура, тем большая мощность может быть рассеяна без опасности повреждения, так как при нулевом токе переход будет более холодным. Конструктор стремится обеспечить хороший теплообмен между коллектором и корпусом транзистора, чтобы температура перехода была как можно ближе к окружающей температуре. Максимальная рассеиваемая мощность может изменяться в пределах от нескольких десятков милливатт для маломощных транзисторов до многих десятков ватт для мощных.

### Максимальное напряжение на коллекторе

Максимальное напряжение, которое может быть приложено к коллектору, определяется:

- а) рассеиванием мощности на коллекторном переходе;
- б) электрическим пробоем коллекторного диода в результате лавинного эффекта;
- в) сквозным пробоем от коллектора к эмиттеру.

Первый фактор достаточно ясен, так как транзистор должен работать в пределах номинальной мощности, определяемой коллекторным напряжением и током. При малых же эмиттерных токах и комнатной температуре часто становятся определяющими факторы, указанные в пунктах (б) и (в).

Явление пробоя в результате лавинного эффекта, описанное на стр. 38, возникает в коллекторном диоде при напряжении, определяемом главным образом удельным сопротивлением области базы. Когда возникает лавинный эффект, коллекторный ток становится независимым от эмиттерного и работа транзистора прекращается.

Сквозной пробой происходит при расширении области пространственного заряда. В разделе «Переход, смещенный в обратном направлении» (стр. 36) указывалось, что ширина области пространственного заряда является функцией приложенного к диоду обратного напряжения. Коллектор является диодом, смещенным в обратном направлении, и когда напряжение на коллекторе увеличивается, область пространственного заряда расширяется все больше и больше в область базы, до тех пор (при условии, если не возникнет лавинный эффект), пока он не достигнет эмиттерного перехода. В этом случае происходит короткое замыкание эмиттера с коллектором и транзистор перестает работать, однако он не выходит из строя. Сквозной пробой возникает в транзисторах с очень узкой областью базы; если область базы широкая, то обычно до сквозного пробоя возникает лавинный эффект в коллекторе.

### Максимальный ток коллектора

Максимальный ток коллектора определяется требованием, чтобы максимальная рассеиваемая мощность в транзисторе не превышала допустимого значения.

### Максимальные ток и напряжение на эмиттере

В зависимости от типа транзистора и его аксиальной симметрии эти параметры у эмиттера и коллектора могут быть одинаковыми или различными. Обычно они одинаковы для транзисторов сплавного типа, но различны для диффузионных транзисторов (эти транзисторы описываются в гл. 2).

### Емкость коллекторного перехода

Пространственный заряд коллекторного перехода вызывает увеличение емкости, которая, как было сказано выше, может влиять на частотную характеристику транзистора. Емкость пропорциональна площади, занимаемой коллекторным переходом, поэтому в высокочастотных транзисторах эта площадь делается настолько малой, насколько это практически возможно. Величина емкости коллекторного перехода меняется с изменением напряжения на коллекторе и зависит от типа транзистора. Так, например, для коллекторного напряжения 5 в емкость  $C_c$  будет иметь величину приблизительно от 1 пф для высокочастотных до 100 пф и более для мощных транзисторов.

### Шумы

Основой работы транзистора является процесс образования пар дырка — электрон, их движения и рекомбинации. Этот процесс неизбежно сопровождается возникновением шумов. Шум-фактор зависит от типа транзистора и колеблется в пределах примерно от 3 дб для малошумящих плоскостных транзисторов и до 50 дб для точечных.

### Параметры $r$ и $h$

Эти параметры (сопротивления и проводимости частей транзистора) относятся к транзистору как к элементу схемы и здесь не рассматриваются, за исключением двух параметров ( $r_e$  и  $r_c$ ), непосредственно связанных со структурой транзистора. Сопротивление эмиттера  $r_e$  является динамическим сопротивлением эмиттерного диода, смещенного в прямом направлении. Оно зависит от

напряжения на эмиттере, но для слабых сигналов при заданном напряжении смещения имеет достаточно постоянную величину. Коллекторное сопротивление  $r_c$  является динамическим сопротивлением коллекторного диода, смещенного в обратном направлении, и мало чувствительно к изменению напряжения на коллекторе. Полное описание параметров  $r$  и  $h$  приводится в работах, посвященных транзисторным схемам.

### Разброс параметров

Несмотря на значительное улучшение системы контроля за производством транзисторов, при их изготовлении возникает множество отклонений параметров от транзистора к транзистору. Эти отклонения обуславливают разброс параметров для данного определенного типа транзисторов. Большинство изготовителей транзисторов указывает лишь среднее, максимальное и минимальное значения параметров.

### НАКОПЛЕНИЕ ЗАРЯДА

Накопление заряда происходит как в диоде, так и в транзисторе и является фактором, ограничивающим верхний предел скорости их переключения при работе в импульсном режиме.

Рассмотрим плоскостной диод с  $p$ -областью, содержащей большее количество примесей, чем  $n$ -область. Если к  $p$ -области приложить положительный потенциал, то большая часть тока будет переноситься дырками, инжектируемыми в  $n$ -область. Если теперь изменить полярность таким образом, чтобы к  $p$ -области был приложен отрицательный потенциал, то диод не сразу будет иметь высокое сопротивление, поскольку в  $n$ -области будут находиться неосновные носители (дырки). Если эти дырки не рекомбинируют, то они диффундируют обратно в переход, через который они «протягиваются» отрицательным потенциалом и, таким образом, образуют ток, протекающий через диод. Этот ток во много раз больше тока насыщения и уменьшается экспоненциально со временем по мере исчезновения дырок. Задержка во времени переключения (восстановления высокого сопротивления перехода) может вызвать серьезные последствия в случае работы диода на коротких импульсах.

Время задержки диода зависит от условий во внешней цепи и механизма исчезновения неосновных носителей в диоде. Первое находится под контролем разработчика, тогда как второе является свойством, присущим самому диоду. Время задержки переключения является функцией времени жизни неосновных носителей: чем короче срок жизни, тем меньше задержка переключения. Плоскост-

ные диоды, рассчитанные на быстрое переключение, изготавливаются из материала, обладающего очень малым временем жизни.

То же явление наблюдается у эмиттерного диода транзистора, только в этом случае дырки, оставшиеся в области базы, после отключения транзистора диффундируют как к эмиттерному, так и к коллекторному переходу. Таким образом, коллекторный ток продолжает протекать и после выключения смещения эмиттера. К сожалению, накопление дырок в транзисторе не может быть уменьшено путем сокращения их времени жизни в области базы, так как при этом  $\alpha$  тоже уменьшится, что приводит к ухудшению работы транзистора. На практике в цепях, предназначенных для быстрого переключения, используются транзисторы с большим  $f_\alpha$  и, следовательно, с узкой областью базы.

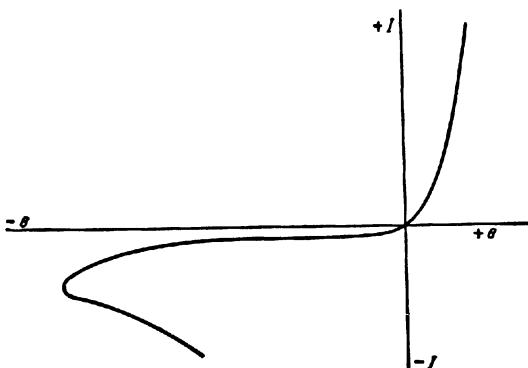
### ТОЧЕЧНОКОНТАКТНЫЕ ДИОДЫ И ТРАНЗИСТОРЫ

Точечноконтактный диод является очень важным полупроводниковым устройством и выпускается в огромном количестве как для коммерческих, так и для военных целей. Однако, несмотря на такое широкое применение, пока еще не существует единой теории по вопросу выпрямления с помощью точечноконтактных полупроводниковых устройств и имеется много затруднений и неясностей, связанных с технологией их изготовления.

В первых конструкциях детекторных приемников в качестве детектора использовался кристалл сульфида свинца с точечным контактом, осуществляемым с помощью стальной пружины. Однако сульфид свинца является труднообрабатываемым материалом, поэтому в настоящее время для изготовления диодов он не используется. Наибольшее применение для этой цели нашли германий и кремний. Германиевые точечноконтактные диоды используются при малых мощностях для выпрямления любых частот вплоть до миллиметрового диапазона. Кремниевые точечноконтактные диоды применяются только в устройствах микроволновой техники.

Точечноконтактный диод представляет собой контакт очень малой площади металла с поверхностью полупроводника. У поверхности имеется слой пространственного заряда, который простирается в кристалл на глубину, приблизительно равную  $10^{-4}$  см. Этот слой имеет выпрямляющие свойства. Инжектирование неосновных носителей происходит при приложении к диоду прямого потенциала. Точечноконтактный диод обладает свойствами, аналогичными свойствам  $p-n$ -перехода. Однако для получения эффективного выпрямления площадь контакта должна быть мала и, кроме того, основную роль в процессах выпрямления играют свойства поверхности полупроводника, недостаточно еще изученные.

Вольтамперная характеристика германиевого точечноконтактного диода дана на фиг. 1.15. Она отличается от характеристики маломощного плоскостного диода большими прямым сопротивлением и обратным током, а также отсутствием области лавинного пробоя и наличием области отрицательного сопротивления. Последнее вызывается явлением теплового пробоя за счет рассеивания избыточной мощности в области контакта весьма малой площади.



Ф и г. 1. 15. Вольтамперная характеристика германиевого точечноконтактного диода.

Работа точечноконтактного транзистора происходит на основе взаимодействия двух точечноконтактных диодов, расположенных на поверхности кристалла в непосредственной близости друг от друга и являющихся один эмиттером, а другой коллектором.

Впервые транзистор, а именно точечный, был разработан в 1948 г. Вскоре он был вытеснен плоскостным транзистором и представляет теперь в основном лишь исторический интерес. Теория точечного транзистора во многом отличается от теории плоскостного транзистора и в настоящей книге не рассматривается.

### НЕКОТОРЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА КРЕМНИЯ

Предыдущие рассуждения касались германиевого транзистора, но они полностью справедливы и в отношении кремниевых транзисторов, поскольку кремний также обладает четырехвалентными электронами. Однако свойства кремния отличаются от свойств германия, причем основным различием является сила сцепления валентных электронов с атомами кремния. Чем прочнее связь электрона с атомом, тем выше должна быть температура (а следовательно, и энергия), необходимая для разрушения этой связи и освобождения

дения электрона. Вследствие этого явление возникновения собственной проводимости в кремнии не наступает до тех пор, пока температура не достигнет примерно  $200^{\circ}\text{C}$ , в то время как для германия с тем же удельным сопротивлением это явление возникает примерно при  $80^{\circ}\text{C}$ . Иными словами, в кремнии при комнатной температуре под действием тепловой энергии образуется гораздо меньше пар электрон — дырка, чем в германии, что является большим преимуществом. Обратный ток насыщения является результатом генерации неосновных носителей в области перехода (см. стр. 37); поэтому при комнатной температуре ток насыщения кремниевого диода будет много меньше тока насыщения германиевого диода, а обратное сопротивление составляет обычно несколько сотен мегом. Ток коллектора также в основном определяется генерацией неосновных носителей и в кремниевом транзисторе имеет очень малую величину; этот ток возрастает с увеличением температуры, но, поскольку у кремниевого транзистора его начальная величина значительно меньше, чем у германиевого, очевидно, что транзисторы, изготовленные из кремния, могут выдерживать более высокие температуры, чем германиевые. Кремниевые транзисторы могут работать при температурах до  $150^{\circ}\text{C}$ , в то время как германиевые — примерно до  $75^{\circ}\text{C}$ .

Может возникнуть вопрос, зачем вообще использовать германий, если кремний имеет такие преимущества? Дело заключается в том, что изготовление кремниевых приборов связано с технологическими трудностями. В настоящее время в технологии изготовления диодов эти трудности в основном преодолены, что же касается кремниевых транзисторов, то здесь используется еще сравнительно отсталая технология и поэтому продукция слишком дорога. По этой причине в настоящее время большая часть плоскостных диодов изготавливается из кремния, а большинство транзисторов — из германия. Очевидно, такое положение долго продолжаться не может и выпуск кремниевых транзисторов, несомненно, превзойдет выпуск германиевых транзисторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория транзисторов, представленная в данной книге, носит описательный характер. Если читатель пожелает более подробно изучить физические принципы работы транзисторов, он может обратиться к целому ряду специальных работ; некоторые из них указаны в прилагаемой литературе. Для начала наиболее подходящей может служить работа [57]<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Из отечественной литературы см. Федотов Я. А., Физика полупроводниковых приборов, Советское радио, 1963.—Прим. ред.

## Глава 2

### ТИПЫ ТРАНЗИСТОРОВ И ДИОДОВ И ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЕ

#### ВВЕДЕНИЕ

Кроме полного описания электрических параметров, в табличных данных по транзисторам и диодам указываются типы приборов, например: «Плоскостной германиевый транзистор с переходами, выполненными путем изменения скорости выращивания кристалла», «Сплавной германиевый транзистор  $p-n-p$ -типа», «Четырехслойный переключающий диод  $p-n-p-n$ -типа» и т. п.

В настоящей главе объясняется значение этих названий на примере описания технологии изготовления различных полупроводниковых приборов.

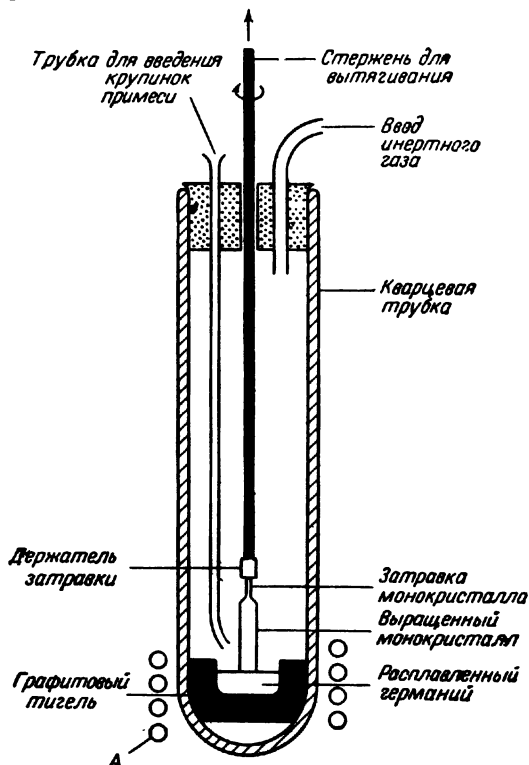
В основу технологии производства транзисторов и диодов заложено три главных процесса: 1) выращивание монокристаллов, 2) сплавление и 3) диффузия.

#### ИЗГОТОВЛЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Германий и кремний, применяемые для изготовления транзисторов, прежде всего тщательно очищаются; затем в них вводятся требуемые примеси необходимой концентрации, после чего из полупроводника выращивается монокристалл.

Германий и кремний обычно добываются с помощью соответствующей химической обработки из своих двуокисей или четыреххлористых соединений. Полученный таким способом полупроводник затем подвергается очистке способом, называемым зонной очисткой. Этот способ основан на том, что многие примеси обладают большей растворимостью, когда полупроводник находится в жидком состоянии. Очистка достигается постепенным перемещением границы затвердевания расплавленной области полупроводника от одного конца бруска к другому. Очищенный материал готов для введения в него примесей и выращивания монокристалла. Выращивание производится обычно в специальной установке, схема которой дана на фиг. 2.1. В тигель помещается расплавленный полупроводник при температуре на несколько градусов выше температуры плавления. Небольшой кусочек монокристалла, называемый затравкой, погружают, вращая, в расплавленный материал и затем медленно вытягивают. При соблюдении правильного температурного

режима на конце затравки наращивается монокристалл, обладающий той же молекулярной структурой, что и затравка. Необходимое для получения нужной концентрации количество примесей добавляется непосредственно в расплавленный полупроводник.



Фиг. 2.1. Схематическое изображение установки для выращивания кристалла.  
А — спираль электрического обогрева.

Интенсивность перехода примесей из расплавленного материала в кристалл может быть изменена путем изменения скорости вытягивания затравки из тигля. Это дает возможность выращивать структуру транзистора в виде монокристалла.

### ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРЕХОДА

Есть два основных метода создания переходов: метод выращивания и контактный метод.

По первому методу изготавливаются: плоскостные транзисторы с переходами, выполненными путем изменения скорости выращи-

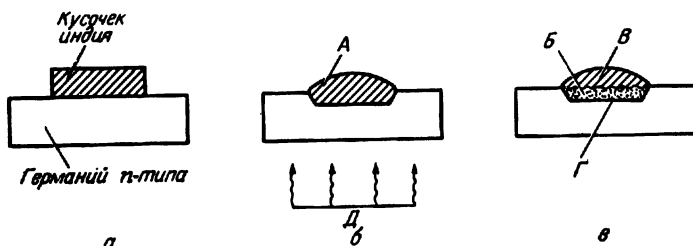


вания кристалла; плоскостные транзисторы, переходы которых образованы диффузией примесей в область, полученную способом выращивания, и плоскостные транзисторы, образованные способом зонной плавки.

Контактным способом изготавливаются сплавные и диффузионные диоды и транзисторы. Ниже кратко описываются основные принципы обоих методов.

### Сплавной переход

Сплавной переход получают из пластинки полупроводника, содержащего необходимое количество примеси, и кусочка материала, представляющего собой противоположный тип примеси. Так, например, пластина может быть из германия  $n$ -типа, а сплавной материал — из чистого индия (примесь  $p$ -типа). Индий плотно прижимают к германиевой пластинке, как показано на фиг. 2.2. Это



Фиг. 2.2. Стадии изготовления сплавного перехода.

$a$  — первоначальная стадия — наложение кусочка индия на германиевую пластинку;  $б$  — подогрев в присутствии инертного газа;  $в$  — образование  $p$ — $n$ -перехода при остывании.

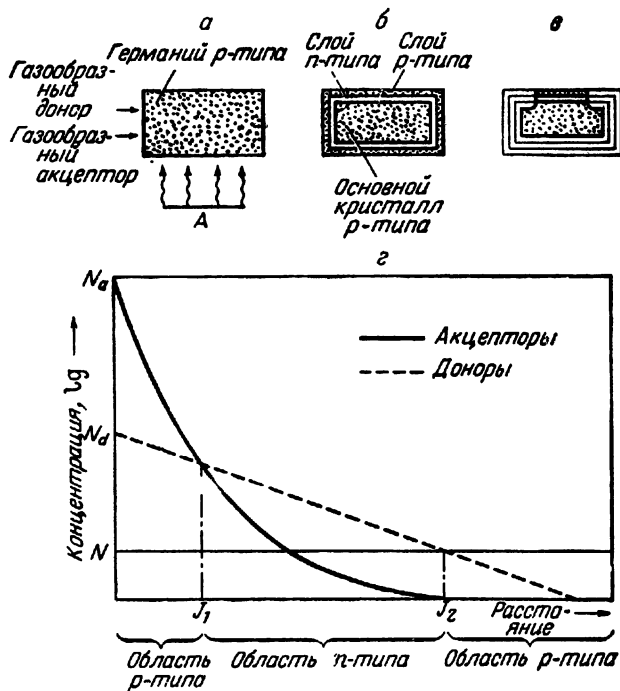
$A$  — индиево-германиевый сплав;  $B$  — рекристаллизованный германий  $p$ -типа;  $B$  — индий;  $Г$  —  $p$ — $n$ -переход;  $Д$  — подача тепла.

соединение затем нагревают в течение нескольких минут примерно до  $500^{\circ}\text{C}$  в соответствующей печи, пока индий не расплавится и не растворит некоторую часть германия. При охлаждении сплав индия с германием вновь кристаллизуется, при этом германий с большим количеством примеси индия осаждается на границе с германиевым основанием. Кристаллизующийся вновь германий имеет ту же молекулярную структуру, что и основной кристалл. Таким образом,  $p$  —  $n$ -переход образуется между содержащим большое количество примесей германием  $p$ -типа и пластинкой германия  $n$ -типа.

Глубина расположения перехода зависит от массы сплавляемого индия и температуры сплавления, при этом должно быть обеспечено достижение равновесия фаз за необходимое время (порядка нескольких минут).

## Диффузионный переход

Процесс диффузии заключается в том, что при нагревании пластинки полупроводника и элементов примеси в одном общем сосуде до температуры несколько ниже (но почти равной) температуры плавления полупроводника атомы примеси диффундируют



Фиг. 2. 3. Стадии диффузионного процесса.

а — нагрев германия в герметизированном сосуде в присутствии донорной и акцепторной примесей, например бора и фосфора в газообразном состоянии; б — диффузионные слои после двойной диффузии; в — селективное травление кристалла, способствующее образованию мезоструктуры, необходимой для изготовления транзистора; г — градиенты концентрации доноров и акцепторов, введенных в германий *p*-типа методом диффузии. А — обогрев.

в него; при остывании непосредственно под поверхностным слоем образуется *p* — *n*-переход. Концентрация диффундирующей примеси понижается по мере удаления от поверхности. Наличие градиента концентрации примесей улучшает как высокочастотные свойства транзисторов, изготовленных этим способом, так и их усиление по току.

Если в качестве примеси использовался один элемент, то пластинка будет пригодна для изготовления диффузионного диода или транзистора с диффузионной базой. Если же используется два элемента с германиевой пластинкой, то, поскольку донорные элементы быстрее диффундируют, чем акцепторные, получается структура  $p - n - p$ -типа, как показано на фиг. 2.3.

Если вместо германиевых использовать кремниевые пластинки, то, как правило, акцепторные элементы будут диффундировать быстрее донорных, и в результате получится структура  $n - p - n$ -типа. Распределение диффундировавших доноров и акцепторов в германии  $p$ -типа показано на фиг. 2.3. Компенсация примесей приводит к образованию двух  $p - n$ -переходов ( $J_1$  и  $J_2$ ). Диффузия является сравнительно медленным процессом; так, например, если в качестве примеси использовать фосфор, то для образования диффузионного слоя (6 ом) толщиной 15 мк в кремнии  $p$ -типа, нагретого до 1150° С, потребуется 15 час, при этом, зная исходные данные, можно точно регулировать глубину диффузии.

После окончания цикла диффузии пластинка подвергается селективному травлению для получения структуры либо транзистора, либо диода.

### Переходы, полученные добавлением примесей в плавку во время выращивания кристалла

Переходы типа  $p - n$  могут быть получены в устройстве для выращивания кристаллов путем введения в расплавленный материал во время цикла выращивания некоторого количества примеси, достаточного для того, чтобы изменить тип его проводимости. Если этот процесс повторить, то можно получить второй переход рядом с первым, что даст образование структуры  $n - p - n$ - или  $p - n - p$ -типа. Эта процедура носит название двойного введения примеси. Стержень затем разрезается на части, каждая из которых становится транзистором при соответствующем присоединении выводов. В гл. I излагалась теория именно такой структуры транзисторов.

Процесс образования перехода диффузией примесей в область, полученную способом выращивания, применяется чаще, чем вышеописанный. Процесс начинается с выращивания кристалла, в который введено количество примеси, достаточное для получения требуемого коллекторного удельного сопротивления. Донорные и акцепторные элементы добавляются в кристалл в процессе цикла выращивания одновременно. Однако оба типа примесей обладают различными скоростями диффузии, и, следовательно, одна из них диффундирует обратно в выращиваемый кристалл, образуя узкую область базы с градиентом примеси. Наличие градиента концентрации примеси улучшает высокочастотные свойства транзистора.

Стержень, содержащий  $p-n-p$  или  $n-p-n$ -переходы, образованные диффузией примесей в область, полученную способом выращивания, затем разрезается на части, каждая из которых является транзистором.

Процесс получения переходов путем *изменения скорости выращивания кристалла* используется для изготовления германиевых транзисторов. Расплавленный германий, находящийся в тигле, в начале процесса содержит как донорные, так и акцепторные примеси. Донорная примесь очень чувствительна к скорости выращивания, так что ее концентрация в кристалле меняется с изменением условий выращивания. В процессе выращивания подогрев тигля выключается и кристалл начинает расти очень быстро. Затем подогрев включается вновь, при этом процесс выращивания прекращается и кристалл начинает плавиться. Вслед за этим подогрев снова отключается, и, так как германий остывает, процесс плавления прекращается, кристалл снова начинает расти. В момент, когда скорость выращивания равна нулю, акцепторная примесь будет преобладать и в поперечном сечении кристалла образуется узкая область  $p$ -типа. Процесс может быть повторен несколько раз, при этом в монокристалле образуется многократная  $n-p-n$ -структура. Затем стержень разрезается, и в этом случае также получают отдельные транзисторы.

### Эпитаксиальное выращивание переходов

Новейшим методом образования  $p-n$ -переходов является метод эпитаксиального выращивания [84—87].

Эпитаксиальный рост кристалла происходит в том случае, когда материал нагревается до температуры несколько ниже его точки плавления в присутствии паров этого же материала. Часть паров осаждается на кристалл и продолжает его образование, причем кристалл растет за счет расхода его паров. Так, например, атомы, добавляемые к растущему кристаллу германия, получают из паров двуокисного германия в соответствии с обратимым соотношением



Подобная же реакция имеет место и у кремния. Реакция протекает в вакуумной трубке, содержащей на одном конце элементарный йод и германиевый «источник», а на противоположном конце — германиевый кристалл, «затравку». Трубку подогревается таким образом, чтобы температура у «источника» была  $550^\circ\text{C}$ , а у «затравки»  $400^\circ\text{C}$ . При этих условиях происходит вышеупомянутая реакция, и германиевый кристалл растет эпитаксиально на затравке со скоростью, равной примерно 100 мк в день.

Выращенный слой может быть *n*- или *p*-типа в зависимости от того, какая примесь введена в «источник» или помещена в виде соответствующего материала в трубку, в которой происходит реакция. Примеси осаждаются на затравке вместе с германием, и концентрация их может регулироваться.

Основным преимуществом этого метода по сравнению с другими является то, что выращенные на затравке соответствующие слои *n*- и *p*-типа германия могут быть любой толщины и обладать требуемым удельным сопротивлением и что градиент удельного сопротивления в выращенном слое можно регулировать. Кроме того относительно низкая температура затравки позволяет использовать маски для осаждения германия на требуемом участке пластинки кристалла. Диоды и транзисторы, выращенные эпитаксиальным методом, выпускаются промышленностью.

### НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В дальнейшем изложении о каждом полупроводниковом приборе приводятся следующие данные:

- 1) схематическое изображение поперечного сечения активной части транзистора или диода;
- 2) конструктивные особенности;
- 3) принцип действия;
- 4) наиболее характерные электрические свойства;
- 5) применение.

Поскольку при любом из описанных выше методов изготовления можно получить электрические свойства, изменяющиеся в широких пределах, в книге не приводятся развернутые электрические характеристики. Однако там, где это возможно, делаются ссылки на номер какого-либо выпускаемого промышленностью транзистора, который может быть принят за образец. Ссылки на литературу даются только в том случае, когда речь идет о приборах, еще находящихся в стадии разработки и не запущенных в промышленное производство.

Объем активного элемента маломощного диода или транзистора обычно бывает не более  $10 \text{ мм}^3$  ( $5 \times 2 \times 1 \text{ мм}$ ). Причем размеры любого устройства определяются габаритами корпуса, а активный элемент занимает лишь незначительную часть общего объема. Детали устройства транзисторов и диодов были в основном взяты из имеющейся по этому вопросу специальной литературы. Во многих случаях заданный прибор можно получить различными путями, и деталильные элементы конструкции зависят от изготовителя.

Заготовки полупроводника могут быть получены различными способами. Обычно монокристалл разрезается диском с алмазной крошкой; полученные пластинки затем обрабатываются до требуе-

мой толщины. Заготовки полупроводника, или галеты, отрезаются одним из следующих способов: 1) ультразвуком; 2) алмазом; 3) движущейся проволочкой с карборундовым покрытием; 4) диском с алмазной крошкой.

В приведенных ниже описаниях не упоминаются процессы травления, но оно тем не менее играет очень важную роль в технологии изготовления диодов и транзисторов. Как правило, полупроводники предварительно всегда протравливают кислотой, а готовое изделие протравливают с целью очистки до его герметизации. Большое значение имеет также промывка деталей. Существенным является то, что полупроводниковые приборы изготавливаются в условиях абсолютной чистоты, при тщательном контроле состава окружающих газов.

### ТОЧЕЧНОКОНТАКТНЫЕ ДИОДЫ

Точечноконтактный диод состоит из заостренной проволочки, прижатой к поверхности маленькой полупроводниковой галеты. Галета припаяна к латунному штифтику, как показано на фиг. 2. 4.



Фиг. 2. 4. Точечноконтактный диод.

Как в германиевых, так и в кремниевых диодах обычно применяется вольфрамовая проволочка. Конструкция корпуса зависит от частоты, на которой должен работать диод. Корпус может быть изготовлен из стекла, металла или керамики. Германиевые галеты перед употреблением подвергаются химическому травлению, а кремниевые галеты — различным видам термообработки для улучшения их высокочастотных свойств.

Как упоминалось в гл. 1, работа точечноконтактного диода основана на использовании свойств области, прилегающей к контакту.

Германиевые точечноконтактные диоды применяются для работы вплоть до диапазона миллиметровых волн (более 30 Гц) и имеют хорошие переключающие свойства. При использовании на звуковых и видеочастотах пиковое обратное напряжение может достичь 150 в. Кремниевые точечноконтактные диоды применяются только в технике с. в. ч.

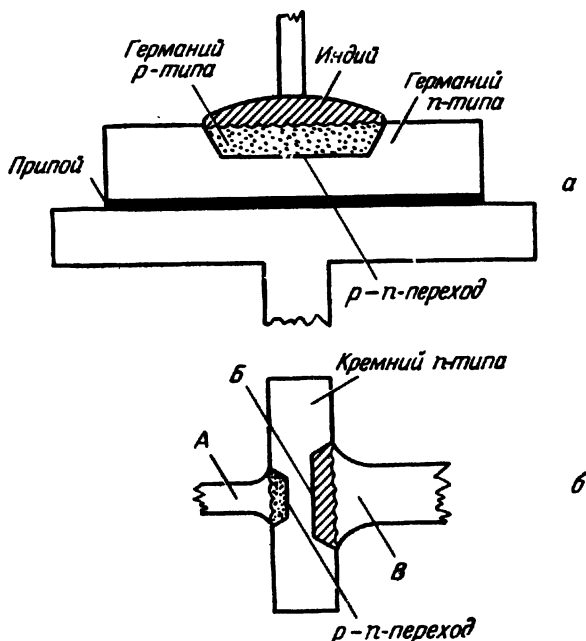
Промышленностью выпускается большое количество точечноконтактных диодов, как кремниевых, так и германиевых; представителем этого типа может служить диод CV448.

### ДИОДЫ СО СПЛАВНЫМ ПЕРЕХОДОМ

Как видно из фиг. 2, 5, имеется два основных способа изготовления диодов со сплавным переходом:

а) метод сплавления кусочка материала примеси в галету, описанный на стр. 55 (фиг. 2.2);

б) метод соединения галеты с проволоочкой из материала примеси.



Фиг. 2. 5. Конструкции диодов со сплавными переходами.

A — проволока из алюминия или золота (акцепторный элемент);

B — n-n<sup>+</sup>-переход; B — золотая проволока (дворный элемент).

Первый метод применяется в случае изготовления германиевых диодов, используемых для управления энергией повышенной мощности. Второй употребляется для маломощных кремниевых схемных диодов. При осуществлении второго метода галета и две прижатые к ней проволоки различного диаметра нагреваются в инертном газе; при этом в месте контакта с тонкой (0,127 мм) проволокой образуется p — n-переход, а в месте контакта с более

толстой (0,254 мм) проволокой — невыпрямляющий переход  $n - n^+$ .

Переход типа  $n - n^+$  или  $p - p^+$  образуется в кристалле в месте соединения двух областей с различными концентрациями примесей и одинаковым типом проводимости и используется для получения невыпрямляющего контакта, в котором отсутствует инжекция носителей. Такое соединение используется для осуществления контакта с базой диода или транзистора.

Мощные германиевые и кремниевые диоды со сплавным переходом могут быть изготовлены для выпрямления токов свыше 100 а при соответствующих условиях работы. Для кремниевых диодов максимальное обратное напряжение может быть равно нескольким тысячам вольт, и обычно их выпрямляющие свойства ухудшаются при частотах более 5 Мгц.

Промышленностью выпускается большой ассортимент кремниевых сплавных диодов. В продаже имеются также германиевые сплавные диоды для переключающих цепей и устройств большой мощности; представителем этого типа диодов служит ZS10(Ferranti).

### ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЕ ДИОДЫ СО СПЛАВНЫМ ПЕРЕХОДОМ

К этому типу относится кремниевый диод, предназначенный для быстрого переключения. Его конструкция идентична показанной на фиг. 2.5, б. Единственная разница заключается в том, что в данном случае до сборки кремний подвергается термической обработке.

Термический удар, испытанный кремнием, вызывает напряжения и смещения в кристаллической решетке. Как уже говорилось в гл. 1, различные дефекты в кристалле и тепловое воздействие являются местами рекомбинирования неосновных носителей. По этой причине время жизни неосновных носителей значительно укорачивается и их накопление уменьшается.

Хотя благодаря термической обработке и получается диод с малым накоплением заряда, подобная обработка приводит к ухудшению вольтамперной характеристики. По сравнению с необработанным диодом обратный ток насыщения увеличивается, а прямой ток уменьшается. Эффективность выпрямления у таких диодов составляет 40% при 45 Мгц и остается еще заметной при 100 Мгц. Время переключения соответственно быстрое. Обратное напряжение может достигать 100 в, а максимальная мощность рассеивания 150 мвт. Такие кремниевые диоды выпускаются промышленностью; их представителем может служить тип G.E.C.SX 781.

### ДИОД ЗЕНЕРА

Диоды Зенера, или диоды опорного напряжения, имеют те же параметры конструктивных деталей, что и сплавные диоды, опи-



санные выше, за исключением удельного сопротивления кремния, величина которого должна обеспечивать низкое пробивное напряжение диода (см. гл. 1).

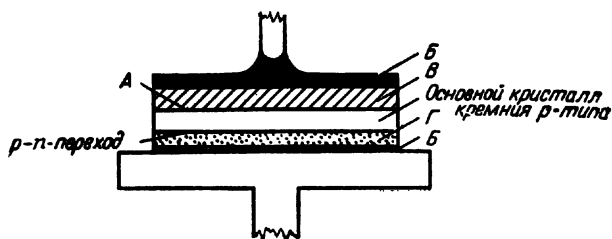
Описываемые диоды обычно имеют напряжение Зенера 4—15 в. В таких пределах это напряжение относительно мало зависит от температуры (при напряжении около 6 в температурный коэффициент приблизительно равен нулю).

Динамическое сопротивление диода в области пробоя изменяется в зависимости от напряжения Зенера  $V_z$  и равно примерно 20 ом при  $V_z = 3$  в, падая до минимума (около 5 ом) при  $V_z = 6$  в и увеличиваясь снова примерно до 20 ом при  $V_z = 15$  в. Очевидно, точные значения этих величин зависят также и от площади перехода.

Промышленностью выпускается большое количество диодов Зенера, различных по мощности и напряжению; представителем этих диодов может служить тип ВТ-HVR35-В.

### ДИФфуЗИОННЫЙ ДИОД

Диффузионные диоды являются главным образом мощными приборами, так как метод диффузии более всего пригоден для получения больших площадей переходов, которые могут сравнительно легко охлаждаться. На фиг. 2.6 показан возможный вариант такого кремниевого диода  $n$ -типа. На брусок кремния  $n$ -типа диффузионным



Фиг. 2. 6. Диод с диффузионным переходом.

А —  $n-n^+$ -переход; Б — слой припоя на металлическом покрытии; В — диффузионный слой  $n^+$ ; Г — диффузионный слой  $p$

способом наносится фосфор. Фосфор пятивалентен и образует  $n-n^+$ -переход между диффузионным слоем и исходным кристаллом, причем слой покрывает весь брусок. На другую сторону, являющуюся основанием, методом диффузии наносится бор. Бор трехвалентен и образует на поверхности основания диффузионный слой  $p$ -типа. Этот слой, однако, не может воздействовать на образованный прежде диффузионный слой  $n^+$ -типа, так как его покрывает слой окиси. Брусок подвергается травлению, металлизирован и распиливается на загостовки требуемой величины (площадь около

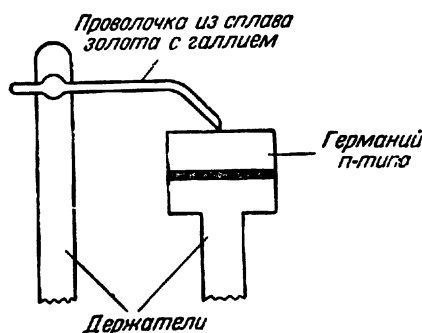
5 мм<sup>2</sup>). К обеим сторонам заготовки припаивают выводы, затем все устройство целиком очищают методом травления и герметизируют.

Мощность, которую может рассеивать диффузионный диод, определяется площадью перехода, сопротивлением областей вне перехода и эффективностью теплоотвода. Практически возможные максимальные токи достигают 100 а и более. Конструкция диффузионных диодов часто монтируется непосредственно на теплоотводящую поверхность (с помощью болтовых соединений).

Диффузионные кремниевые диоды выпускаются промышленностью; представителем их может служить тип ZR40 (Ferranti).

### ДИОД С ЗОЛОТЫМ КОНТАКТОМ

Диод с золотым контактом представляет собой быстродействующий германиевый диод с малой площадью контакта, конструкция которого аналогична конструкции точечноконтактного диода.



Фиг. 2. 7. Диод с золотым контактом.

Заостренную проволоку из сплава золота с 1% галлия плотно прижимают к протравленной поверхности заготовки германия *n*-типа, как показано на фиг. 2.7. Через контакт один или несколько раз пропускают импульсы тока, при этом заостренный конец проволоки вплавляется в германий, образуя *p* — *n*-переход очень малой площади.

Галлий служит акцепторной примесью и образует после перекристаллизации расплавленной области германий *p*-типа.

Процесс является в основном циклом быстрого сплавления.

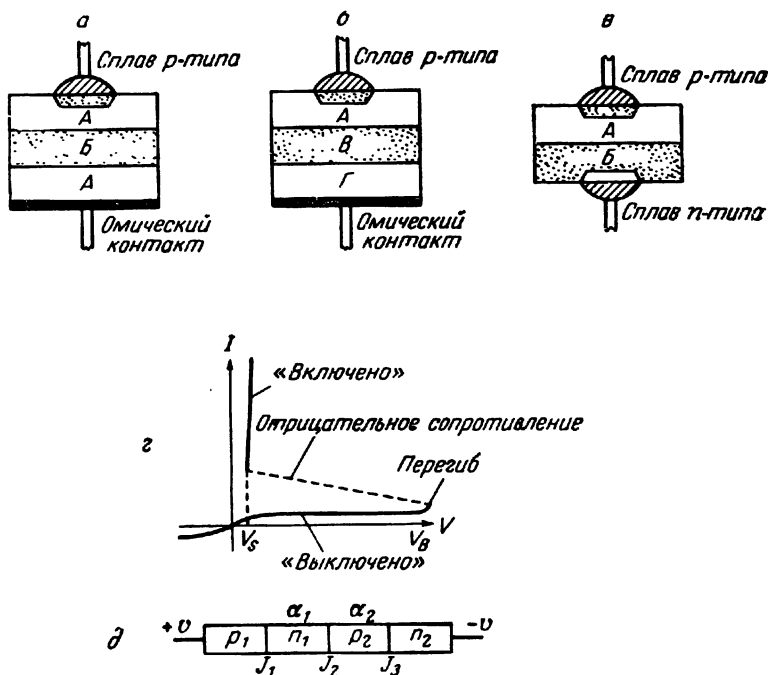
Эти диоды применяются для случаев быстрого переключения. Величина обратного напряжения достигает 100 в. Чем ниже напряжение, тем быстрее срабатывает диод.

Диоды с золотым контактом выпускаются промышленностью; представителем их может служить тип OA5 (Mullard).

### ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЙ ДИОД *p* — *n* — *p* — *n*-ТИПА

Диод *p* — *n* — *p* — *n*-типа представляет собой кремниевый прибор с тремя переходами. Несколько способов изготовления такого устройства показано на фиг. 2.8, *a*—*в*. Как видно из фиг. 2.8, *г*, их вольтамперная характеристика аналогична вольтамперной характеристике тиратрона.

Теория работы диода довольно сложна. Когда к диоду приложено малое напряжение, как показано на схеме фиг. 2.8, д, переход  $J_1$  имеет прямое смещение и инжектирует дырки в  $n_1$ ; переход  $J_3$  также имеет прямое смещение, но инжектирует электроны в  $p_2$ . И те и другие — неосновные носители и будут собираться  $J_2$ -переходом, имеющим обратное смещение.



Фиг. 2. 8. Переключающие диоды  $p-n-p-n$ -типа.

$a, б$  и  $в$  — возможные варианты;  $г$  — вольтамперная характеристика диода  $p-n-p-n$ -типа;  $д$  — схематическое изображение диода  $p-n-p-n$ -типа.  $A$  — диффузионный слой  $n$ -типа;  $B$  — основной кристалл  $p$ -типа;  $Г$  — основной кристалл  $n$ -типа.

У кремниевых транзисторов обнаружено, что низкие коэффициенты усиления по току  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , соответствующие областям  $n_1$  и  $p_1$ , увеличиваются с возрастанием тока в этих областях. Переход  $J_2$ , кроме того, при высоких обратных напряжениях имеет средний коэффициент лавинного эффекта  $M$ , зависящий от приложенного напряжения, что является характерным для перехода с обратным смещением. Эти изменения  $\alpha$  с возрастанием тока и увеличение  $M$  с повышением напряжения и являются факторами, определяющими вид кривой вольтамперной характеристики. Характеристику диода, схе-

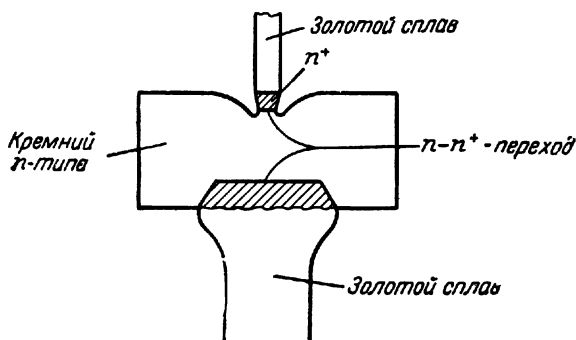
матически изображенную на фиг. 2.8, *з*, можно разделить на четыре основных участка: 1 — участок высокого внутреннего сопротивления, или участок «выключено», когда  $J_2$  имеет обратное смещение; 2 — участок перегиба, где величина  $(\alpha_1 + \alpha_2)M$  порядка единицы; 3 — участок отрицательного сопротивления и 4 — участок низкого внутреннего сопротивления, или участок «включено», когда величина  $(\alpha_1 + \alpha_2)$  равна или больше единицы.

Их свойства изменяются в зависимости от конструкции, но за основу можно взять следующие величины: сопротивление «выключено» составляет приблизительно  $10^7$  ом, сопротивление «включено» 10 ом, пробивное напряжение до 400 в, «остаточное» напряжение (на включенном диоде) примерно 0,7 в и время переключения меньше 1 мксек.

Кремниевые  $p-n-p$ -переключающие диоды на различных рабочих мощностях изготавливаются промышленностью.

### $n-n^+$ -ЛАВИННЫЙ ДИОД

Этот диод [65] имеет характеристики, аналогичные характеристикам диода  $p-n-p$ -типа, но отличается тем, что у него нет  $p-n$ -перехода. Как показано на фиг. 2.9, он содержит два



Фиг. 2.9. Лавинный диод  $n-n^+$ -типа.

$n-n^+$ -перехода. Переход большой площади является базовым контактом, а у перехода малой площади имеет место лавинный эффект. Оба диода изготовлены путем сплавления золотой проволоки, содержащей необходимое количество примеси с германием или кремнием, и травления тонкого проволочного контакта до диаметра 0,05 мм.

Путь от базы к  $n-n^+$ -переходу имеет малое сечение, и сопротивление полупроводника может быть равно нескольким десяткам килоом. Переход типа  $n-n^+$  имеет прямое смещение по отношению

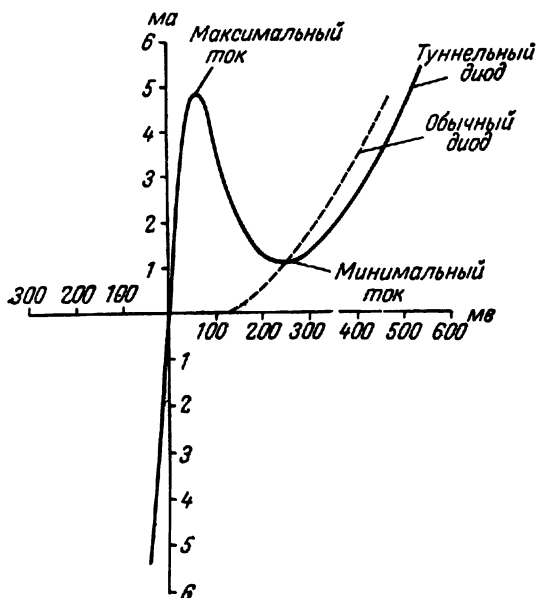
к базе. При низких напряжениях сопротивление диода будет большим, и этот режим называется состоянием «выключено». При увеличении напряжения до критического происходит лавинный пробой  $n-n^+$ -перехода (см. гл. 1) и возникает поток пар электрон — дырка. Дырки проникают из перехода в материал  $n$ -типа, вызывая модуляцию проводимости. Сопротивление диода резко уменьшается. Этот режим называется состоянием «включено».

Лавинные диоды обладают большими скоростями переключения, чем  $p-n-p$ -диоды, но вольтамперные характеристики у них хуже.

Описываемые диоды находятся в стадии исследования и промышленностью не выпускаются.

### ТУННЕЛЬНЫЙ ДИОД

Туннельный диод — это диод с  $p-n$ -переходом, имеющий участок отрицательного сопротивления на прямой ветви характеристики. Он изготавливается методом сплавления, причем основное



Ф и г. 2. 10. Вольтамперная характеристика туннельного диода.

требование состоит в том, чтобы полупроводник по обе стороны перехода имел достаточно большую концентрацию примесей. Для этой

цели, кроме германия, можно использовать и другие полупроводники, например арсенид галлия.

Работа туннельного диода зависит от эффекта Зенера. Чем больше концентрация примеси на каждой из сторон перехода, тем ниже обратное напряжение, при котором имеет место пробой Зенера, и у материалов с очень большой концентрацией примеси он имеет место даже при небольших прямых смещениях. Однако с увеличением прямого напряжения снижается внутреннее поле перехода, поэтому при больших прямых напряжениях эффект Зенера не будет иметь места, а получается обычная прямая ветвь характеристики. Диод имеет отрицательное сопротивление в интервале перехода от области эффекта Зенера к области нормальной прямой проводимости, в результате на характеристике появляются точки максимального и минимального значений тока, как видно из фиг. 2.10. Максимальный ток зависит от площади контакта. Область пространственного заряда перехода очень мала ( $\sim 150 \text{ \AA}$ ), следовательно, емкость диода будет недопустимо велика ( $\sim 5 \text{ мкф}$  на  $1 \text{ см}^2$ ), если не принять мер к уменьшению площади перехода.

Туннельные диоды обладают низким полным сопротивлением; их отрицательное сопротивление имеет обычно величину в пределах  $10\text{--}100 \text{ ом}$ . Эти приборы используются для целей усиления при частотах в диапазоне гигагерц и применяются как быстродействующие переключающие устройства. Вследствие высокой концентрации примесей в полупроводнике туннельные диоды относительно мало чувствительны к окружающим климатическим условиям, температуре и радиации.

Туннельные диоды выпускаются промышленностью; представителем их может служить тип 1K11A (S. T. & C.).

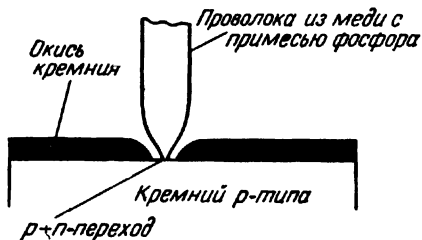
### ОКСИДИРОВАННЫЙ КРЕМНИЕВЫЙ ДИОД

Это быстродействующий кремниевый плоскостной диод [61], имеющий конструкцию, одинаковую с точечноконтактным диодом (фиг. 2.4). Он является плоскостным диодом с малой площадью перехода и изготавливается следующим образом: кремниевая пластинка подвергается окислению до образования на ее поверхности окрашенного в синий цвет слоя двуоксида кремния, являющегося изолятором. Проволоку с очень тонким острием, содержащую примесь, противоположную по типу примеси в кремниевой пластинке, прижимают к оксидному слою. (Для кремниевой пластинки  $p$ -типа пригодна проволока из меди с примесью фосфора.) Чтобы прорвать оксидный слой и сплавить точечный контакт с кремниевой пластинкой, нужно разрядить через это соединение конденсатор, заряженный примерно до  $50 \text{ в}$ . В результате такой операции получается  $p-n$

переход очень малой площади. Область перехода показана на фиг. 2.11.

К этому типу диодов применима обычная теория плоскостного диода с  $p-n$ -переходом. Однако вопрос о том, какое воздействие оксидный слой оказывает на образование перехода, еще полностью не изучен. Без этого слоя плоскостной диод не получается и характеристика его будет аналогична характеристике посредственного точечноконтактного диода.

Оксидированный кремниевый диод обладает физическими свойствами точечноконтактного диода и электрическими свойствами плоскостного диода с  $p-n$ -переходом. Обратное пробивное напряжение может достигать 300 в. Однако прямое сопротивление



Фиг. 2. 11. Оксидированный кремниевый диод.

велико и достигает более 100 ом при 1 в, что объясняется очень малой площадью перехода. Диод имеет достаточно хорошие высокочастотные свойства, и при работе на частоте 45 Мгц можно получить к. п. д. выпрямления, равный 50%.

Описываемый диод проходит стадию исследования и для широкого применения промышленностью не изготавливается.

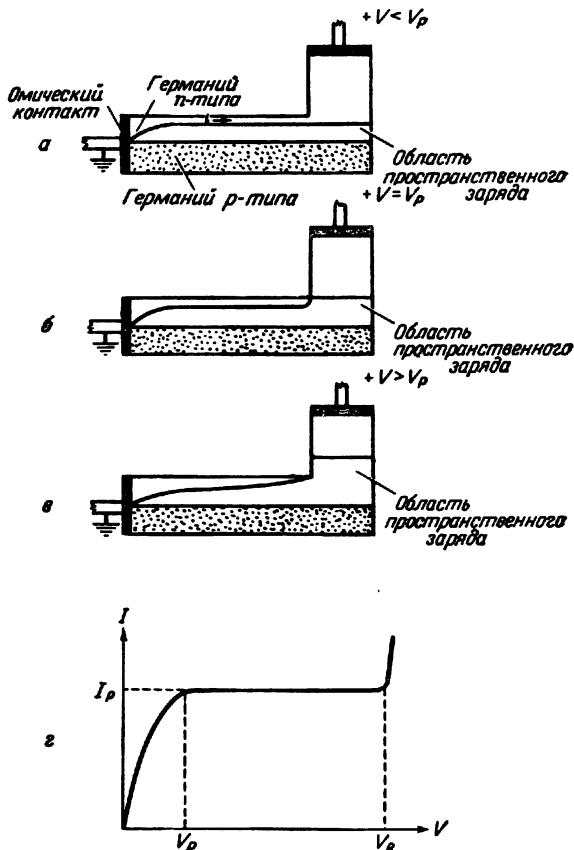
### ДИОД — ОГРАНИЧИТЕЛЬ ТОКА

Подобно диоду Зенера, представляющему собой регулятор напряжения, таким же необходимым элементом цепи является полупроводниковый регулятор тока.

Одно такое устройство, называемое варистором, было описано Вернером [76]. L-образная пластинка германия имеет омические контакты на обоих концах, как показано на фиг. 2.12. Вдоль более длинного плеча имеется  $p-n$ -переход. Существуют также и другие варианты структуры. Как видно из вольтамперной характеристики варистора (фиг. 2.12), при напряжении запираения  $V_p$  ток  $I_p$  достигает насыщения и остается постоянным при возрастании напряжения вплоть до пробивного значения  $V_s$ .

Варистор является одним из представителей класса однополюсных устройств. Большая концентрация примеси в  $p^+$ -области обеспечивает смещение запирающего слоя или пространственного заряда в основном в  $n$ -область с малой концентрацией примеси. Между двумя омическими контактами прикладывается напряжение  $V$ , и переход получает обратное смещение. Когда  $V$  меньше  $V_p$ , пространственный

заряд не распространяется по всему сечению пластинки и ток течет по каналу  $n$ -типа. Когда  $V = V_p$ , пространственный заряд распространяется до поверхности образца и ток становится независимым от



Ф и г. 2. 12. Схематическое изображение диода—ограничителя тока.

На схемах а, б и в указано расположение пространственного заряда для случаев:  $V < V_p$ ;  $V = V_p$  и  $V > V_p$  соответственно; г—вольтамперная характеристика диода—ограничителя тока.

напряжения. Для напряжений, больших  $V_p$ , пространственный заряд продолжает распространяться в изогнутую часть  $n$ -области до тех пор, пока напряжение не достигнет такой большой величины  $V_{в}$ , при которой произойдет пробой  $p-n$ -перехода.

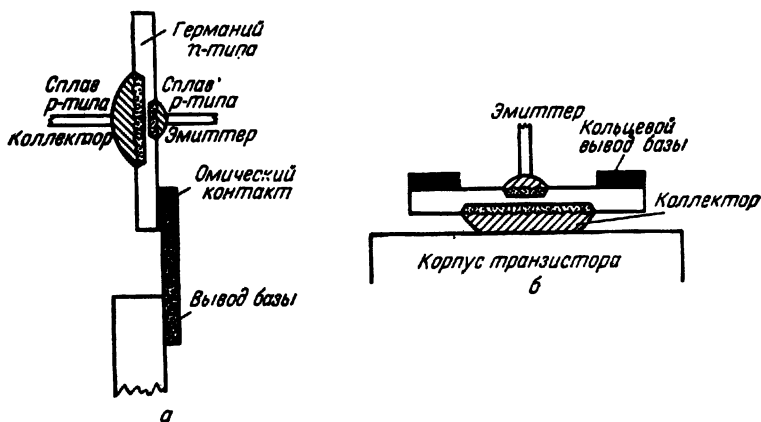


В идеальном ограничителе тока  $V_p$  должно быть малым, а  $I_p$  — большим. Проводимые в настоящее время исследования направлены на то, чтобы снизить величину  $V_p$  до величины менее 5 в;  $I_p$  равно  $\sim 5$  ма. Начальное сопротивление описанного выше варистора равно  $\sim 200$  ом, а в области насыщения была достигнута величина динамического сопротивления, равная 20 Мом.

Диоды—ограничители тока все еще находятся в стадии исследования и в массовое производство не поступали. Для их изготовления применяется как германий, так и кремний.

### СПЛАВНОЙ ТРАНЗИСТОР

Сплавной транзистор является наиболее распространенным типом транзисторов. Маломощный транзистор, показанный на фиг. 2.13, а, состоит из тонкой германиевой галеты  $n$ -типа, в которую вплавлены две капли индия и никелевый вывод. Вплавление



Фиг. 2. 13. Структуры транзистора со сплавным переходом.  
а — маломощный транзистор; б — мощный транзистор.

можно выполнять либо последовательно, либо все три вывода могут быть вплавлены одновременно. Диаметр коллекторного перехода примерно в 2—3 раза больше эмиттерного. Никелевый вывод и тонкие проволочки от индиевых капель припаиваются к соответствующим держателям на ножке транзистора. Некоторые конструкции выполняются с кольцевым выводом с базы, окружающим эмиттерную каплю. Мощные транзисторы (фиг. 2.13, б) изготавливаются по тому же принципу, только капля, представляющая собой коллектор, значительно больше, чем у маломощных транзисторов, и припаивается непосредственно к корпусу для получения более

эффективного теплоотвода. Мощные транзисторы изготавливаются также и другой конфигурации.

В описываемом транзисторе дырки диффундируют радиально относительно эмиттерного перехода, и чем больше коллекторный переход, тем больше дырок будет на нем собираться и тем больше будет усиление по току. Соотношение диаметров 3:1 вполне соответствует эффективному накоплению. Граничная частота усиления сплавного транзистора определяется шириной базы между эмиттерным и коллекторным переходами, коллекторной емкостью и базовым сопротивлением. Однако сам процесс сплавления затрудняет получение ширины базы меньше  $\sim 5 \text{ мк}$ , что дает  $f_a \approx 15 \text{ Мгц}$  при оптимальных условиях.

Метод сплавления применим для изготовления разнообразных транзисторов — от маломощных (25 *вт*) и высокочастотных (15 *Мгц*) до мощных ( $> 5 \text{ вт}$ ) и низкочастотных (500 *Кгц*). Сплавные транзисторы обладают малым запирающим напряжением и поэтому особенно пригодны для переключающих схем.

Имеется много различных типов сплавных транзисторов. Наиболее распространенные типы — это германиевые  $p - n - p$ -транзисторы, но изготавливаются также германиевые  $n - p - n$ - и кремниевые  $n - p - n$ - и  $p - n - p$ -транзисторы. Сплавные транзисторы являются наиболее дешевыми; представителем их может служить V10/50A (Newmarket).

### СИММЕТРИЧНЫЙ СПЛАВНОЙ ТРАНЗИСТОР

Этот транзистор не имеет никаких принципиальных конструктивных отличий от сплавного транзистора, изображенного на фиг. 2.13, *а*, единственной особенностью является то, что оба перехода имеют строго одинаковую площадь.

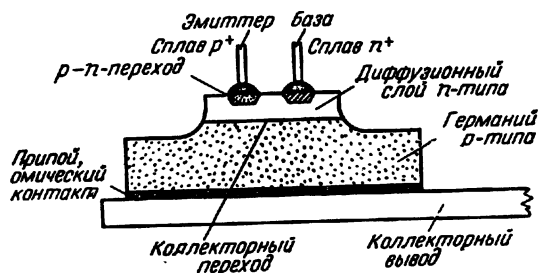
Поскольку площади симметричных переходов одинаковы, то не имеет значения, какой из контактов будет считаться эмиттером. Это свойство используется в некоторых переключающих цепях. Граничная частота таких транзисторов может достигать более 10 *Мгц*, что позволяет использовать их также в качестве усилителей промежуточной и высокой частоты.

Представителем этого типа транзисторов, выпускаемых промышленностью, может служить ТК25В (S. T. & C.).

### ТРАНЗИСТОР С ДИФфуЗИОННОЙ БАЗОЙ

Диффузионные методы изготовления применяются для транзисторов, используемых на сверхвысоких частотах (с. в. ч.). Транзистор с диффузионной базой изготавливается однократной диффузией, например мышьяка, в германиевую галету  $p$ -типа. Эмиттерный и

базовый контакты представляют собой тонкие полоски примерно  $0,025 \times 0,075$  мм, нанесенные на поверхность способом вакуумного напыления через соответствующий шаблон и затем вплавленные в диффузионный слой  $n$ -типа. Материалы эмиттера и базы подбираются так, чтобы образовались  $p-n$  и  $n-n^+$ -переходы соответственно. Высокочастотный транзистор с диффузионной базой  $p-n$ -типа изображен на фиг. 2.14. Расстояние между эмиттерным и коллекторным переходами у приборов с очень высокой частотой равняется всего нескольким микронам. Заделку эмиттерного и базового выводов можно производить с помощью термокомпрессии.



Ф и г. 2. 14 а. Транзистор с диффузионной базой.

Для уменьшения последовательного сопротивления галеты делают возможно тоньше (обычно 0,125 мм). Вместо базы-полоски можно применять кольцевую базу.

Вследствие диффузии в области базы создается градиент концентрации примесей, образующий внутреннее поле, которое способствует переносу дырок от эмиттера к коллектору. Этот эффект и узкая база являются двумя необходимыми условиями для высокочастотных транзисторов. Благодаря градиенту концентрации транзистор обладает низкой коллекторной емкостью, и в нем имеет место значительное распространение коллекторного пространственного заряда через базу даже при низких напряжениях. Это значительно сужает ширину базы и ставит граничную частоту в большую зависимость от коллекторного напряжения при низких его значениях. Обратное пробивное напряжение эмиттерного диода мало (обычно 2 в) из-за большой концентрации по обе стороны перехода. Низкое пробивное напряжение вообще характерно для транзисторов, изготовленных методом диффузии.

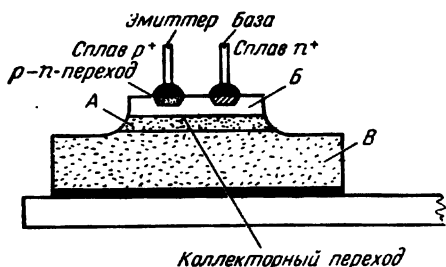
Граничная частота этих транзисторов может превышать 500 Мгц. Коллекторная емкость составляет менее 0,5 пф. Последовательное сопротивление коллектора превышает 100 ом и обуславливает высокое запирающее напряжение. Однако все эти свойства плюс низкое эмиттерное пробивное напряжение значительно ухудшают

характеристики переключения. Коллектор описываемого транзистора легко охлаждать, поэтому допустима работа при относительно больших мощностях.

Транзисторы с диффузионной базой можно изготавливать как из германия, так и из кремния. Германиевые  $p-n-p$ -транзисторы выпускаются промышленностью, например 2N1142 (Texas Instrument).

### ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ ТРАНЗИСТОР С ДИФФУЗИОННОЙ БАЗОЙ

Структура эпитаксиального высокочастотного транзистора с диффузионной базой показана на фиг. 2.14 б. Слой, обладающий большим удельным сопротивлением, наращивается эпитаксиально (стр. 58) на основе, обладающей низким удельным сопротивлением. Область базы создается обычным диффузионным методом, а контактные выводы базы и эмиттера образуются с помощью вакуумного напыления и сплавления.



Фиг. 2. 14 б. Эпитаксиальный транзистор с диффузионной базой.

А — эпитаксиальный слой  $p$ -типа с большим удельным сопротивлением; Б — диффузионный слой  $n$ -типа; В — основной германий  $p$ -типа с низким удельным сопротивлением.

Описанная выше структура позволяет использовать низкое объемное сопротивление тела полупроводника, что способствует понижению последовательного коллекторного сопротивления и увеличению скорости переключения (уменьшению накопления заряда), а эпитаксиальный слой, обладающий большим удельным сопротивлением, способствует понижению коллекторной емкости.

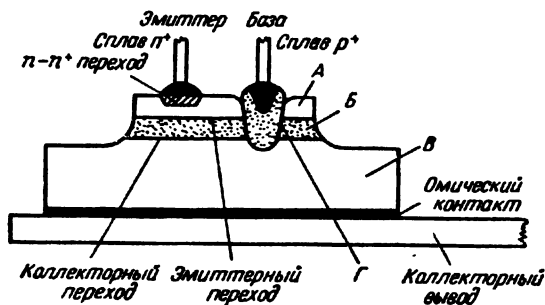
По сравнению с ранее описанным транзистором с диффузионной базой эти транзисторы обладают более коротким временем накопления, более низким напряжением насыщения и уменьшенной коллекторной емкостью.

Эпитаксиальные  $p-n-p$ -транзисторы с диффузионной базой выпускаются промышленностью, например SYL-230 (Sylvania).

### ТРАНЗИСТОР С ДИФФУЗИОННЫМ ЭМИТТЕРОМ И ДИФФУЗИОННОЙ БАЗОЙ

Для изготовления высокочастотных транзисторов этого типа применяется метод двойной диффузии, описанный на стр. 56. Для

кремниевого  $n-p-n$ -прибора, показанного на фиг. 2.15 а, в качестве диффундирующих материалов пригодны фосфор и бор. При правильно выбранном режиме бор диффундирует глубже фосфора, и поэтому при одновременной диффузии в галете образуются области  $n$ - и  $p$ -типа. После этого наносятся контакты эмиттера и базы. Эмиттерный контакт представляет собой  $n-n^+$ -переход на поверхности эмиттерного слоя  $n$ -типа. Большой по величине базовый контакт содержит примесь типа  $p^+$  и проходит через оба слоя. После



Фиг. 2.15 а. Транзистор с диффузионным эмиттером и диффузионной базой.

А — слой  $n$ ; Б — слой  $p$ ; В — кремний  $n$ -типа; Г —  $p-p^+$ -переход.

травления между эмиттером и исходным кристаллом коллектора образуются  $p-n$ -переходы, обладающие высоким сопротивлением, а с базовым слоем образуется  $p-p^+$ -переход, обладающий малым сопротивлением. Затем область вокруг контактов подвергается травлению. Транзисторы с диффузионной базой и диффузионным эмиттером можно сделать и другими способами. Например, диффузия может быть последовательной, а не одновременной, и с помощью метода наложения шаблона базовый слой может быть выведен на часть поверхности высокочастотной структуры. В этом случае легче производить подсоединение к области базы. В процессе производства на одной кремниевой галете делается одновременно большое количество транзисторов, а затем она разрезается на части.

Ширина области базы равна всего нескольким микронам, градиент концентрации примеси в ней такой же, как у транзистора, образованного однократной диффузией. Градиент концентрации обуславливает низкую коллекторную емкость.

Граничная частота как кремниевых, так и германиевых устройств более 100 МГц, а коллекторная емкость меньше 0,5 пф. Большое коллекторное последовательное сопротивление ограничивает возмож-



### ТРАНЗИСТОР, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ МЕТОДОМ «ДИФфуЗИИ НАРУЖУ»

Этот германиевый  $n - p - n$ -транзистор с диффузионными эмиттером и базой, описанный в работе [70], по своей структуре аналогичен транзистору, изображенному на фиг. 2.15 а. Разница заключается в том, что базовый слой  $p$ -типа образован диффузией из кристалла наружу, тогда как эмиттерный слой  $n$ -типа образуется обычным методом диффузии из паровой фазы внутрь кристалла. «Диффузия наружу» осуществляется с помощью нагрева компенсированного германиевого кристалла  $n$ -типа, при этом быстрее диффундирующие доноры оставляют поверхность, а медленнее диффундирующие акцепторы образуют слой  $p$ -типа на основном кристалле  $n$ -типа.

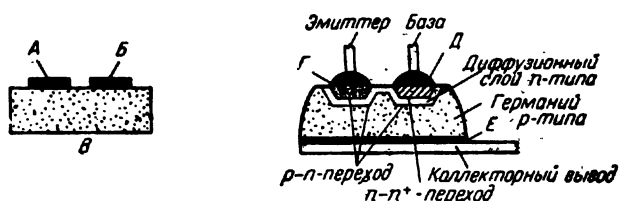
По-видимому, применяя метод диффузии наружу, можно лучше регулировать градиент удельного сопротивления в базовом слое.

Предполагается, что эти транзисторы будут иметь хорошие характеристики переключения при граничной частоте более 200 Мгц.

Возможность массового изготовления транзисторов, образованных «диффузией наружу», находится в стадии изучения.

### СПЛАВНОЙ ДИФфуЗИОННЫЙ ТРАНЗИСТОР

Если в течение цикла сплавления поддерживать высокую температуру, то произойдет диффузия из расплавленного сплава. На этом явлении основан сплавной диффузионный процесс, применяемый для изготовления высокочастотных транзисторов. Две пластинки накладывают на германиевую галету  $p$ -типа, как показано на фиг. 2.16. Эмиттерная пластинка содержит как донорную, так и



Фиг. 2. 16. Сплавной диффузионный транзистор.

А — пластинка, содержащая примеси  $p$ - и  $n$ -типа; Б — пластинка с примесью  $n$ -типа; В — галета  $p$ -типа; Г — перекристаллизованная область  $p^+$ ; Д — перекристаллизованная область  $n^+$ ; Е —  $p - p^+$ -контакт.

акцепторную примесь, а базовая — только донорные примеси. Затем эта сборка подогревается и выдерживается при постоянной температуре до тех пор, пока не произойдет сплавление и частичная диффузия. Акцепторы в эмиттерной пластинке не диффундируют на большую глубину, в то время как более быстро диффундирующие

доноры образуют слой  $n$ -типа под обоими контактами и в пространстве между ними (последнее через газовую среду). При охлаждении вновь кристаллизующийся слой под эмиттером будет  $p$ -типа, так как акцепторы в перекристаллизованном германии легче растворимы, чем доноры, и, следовательно, образуется  $p - n$ -переход. Перекристаллизованный слой под базовым контактом образует с базовым слоем  $n - n^+$ -переход; ширина области базы может быть уменьшена до 5  $\mu\text{к}$ . Для удаления лишних участков диффузионного слоя применяется селективное травление.

При этом процессе в базовом слое образуется градиент концентрации примесей, вследствие чего возникает электрическое поле ускорения (или дрейфа) носителей. Благодаря специфике самого процесса площадь коллекторного перехода будет больше, чем у диффузионного транзистора; следовательно, емкость коллектора также будет больше.

Граничная частота может изменяться в пределах 100—200  $\text{Мгц}$ . Коллекторная емкость равна  $\sim 2 \text{ пф}$ . Максимальное обратное эмиттерное напряжение равно  $\sim 4 \text{ в}$ , а коллекторное  $\sim 50 \text{ в}$ . Последовательное сопротивление коллектора велико, что значительно ухудшает нижний участок характеристики.

Высокочастотные сплавные диффузионные транзисторы  $p - n - p$ -типа, изготовленные из германия, выпускаются промышленностью. Представителем их может служить тип ОС 171 (Mullard). Теоретически возможны и кремниевые устройства  $n - p - n$ -типа.

### ДИФФУЗИОННЫЙ СПЛАВНОЙ, ИЛИ ДРЕЙФОВЫЙ, ТРАНЗИСТОР

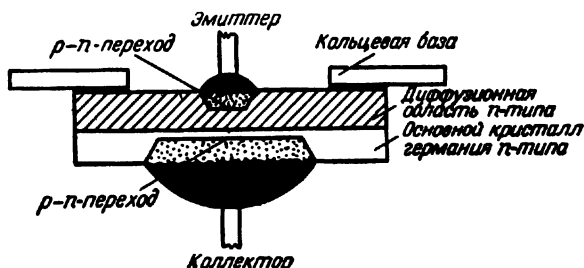
Диффузионный сплавной транзистор, или, как его еще называют, дрейфовый транзистор, отличается от стандартного сплавного транзистора только тем, что имеет на пластине со стороны эмиттера диффузионный слой, как показано на фиг. 2.17. Исходный кристалл является почти чистым германием  $n$ -типа, и диффузионный слой  $n$ -типа обеспечивает постепенное увеличение концентрации доноров от коллекторного к эмиттерному  $p - n$ -переходу.

Плавный градиент концентрации примесей в базе обеспечивает возникновение электрического поля, ускоряющего неосновные носители, а также уменьшение коллекторной емкости.

Общая ширина базы равна примерно 12,7  $\mu\text{к}$  — такая же, как у хорошего сплавного транзистора, однако благодаря наличию градиента концентрации в базе диффузионный сплавной транзистор обладает более высокой максимальной рабочей частотой. Считается, что среднее значение граничной частоты транзистора в промышленном изготовлении равно 30  $\text{Мгц}$ , хотя экспериментальным путем было достигнуто 90  $\text{Мгц}$ .



Германиевые диффузионные сплавные транзисторы  $p-n-p$ -типа производятся для широкой продажи. Представителем этого

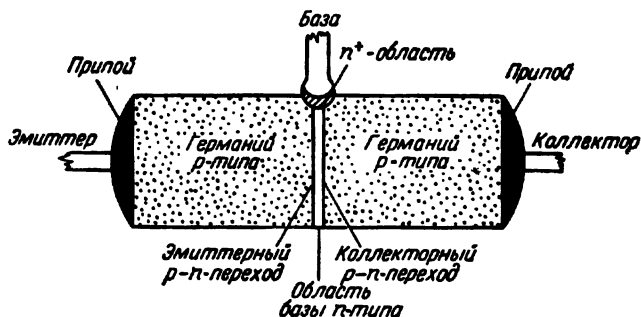


Фиг. 2.17. Диффузионный сплавной транзистор.

типа транзисторов может служить тип AP11 (Associated Transistors). Теоретически возможны  $n-p-n$ -германиевые и  $p-n-p$ - и  $n-p-n$ -кремниевые устройства.

### ТРАНЗИСТОР С ПЕРЕХОДОМ, ОБРАЗОВАННЫМ ДВОЙНЫМ ВВЕДЕНИЕМ ПРИМЕСИ В ПРОЦЕССЕ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛА

Метод выращивания транзисторов двойным введением примеси был описан на стр. 57. К полученному таким способом крошечному брусочку размерами примерно  $2,5 \times 0,25 \times 0,25$  мм приделывают



Фиг. 2. 18. Диффузионный транзистор, полученный методом выращивания.

омические контакты, как показано на фиг. 2.18. Сравнительно легко припаивать контакты к областям эмиттера и коллектора, тогда как подсоединение к узкой (обычно 1 мк) области базы требует большой, тщательности. Место перехода определяется электрическим способом, и после того, как оно найдено, к брусочку припаивается тоненькая

проволочка таким образом, чтобы она перекрывала место перехода. Проволочка содержит примесь того же типа, что и база, и образует контакт малого сопротивления с областью базы и  $p-n$ -переходы с эмиттерной и коллекторной областями. Концентрация примеси в области базы постоянна. После сборки все устройство подвергается очистке травлением и монтируется на держателе.

Транзисторы с переходом, полученным в процессе выращивания кристалла, могут иметь граничную частоту более 10 Мгц и находят применение в схемах, работающих на звуковых и промежуточных частотах. Они не применяются для целей переключения, так как обладают слишком большим запирающим напряжением.

В настоящее время метод двойного введения примесей считается устаревшим, однако кремниевые устройства  $n-p-n$ -типа все еще выпускаются промышленностью.

### **ДИФфуЗИОННЫЙ ТРАНЗИСТОР, ПОЛУЧЕННЫЙ МЕТОДОМ ВЫРАЩИВАНИЯ**

Такой транзистор предназначен для усиления высокой частоты. Процесс его образования заключается в дифференцированной диффузии примесей в процессе выращивания кристалла обратно в область базы; этот процесс был описан на стр. 74. Конструкция транзистора аналогична конструкции, показанной на фиг. 2.18.

Область базы с постепенно изменяющейся концентрацией примеси обеспечивает лучшие высокочастотные свойства, чем те, которые можно получить, применяя транзисторы, образованные двойным введением примесей.

Граничная частота кремниевого диффузионного транзистора, полученного методом выращивания, может достигать 70 Мгц. Разница между максимальным обратным напряжением эмиттера ( $\sim 1$  в) и максимальным коллекторным напряжением ( $\sim 50$  в) очень велика и характерна для транзисторов, имеющих базу с постепенно изменяющейся концентрацией примеси. Коллекторная емкость равна примерно 1,5 пф.

Германиевые  $p-n-p$ -типа и кремниевые  $n-p-n$ -типа диффузионные транзисторы, полученные методом вытягивания, выпускаются промышленностью; представителем может служить тип 2N335 (Texas Instrument).

### **ТРАНЗИСТОР С ПЕРЕХОДАМИ, ВЫПОЛНЕННЫМИ СПОСОБОМ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛА**

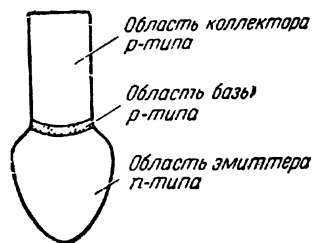
По своей конструкции этот транзистор аналогичен изображенному на фиг. 2.18. Процесс, основанный на изменении скорости выращивания, был описан на стр. 57.

С помощью этого метода получается транзистор с базой, имеющей плавно изменяющуюся концентрацию примесей, следовательно, с хорошими высокочастотными свойствами.

Граничная частота применяемых в промышленности транзисторов этого типа равна примерно 10 Мгц. Максимальное коллекторное напряжение составляет  $\sim 25$  в, а максимальное обратное эмиттерное напряжение равно  $\sim 5$  в. Коллекторная емкость равна  $\sim 2,5$  пф. Германиевые плоскостные транзисторы  $n - p - n$ -типа с переходами, выполненными путем изменения скорости выращивания кристалла, выпускаются промышленностью для широкой продажи; представителем этого типа транзисторов может служить тип 2N167 (General Electric).

### ПЛОСКОСТНОЙ ТРАНЗИСТОР, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ СПОСОБОМ ЗОННОЙ ПЛАВКИ

Транзисторы этого типа изготавливаются методом образования переходов в процессе выращивания кристалла. При этом используются миниатюрные брусочки (примерно  $2,5 \times 0,25 \times 0,25$  мм). В германий вводятся как донорные, так и акцепторные примеси. Конец брусочка нагревают с помощью маленькой спирали накаливания. Кончик плавится и образует грушевидную каплю, удерживающуюся силой поверхностного натяжения. Скорость осаждения доноров и акцепторов в капле различна, поэтому, когда после прекращения нагревания расплавленная капля вновь кристаллизуется, между жидкой и твердой фазами остается тонкий слой  $p$ -типа. На фиг. 2.19 показан полупроводниковый элемент после образования перехода. Выводы подсоединяются ко всем трем областям точно так же, как у транзистора с переходом, образованным в процессе выращивания кристалла.



Фиг. 2. 19. Полупроводниковый элемент плоскостного транзистора, изготовленного способом зонной плавки.

Этим методом удастся получить базу с плавным изменением концентрации примеси, следовательно, транзистор обладает хорошими высокочастотными свойствами.

Описываемые транзисторы пригодны для усиления и обладают свойствами, аналогичными свойствам диффузионных транзисторов, полученных методом выращивания.

Германиевые транзисторы  $n - p - n$ -типа, полученные методом зонной плавки, выпускаются промышленностью; представителем их может служить тип 2N1289.

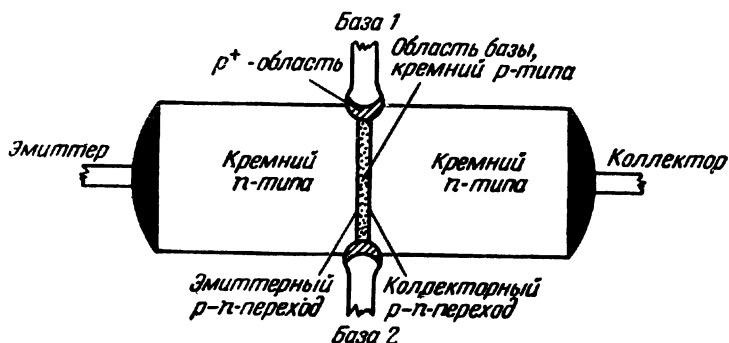
### ДИФфуЗИОННЫЙ ТРАНЗИСТОР, ПОЛУЧЕННЫЙ СПОСОБОМ ЗОННОЙ ПЛАВКИ

Этот транзистор получен тем же способом зонной плавки, как и описанный выше, но при повышенной продолжительности цикла нагрева. При этом в течение более длительного нагрева происходит диффузия примеси в область базы, что приводит к дальнейшему улучшению высокочастотных свойств.

Германиевые ( $p-n-p$ -типа) и кремниевые ( $n-p-n$ -типа) диффузионные транзисторы, полученные методом зонной плавки, изготавливаются промышленностью.

### ПЛОСКОСТНОЙ ТЕТРОД

Плоскостной тетрод представляет собой высокочастотный усилитель. Он состоит из плоскостного транзистора, полученного методом выращивания кристалла, с двумя базовыми выводами, по одному с каждой стороны полупроводникового элемента (фиг. 2.20). Образование перехода в процессе выращивания можно осуществить с помощью любого из описанных выше методов.



Ф и г. 2. 20. Плоскостной транзистор, полученный методом выращивания кристалла.

Второй вывод базы служит для улучшения высокочастотной характеристики плоскостного транзистора, полученного методом выращивания. В рабочем состоянии к базовым выводам прикладывается потенциал, который способствует тому, что эмиттер, обычно имеющий прямое смещение, становится обратным смещенным почти по всей площади, за исключением небольшого участка вблизи одного из базовых выводов. Это делается для того, чтобы уменьшить площадь поперечного сечения рабочей области транзистора. Иначе говоря, для того чтобы уменьшить сопротивление полупроводника базы

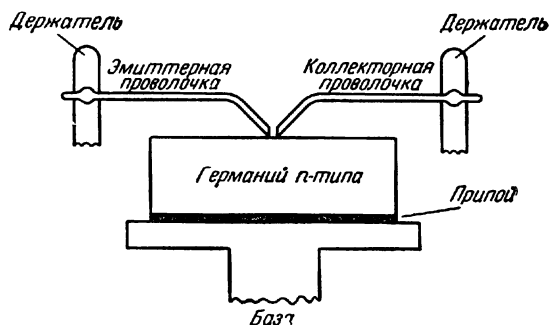
(параметр, наиболее вредно влияющий на высокочастотные свойства) и коллекторную емкость. Такая конструкция дает возможность получить транзистор с очень малым поперечным сечением рабочей области при достаточно больших габаритах полупроводникового элемента.

Плоскостные тетроды выпускаются с граничными частотами до 150 Мгц. Благодаря особенностям работы тетрода базовое сопротивление уменьшается от  $\sim 300$  до 50 ом и менее. Коллекторная емкость равна  $\sim 2$  пф. Сила тока между базами составляет  $\sim 1$  ма.

В промышленности применяются как германиевые, так и кремниевые плоскостные тетроды  $n - p - n$ -типа; представителем этих тетродов может служить тип 3N35 (Texas Instrument).

### ТОЧЕЧНОКОНТАКТНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Точечноконтактный транзистор состоит из двух заостренных проволочек, прижатых к протравленной поверхности германиевой галеты, как показано на фиг. 2.21. Расстояние между проволочками должно быть минимальным, практически около 50 мк. Проволочка



Ф и г. 2. 21. Точечноконтактный транзистор.

представляющая собой коллектор, должна содержать примеси того же типа, что и германий. Так, например, для  $n$ -типа германия берется проволочка из фосфористой меди. Эмиттерная проволочка очень часто берется из того же материала, что и коллектор, хотя в идеальном случае она должна содержать примесь типа, противоположного тому, который содержится в германии. После сборки устройства коллекторная проволочка подвергается формирующей обработке с целью увеличения усиления транзистора по току. Формирующая обработка является пока еще необъяснимым процессом, заключающимся в пропускании одного или нескольких сильных импульсов тока между коллектором и базой или эмиттером.

Описываемый транзистор является поверхностно-контактным транзистором, теория действия которого еще недостаточно изучена. В области под зондом коллектора может быть образована как  $n - n^+$ , так и  $n - p - n$ -структура. Обе эти структуры теоретически способны обеспечить усиление по току, превышающее единицу, при условии, что площадь контакта очень мала.

Преимуществом точечноконтактного транзистора является то, что он может обеспечить большое усиление по току (обычно 3), поэтому это устройство пригодно для применения в цепях переключения. Обратный ток коллектора равен  $\sim 150$  мка, в то время как у плоскостного транзистора он равен 5 мка и меньше. Граничная частота обычно равна 1—5 Мгц, а напряжение на коллекторе составляет  $\sim 50$  в.

Германиевые точечноконтактные транзисторы  $n$ -типа выпускаются промышленностью; их представителем может служить тип 2N110 (Western Electric).

### ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Это устройство является высокочастотным поверхностно-контактным транзистором. Тонкая  $n$ -типа германиевая галета припаивается к кольцевой базе. Тонкие струйки электролита, направленные на поверхность галеты с обеих сторон, образуют в ней с помощью электрохимического воздействия углубления, как показано на фиг. 2.22. (Этот процесс носит название струйного травления.) Затем, снова с помощью тонких струй электролита, в углубления гальваническим способом наносится слой индия. Таким способом образуются эмиттерный и коллекторный контакты. Выводы металлизированных участков выполняются из тонких провололок.

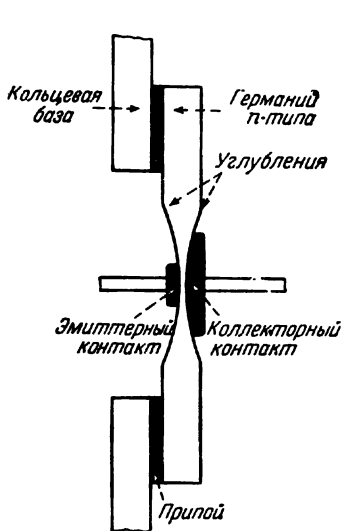
Хотя поверхностно-барьерный транзистор и является транзистором того же типа, что и точечноконтактный, однако площади контактов у него больше и нанесены они на свежеработанные поверхности. Благодаря этому его свойства будут аналогичны свойствам плоскостного  $p - n$ -транзистора и, что самое главное, его усиление по току не будет превышать единицу. Описанный технологический процесс дает возможность получать очень узкие базы и маленькие площади эмиттерного и коллекторного контактов (обычно диаметром 57 мк), что обеспечивает достаточно хорошие высокочастотные свойства этих транзисторов.

Их максимальная рабочая частота достигает  $\sim 40$  Мгц; однако их максимальное коллекторное напряжение (не более 5 в) и максимальное рассеяние мощности на коллекторе ( $\sim 25$  мвт) сравнительно малы. Эти транзисторы используются для работы на высоких частотах и для целей переключения.

Германиевые поверхностно-барьерные транзисторы  $p-n-p$ -типа выпускаются промышленностью; представителем их может служить тип SB344 (Semiconductors Ltd.).

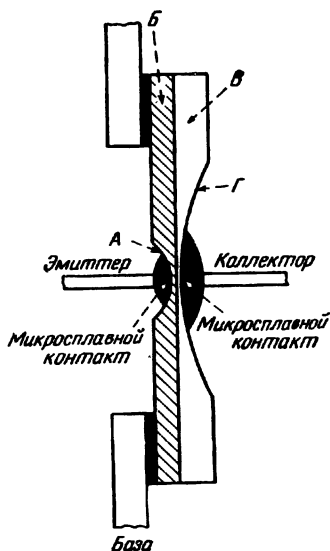
### МИКРОСПЛАВНОЙ ТРАНЗИСТОР

Этот транзистор по своей конструкции аналогичен поверхностно-барьерному транзистору, изображенному на фиг. 2.22. Разница заключается в том, что у микросплавного транзистора активный



Фиг. 2.22. Поверхностно-барьерный транзистор.

Эмиттерный и коллекторный контакты нанесены гальваническим способом; углубления сделаны электрохимическим способом.



Фиг. 2.23. Микросплавной транзистор.

А — неглубокая выемка; Б — диффузионный слой  $p^+$ ; В — германий  $p$ -типа с большим удельным сопротивлением; Г — глубокая впадина, сделанная с помощью травления.

элемент подвергается циклу нагревания, благодаря чему гальванизированные контакты сплавляются с германием. Поскольку объем гальванизированного металла очень мал, переход получается очень неглубокий — менее  $0,25 \text{ мк}$  от поверхности.

С помощью микросплавного метода получается обычный сплавной транзистор. Однако расположенные очень близко друг к другу эмиттерный и коллекторный переходы малой площади обеспечивают улучшенную частотную характеристику.

Германиевые и кремниевые микросплавные  $p - n - p$ -транзисторы выпускаются для широкой продажи; представителем их может служить тип МА393 (Semiconductors Ltd.).

Максимально достижимая рабочая частота составляет около 60 Мгц. Максимальное коллекторное напряжение равно  $\sim 5$  в, а максимальное рассеяние мощности около 50 мвт (при 25° С). Транзистор пригоден для работы на высокой частоте и для целей переключения.

### МИКРОСПЛАВНОЙ ДИФфуЗИОННЫЙ ТРАНЗИСТОР

Этот транзистор является усовершенствованным микросплавным транзистором. Усовершенствование заключается в том, что германий предварительно подвергается диффузии с целью получения диффузионного слоя с повышенной концентрацией примесей. Схематическое изображение микросплавного диффузионного транзистора дано на фиг. 2.23. Углубления делаются электрохимическим травлением, а металл, нанесенный гальваническим способом, сплавляется с германием, образуя поверхностные  $p - n$ -переходы. При использовании такой методики конструирования обеспечивается хороший контроль за шириной области базы, а следовательно, и хорошая частотная характеристика.

Диффузионный слой и переходы малой площади обеспечивают транзистору превосходные высокочастотные свойства, и его граничная частота превышает 200 Мгц. Наличие базы с плавным изменением концентрации примеси позволяет получить максимальное коллекторное напряжение 20 в (т. е. больше, чем у поверхностно-барьерного или у микросплавного транзистора). Максимальная мощность рассеяния равна  $\sim 25$  мвт. Микросплавные диффузионные транзисторы пригодны для работы на высокой частоте и для целей переключения.

Германиевые  $p - n - p$  и кремниевые  $n - p - n$  микросплавные диффузионные транзисторы выпускаются для промышленного применения; представителем их может служить тип 2N502 (Philco).

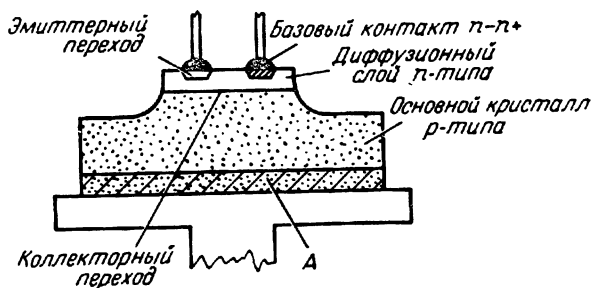
### ТИРИСТОР

Тиристор — это германиевое устройство типа тиратрона с очень малым временем включения и выключения. Конструкция его аналогична конструкции транзистора с диффузионной базой, с той только разницей, что у этого устройства на коллекторном выводе есть контакт  $p - p^+$ , как показано на фиг. 2.24.

Переход  $p - p^+$  обладает способностью при малых токах становиться коллектором дырок, а при больших токах — инжектором электронов. При малых коллекторных токах это устройство работает как транзистор с диффузионной базой и находится в отключенном



состоянии. Однако при больших токах контакт  $p - p^+$  инжектирует электроны, перемещению которых к коллекторному переходу (где они протягиваются через область базы) способствует поле в области коллектора. Таким образом возникает сквозной путь от коллекторного к эмиттерному выводу. Такое состояние соответствует состоянию «включено». Это устройство применяется как устройство с двумя выводами, имеющее такую же вольтамперную характеристику,



Ф и г. 2. 24. Тиристор.

A — контакт  $p^+$ ; коллектор дырок при слабом токе и инжектор электронов при сильном токе.

как и  $p - n - p - n$ -диод, показанный на фиг. 2.8. В другом варианте базовый контакт можно использовать как переключающий элемент.

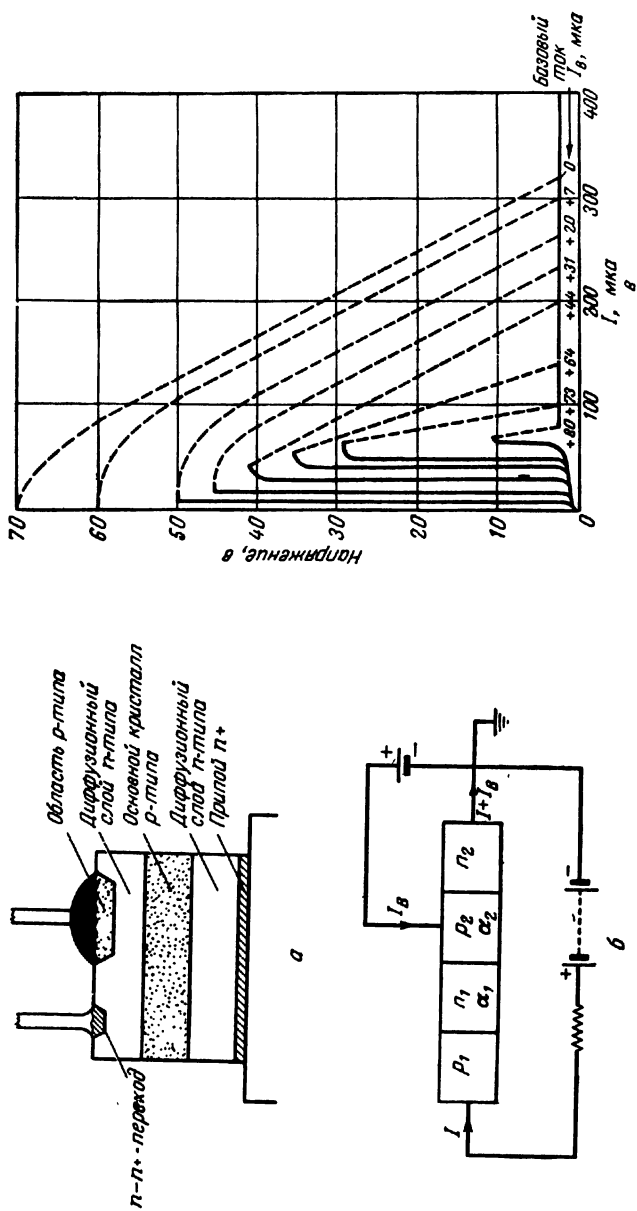
Время включения и выключения тиристора составляет  $\sim 0,1$  мксек; остаточное напряжение около 0,5 в, пробивное напряжение превышает 60 в, граничная частота равна  $\sim 100$  Мгц.

Тиристоры выпускаются фирмой Radio Corporation of America.

### **$p - n - p - n$ -ТРАНЗИСТОР**

Транзистор  $p - n - p - n$ -типа — это полупроводник, эквивалентный газовому тиратрону. Его структура та же, что и  $p - n - p - n$ -диода с третьим омическим контактом, подведенным к одной из двух центральных областей базы. Примерная структура показана на фиг. 2.25, а.

Как было сказано на стр. 65, перегиб характеристики  $p - n - p - n$ -диода наступает в тот момент, когда  $(\alpha_1 + \alpha_2)M$  станет больше единицы. Третий вывод к  $p_2$ -участку управляет увеличением  $\alpha_2$ , которое в этом случае является функцией  $I_b + I$ , где  $I_b$  — базовый ток, а  $I$  — ток, протекающий через транзистор (см. фиг. 2.25, б). Это значит, что можно получить  $(\alpha_1 + \alpha_2)M > 1$  при меньшей величине напряжения в точке перегиба, при этом получается семейство кривых, форма которых дана на фиг. 2.25, в. При напряжениях, мень-



Ф и г. 2. 25. р-п-п-р-п-транзистор.  
а — структура; б — схематическое изображение; в — вольтамперная характеристика р-п-п-р-п-транзистора.

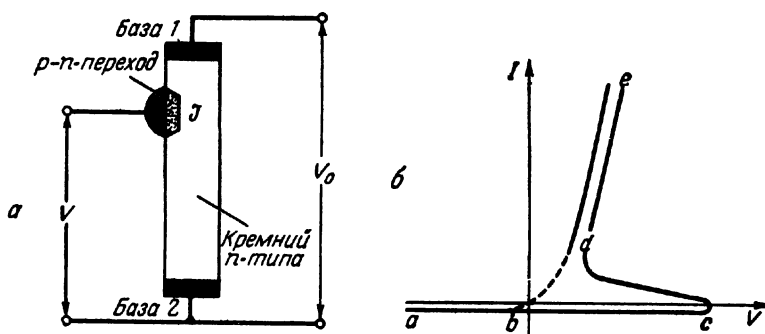
ших, чем напряжение в точке перегиба, устройство может быть переключено из состояния низкой проводимости в состояние высокой проводимости путем приложения к базе слабого импульса (около  $+20$  мкА). Если же транзистор уже находится во включенном состоянии, то для отключения потребуется больший базовый ток (около  $-230$  мкА).

Эти транзисторы имеют широкий диапазон применения — от переключателей, рассчитанных на слабый сигнал, до мощных устройств, работающих на токах более  $50$  А. Они широко применяются как для переключающих цепей, так и для цепей питания.

Транзисторы  $p-n-p$ -типа, часто называемые регулируемыми выпрямителями, выпускаются промышленностью; их представителем является тип CS26 (Westinghouse).

### ТРАНЗИСТОР С ОДНИМ ПЕРЕХОДОМ ИЛИ ДВУХБАЗОВЫЙ ДИОД

Транзистор с одним переходом представляет собой прибор с тремя выводами, обладающий высокостабильной характеристикой отрицательного сопротивления. Его конструкция изображена схематически на фиг. 2.26, а. На обоих концах германиевого стержня  $n$ -типа имеются омические базовые контакты  $B_1$  и  $B_2$ . Вблизи одного из них имеется  $p-n$ -переход, который может быть сплавного типа.



Фиг. 2.26. Транзистор с одним переходом или двухбазовый диод.  
а — структура; б — вольтамперная характеристика.

Вольтамперная характеристика транзистора с одним переходом приведена на фиг. 2.26, б. Действие прибора можно объяснить на следующем примере: пусть между базами  $B_1$  и  $B_2$  приложено постоянное напряжение  $V_0$ , а между  $p-n$ -переходом  $J$  и базой  $B_2$  — переменное напряжение  $V$ . Если цепь  $B_2$  разомкнута,  $p-n$ -переход будет обладать нормальной диодной характеристикой  $abde$ . В том

случае, когда у  $B_2$  будет положительный потенциал по отношению к  $B_1$ , германий будет действовать как делитель напряжения. Пусть теперь  $V$  уменьшается от большой отрицательной величины. При отрицательном  $V$  и даже при небольшом положительном значении  $V$  переход будет иметь обратное смещение и малый ток. При каком-то определенном положительном значении  $V$  переход получит прямое смещение. Произойдет инжектирование дырок, которые, перемещаясь к  $B_1$ , изменяют проводимость области  $JB_1$ , понижая ее сопротивление. Это приводит к перераспределению потенциала в стержне и еще более смещает переход в прямом направлении. При дальнейшем инжектировании дырок сопротивление участка  $JB_1$  постепенно уменьшается, и когда будет получена кривая  $cd$ , действие становится кумулятивным. Конечное состояние будет при достижении точки  $d$ , в которой имеет место нормальная характеристика перехода (принимая во внимание смещение перехода), а  $V_0$  почти все распределится по участку  $JB_2$ .

Однопереходный транзистор применяется для переключателей средней мощности и генераторов колебаний и может заменить в этих схемах два обыкновенных транзистора. Максимальная частота колебаний равна примерно 900 Кгц, а мощность рассеяния 500 мвт.

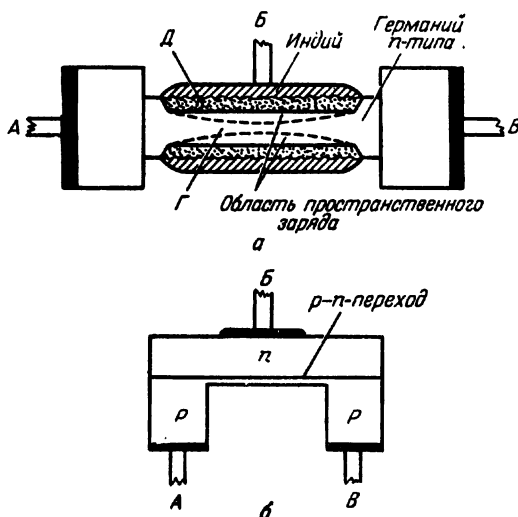
Германиевые транзисторы  $n$ -типа с одним переходом выпускаются промышленностью; представителем их может служить тип 2N491 (GE).

### УНИПОЛЯРНЫЙ ИЛИ КАНАЛЬНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Действие всех описанных выше транзисторов основывалось на перемещении по полупроводнику неосновных носителей. Однако существует другой тип — униполярные транзисторы, — работа которых базируется исключительно на основных носителях. Два возможных варианта конструкции униполярного транзистора дано на фиг. 2.27. Круглый германиевый стержень диаметром 0,25 мм окружает кольцевой  $p$  —  $n$ -переход (фиг. 2.27, а). Омические контакты подведены к более массивным концам стержня. Выводы носят название исток, затвор и сток. Переход  $p$  —  $n$ -типа можно выполнить методом сплавления. На фиг. 2.27, б показан униполярный транзистор другого типа, в котором  $p$  —  $n$ -переход выполнен либо методом выращивания кристалла, либо методом диффузии.

Из фиг. 2.27, а видно, что если затвор имеет обратное смещение по отношению к стоку, запирающий слой распространится в  $n$ -область и тем самым уменьшит площадь поперечного сечения германия, способную переносить поток основных носителей от истока к стоку. Таким образом, сопротивление канала можно изменять напряжением затвора и использовать устройство как усилитель. При больших напряжениях затвора запирающие слои соприкасаются

и между истоком и стоком происходит уменьшение тока до минимума. В конструкции транзистора, показанной на фиг. 2.27, б, для затвора используется плоский переход. Работа его основывается на изменении сопротивления между запирающим слоем и поверхностью полупроводника.



Ф и г. 2. 27. Варианты конструкций униполярных транзисторов.

А—исток; Б—затвор; В—сток; Г—канал; Д—рекристаллизованный германий р-типа.

Свойства описываемых транзисторов меняются в зависимости от конструкции. Униполярный транзистор, описанный в [57], имел мощность рассеяния 0,4 *вт*, напряжение запираения 11 *в* и верхнюю частоту 9 *Мгц*. Другой транзистор, носящий название технетрон [82], имел верхний предел частоты 500 *Мгц* и входное и выходное сопротивления, превышающие 1 *Мом*.

В промышленности униполярные транзисторы пока не применяются; производятся эксперименты с различными видами конструкций.

## ФОТОДИОД

Из многих различных видов полупроводниковых фоточувствительных приборов в настоящем разделе описано только два: фотодиод и фототранзистор. В качестве фотодиода можно использовать диод, выполненный любым обычным методом, если при изготовлении пре-

дусмотрена возможность освещения перехода внешним источником света. Большие кремниевые фотодиоды, известные под названием кремниевых солнечных фотоэлементов, имеют переходы с диаметром до 25,4 мм. Такие переходы выполняются методом диффузии.

В гл. 1 указывалось, что световая волна, падающая на полупроводник, создает пары электрон — дырка. Фотодиод обычно имеет обратное смещение, поэтому, если он не освещен, по нему протекает слабый ток насыщения, называемый иначе темновым током. Когда переход освещен, генерируемые неосновные носители диффундируют в переход, который в этом случае действует как коллектор, и ток диода увеличивается во много раз. Солнечный элемент не имеет обратного смещения, но когда генерируемые светом неосновные носители достигают перехода, они уменьшают и почти полностью погашают внутреннее поле перехода. Таким образом, переход выходит из состояния равновесия, и в элементе возникает напряжение, которое направляет ток во внешнюю цепь. Чувствительность фотодиода меняется с изменением длины световой волны; ее максимальное значение зависит от полупроводника. Существует также критическая длина волны, за пределами которой диод перестает работать. Эта особенность зависит от энергии света, энергии, необходимой для образования пары электрон — дырка, и способности полупроводника поглощать свет.

Германиевые фотодиоды имеют спектральный диапазон 0,5—1,8 мк с максимальной чувствительностью в области  $\sim 1,5$  мк. Их чувствительность зависит от площади перехода и может достигать 30 ма/люмен. Темновой ток составляет  $\sim 25$  мка, а ток при максимальной освещенности  $\sim 25$  ма. Максимальная частота равна  $\sim 50$  Кгц. Кремниевый солнечный элемент имеет спектральный диапазон 0,4—1,2 мк с максимальной чувствительностью в области  $\sim 0,8$  мк. Напряжение разомкнутой цепи при освещенности около 10 люмен/см<sup>2</sup> составляет  $\sim 0,5$  в.

В промышленности применяются как кремниевые, так и германиевые фотодиоды. Представителем германиевых фотодиодов является тип PG40A (S. T. & C.), а представителем кремниевых солнечных элементов — MSII (Ferranti.)

### ФОТОТРАНЗИСТОР

Наиболее распространенной конструкцией фототранзистора является обычный сплавной транзистор, заключенный в прозрачный корпус.

Фототранзистор является, по существу, фотодиодом со встроенным усилителем. Освещенный переход образует эмиттерный переход транзистора, а последующая работа транзистора обеспечивает усиление генерированного светом тока в области коллектора.

Спектральный диапазон и длина волны максимальной чувствительности те же, что и у германиевого фотодиода. Чувствительность, как правило, составляет 300 *ма/люмен*, а граничная частота модулированного света 3 *Кгц*.

В промышленности имеют распространение германиевые фототранзисторы; представителем их может служить ОСР71 (Mullard).

## ДРУГИЕ ВИДЫ КОНСТРУКЦИИ ТРАНЗИСТОРОВ И ДИОДОВ

Кроме описанных транзисторов и диодов, имеется еще много различных типов, которые в настоящее время изготовлены, но прошли лишь лабораторные испытания. Некоторые из них никогда не будут выпускаться промышленностью — либо по причине того, что их рабочие характеристики хуже, чем у других, более поздних конструкций, либо потому, что процесс их изготовления неэкономичен. Другие типы, очевидно, будут выпускаться промышленностью, когда будет больше известно об их свойствах. Некоторые из этих лабораторных устройств кратко описаны ниже.

1. *Спейсистор* [66]. В этом устройстве электроны инжектируются непосредственно в область пространственного заряда смещенного  $p - n$ -перехода. Второй модулирующий контакт подведен к области пространственного заряда. Входное и выходное сопротивления равны нескольким мегомам.

2. *Филдистор, управляемый электростатическим полем* [60]. Здесь  $p - n$ -переход управляется электростатически при помощи расположенного на расстоянии нескольких микрон и изолированного от перехода маленького электрода.

3. *Исключающий транзистор* [63]. У этого транзистора для повышения верхнего рабочего температурного предела используются  $n - n^+$ -переход и ток, текущий в области базы точечноконтактного транзистора.

4. *Точечноконтактный транзистор* [73]. У этого транзистора переключающие свойства германиевого сплавного  $n - p - n$ -транзистора улучшены путем подведения контакта к германию с помощью острого вольфрамового штырька, вмонтированного в коллекторную пластину.

5. *Транзистор  $p - n - n^+$ -типа* [64]. Это сплавной транзистор с электрическими свойствами точечноконтактного транзистора. В частности,  $\alpha$  превышает единицу и для слабых эмиттерных токов может достигать 20.

6. *Транзистор с защищенной поверхностью* [79]. Кремниевым транзисторам с диффузионными эмиттером и базой при обработке придается такая форма, что область базы имеет минимальную пло-

щадь поверхности. Благодаря этому нежелательные поверхностные явления ослабляются.

7. *Деплистор* [72]. Это обладающий отрицательным сопротивлением прибор с тремя выводами, для изготовления которого используется чистый германий. По своей конструкции он сходен с обыкновенным сплавным транзистором, за исключением того, что в нем употребляются  $p^+$ - и  $n^+$ -контакты.

8. *Тристор* [71]. Это прибор сплавного плоскостного типа с характеристиками, подобными характеристикам тиратрона.

Сплавные пластинки содержат одновременно доноры и акцепторы.

9. *Переключающий диод  $p-n-p-n$ -типа* [69]. Это германиевый диод с характеристиками, аналогичными характеристикам кремниевого  $p-n-p$ -диода. Область  $n$ -типа заменена металлическим контактом, что значительно упрощает конструкцию и дает возможность получить низкое управляющее напряжение. Металлический контакт способствует резкому возрастанию  $\alpha$  с увеличением эмиттерного тока, что необходимо для функционирования германиевого устройства, подобно кремниевому  $p-n-p$ -устройству.

10. *Транзистор  $p-n-p-n$ -типа* [69]. Это усовершенствованный германиевый  $p-n-p-n$ -диод, у которого третий вывод соединен с одной из внутренних областей. Вольтамперные характеристики очень похожи на характеристики кремниевого  $p-n-p$ -транзистора.

11. *Структуры  $p-n-p-n$ -типа* [78]. Шунтируя эмиттерную область и соседнюю с ней область базы, можно получить новый вид  $p-n-p-n$ -переключателя. Разработано несколько вариантов этой структуры с симметричными или асимметричными характеристиками.

12. *Криосар* [83]. Это прибор скоростного переключения с двумя выводами и характеристиками, аналогичными обратным характеристикам диода Зенера. Его работа базируется на импульсной ионизации примесей в германии, имеющей место лишь при температуре жидкого гелия ( $-269^\circ\text{C}$ ).

13. *Транзистор Гука ( $p-n$ )* [67]. Это плоскостной транзистор с переходом, полученным методом выращивания, с усилением по току, превышающим единицу (значения  $\alpha$  достигают 100).

14. *Диод, полученный методом диффузии примесей из полупроводника при нагреве его в вакууме* [70]. Этот диод получен методом внешней диффузии, описанным в разделе «Сплавной диффузионный транзистор» (стр. 77). Он обладает исключительно хорошими переключающими свойствами.

15. *Многоэлектродные конструкции*. При использовании более трех электродов можно получить большое количество различных



вариантов конструкций. Так, используя точечноконтактную, сплавную и диффузионную структуры, были получены транзисторы с двойными эмиттерами или двойными коллекторами. Кроме того, были сконструированы многоэлементные однополюсные транзисторы.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Приведенный выше перечень опытных элементов конструкций является лишь незначительной частью большого количества различных типов транзисторов и диодов, известных с момента изобретения транзистора. Сведения о новых устройствах публикуются в технической литературе. Количество их настолько велико, что изготовители затрудняются в выборе наилучшего метода, дающего возможность получить максимальный экономический эффект при массовом производстве.

### Глава 3

## МИНИАТЮРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ СХЕМ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Изобретение транзистора привело к миниатюризации некоторых типов электронного оборудования и к разработке большого числа новых сверхминиатюрных компонентов, позволивших конструкторам уменьшить габариты конструкций.

Работе конструкторов в области миниатюризации способствовало то обстоятельство, что в транзисторных схемах вообще величины напряжений значительно ниже, чем в схемах на электронных лампах; кроме того, в них отсутствуют цепи накала и подогрева и источники их питания, что также дает возможность значительно снизить рабочую температуру и сэкономить площадь монтажа.

Однако важно, чтобы уплотнение монтажа не привело к снижению надежности, которая может быть весьма высокой за счет применения транзисторов, более надежных, чем заменяемые ими электронные лампы.

При проектировании переключателей, потенциометров и других регулирующих устройств для транзисторных схем необходимо следить за тем, чтобы уменьшение их габаритов не привело к снижению механической прочности электронной аппаратуры и чтобы ее малые размеры не затрудняли ручное управление. Контрольные панели должны иметь достаточные размеры, для того чтобы разместить на них приборы, допускающие удобное считывание показаний, и расположить кнопки управления на достаточном расстоянии друг от друга. Не исключена возможность вмонтирования миниатюрных потенциометров, переключателей и т. д. непосредственно внутри самих кнопок управления.

При проектировании сверхминиатюрных компонентов следует применять такие металлы и способы окончательной обработки их, которые не допускают образования заусенцев, часто приводящих к короткому замыканию. Цинк, олово и кадмий обладают этим недостатком, избежать которого можно лишь с помощью золотого покрытия.

*Номинальные напряжения.* Для схемных элементов приняты следующие максимальные рабочие напряжения постоянного тока:

1,5 в — соответствует напряжению, получаемому от одного гальванического элемента и считается минимальной величиной для элект-

ролитического конденсатора, достаточной для обеспечения надежности наряду с максимальной емкостью на единицу объема. Минимальный потенциал для обеспечения электролитического процесса и высвобождения кислорода равен  $\sim 1,2$  в.

3 в — величина, наиболее подходящая в тех случаях, когда требуется большая емкость на единицу объема в цепях передачи потенциала, например от первичного или вторичного элемента постоянного тока на 1,5—2 в.

6 в — аналогично 3 в, но для цепей на 4,5—5,5 в.

9 в — аналогично при питании схем от батарей 6 в.

15 в — аналогично при питании схем от батарей 12 в.

30 в — предусмотрено для бортовых систем, рассчитанных на 24—28 в.

50 в — стандартный американский номинал.

150 в — с расчетом на новые разработки.

*Печатный монтаж.* Все более широкое применение печатного монтажа требует, чтобы радиокомпоненты транзисторных схем были пригодны для автоматической сборки. В настоящее время принята стандартная монтажная сетка 2,54 мм.

Там, где применяются субминиатюрные элементы и для улучшения использования монтажной площади допускается дальнейшее дробление сетки до 0,64 мм<sup>1</sup>).

При автоматической сборке легко сортируются, укладываются в нужное положение и помещаются в разгрузочные устройства элементы, имеющие осевые выводы. Поскольку все выводы обрезают на одну и ту же длину и загибают, чтобы вставить в отверстия, то было бы вполне логично стандартизировать их длину.

Желательно, чтобы диаметры соединительных проводников элементов, собираемых обычным путем, были не слишком малы, поскольку более толстые проводники способствуют отводу тепла от самих элементов.

### Пайка субминиатюрных элементов

*Пайка вручную.* Там, где требуется аппаратура минимального объема, нормальные методы сборки, такие, как крепление к контактным панелькам и вставка в соответствующие ламповые или транзисторные панели, заменяются непосредственной пайкой каждого элемента. Наиболее распространенным и чаще всего применяемым в электронной промышленности припоем является сплав олова со свинцом 60/40, содержащий специальный антикоррозийный флюс. Флюс плавится приблизительно при 70° С и обладает способ-

<sup>1</sup>) В СССР принята стандартная сетка 2,5 мм, но допускается сетка и 0,5 мм.—Прим. ред.

ностью снимать любой оксидный или сульфидный слой с поверхности соединяемых компонентов, облегчая, таким образом, процессы смачивания и сплавления. Сплав 60/40 плавится при  $188^{\circ}\text{C}$ , обладает температурным пределом пластичности  $5^{\circ}\text{C}$  и затвердевает при  $183^{\circ}\text{C}$ . При этой температуре действие флюса прекращается, он разрушается и улетучивается.

Практика показала, что при высокой температуре и минимальной продолжительности контакта процесс пайки будет почти идеальным, так как при быстром плавлении сплава наиболее полно используются лучшие свойства флюса. При этих условиях, пользуясь миниатюрным паяльником с жалом не более 5 мм, и при температуре примерно  $350^{\circ}\text{C}$  можно получить хорошее соединение за 2—3 сек; за это время при использовании теплоотвода не произойдет повреждения компонента или транзистора от чрезмерного нагрева путем теплопроводности или теплового излучения.

Большинство имеющихся миниатюрных паяльников, выпускаемых промышленностью, пригодно для использования при этих температурах. Однако в каждом отдельном случае условия сборки различны и, следовательно, должна быть подобрана температура паяльника в зависимости от монтажных допусков, изменений условий питания и т. д., и поэтому целесообразно стабилизировать напряжения паяльников.

*Пайка погружением.* Большая часть сказанного выше относится и к пайке погружением, причем следует иметь в виду, что вся сборка находится в непосредственной близости от горячей ванны припоя. Необходим тщательный контроль за температурой и временем погружения. Иногда требуется применение металлического держателя или струи охлаждающего воздуха, действующих во время пайки как теплоотвод. Существуют и другие методы соединения миниатюрных элементов, в частности такие, как точечная сварка или «соединение навивкой», описанное в гл. 6.

### Плотность монтажа элементов в аппаратуре

Плотность навесного монтажа миниатюрных элементов в субминиатюрной аппаратуре все еще очень мала, в основном из-за жестких условий охлаждения и необходимости оставлять пространство для съема деталей и удобства ремонта. В обычном субминиатюрном усилителе промежуточной частоты соотношение между свободным пространством и электронными компонентами равно примерно 3 : 1; иначе говоря, плотность монтажа электронных компонентов примерно равна 25%. Это, однако, является практически пределом для обычных объемных элементов из-за трудностей, возникающих при их впаивании даже с помощью миниатюрного паяльника. Максимально достижимая при применении субминиатюрной

турных элементов и нормальных транзисторов плотность монтажа составляет около 2 деталей<sup>1)</sup> на 1 см<sup>2</sup>.

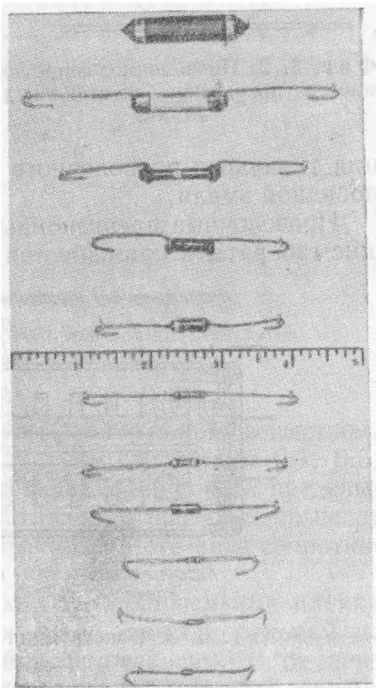
В гл. 6 описывается применение пленок в качестве компонентов, что дает возможность значительно увеличить плотность монтажа.

Ниже дается краткое описание некоторых субминиатюрных элементов. Более подробное описание дано в работе [31].

### ПОСТОЯННЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Сопротивления обычно делятся на две категории — высокостабильные и общего назначения.

Высокостабильными сопротивлениями считаются проволочные, из металлической и металлооксидной пленки и пиролитические (или стабильные углеродистые). Все они способны обеспечить стабильные значения сопротивлений с отклонением не более чем на 1—2%. Сопротивления общего назначения изготавливаются обычно из смеси угля с соответствующим связующим веществом; они сравнительно дешевы и обычно меньше по габаритам, но не так стабильны и под нагрузкой допускают отклонения номинальных значений от 5 до 15%. Кроме того, имеются еще нелинейные сопротивления: термочувствительные (термисторы), используемые для компенсации температуры и т. д., или чувствительные к изменению напряжения (карбид кремния), используемые как ограничители напряжения или тока. На фиг. 3.1 дано наглядное изображение изменения с течением



Фиг. 3.1. Уменьшение габаритов стандартных сопротивлений.

Масштаб в дюймах.

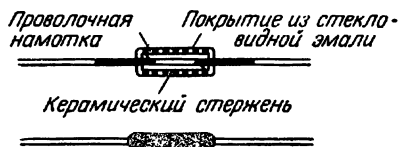
времени габаритов сопротивлений общего назначения. С уменьшением габаритов сопротивлений возможно снижение их надежности,

<sup>1)</sup> При ручной сборке; при автоматизированном производстве около 1 детали на 1 см<sup>2</sup>.—Прим. ред.

особенно в области больших значений сопротивлений. В гл. 6 описываются плоские пленочные сопротивления, которые при малых габаритах обладают достаточно высокой надежностью. Перечень миниатюрных сопротивлений, применяемых в Англии, приведен на стр. 141.

### Высокостабильные сопротивления

**Проволочные сопротивления.** Миниатюрные проволочные сопротивления делятся на два класса: покрытые стекловидной эмалью и т. п. (общего назначения) и прецизионные герметизированные.

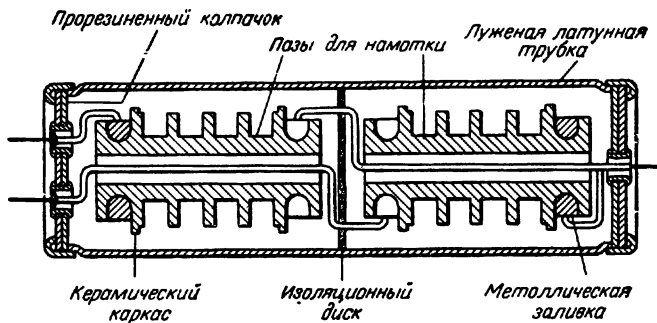


Фиг. 3. 2. Проволочное сопротивление с покрытием из стекловидной эмали.

Малогабаритные, покрытые стекловидной эмалью сопротивления на 1,5—3 Вт имеют размеры: длина ~12,5 мм, диаметр ~7,0 мм и интервал сопротивлений от 10 до ~5000 Ом. Крупногабаритные сопротивления изготавливаются на 10 и более Ом вплоть до ~50 000 Ом.

На фиг. 3.2 показана конструкция типичного проволочного сопротивления с покрытием из стекловидной эмали.

Проволочные прецизионные сопротивления обычно имеют большие габариты и применяются в тех случаях, когда требуется боль-

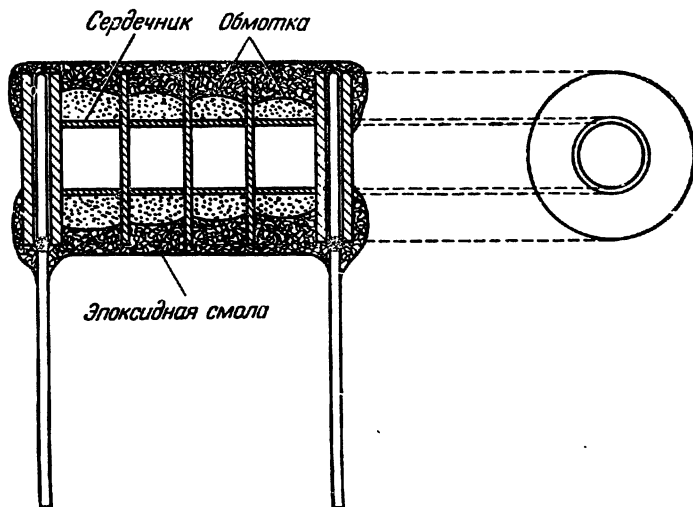


Фиг. 3. 3. Конструкция герметизированного прецизионного проволочного сопротивления.

Латунная трубка имеет внутреннюю изоляцию из промасленной бумаги; пазы служат для намотки хромо-никелевой или медно-никелевой проволоки с эмальевым покрытием; изоляционный диск имеет 2 отверстия.

шая стабильность. На фиг. 3.3 показана конструкция типичного герметизированного прецизионного проволочного сопротивления. Допустимое увеличение температуры у этого типа сопротивлений

мало и, следовательно, рассеиваемая мощность также незначительна. При изготовлении проволока тщательно отбирается и наматывается на небольшие, сделанные из глазурованного фарфора катушки, разделенные на мелкие секции. Обычно применяется проволока из покрытого эмалью сплава никеля с хромом или меди с никелем. Иногда этот же провод применяется с шелковой обмоткой или же с покрытием из стекловидной глазури. После выдержки при повышенных токе и температуре сопротивления подвергают пропитке



Ф и г. 3. 4. Конструкция прецизионного проволочного сопротивления, залитого эпоксидной смолой.

лаком в вакууме или каким-либо другим изолирующим веществом. Обычно встречающиеся стандартные допуски составляют 0,1; 0,5; 1 и 2%; однако могут быть установлены и еще более точные пределы.

Прецизионные проволочные сопротивления часто покрывают эпоксидными смолами. Типичная конструкция этого вида сопротивлений показана на фиг. 3.4.

*Сопротивления из оксидной пленки.* Металлооксидные пленки получают путем напыления хлоридов смеси олова с сурьмой на стеклянный стержень, нагретый до  $\sim 600^\circ\text{C}$  (в зависимости от качества стекла). При этой температуре хлориды разлагаются, образуя оксидную пленку, прочно соединенную со стеклом. Сопротивление резистивной пленки подгоняется до требуемого значения путем придания ей спиралевидной формы тем же способом, который применяется для получения сопротивлений, изготовленных методом пиролиза.

Типичные характеристики сопротивлений из оксидной пленки (смеси олова с сурьмой):

Стабильность, % . . . . . 0,5 при любых климатических условиях

Диапазон номиналов, ом . . . . . от 10 до ~ 350 000

Габариты:

диаметр, мм . . . . . 9,14      9,14      5,08

длина, мм . . . . . 50,8      25,4      15,875

Мощность (при 70° С), вт . . . . . 1,5      0,7      0,35

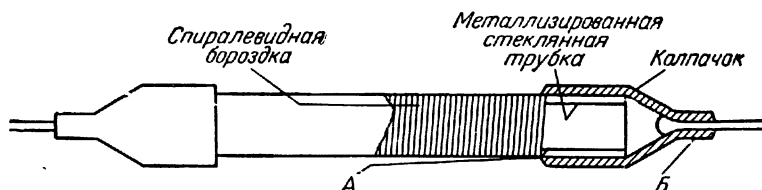
Рабочая температура, °С . . . . . 150

Температурный коэффициент, % на 1° С . . ~ 0,05 (в зависимости от величины сопротивления)

Коэффициент напряжения, % на 1 в пост. т. 0,01 (в зависимости от величины сопротивления)

Шумфактор, мкв/в . . . . . 1,0

В Англии выпускается два типа таких сопротивлений: первый с пленками из смеси олова с сурьмой на стеклянных стержнях и второй из тех же пленок на керамических стержнях (см. таблицу сопротивлений, стр. 141). Конструкция последнего типа дана на фиг. 3.5.



Фиг. 3. 5. Сопротивление фирмы Welwyn.

А — припаяно; Б — запрессовано и припаяно.

*Сопротивления, изготовленные методом пиролиза или «крекинга» углеводорода.* Пленочные сопротивления этого типа изготавливаются путем крекинга метана или других газообразных углеводородов и осаждения пленки на керамический стержень в камере при 900° С. Затем для получения требуемого сопротивления в пленке с помощью быстро вращающегося алмазного круга вырезается спиральная бороздка. Конструкция сопротивления такого типа дана на фиг. 3.6. Его основные характеристики:

Стабильность, % . . . . . 2 при любых климатических условиях

Диапазон номиналов . . . . . 10 ом — 10 Мом

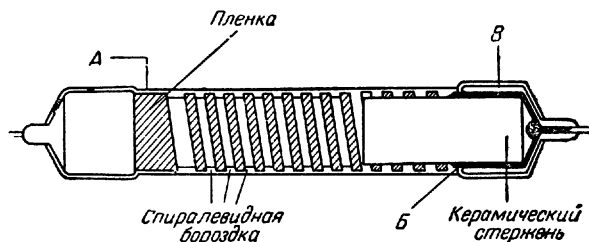
Габариты:

диаметр, мм . . . . . 1,62—8,7

длина, мм . . . . . 12,7—50



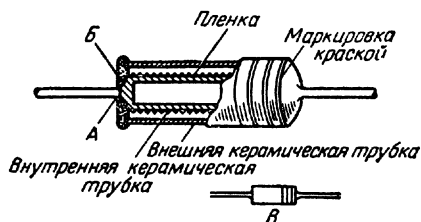
Мощность (при 70°С), <i>вт</i> . . . . .	$\frac{1}{8}$ —2
Рабочая температура, °С . . . . .	150
Коэффициент напряжения, % на 1 <i>в</i> пост. т. . . . .	0,002
Шумфактор, <i>мкв/в</i> . . . . .	0,5



Фиг. 3. 6. Конструкция пиролитического сопротивления.  
А—покрытие из глазурованного кремня; Б—коллоидальный графит; В—напрессованный колпачок.

*Субминиатюрные пиролитические сопротивления.* Французская фирма Le Condensateur Céramique выпускает миниатюрные сопротивления мощностью  $\frac{1}{4}$  *вт*, имеющие следующие размеры: длину ~6,35 мм и диаметр ~2,0 мм.

Керамическую трубку с внутренним и внешним диаметрами ~0,7 и ~1,7 мм покрывают с помощью крекинг-процесса углеродистой пленкой, нарезают на ней спираль, концы металлизировуют и припаивают к ним выводы. На трубку затем надевают вторую трубку и концы изолируют термопластической пастой (фиг. 3.7). Эти сопротивления обладают большим температурным диапазоном и имеют температурный коэффициент (200—600)  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  для значений от 100 *ом* до 1 *Мом* соответственно. Эта фирма изготавливает также



Фиг. 3. 7. Субминиатюрное пиролитическое сопротивление.

А—припаяно; Б—термопластическая паста; В—0,9 натуральной величины.

сопротивления, комбинированные с конденсаторами. Внешняя керамическая трубка таких сопротивлений изготовлена из материала, обладающего высокой диэлектрической проницаемостью, и покрыта с внутренней и внешней стороны слоем серебра, что придает ей свойства конденсатора. Область пайки расширяется с таким расчетом, чтобы захватить концы внешней трубки, причем один посеребренный слой подсоединяется к одному концу сопротивления, а второй слой — к другому концу. Таким образом, получается параллельное соединение сопротивления с конденсатором. С помощью такого

устройства легко получить емкости до 1500 *пф*, а возможно, даже и до 2200 *пф*. Длина комбинированного устройства 7,6 *мм*, диаметр 2,5 *мм*. При объединении двух таких устройств, соединенных последовательно, получится устройство с тем же диаметром, но вдвое длиннее.

Голландская фирма Phillips выпускает субминиатюрные сопротивления до 10 *Мом* длиной 7,6 *мм* и диаметром 1,8 *мм*.

### Сопротивления общего назначения

*Сопротивления из угольных смесей, полученные методом формования.* Сопротивления этого типа изготавливаются как герметизированными, так и негерметизированными. Негерметизированная, открытая конструкция обеспечивает хороший отвод тепла, и габариты ее при той же мощности меньше, чем у герметизированной.



Ф и г. 3. 8. Негерметизированное сопротивление из уголеродистой смеси.

Однако из-за возможности короткого замыкания на соседние элементы или металлическое шасси предпочтение отдается герметизированному типу сопротивлений.

При изготовлении прессованных уголеродистых сопротивлений газовая сажа, смолистое связующее вещество и тугоплавкий наполнитель сначала дозируются, затем смешиваются в требуемых пропорциях и просеиваются. Полученная в результате черная пудра прессуется в форме сопротивления на пресс-автомате и затем выдерживается в печи до отверждения. Перед маркировкой готовых сопротивлений проводят их испытания с автоматической сортировкой по номиналам.

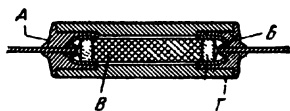
Конструкция сопротивления показана на фиг. 3.8. Сопротивления выпускаются с выводами трех различных видов, изготовленных следующими способами:

- 1) напылением металла на концы и припайванием обмотанной вокруг них луженой медной проволоки;
- 2) запрессовкой утолщенных концов соединительных проводов непосредственно в уголеродистый стержень;
- 3) напрессовкой металлического колпачка на напыленные концы.

Большинство негерметизированных типов сопротивлений делают методом запрессовки.

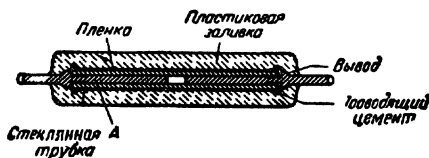
*Герметизированные сопротивления из прессованной смеси.* Некоторые типы сопротивлений, изготовленных из углеродистых смесей, как описывалось выше, герметизируют термореактивным пластиком. Такой тип изоляции пригоден для большинства случаев применения.

При другом виде герметизации прессованных сопротивлений их помещают в керамические трубки (фиг. 3.9). В этом случае некото-



Фиг. 3. 9. Сопротивление из углеродистой смеси с керамической изоляцией.

А — специальный изолирующий цемент; Б — напрессованный колпачок; В — резистивный стержень из углеродистой смеси; Г — металлизированные торцы стержня.



Фиг. 3. 10. Герметизированное сопротивление из углеродистой пленки.

А — конец проволоки, помещенной внутри трубки для отвода тепла.

рые, меньшие по величине сопротивления изготавливаются методом выдавливания. Угольная смесь и связующее вещество смешиваются точно так же, как и для сухого прессования, но к смеси добавляют специальные вещества, делающие смесь пригодной для выдавливания. Этим способом изготавливают только стержни малого диаметра; стержни большого диаметра изготавливаются сухим прессованием. После термической обработки стержни помещают в керамические трубки, а на омедненные торцы насаживают бронзовые колпачки; затем концы цементируют специальным влагоустойчивым цементом. Автоматическая проверка, сортировка и маркировка делаются так же, как и для сопротивлений, изготовляемых методом сухого прессования.

*Пленочные сопротивления из углеродистых смесей.* Конструкция сопротивления из углеродистой пленки дана на фиг. 3.10. Через находящуюся в жидком состоянии углеродистую смесь протягивают стеклянную трубку таким образом, что на внешней поверхности трубки образуется равномерная пленка из резистивного материала. Затем для отверждения и закрепления пленки трубку выдерживают в печи непрерывного действия. Выводы имеют форму, как показано на фиг. 3.10, и помещаются внутри стеклянной трубки; для их закрепления используют проводящий цемент. Такое расположение выводов, при котором значительная часть площади их поверхности находится в непосредственной близости от резистивного элемента, создает благоприятные условия для отвода тепла. Элемент затем

заливается термореактивным пластиком; автоматическая проверка, сортировка и маркировка выполняются так же, как и для других сопротивлений из углеродистых смесей.

### ПЕРЕМЕННЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Переменные сопротивления общего назначения выпускаются в двух видах: непроволочные из углеродистых смесей и проволочные. Прецизионные сопротивления почти всегда делаются проволочными. Обычные предельные допуски для проволочных сопротивлений 10% (хотя могут быть получены и более точные допуски) и около 25% для сопротивлений из углеродистых смесей.

Миниатюрные типы сопротивлений перечислены на стр. 143.

#### Непроволочные сопротивления из углеродистых смесей

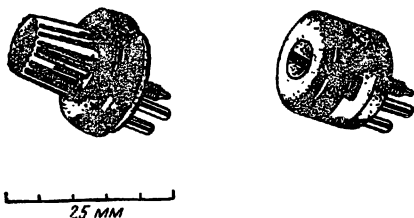
*Переменные непроволочные сопротивления, покрытые пленкой из углеродистой смеси.* Обычно такого рода переменные сопротивления изготавливают путем непрерывного напыления раствора углеродистой смеси на пластиковую ленту с последующей выдержкой при высокой температуре. Затем полоски штампуются на автоматических прессах. Состав распыляемого раствора аналогичен применяемому в производстве пленочных постоянных сопротивлений. Для получения логарифмического закона изменения сопротивления вдоль пластиковой полоски ее подвергают селективному напылению углеродистыми смесями различного состава через соответствующий трафарет.

Покрывать можно также нанести на полоску, пропуская ее по валику, вращающемуся в растворе углеродистой смеси. Сбегая с валика, полоска покрывается тонкой ровной пленкой определенной толщины, величина которой может регулироваться. После выдерживания при высокой температуре отвердевшей, покрытой углеродистой смесью полоске с помощью штамповки придается требуемая форма.

#### *Переменные непроволочные сопротивления из прессованной углеродистой смеси*

1-й способ изготовления: исходные материалы — газовую сажу, смолистое связующее вещество и тугоплавкий наполнитель — дозируют, затем смешивают в требуемых пропорциях и просеивают для получения тонкой черной пудры. Затем пудру прессуют, придавая ей кольцеобразную форму, и выдерживают при высокой температуре для отверждения. Концевые выводы полученного сопротивления напыляют металлом.

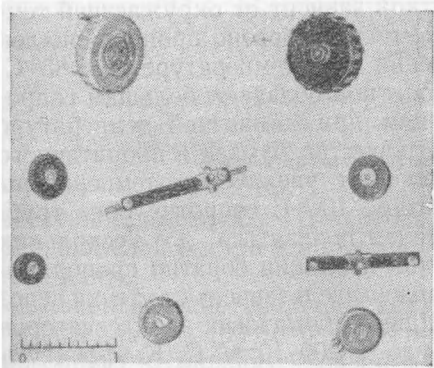
2-й способ: одновременное отверждение внешнего корпуса и резистивного элемента. Внешний корпус, или держатель сопротивления, изготавливается из фенольных формовочных пудр, а канавка для резистивного элемента заполняется углеродистой смесью в виде пудры. Затем производится горячее прессование и одновременное выдерживание при высокой температуре. Типичное непроволочное переменное сопротивление, изготовленное этим способом, изображено на фиг. 3.11.



Фиг. 3. 11. Переменное сопротивление из углеродистой смеси, изготовленное методом отверждения внешнего корпуса.

Сопротивления, выполненные по логарифмическому или другим законам, изготавливаются путем деления канавки на участки и заполнения их различными по составу смесями в виде пудры, после чего производится прессование и отверждение.

3-й способ изготовления непроволочных сопротивлений заключается в вибрационной подаче заранее изготовленных шариков углеродистой смеси в канавку, где шарики запрессовываются, после чего производится отверждение.



Фиг. 3. 12. Некоторые типы миниатюрных переменных сопротивлений с резистивными линиями из углеродистой смеси.

Масштаб в дюймах.

Миниатюрные непроволочные сопротивления с широким диапазоном номинальных значений, выполненные из углеродистых смесей, изготавливаются диаметром до ~12 и высотой ~6 мм; верхняя крышка используется в качестве ручки управления. Некоторые наиболее типичные сопротивления показаны на фиг. 3.12.

### Проволочные сопротивления

*Переменные проволочные сопротивления.* Сопротивления этого типа изготавливаются путем намотки проволоки на плоскую полосу из изоляционного материала, обычно синтетического со смоляной

пропиткой. Острые края пластиковой полоски-каркаса обычно скругляют или снимают с них фаску, чтобы при наматывании не повредить проволоку. После намотки каркас сгибают в виде дуги окружности. Миниатюрные переменные сопротивления этого типа изготавливаются диаметром до 12,7 мм. Большинство обмоток выполняется по линейному закону изменения сопротивления; логарифмический или какой-либо другой закон можно получить, придавая каркасу клинообразную форму.

### ПОСТОЯННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ <sup>1)</sup>

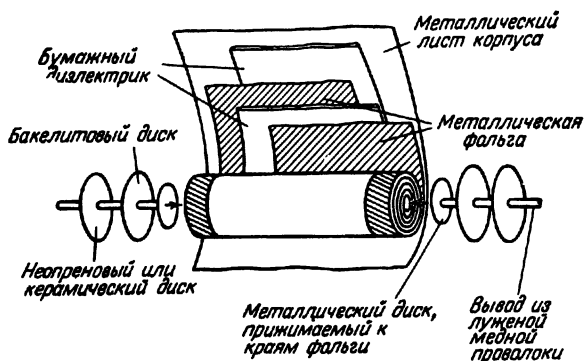
*Бумажные конденсаторы общего назначения.* Они изготавливаются из листов металлической фольги с проложенной между ними пропитанной бумагой. Эти конденсаторы сравнительно дешевы, обладают высоким соотношением емкость/объем и способны работать при довольно больших напряжениях, однако коэффициент мощности у них сравнительно высок, а допуски весьма широки. Максимальное допустимое рабочее напряжение постоянного тока любого бумажного конденсатора с пропиткой зависит от окружающей температуры, а срок службы приблизительно обратно пропорционален пятой степени рабочего напряжения при температуре до 85° С.

Бумажные конденсаторы с пропиткой обладают большим сопротивлением изоляции, составляющим при комнатной температуре 2000—5000 ом·ф (в зависимости от качества бумаги и пропиточного материала), но быстро падающим при увеличении температуры окружающей среды. При температуре 100° С сопротивление трубчатого типа емкостью 0,1 мкф может понизиться до нескольких сотен мегом. Падение сопротивления изоляции обратно пропорционально емкости для значений 1 мкф и выше и зависит от утечки через корпус. Температурный коэффициент бумажных конденсаторов с пропиткой изменяется от + 100 до + 200·10<sup>-8</sup>/° С. Коэффициент мощности равен ~0,005—0,01 при 1 Мгц и стремится к возрастанию с увеличением частоты. Стабильность емкости при нормальных рабочих условиях равна ~0,5—5%. Индуктивность трубчатых конденсаторов равна ~0,006 мкн/см длины конденсатора (включая длину выводов). Эти характеристики относятся в основном к бумажным конденсаторам, применяемым в радиотехнике; высококачественные конденсаторы с масляной пропиткой могут дать значительно лучшие показатели. При использовании этих конденсаторов в транзисторных схемах с низким рабочим напряжением следует принимать меры предосторожности, если постоянное или переменное напряжение будет меньше 10 в. Для таких низких напряжений могут быть изготовлены специальные конденсаторы с увеличенной пло-

<sup>1)</sup> См. стр. 148.

шадью контакта или с приваренными выводами. Конструкция типичного трубчатого конденсатора дана на фиг. 3.13.

**Металлизированные бумажные конденсаторы.** В этих конденсаторах отсутствуют пустоты между изоляционной бумагой и металлом за счет металлизации одной стороны бумаги. Впервые такие конденсаторы были выпущены в конце 1940 г. Характерным для них является малый размер и способность самовосстановления при



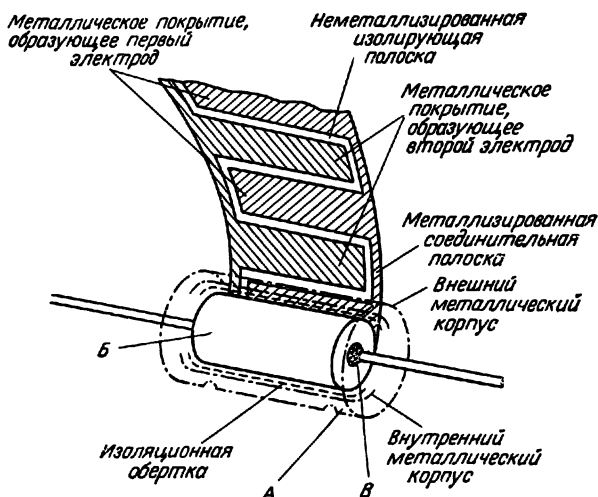
Фиг. 3. 13. Конструкция бумажного конденсатора. Металлический лист корпуса накручивается в виде трубки на два концевых диска с каждой стороны. Бумажный диэлектрик прокладывается в 2 или более листа.

электрическом пробое. В этом случае в области пробоя металлизирующий слой быстро испаряется, предотвращая тем самым короткое замыкание.

Сопротивление изоляции конденсаторов из металлизированной бумаги равно  $\sim 100 \text{ ом} \cdot \text{ф}$  и обычно в 10—20 раз меньше, чем у обыкновенного бумажного конденсатора (некоторые типы, например W 97 Hunt, по этому параметру сравнимы с обычными бумажными конденсаторами). Поэтому эти конденсаторы непригодны для использования в качестве конденсаторов связи и применяются только для развязки и фильтрации там, где основным требованием является наличие низкого полного сопротивления. Конденсаторы из металлизированной бумаги не следует применять в тех случаях, когда ожидается частое превышение номинального рабочего напряжения, так как в этом случае может произойти изменение емкости, коэффициента мощности и сопротивления изоляции. Коэффициент мощности конденсатора этого типа равен примерно 0,02 при 1000 гц, а стабильность емкости составляет примерно 5—10%. Конструкция его показана на фиг. 3.14.

**Слюдяные конденсаторы.** Основными свойствами этого типа конденсаторов являются их низкий коэффициент мощности и исклю-

чительно долговременная стабильность при комнатной температуре. Стабильность слюдяного конденсатора с посеребрёнными пластинами при работе в нормальных условиях составляет примерно 1%, а многослойного слюдяного — около 2%. Сравнительно небольшой температурный коэффициент колеблется между  $\pm 100 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , но изменяется в зависимости от качества слюды, ее обработки и т. д.



Фиг. 3. 14. Конструкция бумажного конденсатора.  
А — уплотнение синтетической смолой; Б — намотанная часть конденсатора; В — выводы, припаянные к металлизированным концам намотанного конденсатора.

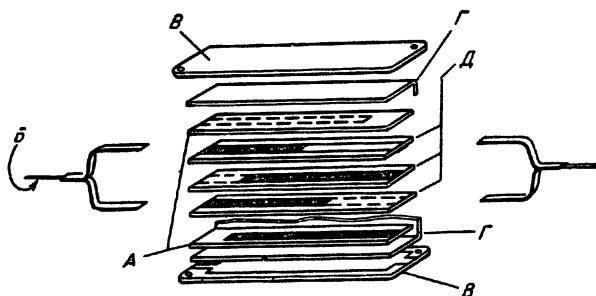
Конденсатор из посеребрённых пластин обладает лучшим температурным коэффициентом, чем многослойный. Оба типа конденсаторов, особенно многослойный, дают небольшое нециклическое изменение емкости при периодическом изменении температуры, и почти у всех изготавливаемых в настоящее время типов зависимость емкости от температуры имеет не совсем линейный характер. Наблюдается также большой разброс основных температурных коэффициентов у различных образцов даже из одной партии выпуска. Хорошие температурные коэффициенты наблюдаются у вощеных конденсаторов с защитными слюдяными листами, однако конденсаторы со смоляной заливкой обладают лучшей линейностью температурного коэффициента в пределах от  $-40$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент мощности слюды равен  $\sim 0,0003$  при  $1\text{ МГц}$ , но может быть понижен и до  $0,00005$ , если специально подобрать сорт и если слюда будет очень сухой. Диэлектрическая постоянная равна  $\sim 7$ . Величина высокочастотной и импульсной нагрузки ограни-



чивается по допустимому току каждой посеребренной пластины, поэтому конденсатор из таких пластин менее пригоден для работы при больших токах, чем многослойный, хотя последний обладает меньшей стабильностью и не столь жесткими допусками. Конструкция конденсатора дана на фиг. 3.15.

**Керамические конденсаторы.** Конденсаторы с керамическим диэлектриком выпускаются в трех видах: с низкой диэлектрической постоянной и малыми потерями, средней диэлектрической постоянной и с высокой диэлектрической постоянной.



Фиг. 3. 15. Конструкция конденсатора из посеребренных слюдяных пластин.

А—серебрение только на одной стороне этих внешних слюдяных пластин; Б—выводы из луженой медной проволоки с гибкими металлическими полосками, которые зажимаются между посеребренными слюдяными пластинами; В—литое покрытие; Г—металлические обжимные пластины; Д—слюдяные диэлектрические пластины с асимметричным серебрением с обеих сторон для образования двух электродов.

Конденсаторы с низкой диэлектрической постоянной и малыми потерями обычно изготавливаются из стеатита с диэлектрической постоянной 8,0 или из подобных ему материалов с диэлектрическими постоянными в пределах 6,0—15,0. Эти конденсаторы имеют превосходные рабочие характеристики на высоких частотах (от 50 кГц и выше); их коэффициент мощности достаточно низок (0,001) и приближается к коэффициенту мощности слюды. Температурный коэффициент находится в пределах между  $+80$  и  $+120 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  и колеблется между отдельными промышленными сериями меньше, чем у конденсаторов с другими диэлектриками, за исключением стеклянных и вакуумных керамических конденсаторов рассматриваемого типа. Емкостная стабильность в нормальных рабочих условиях составляет  $\sim 1\%$ , исключая случаи изменения температурных условий. Предельное рабочее напряжение достигает  $\sim 500$  в. допустимый диапазон температур при эксплуатации находится в пределах от  $+150^{\circ}\text{C}$  до самых низких,

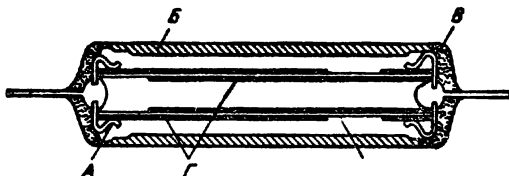
Следующий класс конденсаторов со средней диэлектрической постоянной (около 90) используется главным образом в качестве конденсаторов с температурной компенсацией в резонансных цепях и имеет отрицательный температурный коэффициент порядка от  $-600$  до  $-800 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Основным материалом для их изготовления служит титан и его производные. Они обладают малым коэффициентом мощности, достигающим при высоких частотах значений менее 0,0003. Температурные коэффициенты могут иметь различную величину в зависимости от состава смеси, используемой при изготовлении диэлектрика.

Керамические конденсаторы с большой диэлектрической постоянной обеспечивают большую емкость при компактном устройстве. Однако их емкость и коэффициент мощности сильно меняются с изменением температуры, причем эти изменения носят нелинейный характер и недостаточно цикличны. Так, например, конденсаторы из материала с  $\epsilon=1200$  при температуре около  $110^{\circ}\text{C}$  имеют высокую пиковую емкость (точка Кюри), которая в 2—3 раза больше, чем при комнатной температуре, и значительно больше, чем при температуре около  $-10^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент мощности минимален при температуре в пределах  $20\text{—}40^{\circ}\text{C}$  и равняется примерно 2%. В общем случае, чем выше диэлектрическая постоянная, тем чувствительнее будет конденсатор к изменению температуры. Кроме зависимости от температуры, емкость меняется также под влиянием градиента напряжения постоянного тока, особенно в пиковых точках; при комнатной температуре емкость уменьшается на 10—20%, в то время как в точке Кюри можно ожидать уменьшения до 50%. Рабочее напряжение постоянного тока конденсаторов с высокой диэлектрической постоянной ниже, чем у керамических конденсаторов с малой диэлектрической постоянной. Конденсаторы подвержены гистерезису и поэтому пригодны для работы только с очень малыми напряжениями переменного тока. Они используются в основном как высокочастотные блокировочные конденсаторы, но могут также применяться для межкаскадных соединений при условии, что емкость будет достаточной при любых условиях работы. Свойства конденсаторов настолько сильно меняются с изменением температуры, градиента напряжения и т. д., что для них невозможно установить общие электрические характеристики. Конструкция типичного трубчатого керамического конденсатора дана на фиг. 3.16.

*Пластиковые конденсаторы.* Эти конденсаторы в настоящее время в основном изготавливаются из полистироловой пленки. Основным свойством этого типа конденсаторов является их чрезвычайно большое сопротивление изоляции при комнатной температуре. С увеличением температуры сопротивление изоляции полистироловой пленки всегда значительно выше, чем у бумаги, однако полистироловые конденсаторы ограничены в их верхних температурных

пределах и обычно не применяются при температуре выше  $60^{\circ}\text{C}$ , хотя некоторые типы небольшой емкости работают удовлетворительно даже до  $85^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент мощности невелик (около 0,0002) и не зависит от частоты. Температурный коэффициент имеет отрицательное значение и доходит примерно до  $200 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Емкостная стабильность порядка 0,5%, а диэлектрическая постоянная 2,5.

Среди прочих пластических материалов в качестве диэлектриков применяются полиэтиленовый терефталат, полиэтилен, политетрафлуорэтилен, поликарбонат. Первый из них является многообещающим материалом и во многих случаях заменяет бумагу.



Ф и г. 3. 16. Трубчатый керамический конденсатор.

А — припаянный колпачок; Б — керамический корпус; В — связующий цемент; Г — серебряное покрытие снаружи и внутри трубки, образующее два электрода.

Он, однако, чувствителен к изменениям температуры и частоты. Его рабочая температура много выше, чем у бумаги, и достигает  $130^{\circ}\text{C}$ . Отдельные листы этого материала для заполнения мельчайших отверстий пропитывают полистиролом, минеральным маслом и т. д.; можно также использовать две пленки (как в бумажных диэлектрических конденсаторах). Пленки обладают хорошей механической прочностью и могут поэтому металлизироваться методом вакуумного испарения. Однако они влаговосприимчивы, поэтому такие конденсаторы необходимо герметизировать.

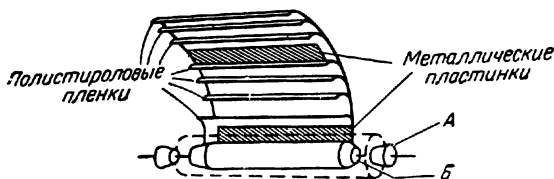
Политетрафлуорэтилен имеет то преимущество, что он может работать при еще более высоких температурах (до  $250^{\circ}\text{C}$ ), но из этого материала трудно получить тонкую пленку. Конструкция конденсатора из полистироловой пленки дана на фиг. 3.17.

**Электролитические конденсаторы.** Наиболее важной особенностью этих конденсаторов являются значительные емкости, получаемые в заданном объеме при низком рабочем напряжении. Конденсаторы изготавливаются анодированием алюминиевой фольги при «формировании» в борной ванне с постепенно возрастающим рабочим напряжением. Максимальное формирующее напряжение составляет  $\sim 600$  в. Электролитические конденсаторы употребляются для фильтрации и блокировки низких частот, но они могут также применяться для накопления мощных импульсов, как, например, в ламповых вспышках.

**Конденсаторы из алюминиевой фольги.** Имеется два типа таких конденсаторов: с плоской и травленной поверхностью. В последнем случае поверхность фольги подвергается травлению для увеличения ее площади.

Ниже приводятся некоторые данные этих конденсаторов.

**Е м к о с т ь.** При повышении температуры от  $20$  до  $70^{\circ}\text{C}$  наблюдается небольшое увеличение емкости (около  $10\%$ ); при понижении температуры до  $-30^{\circ}\text{C}$  происходит постепенное ее уменьшение и затем очень быстрое уменьшение при еще более низких



Ф и г. 3. 17. Пластиковый (полистироловый) трубчатый конденсатор в металлическом корпусе, негерметизированный.

А — вставка из политетрафлуорэтилена; Б — припаянный вывод.

температурах. Емкость также слегка уменьшается при увеличении частоты выше  $50\text{ гц}$ , при  $10\,000\text{ гц}$  она снижается на  $10\%$ .

**К о э ф ф и ц и е н т м о щ н о с т и.** При  $50\text{ гц}$  и комнатной температуре значение коэффициента мощности составляет  $0,02 \div 0,05$ . При  $+70^{\circ}\text{C}$  наблюдается небольшое повышение его и значительное повышение при  $-30^{\circ}\text{C}$ . Значительное увеличение коэффициента мощности наблюдается также при увеличении частоты; при  $10\,000\text{ гц}$  он равен  $0,5$ .

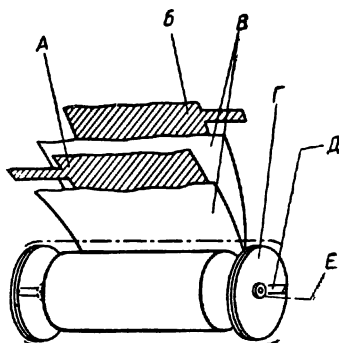
**Т о к у т е ч к и.** Величина тока утечки изменяется прямо пропорционально изменению температуры и имеет малое значение при  $-30^{\circ}\text{C}$ ; при  $+70^{\circ}\text{C}$ , однако, величина его примерно в  $10$  раз больше, чем при комнатной температуре. Ток утечки также увеличивается при подключении нагрузки, причем имеет очень большую величину в момент присоединения нагрузки, затем быстро падает и примерно через  $1\text{ мин}$  достигает постоянного значения.

**П о л н о е с о п р о т и в л е н и е.** При понижении температуры наблюдается постепенное увеличение полного сопротивления, которое при  $-30^{\circ}\text{C}$  имеет значение вдвое большее, чем при комнатной температуре; при дальнейшем понижении температуры увеличение происходит намного быстрее. При повышении температуры выше нормальной наблюдаются лишь незначительные изменения. С увеличением частоты полное сопротивление быстро падает и при частоте  $10\,000\text{ гц}$  для типичного конденсатора на  $16\text{ мкф}$  составляет

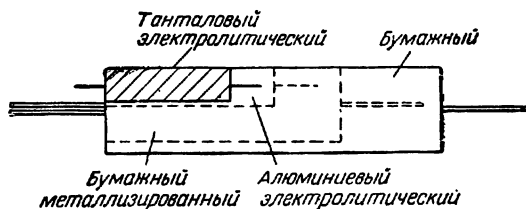
~2 ом. Электролитические конденсаторы, если они долго хранятся, следует периодически подвергать формованию путем приложения рабочего напряжения через сопротивление ~1000 ом в течение 1 час. Конструкция электролитического конденсатора из алюминиевой фольги дана на фиг. 3.18.

Ф и г. 3. 18. Электролитический конденсатор с травленной фольгой и двумя выводами.

*А* — положительный электрод из травленной алюминиевой фольги, покрытой оксидной пленкой, образующей диэлектрик; *Б* — используемая для внешнего вывода алюминиевая фольга, контактирующая с электролитом; *В* — бумажный разделитель, пропитанный электролитом — отрицательный электрод; *Г* — бакелитовый диск с резиновой облицовкой; *Д* — припаянное ушко; *Е* — алюминиевая заклепка, соединяющая ушко с выводом на торце фольги.



**Танталовые конденсаторы.** Основным преимуществом танталовых электролитических конденсаторов являются их малые габариты. Они наиболее пригодны для работы на низком напряжении, и, поскольку их верхний предел рабочей температуры ограничен, они очень удобны для использования в транзисторных схемах. На фиг. 3.19 сравниваются габариты танталового конденсатора и других трубчатых конденсаторов.

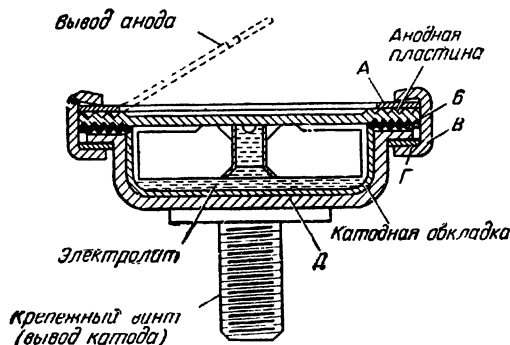


Ф и г. 3. 19. Сравнительные габариты танталового и других трубчатых конденсаторов.

Конструкция этих конденсаторов аналогична конструкции электролитических конденсаторов из алюминиевой фольги, но танталовая фольга используется здесь в качестве обкладки.

Тантал является инертным металлом, поэтому он не подвергается воздействию большинства кислот и его можно применять с электролитом, не опасаясь гальванической коррозии. Прокладкой служит обычно бумага с тряпичной основой, обладающая малой плотностью.

и пропитанная электролитом. Практически выделения газов не наблюдается, так что конденсатор может быть полностью герметизирован. Танталовые электролитические конденсаторы имеют продолжительный срок службы при хранении и не требуют периодической формовки. Они выпускаются как поляризованными, так и неполяризованными. Обычная емкость, которая может быть получена для поляризованного конденсатора длиной около 40,6 мм и диаметром ~8,7 мм, составляет 200 мкф при 6 в или 10 мкф при 150 в.



Фиг. 3. 20. Конструкция танталового таблеточного электролитического конденсатора. А — контактное кольцо; Б — прокладка; В — зажимное кольцо; Г — изолирующая шайба из политетрафлуорэтилена; Д — катодная крышка.

мерно +70° С, но кратковременно конденсатор может работать и при несколько более высокой температуре.

Наиболее интересным свойством этого типа конденсаторов является исключительно низкий ток утечки, который для конденсаторов 1 мкф при 150 в и 20° С составляет около 10 мка в течение 10 сек, затем падает до 0,7 мка через 1 час и до 0,5 мка через 3 час. Постоянная времени поэтому равна

$$RC = \left( \frac{E}{I} \right) C = \frac{150}{0,7} \cdot 1 = 200 \text{ ом} \cdot \text{ф (или сек)}.$$

Танталовые электролитические конденсаторы используются как развязывающие конденсаторы, но их не следует применять в цепях переменного тока большой мощности, потому что в этих условиях они имеют малое пробивное напряжение. При использовании их в качестве конденсаторов связи во временных цепях наблюдается некоторое искажение формы импульса (т. е. имеют место некоторые изменения крутизны фронта) из-за фазовых изменений, вносимых

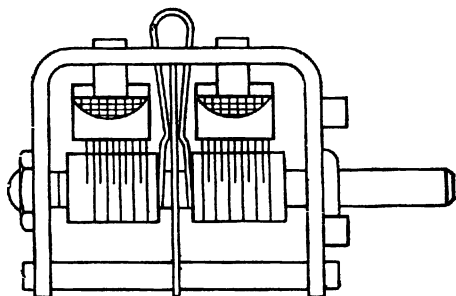
Допуски составляют приблизительно  $\pm 20\%$  для  $C \geq 0,25$  мкф и несколько выше при меньших значениях емкости. Коэффициент мощности значительно меняется с изменением температуры и напряжения. При 50 гц он равен 12% при +70° С, 8% при комнатной температуре и 20% при -40° С (для 25 в и выше). Коэффициент мощности увеличивается с уменьшением рабочего напряжения. Максимальная рабочая температура равна при-

последовательным сопротивлением. При использовании их на более высоких частотах (1—10  $\text{кгц}$ ) потери начинают значительно расти и становятся сравнимыми с таблеточным конденсатором, у которого потери начинают расти уже при частотах порядка нескольких сотен герц. У обоих этих конденсаторов потери значительно заметнее при температурах ниже комнатной.

**Таблеточные конденсаторы.** Танталовые таблеточные электролитические конденсаторы не нуждаются в периодическом формировании, срок хранения их более 10 лет. Они отличаются большой емкостью при малом объеме, и ток утечки у них предельно мал (порядка нескольких  $\text{мкА}$ ). Это позволяет использовать их в таких цепях, как мультивибраторы. Они имеют более низкие значения номинальных напряжений, но способны работать в диапазоне температур от  $-55$  до  $+125^\circ\text{C}$  с ничтожным изменением емкости. Конструкция их показана на фиг. 3.20.

### КОНДЕНСАТОРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

В настоящей книге описаны только радиоконденсаторы общего назначения, используемые в качестве настроечных конденсаторов в широкополосных приемниках. В процессе миниатюризации они изменялись от больших одинарных конденсаторов до компактных блоков из 4—5 конденсаторов, у которых допуски на номинальную емкость могут быть в пределах 1% или 1  $\text{нф}$ . Коэффициент потерь новейшего воздушного диэлектрического конденсатора переменной емкости при 1  $\text{Мгц}$  колеблется в пределах от 0,03% (при минимальных величинах емкости) до 0,06% (при максимальных величинах емкости). Емкость конденсаторов этого типа может изменяться по прямочастотному и прямоволновому законам. Нормальное перекрытие емкости составляет около 400—500  $\text{нф}$ , но в пределах этого перекрытия могут быть получены значения 10—600  $\text{нф}$ . Конструкция миниатюрного конденсатора приведена на фиг. 3.21. Перечень миниатюрных переменных и подстроечных конденсаторов, выпускаемых в настоящее время промышленностью, приведен на стр. 151.



Фиг. 3. 21. Миниатюрный воздушный диэлектрический конденсатор общего назначения.

## ТРАНСФОРМАТОРЫ

### Трансформаторы звуковой частоты

В настоящее время при использовании сигналов низкого уровня в транзисторных схемах применяются специальные субминиатюрные трансформаторы и катушки индуктивности с малыми по размеру магнитными сердечниками. Когда мощность измеряется в милливаттах, требуется лишь несколько граммов магнитного материала. Кроме того, оказывается возможным уменьшить до минимума объем обмотки, поскольку в данном случае допустимо довольно высокое ее сопротивление. Постоянный намагничивающий ток является фактором, определяющим размеры сердечника, но его влияние может быть уменьшено путем применения пуш-пульного соединения. Толщина сердечника может быть уменьшена до размеров одной пластины, что делает возможным применить монолитную или штампованную конструкцию. Следует обращать особое внимание на качество концевых соединений в магнитной цепи, обрабатывая их шлифовкой с точностью, требуемой оптическими стандартами.

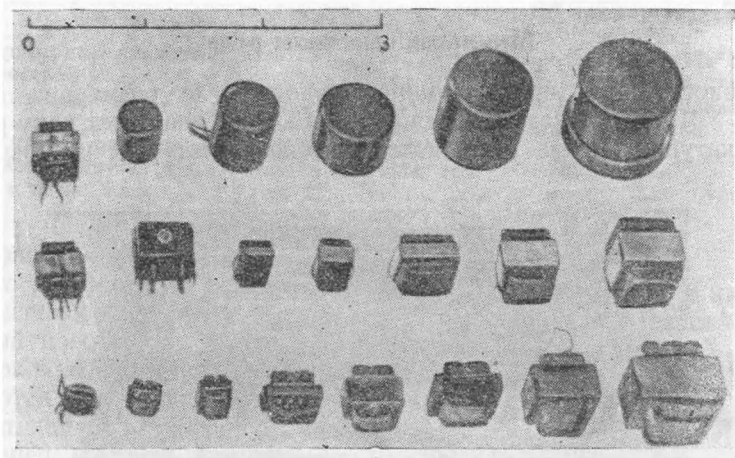
В транзисторных схемах при оптимальных условиях коэффициент усиления по мощности лишь незначительно уменьшается при снижении уровня рабочей мощности, и при миниатюризации постоянный ток должен быть минимально допустимым. Магнитная цепь должна иметь наименьшее поперечное сечение, а сопротивление обмотки наибольшим в допустимых пределах. Поскольку длина провода обмотки связана с размерами магнитной цепи, диаметр провода может быть значительно уменьшен. Это в свою очередь влечет за собой уменьшение объема, занимаемого обмоткой, и соответственно длины магнитной цепи. Хорошая миниатюрная электронная конструкция характеризуется плотной компоновкой, минимальной толщиной катушки и отсутствием пустотных объемов. Это приводит к снижению эквивалентной сосредоточенной емкости обмотки, в результате чего миниатюризация может улучшить частотную характеристику электронной аппаратуры.

В небольших трансформаторах целесообразно использовать такие магнитные сплавы, обладающие высокой проницаемостью, как мю-металл, пермаллой «С» или радиометалл и пермаллой «В».

Ленточные сердечники в форме тороида наиболее пригодны для изготовления миниатюрных трансформаторов и обеспечивают полное использование магнитной проницаемости материала ленты. Сердечники, выполненные из плоских пластин, характеризуются наличием заметного влияния воздушных зазоров и нерациональным использованием поперечного сечения вследствие неравномерного насыщения в местах стыков. Форма пластинчатых сердечников определяется величиной требуемого эффективного воздушного зазо-



ра. Минимальный эффективный зазор достигается при тщательной укладке плотно сжатых пластин Е- и I-образной формы. Поверхности малоразмерных пластин толщиной 0,4 мм достаточно изолировать слоем окиси определенной толщины путем доступа ограниченного количества воздуха во время их термической обработки.



Фиг. 3. 22. Различные типы миниатюрных трансформаторов.  
Масштаб в дюймах.

Изготовление малоразмерных пластин требует соблюдения малых допусков в вырубных штампах и последующей заточки для устранения крупных заусенцев.

При изготовлении обмотки необходимо регулировать скорость вращения револьверной головкой, сматывающей проволоку со стационарной бобины. Увеличение и снижение скорости намоточной машины следует производить весьма тщательно, тогда никаких трудностей в высокоскоростной намотке не возникнет.

Выводы обмотки должны быть не слишком толстыми и жесткими и прочно закрепляться лентой на конце обмотки. Предпочтительно соединять выводы обмотки со штырьками, запрессованными в катушку.

Максимальная защита таких миниатюрных трансформаторов обеспечивается капсулированием или заливкой компаундом после пропитки лаком. Некоторые типы миниатюрных трансформаторов показаны на фиг. 3.22<sup>1)</sup>.

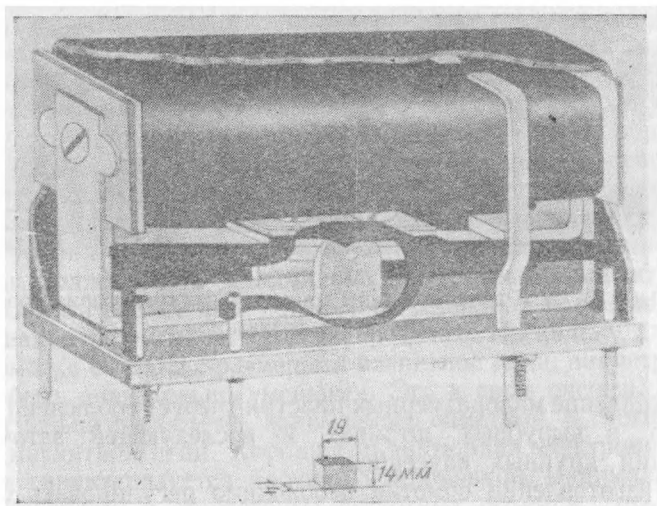
<sup>1)</sup> См. стр. 152 и 158.

### РЕЛЕ<sup>1)</sup>

В транзисторных схемах применяются два типа реле: специально разработанные миниатюрные электромагнитные реле и используемые в качестве реле переключающие транзисторы.

#### Миниатюрные типы реле

Конструкция типового миниатюрного реле размерами  $19 \times 14 \times 14$  мм показана на фиг. 3.23. Такое реле имеет одну рабочую катушку и два переключающих контакта, рассчитанных на



Ф и г. 3. 23. Типовое миниатюрное реле.

ток 0,5 а при напряжении 28 в пост. тока. Реле заключено в литом корпусе и загерметизировано стеклометаллической платой с 8 штырьками. Якорь совершает возвратно-поступательное движение и возвращается в исходное положение посредством пружин. К якорю крепятся два подвижных контакта, осуществляющих переключение. Пружины упираются в якорь и соприкасают его с двумя контактами на штырьках платы. Реле крепится к шасси двумя болтами.

<sup>1)</sup> См. стр. 160.

Цилиндрическое микрореле фирмы Smith's Aircraft Instruments Ltd. имеет следующие технические данные:

Рабочее напряжение катушки . . . . .	6, 9, 15, 30, 50 в пост. т.
Мощность, потребляемая катушкой . . . . .	200 мвт
Контакты . . . . .	1 переключение
Номинальная нагрузка на контакты . . . . .	0,5 а при 30 в пост. т.
Срок службы (число переключений) . . . . .	10 <sup>7</sup> при нулевой нагрузке 10 <sup>6</sup> при номинальной нагрузке
Температурный диапазон . . . . .	—55 — +125° С
Влажность . . . . .	Класс Н1
Герметизация . . . . .	Контакты изолированы от катушки

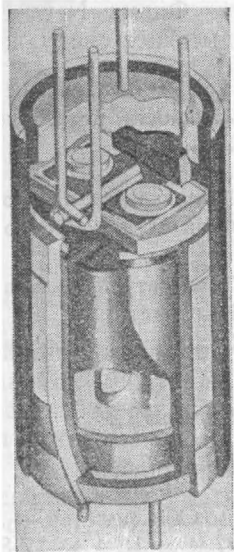
Реле имеет цилиндрическую форму, диаметр 7,1 мм, длину 11,4 мм, выводы с обоих торцов и весит 2,5 г . . . . . —

Конструкция реле показана на фиг. 3.24.

Это реле состоит из магнитной цепи горшкового типа и якоря, подвешенного на плоской возвратной пружине, допускающей свободный поворот якоря для контактирования. Центральный полюс и концевые щетки вытачиваются из мягкой стали. Бронзовый диск, герметизирующий катушку, напрессовывается на конец центрального полюса, после чего монтируют выводы и нейлоновые изолирующие втулки. Собранный узел покрывают эпоксидной смолой, затем наматывают катушку и на концевую щетку надевают внешний стакан магнита, выполненный из мягкой стали. Герметизирующий диск припаивают заподлицо.

Платиновые проволочные контакты, запрессованные в стеклянное доньшко, сгибают таким образом, чтобы получить требуемый зазор между контактами. Минимальное давление на нормально замкнутый контакт составляет 10 г. Все устройство запрессовывается в опорную втулку.

Тело магнита и контактный узел устанавливаются в специальный шаблон, после чего к катушке подключается максимальное напряжение. Обе половины спрессовывают вместе до переключения контактов реле. Затем напряжение, подаваемое на катушку, уменьшают до минимального рабочего уровня и продолжают прессование до следующего срабатывания контактов. Таким способом устанавливают необходимую ширину воз-



Ф и г. 3. 24. Цилиндрическое микрореле.

душного зазора. Герметизация реле осуществляется погружением в силиконовый лак и последующим высушиванием при 150°С.

Высокая стойкость реле к вибрационным нагрузкам в любой плоскости обеспечивается высоким соотношением усилие/масса, составляющим около 500/1.

Выпускается 5 моделей реле, перекрывающих необходимый диапазон напряжений:

Тип реле фирмы Smith's A. J.	Номинальное напряжение, в	Рабочее на- пряжение (не более), в	Мощность при рабочем на- пряжении, вт
Z/11 PCR/1	50	34	0,32
Z/11 PCR/2	30	20	0,27
Z/11 PCR/3	15	10	0,23
Z/11 PCR/4	9	6	0,2
Z/11 PCR/5	6	4	0,35

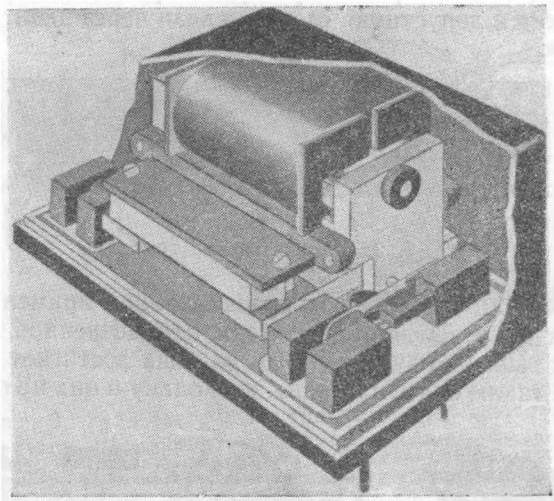
Фирма New Electronic Products Ltd. сконструировала реле, имеющее следующие технические данные:

Рабочее напряжение катушки . . . . .	1,5; 3; 6; 15; 30 и 50 в
Мощность, потребляемая катушкой . . . . .	100 мвт
Контакты . . . . .	2 переключения, 4 переключения
Номинальная нагрузка на контакты . . . . .	0,5 а при 50 в пост. т.
Срок службы (число переключений) . . . . .	10 <sup>7</sup> при нулевой нагрузке 10 <sup>6</sup> при номинальной нагрузке
Температурный диапазон . . . . .	—55 +125° С
Влажность . . . . .	Класс HI
Стойкость к вибрационным и ударным нагрузкам . . . . .	100 г в диапазоне частот 30—2000 гц
Размеры . . . . .	Минимальные при требующейся надежности
Герметизация . . . . .	Герметизировано

Оба реле, как на 2, так и на 4 переключения, имеют размеры 27,9 × 18,4 × 17,8 мм.

Первое реле имеет одну плату (фиг. 3.25), второе — две, причем вторая плата расположена на противоположной стороне. В обоих реле имеется по два якоря, хорошо уравновешенных по центру тяжести. В новейшей конструкции прочно закрепленный и расположенный под прямым углом к якорю рычажный механизм позволяет якорю вращаться лишь в противоположных направлениях, предохраняя от воздействия скручивающих вибраций. Перемещение

якоря составляет 127 мк. В реле с 4 переключениями оба конца каждого якоря производят переключение между двумя парами контактов, а в реле с 2 переключениями последние осуществляются только одним концом якоря. Пружинный механизм возвращает якорь в исходное положение после срабатывания.



Ф и г. 3. 25. Двухъякорное реле.

Оба реле имеют постоянный магнит, расположенный параллельно катушке. Когда поле, создаваемое катушкой, налагается на поле постоянного магнита, якорь быстро перемещается под воздействием полей с противоположными знаками. Когда ток в катушке прекращается, постоянный магнит обеспечивает возвращение якоря в исходное положение. Такая конструкция исключает необходимость применения возвратных пружин.

Уровень магнитных полей регулируется перемещением магнитов или подбором магнитов различных размеров. Интересно отметить, что при перемене полярности поля, создаваемого катушкой, время срабатывания и отлипания значительно изменяется, однако характеристики контактов остаются постоянными.

### ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Миниатюрные тумблеры, галетные переключатели и микровыключатели часто применяются в транзисторных схемах.

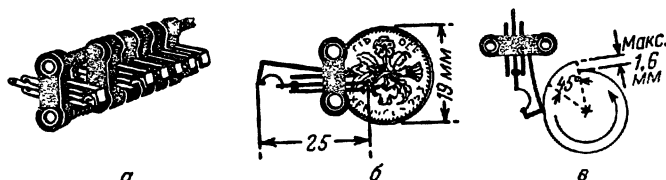
### Тумблеры

Переключатели этого типа предназначены главным образом для включения и отключения сети переменного тока или источника питания постоянного тока, однако их можно применять и на частоте до нескольких тысяч герц. В частности, они с успехом применялись в контурах до 1 МГц, причем критерием применимости на высокой частоте является допустимая степень связи через цепи.



Ф и г. 3. 26. Миниатюрные тумблеры.

Переключатели с медленным срабатыванием применяются главным образом на переменном токе, так как медленное выключение способствует гашению дуги до того, как она достигнет опасной величины. Они также более надежны, поскольку в них не применяется



Ф и г. 3. 27. Открытые микропереключатели.

а — соединение в ряд; б — требуемое для микропереключателя пространство; в — кулачковый механизм.

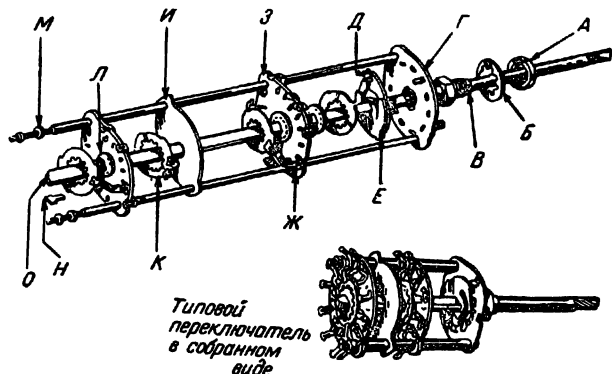
сильно сжатая, легко ломающаяся пружина. Неподвижные контакты в этом переключателе делаются из серебра и фосфористо-бронзового би-металла, а подвижные — из чеканного серебра. Рабочее усилие на тумблере для более мелких переключателей колеблется от 28,3 до 141,5 г. Миниатюрные тумблеры, приводимые в действие ручным рычажком, показаны на фиг. 3.26. На фиг. 3.27 представлен открытый микропереключатель. Такие переключатели можно соединять в ряд по несколько штук.

### Галетные переключатели

Конструкция типового галетного переключателя показана на фиг. 3.28. Основной частью переключателя является галета. Она должна обладать хорошей диэлектрической прочностью для предот-

вращения пробоя при малых зазорах между элементами конструкции, а также иметь высокое сопротивление дугообразованию и хорошую изоляцию для обеспечения минимального тока утечки даже при наличии влажности.

Самоочищающиеся при переключении контакты обычно выполняются из нейзильбера или серебряного сплава; они имеют малое



Фиг. 3. 28. Конструкция галетного переключателя.

А—гайка; Б—антивибрационная прокладка; В—С-образная шайба; Г—индексная пластина; Д—бегунок; Е—индексная пружина; Ж—фиксатор; З—статор; И—щиток; К—щетка ротора; Л—ротор; М—прокладка; Н—Т-образная пластина; О—ось.

сопротивление, составляющее в нормальных условиях от 1 до  $10 \cdot 10^{-3}$  ом. При использовании их в высокочастотных схемах следует учитывать возможность появления межконтактных емкостей.

Имеются миниатюрные типы переключателей размерами  $19 \times 19 \times 12,7$  мм.

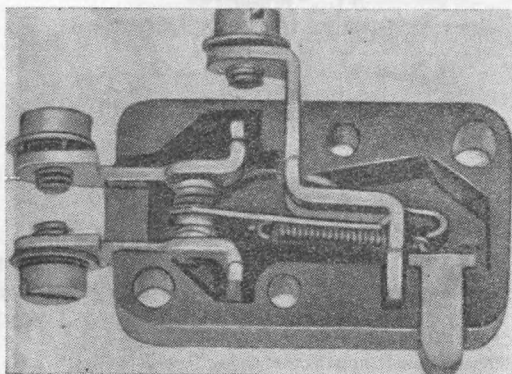
### Микропереключатели

Эти переключатели, широко применяемые в электронном оборудовании, относятся к типу быстродействующих («мгновенного действия») и включаются нажимом. Они используются как выключатели предельные, управляющие и предохранительные.

При срабатывании подвижный штифт переключателя нажимает на пружину с пластиной, выполненную из сплава меди с бериллием, и отгибает ее до упора. Контакт пружинящей пластины соприкасается с неподвижным контактом. Когда давление снимается, пружина, прерывая контакт, возвращается в исходное положение. Такие переключатели весьма чувствительны к давлению и срабатывают

приблизительно через 5 *мксек*, однако щелчок происходит лишь после того, как подвижный штифт переместится на строго установленное расстояние. Предел перемещения штифта может составлять лишь несколько сотых долей миллиметра.

Такие переключатели выпускаются в широком диапазоне номиналов тока и напряжения (2—10 *а* и 120—600 *в*). При правильной работе долговечность их может достигать 20 и более миллионов переключений.



Ф и г. 3. 29. Устройство микропереключателя.

Общий вид механизма миниатюрного микровыключателя размерами примерно  $25 \times 15 \times 10$  *мм* и весом 7 *г* представлен на фиг. 3.29. Фирмой Honeywell-Brown выпускается микровыключатель еще меньших размеров — всего  $12,7 \times 8,9 \times 5,1$  *мм* (тип ISXI-T).

### РАЗЪЕМЫ

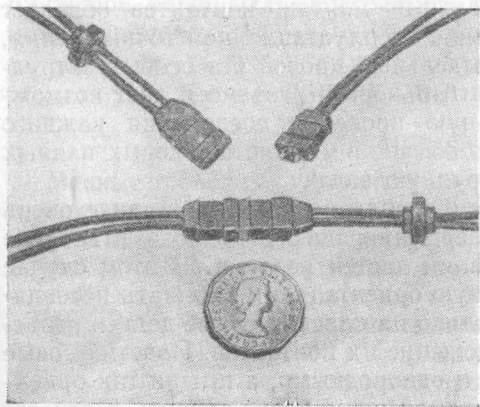
Существуют следующие типы миниатюрных разъемов: с контактами прямоугольного сечения (прямоугольные) — двухполюсные и многополюсные; с контактами круглого сечения (цилиндрические) — многополюсные штепсельные разъемы и коаксиальные высокочастотные разъемы.

#### Прямоугольные штепсельные разъемы

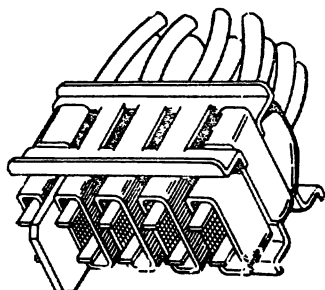
Несколько малогабаритных двухполюсных прямоугольных разъемов может быть составлено в многополюсный разъем с парными соединениями. Типичный двухполюсный штепсельный разъем показан на фиг. 3.30, а многополюсный узел, собранный из таких разъемов, — на фиг. 3.31.



Двухполюсные штепсельные разъемы имеют габаритные размеры  $9,5 \times 4,0 \times 29$  мм. Они водонепроницаемы, но не влагоустойчивы (для влагоустойчивости их можно заполнять кремнеорганической массой). Наибольшее переходное сопротивление контактов составляет 0,01 ом, а сопротивление изоляции при температуре  $+70^\circ\text{C}$  и нормальной влажности воздуха — около 1000 Мом. Существуют разновидности разъемов с контактами, рассчитанными на ток 5 а, с пробивным напряжением постоянного тока около 3500 в при расстоянии между контактами 7,5 мм.



Фиг. 3. 30. Миниатюрный кабельный разъем.



Фиг. 3. 31. Узел, собранный из двухполюсных разъемов.

Вывод каждого контакта штепсельного разъема обычно заключается в нейлоновую трубку диаметром 6,5 мм и длиной  $\sim 16$  мм; поверхность контакта покрывается серебром. Выпускаются также многополюсные штепсельные разъемы прямоугольной формы с 7, 14, 20, 26, 29 и 34 контактами и габаритными размерами в пределах от  $5 \times 20 \times 13,5$  мм для 7-штырьковых разъемов до  $9,5 \times 32 \times 13,5$  мм для 34-штырьковых разъемов.

### Цилиндрические многополюсные разъемы

Проблемы конструирования контактов сверхминиатюрных штепсельных разъемов наряду с температурными требованиями выдвигают множество вопросов. Контакты с диаметром менее 1 мм, помимо хороших физических свойств и высокой проводимости, должны быть к тому же экономичными в производстве. Для обеспечения высокого качества разъемов в тяжелых условиях эксплуатации требуется применение прочного золотого покрытия толщиной по крайней мере 5 мк, а для нормальных условий часто оказывается достаточным использование серебряного покрытия.

Принимая во внимание миниатюрность кабелей и компактное расположение контактов в разъеме, присоединение провода к контакту следует производить отдельно до установки контактов в разъем. Такого рода разъемы вот уже в течение ряда лет подтверждают свою надежность в различных условиях эксплуатации; они ликвидируют хрупкость соединений, произведенных с помощью пайки, особенно опасную при тонких проводниках, и обеспечивают выполнение надежного соединения даже после длительного хранения контактов и разъемов. Раздельный монтаж контактов обладает определенными преимуществами с эксплуатационной точки зрения, так как позволяет заменять отдельный провод без особых затруднений даже в середине многостырькового разъема и дает возможность произвести окончательную проверку соединения каждого проводника перед сборкой, что обычно в многостырьковых паяных конструкциях представляет трудную задачу.

Разъемы, имеющие контактирующие поверхности в виде очень мелких штырей, требуют совершенно нового подхода в вопросе обеспечения взаимной ориентации частей разъема. В этом случае невозможно обеспечить надежную ориентацию и избежать несовпадения контактов, полагаясь только на пластмассовые детали разъемов или на правильное расположение их контактов. Пластмассовые детали должны быть ровными и однородными, а штыри так ориентированы, чтобы они смогли, самоцентрируясь, входить в эти детали, иначе при сильном нажатии они согнутся.

Конструкции разъемов, в которых контактные втулки герметизированы и в них обеспечивается умеренное контактное давление, показывают заметное улучшение электрических свойств в разреженной атмосфере. Испытания показали, что отношение пробивного напряжения при нормальном давлении воздуха к пробивному напряжению при давлении воздуха, соответствующем высоте 21 000 м, уменьшено в этих конструкциях до 3 : 1 по сравнению с величиной 5 : 1, присущей прежним конструкциям. Испытания с многократными изменениями давления воздуха от пониженного до нормального во влажной атмосфере продемонстрировали очень высокое значение их сопротивления изоляции.

В последних конструкциях разъемов эксплуатационные свойства значительно улучшены в сравнении с предыдущими; так, на такой же площади, как и раньше, располагается удвоенное количество контактов, а их качество повышено вдвое (имеется в виду номинальное напряжение, сопротивление изоляции, диапазон рабочих температур и ударопрочность). Перечисленные свойства таких разъемов почти равноценны свойствам цельного кабеля, у которого лишь увеличены сечение (примерно в 3 раза) и вес (на 150%).

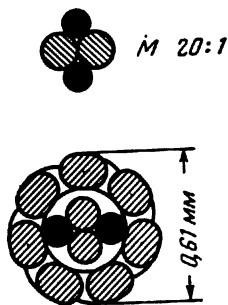
### Коаксиальные разъемы

Сверхминиатюрные коаксиальные разъемы для диапазона с. в. ч. изготавливаются диаметром примерно 6,0 и длиной 18 мм; их волновое сопротивление  $Z_0 = 50 \text{ ом}$  и максимальное рабочее напряжение 600 в. Контакты часто покрываются золотом по серебру. Разъемы для частот свыше 300 Мгц (КСВН 1,2) с фторопластовой изоляцией имеют диаметр 5,7 мм и длину 19,4 мм; их пробивное напряжение равно 1000 в постоянного тока при нормальном атмосферном давлении.

### ПРОВОДА И В. Ч.-КАБЕЛИ

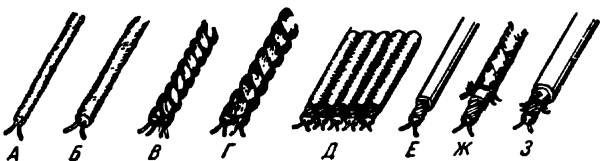
#### Провода

Медные провода для миниатюрных конструкций выпускаются различных размеров с оболочками из полихлорвинила и фторопласта, обычно окрашенными в разные цвета. Одножильные провода обычно соответствуют 22 s. w. g<sup>1)</sup> с хлорвиниловой оболочкой толщиной примерно 0,5 мм, а многожильные кабели соответствуют 7/33 s. w. g, 7/40 s. w. g. или 14/40 s. w. g. Для изоляции и увеличения прочности кабелей часто используют нейлоновые нити. На фиг. 3.32 показаны сечения двухжильного (в масштабе 20 : 1) и



Фиг. 3.32. Типичное сечение миниатюрных многожильных кабелей.

*а*—сечение внутреннего слоя, состоящего из двух медных проволочек и двух нейлоновых нитей; *б*—полное сечение внутреннего и внешнего слоев кабеля, состоящего из медных проволочек диаметром 0,08 мм и нейлоновых нитей диаметром 0,13 мм.



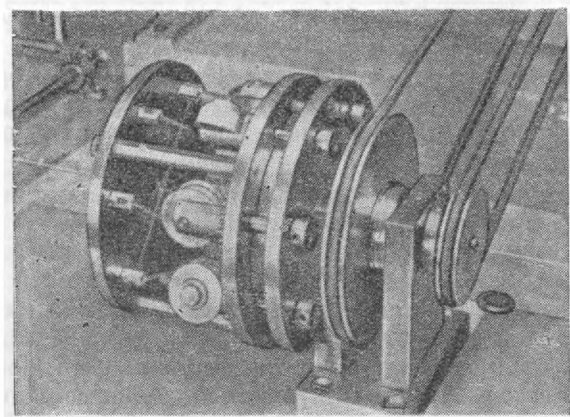
Фиг. 3.33. Типичные миниатюрные многожильные кабели.

*А*—2-жильный, наружный диаметр 0,6 мм, проводники сопротивлением 0,64 ом/м; *Б*—2-жильный, наружный диаметр 0,8 мм, проводники—0,64 ом/м; *В*—4-жильный, попарно скрученный, наружный диаметр 1,2 мм; *Г*—4-жильный, попарно скрученный, наружный диаметр 1,6 мм; *Д*—10-жильная лента 5,1×1,7 мм; *Е*—2-жильный с полихлорвиниловой изоляцией, наружный диаметр 1,0 и 1,25 мм; *Ж*—2-жильный экранированный; *З*—2-жильный экранированный с полихлорвиниловой изоляцией.

многожильного кабелей. Выпускаемые разновидности таких кабелей представлены на фиг. 3.33. Для изготовления многожильных

<sup>1)</sup> S. w. g. (Standard wire gauge)—Британский нормальный сортамент проволоки.—Прим. ред.

кабелей и кабельных оболочек применяются специальные машины; на фиг. 3.34 показана механическая головка для производства кабелей (см. перечень на стр. 162).



Фиг. 3. 34. Механическая головка для производства кабелей.

**В. ч.-кабел и.** Миниатюрные кабели типа UR94 и UR95 имеют следующие данные:

UR94  $Z_0 = 50 \text{ ом}$

Диаметр с полиэтиленовой изоляцией . . . . .	1 мм
Диаметр с нейлоновой оболочкой . . . . .	1,7 мм
Внутренний проводник . . . . .	Омедненный стальной провод, покрытый серебром

UR95  $Z_0 = 50 \text{ ом}$

Диаметр с полиэтиленовой изоляцией . . . . .	1,5 мм
Диаметр с нейлоновой оболочкой . . . . .	2,3 мм
Внутренний проводник . . . . .	Омедненный стальной провод, покрытый серебром

Миниатюрные многожильные фторопластовые кабели с количеством жил 3, 4, 6, 12, 18 и 25 выпускаются неэкранированные, с общим экраном и с индивидуальными экранами для каждой жилы.

Защитная оболочка кабеля состоит из стеклянной оплетки, полуспекшейся фторопластовой ленты и еще одной стеклянной оплетки, покрытой распыленным фторопластом. Вся защитная оболочка в целом сплавляется в компактную массу.

Количество жил	Диаметр кабелей		
	Неэкранированные, мм	С общим экраном, мм	С индивидуальными экранами, мм
3	3,6	4,6	4,3
25	8,5	10,2	11,4

Сверхминиатюрные многожильные кабели с количеством жил 1, 2, 3, 6, 12, 18, 25 и 50 выпускаются с экранами на каждой жиле или с одним общим экраном на все жилы.

Каждая жила кабеля состоит из 7 проволочек (0,1 мм), покрытых слоем полихлорвинила толщиной 0,18 мм. При этом диаметр жилы без экрана составляет 0,7 мм, а с экраном 0,8 мм.

Общий диаметр кабелей составляет 1,8 мм для 1-жильного кабеля и 9,7 мм для 50-жильного.

Рабочее напряжение 250 в (эфф.).

Выпускаются миниатюрные экранированные провода:

Одинарный тип	Двойной тип
1 проводник из 6 медных проводов диаметром 0,06 мм	2 проводника по 6 медных проводов диаметром 0,06 мм
Емкость 15 пф/м	—
Полиэтиленовое покрытие с наружным диаметром 0,25 мм	Полиэтиленовое покрытие с наружным диаметром 0,25 мм на каждом проводнике
Полностью экранирован	Полностью экранирован

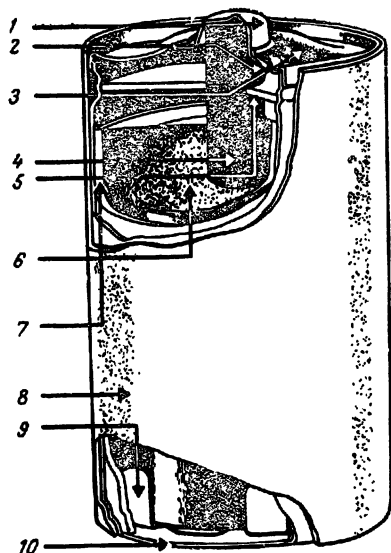
## БАТАРЕИ И АККУМУЛЯТОРЫ

### Первичные элементы

Наиболее распространенным из первичных элементов является элемент Лекланше, достаточно полно описанный в литературе. Устройство цилиндрического и галетного элементов этого типа показано на фиг. 3.35 и 3.36 соответственно. В галетной форме конструкции цинковая анодная пластина стороной, покрытой проводящим углем, взаимодействует с двуокисью марганца катодной пластины. В этой конструкции достигается наибольшая экономия объема, и батареи элементов получают небольших размеров при относительно высоких напряжениях. Оба типа дают э. д. с. примерно 1,5 в. В деполяризаторе используется не обычная двуокись марганца, а полученная электролитическим путем, что обеспечивает нормальную э. д. с. в течение длительного времени и дает возможность получить большую плотность тока при разряде.

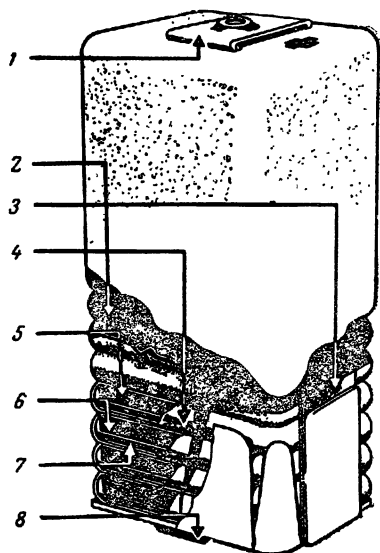
**Ртутный элемент.** Ртутно-окисный элемент может быть герметизирован. Элемент этого типа показан на фиг. 3.37. Его крыш-

ка, являющаяся отрицательным полюсом, представляет собой колпак с закрепленной на нем витой цинковой лентой. На дно укладываются таблетки из окиси ртути с графитом, в качестве электролита используется едкий кали, смягченный цинкатом калия, заполняющий пространство между таблетками.



Фиг. 3.35. Цилиндрический элемент.

1 — латунный колпачок; 2 — изоляционная шайба; 3 — металлическая заделка; 4 — положительный электрод; 5 — картонная шайба; 6 — деполяризатор; 7 — электролит; 8 — бумажная гильза; 9 — бумажная изоляционная прокладка; 10 — отрицательный электрод.



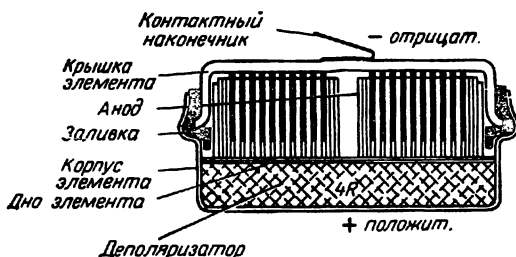
Фиг. 3.36. Галетный элемент.

1 — латунный положительный контакт; 2 — изолирующий слой вара; 3 — скрепляющая лента; 4 — пластмассовый корпус элемента; 5 — деполяризатор; 6 — волокно, пропитанное электролитом; 7 — цинковый электрод, покрытый углем; 8 — латунный отрицательный контакт.

В результате усовершенствования были получены самогерметизирующиеся элементы, в которых анод из спрессованного цинкового порошка заключен во втулку из окиси ртути. Идея конструкции заключается в том, что применяется двойная крышка, создающая двойное зажатие уплотняющей прокладки. Когда весьма малое количество газа, образовавшееся в элементе, достигает определенного давления, прокладка сжимается, давая газу возможность просочиться между внутренней и внешней оболочками и выйти наружу через небольшое отверстие в дне элемента. Как только давление газа ослабевает, прокладка возвращается на свое место и вновь герметизирует элемент.

Основные особенности этого типа элементов следующие:

- 1) большой срок годности;
  - 2) ровная разрядная характеристика, причем основная часть ее лежит между первоначальным напряжением 1,34 и 1,25 в. При дальнейшем разряде происходит быстрое падение напряжения ниже 1,0 в;
  - 3) высокая концентрация энергии в единице объема.
- В ртутных элементах, в отличие от элементов Лекланше, внешняя оболочка является положительным выводом.



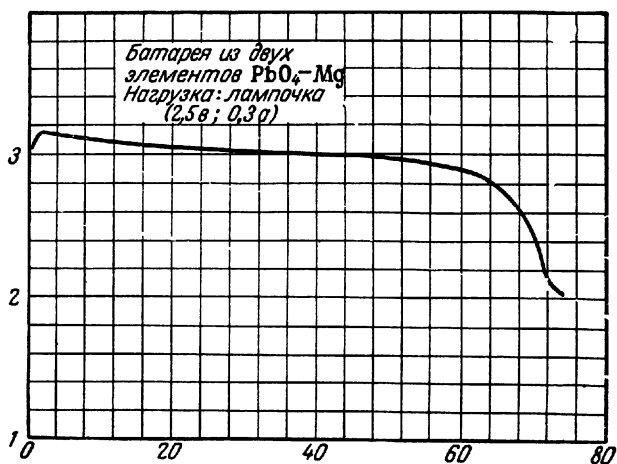
Фиг. 3. 37. Внутреннее устройство ртутного элемента.

**Калиевый элемент.** Конструкция этого элемента похожа на элемент Лекланше с наружной цинковой крышкой. Здесь в центре находится стержень из окиси ртути и графита с соответствующим пористым сепаратором, а цинковый электрод в виде цинкового порошка, нанесенного на абсорбирующую бумагу, обернут вокруг стержня. Эти элементы заполнены смолой (обычно полиэфирная смола) и имеют срок годности около 12 месяцев. По конструкции они похожи на предшествующие элементы, но характеризуются более высокой плотностью тока при низких температурах.

Любые ртутные элементы имеют емкость в 4—7 раз более (в зависимости от условий разряда), чем равный им по размерам элемент Лекланше.

**Магнийевый элемент.** Это разновидность элемента Лекланше с магниевым стаканом вместо цинкового. Магниевого стаканы изготавливаются выдавливанием с последующей специальной обработкой. Центральный столбик из двуокиси марганца точно такой же, как в элементе Лекланше. Электролитом является бромид магния. Одним из недостатков магниевого элемента является замедленное нарастание в нем максимального уровня напряжения, требующее определенного времени. Время нарастания напряжения значительно изменяется в зависимости от плотности тока, срока хранения и т. п. Замедление происходит благодаря защитной пленке

хромата, нанесенной на внутренней поверхности стакана для защиты магния от разрушения во время хранения. При включении батареи проходит некоторый промежуток времени (в зависимости от условий — несколько секунд или минут), прежде чем установится нормальное выходное напряжение. Основными преимуществами этих элементов являются сравнительно малый вес и увеличенная емкость.



Фиг. 3. 38. Типичная разрядная характеристика водно-активированной батареи.

По оси абсцисс отложено время разряда в часах, а по оси ординат — напряжение в вольтах.

**Сухой элемент.** В этом элементе используется твердый электролит (обычно йодистое серебро), и действие элемента зависит от ионной проводимости электролита. Он может работать при пониженных температурах и имеет очень длительный срок годности (предположительно до 20 лет). Номинальный ток составляет всего  $\sim 10^{-8}$  а при достаточно высоком напряжении  $\sim 40$  в на 1 см длины.

**Водно-активированные батареи.** Чтобы задействовать эти батареи, необходимо их погрузить в воду, причем скорость активации в соленой воде будет выше, чем в пресной. Типичная разрядная характеристика водно-активированных батарей приведена на фиг. 3.38. Одним из характерных свойств батарей является их инертность, вследствие чего они могут сохраняться в течение длительного периода времени, причем после активации имеют номинальную емкость.

**Элементы из магния и перекиси свинца** применяются в шарах-пилотах и имеют перекись свинца в качестве положительного электрода и магний в качестве отрицательного.



Сепараторы пропитаны поваренной солью. Для приведения их в действие требуется активация водой.

Батареи из магния и хлористого серебра используются главным образом для аварийного освещения на подводных лодках. Хлористое серебро отливается и прокатывается как металл. Очень хороший выход получается в течение 10—15 час. Они дороги и постепенно заменяются на медно-магниевые элементы.

Элементы из магния и хлористой меди. Медно-магниевые элементы производятся во многих разновидностях; некоторые из них после погружения в морскую воду дают высокое напряжение и имеют разрядную характеристику, сходную с показанной на фиг. 3.38. При нарушении герметизации и проникновении морской воды в батареях активируются смешанные высоковольтные и низковольтные ячейки.

Применяются многоэлементные серии, в которые вода, проникая через крышку и отверстия в перегородках между элементами, растекается внутри элемента, вытесняя из него воздух и увлажняя волокнистую прокладку. Как только элемент начинает действовать, выделяется некоторое количество газа, вытесняющего излишнюю воду. Такая многоэлементная батарея работает вполне удовлетворительно, несмотря на небольшие уравнительные токи между элементами. Батарея из 116 элементов может развить напряжение 120 в через 1 мин после включения и давать ток 90 ма в течение 1 час при установившемся напряжении 130 в.

### Вторичные элементы

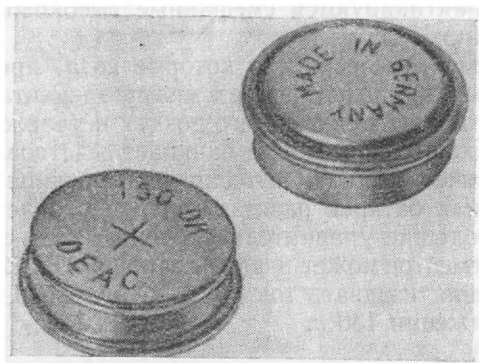
Свинцово-кислотные аккумуляторы. Применение современных материалов значительно улучшило качество этих аккумуляторов. Конструкция и действие вторичных элементов достаточно полно описаны в литературе.

Использование современных пластмасс, таких, как полистирол, для корпусов аккумуляторов и введение пористого полихлорвинила и других синтетических пластмассовых сепараторов значительно увеличило срок службы и общую экономичность свинцово-кислотного аккумулятора. Применявшиеся ранее сетки из сплава сурьмы и свинца заменены пластмассовыми, что, кроме экономии в весе, позволяет использовать чистый свинец, хорошо обеспечивающий сохранение заряда.

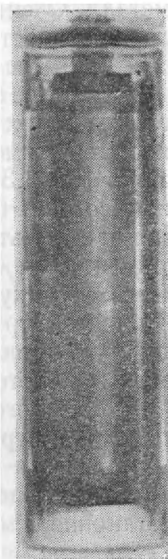
Хотя о возможности сухой зарядки было известно давно, применяться она стала только недавно. При этом батареи сохраняются в сухом виде и только перед употреблением заливаются серной кислотой с удельным весом 1,28. Спустя некоторое время (около 2 час) обеспечивается полная емкость без дальнейшей зарядки. Этот тип

аккумуляторов характеризуется большей стоимостью, в основном по технологическим причинам.

**Н и к е л ь - к а д м и е в ы е а к к у м у л я т о р ы.** В современных батареях применяют синтерированные пористые пластины, заполненные никелевым порошком и пропитанные соответствующей солью: никелевой для положительного полюса и кадмиевой для отрицательного. Пластина пропитывается 4—5 раз, с тем чтобы в поры сетки проникло максимальное количество активного материала. Затем пластины в окончательном виде



Ф и г. 3.39. «Пуговичный» никель-кадмиевый аккумулятор.



Ф и г. 3.40. Рентгенофотография герметичного щелочного аккумулятора.

формируются электрохимическим способом. Такая металлизация пластин дает возможность изготавливать батареи с очень большой площадью активной поверхности при толщине пластин менее 0,4 мм. Такие аккумуляторы обладают хорошими разрядными свойствами при низких температурах, что дает им определенные преимущества перед свинцово-кислотными батареями. На фиг. 3.39 показана «пуговичная» форма конструкции, обеспечивающая полную герметичность и удобная для набора блока аккумуляторов на высокое напряжение.

**Г е р м е т и ч н ы й щ е л о ч н ы й а к к у м у л я т о р** показан на фиг. 3.40. Центральный электрод — положительный, в виде цилиндра из прессованного порошка, окружен четырьмя отрицательными электродами прямоугольного сечения, изготовленными из порошка, напрессованного на проволочную сетку.

**Серебряно-цинковый аккумулятор** имеет положительный электрод из синтерированного серебряного порошка, а отрицательный — из серебряного провода, опрессованного окисью цинка и изогнутого зигзагами, образующими пластину. Отрицательные пластины завернуты в тонкие листы пористого целлофана и сложены в пачку попеременно с положительными. Провода от каждой пластины выводятся и привариваются к соответствующим стальным клеммам. Затем элемент заполняется небольшим количеством едкого кали, вызывающего образование перекиси серебра на поверхности положительного электрода и пористого цинка из окиси цинка — на отрицательном электроде.

Достоинством такого аккумулятора является способность обеспечивать очень высокую плотность тока; в процессе разряда перекись серебра восстанавливается до металлического серебра, из-за чего проводимость пластины постепенно увеличивается. С другой стороны, отрицательный электрод, будучи слабо растворимым в электролите, затрудняет осаждение цинка при последовательных зарядах.

Следует отметить, что сборку отрицательных электродов в пористом целлофане следует производить с особой осторожностью, чтобы избежать короткого замыкания. Практика показывает, что срок службы таких аккумуляторов составляет обычно 30—50 зарядно-разрядных циклов, а иногда при больших размерах достигает и 100 циклов.

Другим достоинством этого аккумулятора является чрезвычайно высокая отдача энергии на единицу объема и веса; она приблизительно втрое больше, чем у свинцово-кислотного аккумулятора.

**Элемент из свинца и перекиси кадмия.** Этот элемент заливается серной кислотой непосредственно перед применением. Его положительные пластины такие же, как пластины свинцово-кислотных аккумуляторов, отрицательные сделаны из листового кадмия. Это дает увеличение емкости, получаемой в том же объеме, примерно на 50%, а элемент становится первичным элементом, так как восстановление кадмия в отработанной батарее невозможно. Основное достоинство этого элемента состоит в том, что он может храниться неопределенно долго и отдавать полную емкость после его активации кислотой.

**Элемент из свинца и перекиси цинка.** Этот элемент, так же как и предыдущий, может храниться неопределенный срок и отдавать полную емкость после его активации. Листовые цинковые электроды элемента легко поляризуются при низких температурах или больших плотностях разрядного тока.

**Солнечные батареи.** Солнечная батарея состоит из отдельных больших пластинок кристаллического кремния, легированного бором. Каждый элемент диаметром ~ 38 мм дает около

0,35 в и 10 ма (максимально). Достаточное количество таких элементов может приводить в действие небольшую радиостанцию. Увеличение мощности солнечных батарей за счет использования крупных кремниевых пластинок в настоящее время нерентабельно, хотя нет сомнения, что в ближайшем будущем солнечные батареи будут усовершенствованы, а стоимость их значительно снижена.

**Атомные батареи.** В настоящее время существует несколько типов таких батарей, работа которых зависит от излучения радиоактивных изотопов (например, стронций-90). В первом типе изотопы помещаются напротив собирающего электрода, причем бомбардировка электронов создает напряжение, величина которого определяется исключительно качеством изоляции конструкции элемента.

Наиболее подходящим с этой точки зрения материалом является полистирол. От одного элемента можно получить напряжение более 2000 в, но обеспечиваемый им ток чрезвычайно мал ( $10^{-12}$  а). Такой элемент не зависит от температуры, и его теоретический срок службы достигает 25 лет. Некоторые другие элементы этого типа могут быть созданы с применением в качестве активных источников криптона или насыщенного тритием циркония.

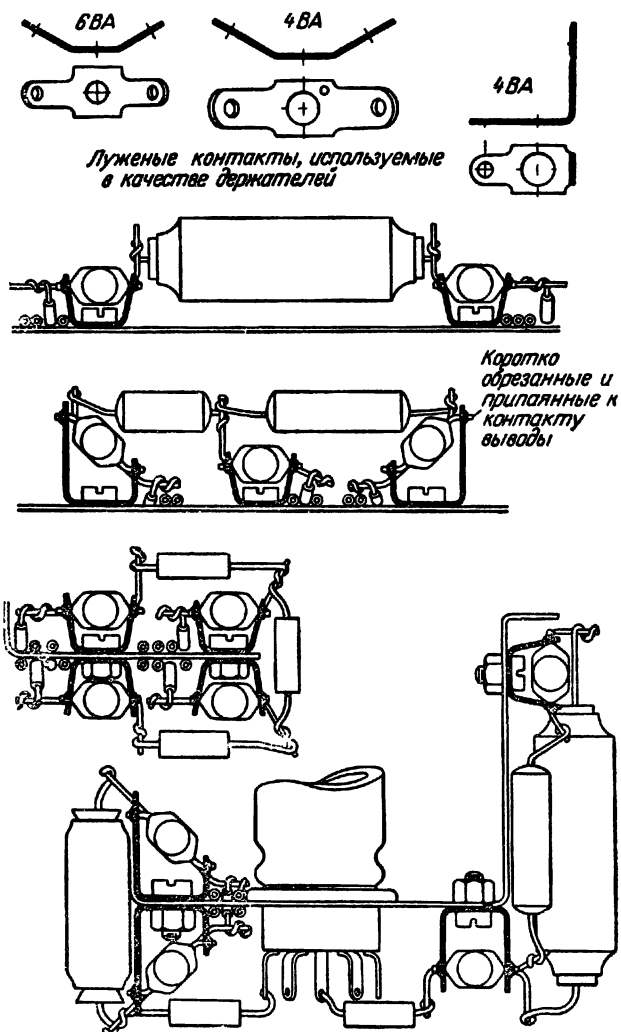
Работа второго типа атомных элементов определяется различным действием двух разнородных металлов; в этом случае от одного элемента можно получить очень небольшое напряжение порядка 1 в. Излучение из радиоактивного источника ионизирует газ между двумя металлическими электродами, благодаря чему и используется энергия изотопа, необходимая для функционирования элемента. В этом типе элементов внутреннее сопротивление также чрезвычайно высоко.

В третьем типе атомных элементов излучение используется для возбуждения люминесцентного фосфора. Его свечение возбуждает, как и в солнечном элементе, кремниевый  $p-n$ -переход. Сопротивление такого элемента относительно низкое, а напряжение соответственно мало.

## РАЗЛИЧНЫЕ МИНИАТЮРНЫЕ ДЕТАЛИ

### Монтажные панели и изоляционные стойки

Монтажные панели и втулки в радиоаппаратуре все еще широко применяются, но они имеют свои недостатки, которые необходимо учитывать при конструировании оборудования. Небольшое расстояние между выводами, обычно продиктованное соображениями экономии объема, может вызвать явление перекрытия по поверхности изолятора от весьма низких напряжений при конденсации влаги,



Фиг. 3. 41. Различные способы монтажа деталей.

которая понижает сопротивление изоляции между выводами. Пыль и грязь на поверхности монтажных панелей также понижают сопротивление изоляции. Другим недостатком, особенно значительным в военном оборудовании, где имеют место вибрация и удары, является низкая механическая прочность. Вследствие явлений резонанса, возникающих в монтажных панелях, перемещение радиодеталей под воздействием вибрации может достигать значительной величины, вызывая обрыв выводов или другое повреждение деталей. Монтаж блоков сам по себе является ответственным делом, поэтому там, где возможно воздействие ударов и вибрации, необходимо избегать соединения радиодеталей с платой с помощью жестких выводов.

Не следует пренебрегать опасностью перегрева перегруженных радиодеталей, смонтированных на панели очень плотно, особенно с учетом тенденции к повышению рабочих температур современных радиодеталей.

На фиг. 3.41 показано несколько часто встречающихся разновидностей монтажа.

Делают и другие конструкции монтажных панелей, где в зависимости от размеров деталей могут изменяться расположение и расстояние между отверстиями, в которых закрепляются монтажные контакты.

Ни одна панель не обеспечит такой гибкости при монтаже, какую дают отдельные монтажные стойки. Они с успехом используются в высокочастотных схемах, таких, как усилители промежуточной частоты, где применению монтажных панелей мешают дополнительные емкостные связи, возникающие при определенных взаимных расположениях панелей, а также потери в диэлектрике. Часто применяются фторопластовая и керамическая изоляции, имеющие низкие потери на радиочастотах и достаточную механическую прочность. Там, где имеют место сильные удары, керамические опорные стойки могут ломаться; здесь следует предпочесть фторопласт, хотя при этом может возникнуть проблема «холодной текучести», свойственной этому материалу.

### **Перечень миниатюрных радиодеталей**

Нижеследующий перечень предназначается в качестве руководства для выбора радиодеталей, пригодных для использования в транзисторных схемах. Перечень составлен к моменту публикации данной книги и, очевидно, должен систематически пополняться. Читатель может получать соответствующие сведения в информационном ежегоднике *British miniature Electronic Components Data Annual*, публикуемом издательством Pergamon Press [28].

Таблица 3.1

## Постоянные сопротивления

Изготовитель	Величина, ом	Номинальная мощность, вт	Размеры, мм	Примечание
Ardente	От 56 до $270 \cdot 10^3 \pm 10\%$	0,05 (80 °C)	$\varnothing 1,5 \times 5,5$	$U_{\text{макс}} = 140 \text{ в}$
Dubilier Тип BTR Тип S27 Тип BTS	От 10 до $4,7 \cdot 10^6$ От 10 до $100 \cdot 10^3$ От 10 до $22 \cdot 10^6$	0,25 0,1 0,5	$\varnothing 2,54 \times 10,2$ $\varnothing 2,54 \times 8,3$ $\varnothing 3,2 \times 10,2$	— — —
Erie Тип 5B Тип 15	От 10 до $10 \cdot 10^6$ От 10 до $10 \cdot 10^6$	0,1 (20° C) 0,25 (70° C)	$\varnothing 2,8 \times 6,6$ $\varnothing 2,54 \times 9,5$	Стабильность $\pm 5\%$ —
Morganite Тип X	—	0,1 (70° C)	$\varnothing 2,54 \times 10,2$	—
Mullard MR	От 10 до $10 \cdot 10^6$	0,05	$\varnothing 1,8 \times 7,6$	Стабильность: $\pm 5\%$ до 100 Ком $\pm 10\%$ до 10 Мом
Painton Тип 70 Wirewound Тип RWV3	От 3 до $300 \cdot 10^3$ От 1 до $4,7 \cdot 10^3$	0,2 (70° C) 0,25 (70° C)	$\varnothing 2,54 \times 9,5$ $\varnothing 4 \times 11,1$	Стабильность 0,5% Низкий шум
Electrosil Тип № 20	От 100 до $500 \cdot 10^3$	0,5 (40° C)	$\varnothing 4,3 \times 15$	Металлоокисный тип
S. T. & C. Тип 4307	От 10 до $470 \cdot 10^3$	0,1 (70° C)	$\varnothing 2,3 \times 8,6$	—
Welwyn Тип C20	От 10 до $1 \cdot 10^6 \pm 5\%$	0,125 (25° C)	$\varnothing 3,6 \times 11,1$	—

Продолжение табл. 3.1

Изготовитель	Величина, ом	Номинальная мощность, вт	Размеры, мм	Примечание
Welwyn Тип C80	От 10 до $1 \cdot 10^6$	0,125 (70° C)	$\varnothing 4,8 \times 12,7$	Изолиро- ванный
Тип F11	От 25 до $100 \cdot 10^3$	0,33 (70° C)	$\varnothing 3,7 \times 13,5$	—
Тип F20	От 50 до $250 \cdot 10^3$	0,5 (40° C)	$\varnothing 3,78 \times 9,5$	Металло- окисный тип

Таблица 3.2

## Термосопротивления

Изготовитель	Тип	Температур- ный коэффи- циент, %/° C	Размеры, мм	Примечание
Mullard	VA1021	—3,9	$2 \times 12,3$	Температур- ная стаби- лизация в транзи- сторных схемах
	VA1022	—3,5	$2 \times 12,3$	—
Plessey	A, B, D и G	—(3,6÷5,7)	От $4 \times 0,51$ до $23 \times 3$	—
S. T. & C.	A, M и K	—(3,2÷4,8)	От 1,5 до 3,8	—



Таблица 3.3

## Переменные сопротивления

Изготовитель	Тип	Величина, ом	Номинальная мощность, вт	Размеры, мм	Примечание
Amplivox	A5016	$3 \cdot 10^6$	0,1	18×5,3	Угол поворота 270°
	D5040	$5 \cdot 10^3$	0,1	18×5,3	
	B5017	$3 \cdot 10^6$	0,1	20×6,4	
Ardente	VC1041	От $1 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6 \pm 30\%$	0,1	17×4,3	Функциональные, полуфункциональные и линейные (с выключателем)  С прямолинейным перемещением движка и выключателем То же, что и тип VC1226, но без выключателя
	VC1126	От $1 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6 \pm 30\%$	0,1	17×4,3	
	VC1150	$3 \cdot 10^6 + 100\% - 0\%$	0,1	23×7,3	
	VC1545	$3 \cdot 10^6 + 100\% - 0\%$	0,1	23×7,3	
	VC1226	От $1 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6 \pm 30\%$	0,1	25,4×3,2	
	VC1383	От $5 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6 \pm 30\%$	0,1	21,1×3,8	
Dubilier	VN и YT	От $1 \cdot 10^3$ до $10 \cdot 10^6$	0,1	19,5×13,5	Линейное
		От $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$	0,05		Функциональное или обратно пропорциональное Функциональное Герметичный (тип YT)
Egan	123 и 125	От $5 \cdot 10^3$ до $6 \cdot 10^6 \pm 20\%$	0,1	20×14,3×6,3	С заданным линейным законом
		От $500 \cdot 10^3$ до $6 \cdot 10^6$	0,1		С заданным функциональным законом

Продолжение табл. 3.3

Изготовитель	Тип	Величина, $\text{ом}$	Номинальная мощность, $\text{вт}$	Размеры, $\text{мм}$	Примечание
	166	От $4,7 \cdot 10^3$ до $2,2 \cdot 10^6$	0,33	$32 \times 11,2$	Линейный закон
	189	От 10 до $33 \cdot 10^3$	0,2	$32 \times 19$	Проволочное
	170	От $4,7$ до $2,2 \cdot 10^6$	0,1	$21 \times 20 \times 8$	Крепится к шасси
	171	От $4,7$ до $2,2 \cdot 10^6$	0,1	$21 \times 20 \times 8$	Для печатных схем
	172	От $4,7$ до $2,2 \cdot 10^6$	0,1	$21 \times 20 \times 8$	Проволочное, опорное
	173	От $4,7$ до $2,2 \cdot 10^6$	0,25	$34 \times 6,4$	Для объемного монтажа
	174	От $4,7$ до $2,2 \cdot 10^6$	0,25	$34 \times 6,4$	Для печатных схем
	195	От $4,7$ до $2 \cdot 10^3$	0,5	$34 \times 6,4$	Для объемного монтажа
	196	От 10 до $2 \cdot 10^3$	0,5	$34 \times 6,4$	Для печатных схем
	276	От $4,7 \cdot 10^3$ до $3,3 \cdot 10^6$	0,33	—	Для ручного управления
	295	От $4,7 \cdot 10^3$ до $3,3 \cdot 10^6$	0,33	—	» » »
	328	От $4,7 \cdot 10^3$ до $2,2 \cdot 10^6$	0,33	—	Двойное сопряжение
Fortiphone	286	От $4,7 \cdot 10^3$ до $2,2 \cdot 10^6$	—	$23 \times 16 \times 5$	Для ручного управления
					Вертикальное закрепление
	322	От $4,7 \cdot 10^3$ до $2,2 \cdot 10^6$	—	$23 \times 16 \times 5$	Горизонтальное закрепление
	VC25	10 и $35 \cdot 10^3$	0,1	$11,4 \times 2$	Линейное
	VS26	50, 100, $330 \cdot 10^3$ 1 и $3,3 \cdot 10^6$ От $1 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6$ От $5 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6$	0,1 0,1 0,05 0,05	$11,4 \times 2$ $11,4 \times 3$ $11,4 \times 3$ $11,4 \times 3$	Полуфункциональное Линейное + выключатель Полуфункциональное + выключатель

Morganite	VS32	От $10 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6$	0,05	$11,4 \times 3$	Функциональное + выключатель
		От $1 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6$	0,05	$8 \times 3,8$	Линейное + выключатель
		От $5 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6$	0,05	$8 \times 3,8$	Полуфункциональное + выключатель
		От $10 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6$	0,05	$8 \times 3,8$	Функциональное + выключатель
	B. J.	От $1 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^6$	0,1	$20 \times 10$	Линейное
		От $20 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^6 \pm 20\%$	0,1	$20 \times 10$	Функциональное
Painton	—	От 10 до $10 \cdot 10^3 \pm 5\%$	1,0 при $70^\circ \text{C}$	$32 \times 8 \times 5,6$	25 оборотов от 0 до максимума
Plessey	M. MH1 и MH2 MP G	От $1 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$	0,25	$18 \times 13$	Линейное
		От $5 \cdot 10^3$ до $2,5 \cdot 10^6 \pm 20\%$	—	—	Нелинейное
		От $1 \cdot 10^3$ до $2,2 \cdot 10^6 \pm 20\%$	0,25	$18 \times 11$	Линейное
		От $1 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$	0,25	$15,3 \times 8,6$	Нелинейное
	F	От $1 \cdot 10^3$ до $2,5 \cdot 10^6$	0,25	$15,3 \times 8,6$	Линейное
		От $1 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$	0,25	$23 \times 8$	Нелинейное
		От $1 \cdot 10^3$ до $2,5 \cdot 10^6$	0,25	$23 \times 8$	Нелинейное

Таблица 3.4

## Постоянные конденсаторы (керамические и бумажные)

Изготовитель	Тип	Диэлектрик	Величина, пф	Номинальное значение при постоянном токе, $\phi$	Размеры, мм	Примечание
Dubilier	T. 310 T. 316 CB. 316 CS. 316	Керамика с большим $\epsilon$	470÷4000 —20% —80%	От 500 до 300	От 4,6×9,5 до 4,6×16	До +120°С
Erie	Style A Style B CD. 811 CD. 811P 831 Spade	Керамика	1÷3500 19÷8500 600÷5000 6÷10·10 <sup>3</sup> 220÷3·10 <sup>3</sup> 3÷400	500 500 500 500 300—500 500	$\phi$ 5×9,8 $\phi$ 5×16,5 $\phi$ 15×4 $\phi$ 15×4 8×4 8,4×0,08 макс.	Втулочный тип
Hunts	TB1000/3000 TB6000 DQ G. S.	Керамика с большим $\epsilon$	470÷4700 470÷20·10 <sup>3</sup> 470÷100·10 <sup>3</sup> 4,7·10 <sup>3</sup> , 10·10 <sup>3</sup> 25·10 <sup>3</sup> , 50·10 <sup>3</sup> 100·10 <sup>3</sup>	500 500 125 30	От $\phi$ 5×11 до $\phi$ 5×19 От $\phi$ 7,6 до $\phi$ 21 От 4×4×3 до 30,5×10,6×5 От 10,1×10,1×3 до 15,2× ×15,2×3	Трубчатый Дисковый Трубчатый Пластинчатый
L. E. M. Co.	FEC дисковый FEC трубчатый	Керамика с большим $\epsilon$	500÷10·10 <sup>3</sup> 300÷2000	500 350	От $\phi$ 11 до $\phi$ 23 $\phi$ 3×10,1	От —40° до +100°С

Plessey	Дисковый	Керамика	500÷10·10 <sup>3</sup> От -25% до +50%	500	От Ø 7,1×3,9 до Ø 16,2×3,6	—
Т. С. С.	Дисковый, трубчатый Трубчатый «Бусинка»	Керамика с большим ε	2÷50	500	От Ø 10,6×7,1 до Ø 13,4×3	Допуск от ±20% до ±1% Допуск от ±20% до ±1% Допуск ±20%
			10÷1000	500	От Ø 3×10 до Ø 6×40	
			0,5÷15	500	От Ø 5×5,8 до Ø 6,8×4	
				От 600 до 150	От 5×12 до 7,1×14,2	
Dubilier	400	Металлизированная бумага	100÷40·10 <sup>3</sup>	От 600 до 150	От 6,3×17 до 6,3×19	От -40° до +85° C
	407 407E	То же	100÷10·10 <sup>3</sup>	От 600 до 150		
Hunts	W97	» »	50÷40·10 <sup>3</sup>	150	От 4,2×17 до 7,4×17	От -40° до +100° C
	W96	» »	50÷40·10 <sup>3</sup>	200	От 5×11 до 6,6×14,2	От -40° до +100° C
	W99	» »	50÷40·10 <sup>3</sup>	150	От 4,6×11 до 6,3×14,2	От -40° до +85° C
Plessey	Plesmin	» »	1÷1000·10 <sup>3</sup>	150	От 3,2×9,5 до 15×32	—
S. T. & C.	453/LWA/411	» »	5÷2000·10 <sup>3</sup>	150	От 4,7×18,2 до 19×53	От -40° до +85° C
T. C. C.	Metalmite	» »	10÷250·10 <sup>3</sup>	150	От 5,6×17 до 11×41	—
	143	» »	20÷500·10 <sup>3</sup>	150	От 6,3×16 до 14,2×35	—

Таблица 3.5

## Постоянные конденсаторы (электролитические)

Изготовитель	Анод	Тип	Величина, мкф	Номиналь- ное на- пряжение, в	Размеры, мм	Примечание
Dubilier	Алюминий	Сверхмини- атюрный	1÷10 3÷32 20÷100	1,5÷30 1,5÷30 3÷30	4,7×12,7 4,7×19 6,3×25,4	Допуск: —20% +100% —20° ÷ +60° С Коэффициент потерь: 25% вы- ше 12 в; 30% ниже 12 в
Hunts	Алюминиевая глад- кая фольга	L571	0,5÷10	1,5÷25	3,2×17,5÷4,7×17,5	Допуск: —20% +100%
	Травленая фольга	L571	1,0÷45	1,5÷75	3,2×17,5÷4,7×17,5	—20° ÷ +60° С
		L28/L37	8÷5000	6	8×19÷25,4×51	Допустимое рабочее напряже- ние от 6 до 50 в
		L28/L37	8÷5000	12	8×19÷25,4×76	До 500 мкф: —20% +100%
		L28/L37	8÷1000	25	8×19÷25,4×51	Свыше 500 мкф: —20% +50%
		L28/L37	5÷500	50	8×19÷25,4×51	Для номинала 150 в: —20% +50%
		L28/L37	2÷50+50	150	8×19÷25,4×44,4	$T_{\text{макс}} = +85^{\circ}\text{C}$
Mullard	Алюминиевая травле- ная фольга	C. 426	0,8÷200	2,5÷25	Ø 3×10,2÷ Ø9×18	—
Plessey	Алюминиевая фольга	CE	1÷50	1,5÷70	6,3×19÷2,54×7,1	Допуск: —20% +100% $T_{\text{макс}} = +60^{\circ}\text{C}$

T. C. C.	Алюминиевая фольга	—	0,1÷50	1,5÷50	3×16÷6,3×19	Допуск: -20% ÷ +100% -25° ÷ +60° C
L. C. C.	Танталовая фольга	Серия TA	16÷400 2÷40 0,2÷4	6÷50 — 6÷150	6,3×21 12,7×21 21×19	-50° ÷ +85° C
Plessey	Танталовая таблетка	Castanet CE	750 250 140 50	3 15 30 70	22×6,3	-50° ÷ +150° C Влажность: Класс HI
	Синтерированный тантал	E	70, 140, 200 35, 70, 100 25, 50, 75 20, 40, 60 10, 20, 30 4, 8, 12	3 6 10 15 30 70	6,3×10,1÷6,3×12,7	—
S. T. & C.	Танталовая фольга	472(LWA) 1-6	5÷200 0,3÷10	6 150	3,7×20÷8,7×41	Влажность: класс HI -40° ÷ +85° C -25° ÷ +70° C
	Поляризованный Неполяризованный	472(LWA) 201-2 472(LWA) 101-6	1,5÷16 2,5÷100 0,15÷5	3÷25 6 150	3,6×14,2÷3,6×19 3,7×20,3÷8,7×41	Допуск: ±20%
T. C. C.	Тантал	—	0,1÷4	6÷150	4,8×19÷5×19	T <sub>макс</sub> = +85° C Поляризованные и неполяри- зованные Поляризованные Неполяризованные обратимые
			0,25÷200 0,5÷200	6÷150 6÷150	6,3×24÷11,1×60 6,3×21÷12,7×46	

Таблица 3.6

## Постоянные конденсаторы (пластиковые и слюдяные)

Изготовитель	Тип	Диэлектрик	Величина, пф	Номинальное значение постоянной емкости, е	Размеры, мм	Примечание
Hunts	M96/2	Металлизированная пленка	$50 \div 40 \cdot 10^3$	От 600 до 200	$5,2 \times 11 \div 6,6 \times 14,3$	Стабильность: $\pm 1\%$ при $t^\circ = 0^\circ \div 80^\circ \text{C}$ $\pm 2\%$ при $t^\circ = -20^\circ \div +80^\circ \text{C}$
S. T. & C.	489/LWA	То же	$10 \div 2200 \cdot 10^3$ $10 \div 1000 \cdot 10^3$	50 100	$4,8 \times 14,7 \div 15,7 \times 43,4$	—
G. E. C.	—	Полистирол	$10 \div 10 \cdot 10^3$	125	$4 \times 8,1 \div 12 \times 12$	От $-40^\circ$ до $+70^\circ \text{C}$
Hunts	L110	»	$150 \div 3500$	250	$15,2 \times 18,1 \div 23 \times 7,6$	—
S. T. & C.	—	»	$10 \div 10 \cdot 10^3$	125	$6,3 \times 7,1 \div 11,4 \times 11,4$	—
Sufflex	HS	»	$4,7 \div 6800$	125	$3 \times 6,8 \div 9,1 \times 15,2$	От $-40^\circ$ до $+80^\circ \text{C}$
Dubilier	SM22	Посеребренная слюда	$22 \div 510$	350	$12,7 \times 7,1 \times 4,3$	—
Hunts	L5/IS	То же	$15 \div 500$	250	$12,7 \times 7,1 \times 4,7$	Допуск $\pm 3\% \div \pm 20\%$
	L1/2S	» »	$100 \div 1000$	350	$17,2 \times 11 \times 6,3$	Допуск: $\pm 2\% \div \pm 20\%$
L. E. M. Co.	1106	» »	$10 \div 1500$	350	$13,4 \times 8 \times 3,2$	Допуск: $\pm 1\% \div \pm 20\%$
T. C. C.	SMP	» »	$5 \div 12 \cdot 10^3$	350	$11 \times 16 \div 25,4 \times 38$	—



Таблица 3.7

## Переменные конденсаторы

Изготовитель	Тип	Наибольшая емкость, пф		Размеры, мм	Примечание
		радиочас- тотная секция	секция общего примене- ния		
Jackson Bros	00	208	176	24×35×33	Двухсекционный сопря- женный, экранирован- ный или неэкраниро- ванный
Plessey	W	229	111	28×36×34	То же
		175	123	28×36×34	
Polar	C7822	115	115	23,4×30×30	» »

Таблица 3.8

## Переменные конденсаторы (подстроечные)

Изготовитель	Тип	Емкость, пф	Номиналь- ное напря- жение, в	Размеры, мм	Примечание
Erie	3116	0,5÷5	350	4,8×13,5	—
		2,75÷15			
	3115	0,5÷3	350	5,5×12,7	—
		1÷4			
	3221	(1,12 ÷ 3) ± ±0,15	350	4,6×9	Крепежное от- верстие Ø 3,1 мм
	СТ. 20	1÷6	500	3,2×19,1	—
	СТ. 30	1,5÷4	350	6,3×12,7	Плунжерный тип
Mullard	АС.2002	0,7÷3,7 0,95÷6,95 0,95÷12,95 1,2÷23,2	400	От 8,9×10,2 до 8,9×33 8,9×33	Крепежное от- верстие Ø 7,1 мм
Oxley	Триммер	2÷9,3	750 (испыт.)	9,5×9,5×12,7	Дифференци- альный тип
		2,5÷9,3		9,5×9,5×12,7	
		2,5÷13,5		9,5×9,5×15,2	
Plessey	—	3,5 и 8,5 (макс.)	—	9,4×13,1	—40°÷+100° С Соответствует RCL 141

Продолжение табл. 3.8

Изготовитель	Тип	Емкость, пф	Номиналь- ное напря- жение, в	Размеры, мм	Примечание
T.C.C.	CC164 N	0,5÷3	350	13,5×5	Керамический трубчатый; крепится к шасси
	CC165 N	1÷5	350	13,5×5	
	CC175 N	2÷20	350	13,5×5	
	CC159 N	3÷9	350	13,5×5	
Wingrove and Rodgers	S50-01/1	3,3 (макс.)	—	5,3×26	—

Таблица 3.9

## Сердечники и каркасы

Обозначение сердечника	Тип	Материал (толщина 3,8 мм)	Размеры, мм							Каркас	Количество листов, пар	Поперечное сечение, см²	Длина маг- нитопровода, см
			A	B	C	D	E	F	G				
A730	E/I	M	2,5	4	1,3	1,3	1,3	6,5	9,5	Z	6	0,058	1,87
A809	F	M								Z	6		
A476	F	M	2,6	7	1,3	1,3	1,3	9,5	9,5	S	6	0,058	2,73
A920	F	R	2,6	7	1,3	1,3	1,3	9,5	9,5	R	13	0,126	2,73
A552	F/I	M	4,2	6,3	1,9	2,1	1,9	10,1	16,8	T	11	0,136	3,1
A589	F/I	R	4,2	6,3	1,9	2,1	1,9	10,1	16,8	T	11	0,176	3,1
A230	F	M	4,2	6,3	1,9	2,1	1,9	10,1	16,8	N	22	0,35	3,1
A821	F	R	4,2	6,3	1,9	2,1	1,9	10,1	16,8	N	22	0,35	3,1
A208	E/I	M	4,7	11,1	2,4	2,4	2,4	16	19,1	B	12	0,218	4,36
A624	E/I	R	4,7	11,1	2,4	2,4	2,4	16	19,1	M	24	0,44	4,36
A1061	E/E	M	6,3	12,7	3,2	3,2	3,2	19,1	25,4	L	17	0,413	4,78
A723	E/E	R	6,3	12,7	3,2	3,2	3,2	19,1	25,4	L	17	0,826	4,78
A711	L	M	2,5	16,5	—	—	—	33,6	5	SH	9	0,087	5,45
A696	U	M	2,7	6,9	5	—	—	17,1	10	DS	3	0,061	1,41
										DR	6	0,122	1,41
										DB	6	0,218	2,75
A909	U	По требо- ванию	4,7	11,2	9,5	—	—	3	19	DM	12	0,44	2,75

Примечание: M—мю-металл (железо Армикс); R—радиометалл (никелево-железный сплав).

Таблица 3.10

## Магнитные сердечники

Изготовитель	Тип	Размеры, мм
Mullard Ltd. Ferroxcube	Стержни	$\varnothing 4 \times 5 \div \varnothing 9,6 \times 203$
	Трубки v	$\varnothing 4 \times 5$ ( $\varnothing 2$ внутр.) $\div \varnothing 10 \times 180$ ( $\varnothing 6$ внутр.)
	Кольца	$\varnothing 25,4 \times 4,8$ ( $\varnothing 19,3$ внутр.) $\div$ $\varnothing 108 \times 12,7$ ( $\varnothing 7$ внутр.) $\varnothing 2$ ; $\varnothing 3$ и $\varnothing 8$
	Горшковые сборки	$27 \times 27 \times 18,6$ типы LA1-3 $42 \times 42 \times 24$ типы LA4-7

Примечание: Имеются также E, L и U сердечники:

A.42

A.43 18-миллиметровые регулируемые горшковые сборки

A.44

A.45

Таблица 3.10а

## Магнитные сердечники

Изготовитель	Т и п	Размеры, мм	Магнитная проницае- мость тороидов	Диапазон частот, Мгц
Neosid	Сплошные цилиндрические сердечники	$\varnothing 2,5 \times 13 \div$ $\div \varnothing 19 \times 44$	30	До 2
	Полые цилиндрические сердечники	$\varnothing 4,5 \times 13 \div$ $\div \varnothing 66 \times 63$	12	До 10
	Дисковые или кольцевые сердечники	$\varnothing 5,8 \div \varnothing 36$ ; длина не более 13	11	5 ÷ 60
	Горшковые с замкнутой магнитной цепью	$\varnothing 16 \times 5,8 \div$ $\div \varnothing 24 \times 72$	5	30 ÷ 200
	Горшковые закрытого типа	$\varnothing 17 \times 7,8 \div$ $\div \varnothing 18 \times 10$	—	30 ÷ 300
	Резьбовые чашки	$\varnothing 14 \times 11$ ; шаг резьбы 0,75 6,5 см <sup>2</sup>		
	Экранированные горшковые сборки для печатных схем		Примечания: Имеется целый ряд каркасов и бобин для этих сердечников.	

Продолжение табл. 3.10а

Изготовитель	Т и п	Размеры, мм	Магнитная проницае- мость тороидов	Диапазон частот, Мгц
	Сборки с переменной ин- дуктивностью 9D/WR каркас 10D/WR горшок Винтовые сердечники	$\varnothing 22 \times 16$ и $\varnothing 22 \times 17$  $\varnothing 4 \times 10 \div$ $\varnothing 10 \times 20$ Британская и аме- риканская резьба: $0,16'' \times 7,6$ мм $\div$ $\div 0,25'' \times 13$ мм	Полистирол — мак- симальная рабочая температура +85 °С. Бакелит — макси- мальная рабочая температура +140 °С	

Таблица 3.10б

Изготови- тель	Тип	Размеры, мм	Примечание				
Plessey	Настроенные сердечники	$\varnothing 8 \times 5,25 \div$ $\div \varnothing 14 \times 5,3$ с 6 или 8 бронзовыми шпильками $\varnothing 6,4 \times 12,7 \div \varnothing 16 \times 38$ и $\varnothing 5,1 \times 16$ с 2, 4 или 6 бронзовыми шпиль- ками	—				
	Винтовые сер- дечники	$\varnothing 5,8 \times 8$ $\varnothing 10/9,8 \times 16/15,6$ $\varnothing 17, \varnothing 16, \varnothing 19$	Шаг винта 0,75; 1; 1,25 и 1,5 мм				
	Сердечники горшкового и чашечного типа	—	—				
	Цилиндры	$\varnothing 5,3 \times 11 \div \varnothing 6,3 \times 19$ $\varnothing 19 \times 9,5$ (внутр. диам. 4) $\varnothing 22 \times 6,5$ (внутр. диам. 10) $\varnothing 22 \times 2,5$ (внутр. диам. 8)	Существует 5 типов сер- дечников				
	Диски	—	Следующая таблица дает сравнение Q-факторов, выраженное в процен- тах относительно Q- фактора первого типа:				
		Частотa Мгц	1%	2%	7%	9%	11%
		0,5	0	107	107	107	98
		5,0	0	144	153	147	135
		50	0	188	250	200	300
		100	0	235	375	260	560

Таблица 3.10в

Изготовитель	Тип	Размеры, мм	Примечание
Salford Elect. Instr. Ltd.	Винтовые сердечники	$\varnothing 6 \times 12,5 \div \varnothing 10 \times 17$	Сердечники «гекаллой» отформованы в трех типах из изолированного порошкового железа; проницаемость 10—12; диапазон частот 100 кГц $\div$ 50 МГц
	Дисковые и цилиндрические сердечники	$\varnothing 4,6 \times 8 \div \varnothing 60 \times 170$ (несколько типов — пустотелые)	Тип MF. Проницаемость 8—10; диапазон частот 5 $\div$ 200 МГц МА; проницаемость 5—6; диапазон частот 50 $\div$ 300 МГц
	Брусковые сердечники	$12 \times 6 \times 5,1 \div 40 \times 10 \times 12,3$	Тип МА применяется в простых сердечниках, таких, как латунные подстроечные или винтовые
	Горшковые сердечники	$12,7 \times 5,3 \div 43 \times 12$	—
	Латунные подстроечные сердечники	$\varnothing 3,8 \times 9,5 \div \varnothing 16 \times 29$	—

Примечание. Имеется ряд полистироловых и бакелитовых катушек и каркасов, годных для использования с перечисленными выше сердечниками.

Т. С. М.	М. 1а $\div$ М. 7б	$\varnothing 4,3 \div \varnothing 16,5$	Сердечники из тонкой ленты для схем запоминающих устройств и т. п. Сплавы — суперметалл, мю-металл
----------	--------------------	---	---

## Разъемы

Изготовитель	Составные части	Количество штырей	Размеры, мм	Примечание
Amphenol	Тип 27			
Amplivox	Вилка типа 12300	2	15×6	Сверхминиатюрный коаксиальный разъем
	Розетка типа 6040		Ø 4	Штыри Ø 1,3 мм
	Вилка типа 10325	2	14,5×7	Розетка для вилки типа 12300
	Розетка типа 6042		10,5×6	Штыри Ø 1,3 мм
Ardente	Тип E6, E9		11,5×3,3	Розетка для вилки типа 10325
	Тип L. 1403		6,3×4,5×5,1	Имеются разъемы с поляризованными штырями
Belling & Lee	Вилка			
	Розетка		5,7×19,3	Сверхминиатюрный коаксиальный разъем
Ediswan Clix	Телефонное гнездо и розетка		6,3×11,5	
	Вилка типа JP200		33,3×3,2 19×8	
Electromethods Ltd.	Розетка типа JS200			
	Тип SM1	1	6×10,2	Гайка шестигранная 5/16"
	Тип SM2 — вилка	2		
	Розетка SMRE			Сверхминиатюрная вилка с 2 штырями, смонтированными в панель
Fortiphone	Вилки с кабелем	7, 26, 14, 24, 20		
	Вилка PL5 и 15	2	7,9×10,2	Вилки с плоскими одинаковыми штырями или с одним суженным
	Вилка PL6 и 14	2	7,6×6,6×3,6 7,6×6,6×3,6	Круглые штыри, поляризованные или неполяризованные

Вилка PL9 и 16	2	9×7×4	Круглые штыри одного размера или с одним поляризованным штырем меньшего диаметра
Розетка SK4 для перечисленных выше вилок		7,1×10,2×5,1	—
Розетка SKC		7,1×12,2×5,1	Неполяризованные
Розетка SK2 для вилок PL6 и PL9		7,1×11,4×6,3	Неполяризованные
Водонепроницаемый разъем PL20/SK20		В собранном виде 29 (длина) ×9,6×4	Запрессованный разъем. Могут быть сгруппированы; переходное сопротивление контактов не более 0,01 ом
PL/SK17 — Гнездо		Ø 9,5×12,7	
Вилка		6,3×7,1×11,1	
Розетка		15,9× Ø 4,6	Для подключения кабеля к кабелю или кабеля к приборной панели
Вилка W3001	1	15,2 × Ø 4,6	
Розетка W3000	1	5,6×5,1×6,8	Круглые штыри (один из них меньшего диаметра), впрыснутые в вилку
Вилка	2	14×4,8×5,6	
Розетка		Ø 4,7	Вилка
50P/156		Ø 5	Розетка
50S/156		4,7 × 19,8 ÷ ÷ 9,5 × 32	Заимствованы у Electro Methods Ltd., Stevenage
Серии SMRE	7, 14, 20 26, 29 и 34 (Штыри 3-амперные)		
Winchester Elect. Inc.			
Harwin			
Multitone Elect. Co.			
Oxley			

Таблица 3.12

## Пресобразователи (ф. Fortiphone)

Тип	Частота, гц	Усиление мощности	Напряжение питания, в	Максимальный выход, в	Максимальный выход, мвд	Размеры, мм	Примечание
DS	400	20	65	30 (пост. т.)	95	13,8×17×6,3	2 блока с применением мю-металла
DS	400	40	140	60	350	13,8×17×6,3	2 блока с применением сплава типа Н. С. Р
DR	400	100	70	40	150	13,8×17×8,9	2 блока с применением мю-металла
DB	400	400	70	40	200	27×48×13,5	То же
DM	400	400	80	50	400	27×27×18,6	»
3A	400	16	—	20 (ср. квадр.)	2000	—	2 блока с применением сплава типа Н. С. Р. в балансной трансформаторной схеме с насыщением

Таблица 3.12а

Тип	Габаритные размеры, мм	Вес, г	Полное поперечное сечение, см <sup>2</sup>
DS	13,8×17×6,3	4,9	0,06
DR	13,8×17×8,9	5,8	0,12
DB	27×30×13,5	21,3	0,29
DM	27×27×18,6	41	0,58
3A		50	0,83

Примечание: В перечисленных узлах применяются пластины толщиной 0,1 мм из мю-металла или сплава типа Н. С. Р. Возможны другие материалы и толщины для специальных назначений.

Таблица 3.13

## Трансформаторы звуковой частоты

Изготовитель	Тип	Размеры, мм	Описание
Ardente	1010 1065 —	18,3×13,2×11 13,5×10,7×7,9	Номинал: 100 мвт переменного тока Номинал: 25 мвт переменного тока Имеется много типов входных меж-каскадных и выходных трансформаторов, а также для печатных и залитых схем



Изготовитель	Тип	Размеры, мм	Описание
Fortiphone	S1 ÷ S9 R1 ÷ R9 L1320	9,5×6,3×9,5 9,5×8,9×9,5 12,7×19×20	Имеется много типов, содержащих залитые и экранированные модификации Трансформаторы для транзисторных преобразователей постоянного тока
Parmeko	Серия 5094	14,2×15,8×19	Имеется много типов для входных, предоконечных, выходных каскадов и т. д.

Таблица 3.14

## Трансформаторы промежуточной частоты

Изготовитель	Тип	Описание	Размеры, мм
Channel Electronic Industries	735 736 737	Катушка генератора Входной и межкаскадный трансформатор промежуточной частоты Выходной трансформатор промежуточной частоты, работающий на детектор	∅ 16×17,5
Plessey	CP124924 CP127581 CP124925 CP127582 CP124926 CP127584	Катушка генератора типа Mullard Катушка генератора типа Mazda Входной и межкаскадный трансформатор промежуточной частоты типа Mullard Входной и межкаскадный трансформатор промежуточной частоты типа Mazda Выходной трансформатор промежуточной частоты, работающий на детектор, типа Mullard Выходной трансформатор промежуточной частоты, работающий на детектор, типа Mazda	∅ 16×17,5
Weymouth	P50/1A P50/2 P50/3	Катушка генератора Входной и межкаскадный трансформатор промежуточной частоты Выходной трансформатор промежуточной частоты, работающий на детектор	∅ 16×17,5

Таблица 3.15

## Реле

Изготовитель	Тип	Контакты	Размеры, мм	Примечание
Counting Instruments Ltd.	RZO	2 замкн.-разомкн.	22×8×20	Герметизированное с азотным наполнением
Electro Methods	416	1 » »	35×19×16	С подвижной катушкой
Elliott	R350B	1 » »	35×19×16	То же
E. M. I.	R2A	1 » »	22×20,6	Герметизированное влагостойкое класса HI. Температурный диапазон (—40° ÷ +100) °C
Magnetic Devices	335	2 » »	20,6×19,8× ×9	Герметизированное
New Electronic	XC430	2 » »	19×14×14	То же
	XC431	4 » »	19×28×14	»
Smiths Aircraft Inst. CO.	11PCR	1 » »	6,3×11	»
S. T. & C.	60 LAA-1A	2 » »	19,5×14×14	»
Walter Inst. Co.	MR21	2 » »	41×20	Запаянное в стеклянной колбе лампы B9G

Таблица 3.16

## Переключатели

Изготовитель	Тип	Характеристика контактов (номинал.)	Размеры, мм	Примечание
Ardente	S1450	50 ма при 300 в пост. и перем. тока	19×15	От 1 до 4 контактных групп, от 2 до 6 направлений
		500 ма при 30 в пост. и перем. тока		То же
	S1100	60 ма (безындукционные)	13×2,3	3 положения от 1 до 5 групп на 3 направления
	S1140	60 ма (безындукционные)	18	То же
Fortiphone	SW1		20×13 макс.	Постепенное замыкание 4 направлений с приводной рукояткой
	SW19		Макс. Ø 16	Однополюсный или с постепенным замыканием } На 2, 3 или 4 направления
	SW20PC		Вариант SW 19 для печатных схем	—
Honeywell	11SM-1-T	5 а, 250 в перем. тока	20×6,4×9	Однополюсный, замкн.-разомкн., рабочее давление от 85 до 140 г
	11SM-3-T	То же		
	1SX1-T	»	12,7×9×5,1	»

Таблица 3.17

## Соединительные кабели и провода

Изготовитель	Количество проводников	Изоляция полихлорвиниловая	Сопровождающее 1 м, ом	Ток, а разрыва, кг	Усилие разрыва, кг	Размеры, мм	Примечание
Amplivox Туп А № катал. 4401	2	Розовая или черная	3,28	0,5	3,2	0,9×2,2	Фольга, 6 проводов в жиле с х/б сердцевинной
4410	2	Серебристо-серая	1,1	1	13,6	1,8×3,2	Фольга, 8 проводов в жиле с х/б сердцевинной
4406	1	Серая и черная	1,31	0,5	4,1	Ø 0,9	Фольга, 3 провода в жиле с нейлоновой сердцевинной
4415	2 (экранированные)	Черная	3,28	0,5	9,1	Ø 2,5	То же, экран — медная оплетка из проводов 0,061 мм, 8 проводов в жиле с х/б сердцевинной
4422	4 (2 экранированных и 2 неэкранированных)	Серая или кремовая снаружи; 2 черные неэкранированные, 2 серые экранированные внутри	1,1	1	45,4	Ø 7	То же, экран — медная оплетка из проводов 0,071 мм
4423	1	Серебристо-серая	0,55	1	6,8	Ø 1,1	Фольга, 8 проводов в жиле с х/б сердцевинной
4416	2 (скрученные)	Нетвердеющая розовая	3,28	0,5	10,4	Ø 0,9	Фольга, 3 провода в жиле с нейлоновой сердцевинной
4419	1 + концентричный экран	Серая	—	1	9,1	Ø 4	Фольга, 8 проводов в жиле с х/б сердцевинной. Экран — медная оплетка из 0,071 проводов
4421	2	Кремовая отделяемая	1,1	1	13,6	1,8×3,2	То же, без экрана
4462	1	Упрочненная, красная, желтая или голубая	0,28	0,25	—	Ø 1,4	Медная луженая проволока 0,27 мм

Таблица 3.17а

Изготовитель	Количество проводов	Диаметр провода, мм	Изоляция полихлорвиниловая, толщина, мм	Номинальный диаметр (общий), мм	Примечание
Radiospares Ltd.	1	0,711	0,5	1,6	11 цветов
	7	0,254	0,5	1,6	11 цветов и 10 двухцветных типов
	7	0,121	0,25	0,8	6 цветов
	14	0,121		2	С легким экраном
	7	0,254	0,5	4×1,6 (высота × ширина)	Плоская укладка

Таблица 3.17б

Изготовитель	Вид	Тип	Размеры, мм	Примечание
Fortiphone	Неэкранированные	2-жильный	∅ 0,61 наружн.	Крученный слой из 2×0,09 мм эмалированной проволоки и 2×0,13 мм нейлона
		2-жильный	∅ 0,8 наружн.	То же, но с внешним слоем нейлона
		2-жильный	∅ 1 наружн.	То же, но с хлорвиниловым покрытием
		4-жильный	∅ 1,2 наружн.	2×∅ 0,06 мм попарно скрученные
		4-жильный	∅ 1,6 наружн.	2×∅ 0,08 мм попарно скрученные
	Экранированные	10-жильный, ленточный	5,1×1,1	
		2-жильный	∅ 1,25 наружн.	Экранированный поверх хлорвинилового покрытия
		2-жильный	∅ 1,25 наружн.	Экран под хлорвиниловым покрытием
Phoenix		2-жильный	2	Наполнение из нейлоновых нитей, полихлорвиниловая изоляция
Reliance Elect. Wire Co.		—	2	Крученный
		1028		Экранированный 1-жильный 160 пф/м
		6×0,06 1411	∅ 0,25 наружн.	
		2×6×0,06	∅ 0,25 наружн.	Экранированный 2-жильный, полиэтиленовая изоляция

Таблица 3.18

## Индикаторы

Изготовитель	Тип	Размеры, мм	Описание
Autophone	«Звезда»	Ø 18	Черный и белый звездообразный индикатор. Приводится в действие током 0,8 ма
Howard Butler		25,4×25,4	Вольтметр на требуемый диапазон. Шкала измерительного прибора 500 мка
Taylor	220	64×15	Прибор с боковым перемещением стрелки. Шкала 20 мка

Таблица 3.19

## Громкоговорители (сверхминиатюрные)

Изготовитель	Тип	Диаметр, мм	Полная глубина, мм	Диаметр магнита, мм	Магнитная индукция, ес	Сопротивление, ом	Примечание
Elac	2,5G	66	23,8		8500	3 или 15	Имеются громкоговорители с сопротивлением до 80 ом
Fortiphone	LSI/L	51	16			250—1000	
Plessey		76	25,4		8500	3	
Rola Celestion	B2500 T3/3549	64	51 25,4			3 3	Звуковая катушка с намоткой для транзисторных схем
Whiteley Elect. Ltd (W. B.)	S. 175 S. 2×3 (эллиптический)	44,5 68×47	25,4 35	9,5 12,7	5000 7000	3 3	

## *Глава 4*

### **ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА И СХЕМ С ЗАЛИВКОЙ**

#### **ПЕЧАТНЫЙ МОНТАЖ**

##### **Материал печатных плат**

В течение многих лет в массовых количествах применялись платы из слоистого картона, пропитанного синтетической смолой (гетинакса). Медная фольга легко сцепляется с этим материалом; платы, изготовленные из него, достаточно дешевы, легко прессуются и обрабатываются, а их электрические и механические свойства отвечают требованиям большинства областей гражданского применения. Однако их сопротивление перекрытию по поверхности неудовлетворительно, а механические свойства не отвечают требованиям, предъявляемым к аппаратуре в тяжелых военных условиях.

Материал из стекловолокна, пропитанный эпоксидной смолой, обладает превосходными механическими свойствами в широком диапазоне температур и сохраняет отличные электрические свойства в условиях высокой влажности при температуре до  $+150^{\circ}\text{C}$ . Медь хорошо сцепляется с ним, при этом прочность сцепления больше, чем с каким-либо другим материалом. Этот материал, однако трудно изготавливать, и его стоимость в несколько раз больше стоимости гетинакса, пропитанного фенолом.

Материал из стекловолокна, пропитанный кремнеорганической смолой, имеет превосходные электрические характеристики — малые потери, высокое сопротивление изоляции и т. д., но эти характеристики не сохраняются в условиях высокой влажности. Этот материал к тому же непрочен и имеет тенденцию расслаиваться. Медь с трудом сцепляется с его поверхностью, и верхний предел рабочей температуры платы ограничивается верхним допустимым пределом температуры сцепляемости меди с платой.

Материал из стекловолокна, пропитанный фторопластом, обладает наилучшими электрическими свойствами среди всех перечисленных выше материалов, — низкими потерями, высоким сопротивлением изоляции, хорошим сопротивлением перекрытию по поверхности и т. п., — которые сохраняются при повышении температуры до  $+250^{\circ}\text{C}$ . Этот материал механически прочен и хорошо обрабатывается. Для обеспечения удовлетворительного сцепления меди с платой необходима специальная обработка меди и фторопласта.

Таблица

## Свойства некоторых основных материалов для плат

Тип материала	Британский стандарт	Коэффициент мощности (cos φ) при 1 Мгц (макс.)	ε при 1 Мгц (макс.)	Сопротивление изоляции после погружения в воду (миним.), мом	Поглощение воды (макс.), мг	Предел прочности, кг/см <sup>2</sup>	Рабочая температура (макс.), °С	Основные свойства и рекомендуемое применение
Фенольно-бумажная слоистая изоляция (гетинакс) — тип Н	2076	0,038	5,0	5 · 10 <sup>4</sup>	13	700	100	Ответственные электронные блоки со стабильными электрическими параметрами
Фенольно-бумажная слоистая изоляция (гетинакс) — тип L	2076	0,045	5,8	500	32	850	100	Менее ответственные электронные блоки
Фенольно-тканевая слоистая изоляция (гетинакс) — электротехнический тип	972 1137	0,045	5,8	500	50	850	100	Блоки, в которых важна механическая прочность
Ацетилированная хлопчатобумажная изоляция — тип Р	972 1137	0,01	2,9	10 <sup>5</sup>	75	700	60	Высокая стабильность электрических параметров; для применения в условиях высокой влажности
Фенольная с подложкой из стеклоткани	—	0,035	4,4	100	30	2450	120	Стабильные механические и тепловые свойства
Эпоксидная смола + стеклоткань	—	0,035	4,7	10 <sup>3</sup>	4	4900	150	Стабильные механические и тепловые свойства; малое поглощение воды
Полиэфир + стеклоткань слоистая	—	0,02	3,7	0,5	4	1050	120	Те же
Кремнеорганическая смола + стеклоткань слоистая типа S1 *	—	0,005	3,7	10 <sup>4</sup>	10	980	200	Хорошее сопротивление изоляции при сырой поверхности; низкие потери при сухой поверхности
Фторопласт + стеклоткань слоистая *	—	0,011	2,85	10 <sup>6</sup> (макс.)	Очень низкое	850	250	Хорошие электрические свойства (низкие потери и диэлектрическая постоянная); стабильность параметров и удовлетворительная работа на с. в. ч.

Примечание: Перечисленные свойства типичны для пластических материалов без медного покрытия. Материалы, отмеченные звездочкой, находятся в стадии разработки. Некоторые параметры, приведенные в таблице, могут иметь большой разброс.

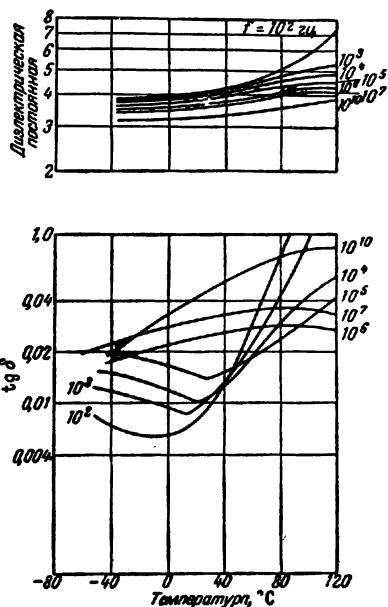


Благодаря последним достижениям технологии обработки фторопласта достигнутая сила сцепления с ним обеспечила получение плат, представляющих собой идеальный материал для создания высококачественного печатного монтажа. Материалы этого типа наиболее пригодны для работы на сверхвысоких частотах. Их единственный недостаток заключается в том, что они дороги.

Исследования полистирола и его разновидностей дали возможность получить материалы с очень низкими потерями и меньшей стоимостью, чем фторопластовые, но работающие при более низких температурах.

В таблице приведены основные характеристики некоторых изоляционных материалов для печатных плат.

Диэлектрические свойства типичного гетинакса и их изменение с температурой показаны на фиг. 4.1.



Фиг. 4.1. Характеристики гетинакса.

### Технология печатного монтажа

Схему, предназначенную для печатания, сначала вчерне вычерчивают на плоскости. Затем этот чертеж в 4-кратном увеличении переносится на прозрачную пленку с малым коэффициентом линейного расширения, на которой изображена и хорошо видна координатная сетка (с шагом 10 мм). На соответствующих местах чертежа располагают изображения элементов или их очертания. Желательно, чтобы ширина проводников была не менее 0,8 мм, а расстояние между ними не менее 1,3 мм. Когда элементы и соединительные проводники расположены соответствующим образом, рисуют линии монтажа непрозрачной краской или тушью (все в 4-кратном увеличении). К этому эталонному чертежу добавляются соответствующие надписи, обозначения элементов и т. п. Углы печатных проводников обычно скругляются.

Эталонный чертеж затем фотографируют, уменьшая в 4 раза, чтобы получить контрастный негатив, который используется для изготовления печатных плат.

В настоящее время применяется несколько способов нанесения печатного монтажа на изоляционные платы; наиболее простыми из них являются: печатание через шелковый трафарет (шелкотрафаретная печать), офсетный и фотографический способы.

**Трафаретный способ.** По эталонному чертежу делается позитив и затем на пленку, покрытую светочувствительной эмульсией, наносится изображение обычным контактным способом. После проявления и промывки с пленки полностью удаляется эмульсия, находившаяся под изображением печатного монтажа и поэтому незасвеченная. Проявленная пленка с негативным изображением напрессовывается на шелковую или проволочную сетку, в результате чего эмульсия заполняет ячейки сетки, соответствующие пространству между линиями печатного монтажа. Оставшаяся пленка затем удаляется. Через полученный сетчатый трафарет на фольгированную изоляционную плату резиновым отжимным валиком накатывается клейкая кислотоупорная краска, образуя изображение печатного монтажа на медной фольге, которая впоследствии травится обычным способом.

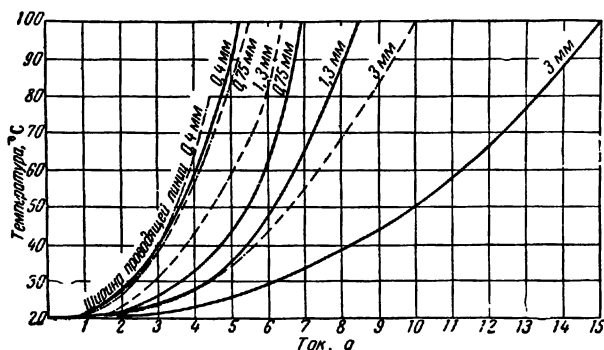
**Офсетный способ.** В этом способе печатная форма, какую применяют в обычной офсетной печати, несет на себе нужное изображение (позитивное) печатного монтажа, сделанное с негатива. Затем это изображение печатается офсетным способом на фольгированной плате, но так как полученная пленка слишком тонка, чтобы создать кислотоупорное покрытие, необходимо полученный оттиск припудрить асфальтитом с последующим оплавлением последнего. Затем, так же как и в предыдущем способе, следует травление платы.

**Фотографический способ.** Этот способ по сравнению с другими обеспечивает максимальную четкость изображения, а так как он пригоден и для единичного и для серийного производства, здесь приводится более подробное описание его.

*Метод травления фольги (фотохимический).* Изоляционная плата, используемая в этом методе, должна быть покрыта медной фольгой с одной или с обеих сторон. Медная фольга высокой чистоты (полученная электролитически) выпускается в виде сплошных листов значительной ширины и применяется обычно в двух видах  $0,3 \text{ кг/м}^2$  (номинальная толщина 34 мк) и  $0,6 \text{ кг/м}^2$  (толщина 68 мк). Проводники, образованные из тонкой фольги, могут обеспечить прохождение больших токов по сравнению с обычными объемными проводниками. Например, проводник шириной 0,8 мм и толщиной 34 мк пропускает ток 3 а с перегревом  $40^\circ \text{C}$  относительно окружающей температуры.

Нагрузочные характеристики некоторых типовых печатных проводников показаны на фиг. 4.2.

При фотохимическом методе изготовления печатных плат выбранная фольгированная плата покрывается светочувствительной эмульсией (коллоид двуххромовокислой соли или какой-либо стандартный раствор) пульверизацией, погружением или другими способами и затем медленно высушивается. Негативное изображение печатного монтажа, изготовленное по методике, приведенной выше, накладывают на поверхность платы и затем облучают ультрафиолетовым



Фиг. 4. 2. Нагрузочные характеристики печатного монтажа на гетинаксе (1,6 мм).

Толщина медной фольги: — — — — 0,035 мм и — — — — 0,07 мм.

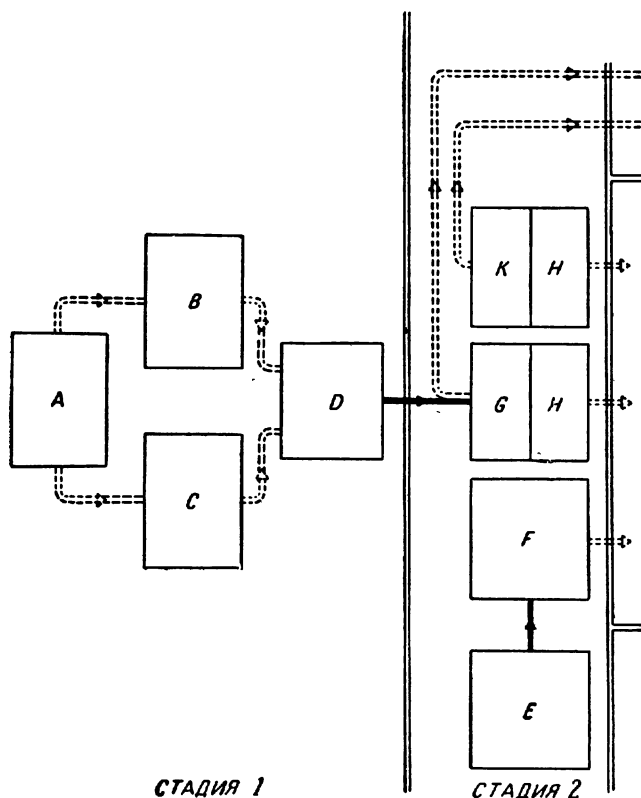
светом в течение 1 мин (не менее) для засвечивания эмульсии на плате через прозрачные линии изображения печатного монтажа. Проявление в соответствующих растворах удаляет ненужную эмульсию, оставляя требуемое изображение монтажа в виде кислотоупорного изображения на медной фольге. Остающаяся незакрытой ненужная медь вытравливается затем в кислотной ванне (обычно хлорное железо). Тщательная промывка и сушка завершают процесс изготовления печатной платы. Этот процесс по стадиям схематично показан на фиг. 4.3.

Затем следуют пробивка необходимых отверстий, обрезка платы по требуемым размерам, и плата готова для установки элементов, пайки и т. п.

**Электролитическое осаждение.** Этот метод заключается в том, что на плате электролитическим осаждением создается медное изображение печатного монтажа. По этому методу сначала в плате пробиваются необходимые отверстия и плата обрезается по размерам, а затем на нее типографской краской наносится (обычно трафаретным способом) негативное изображение монтажа. После этого вся поверхность платы покрывается серебряной краской, которая сцепляется только с неотпечатанными участками платы. Электролитическим осаждением меди или серебра на полученное изображение

печатного монтажа добиваются его требуемой толщины. Последовательные стадии этого процесса также показаны на фиг. 4.3.

По этому методу металл осаждается также в отверстия и на кромках платы, чем осуществляется механическое соединение печат-



Фиг. 4. 3. Производство

1-я стадия. Вычерчивание схемы и фотографирование для изготовления рабочего изображения, негативов и позитивов.

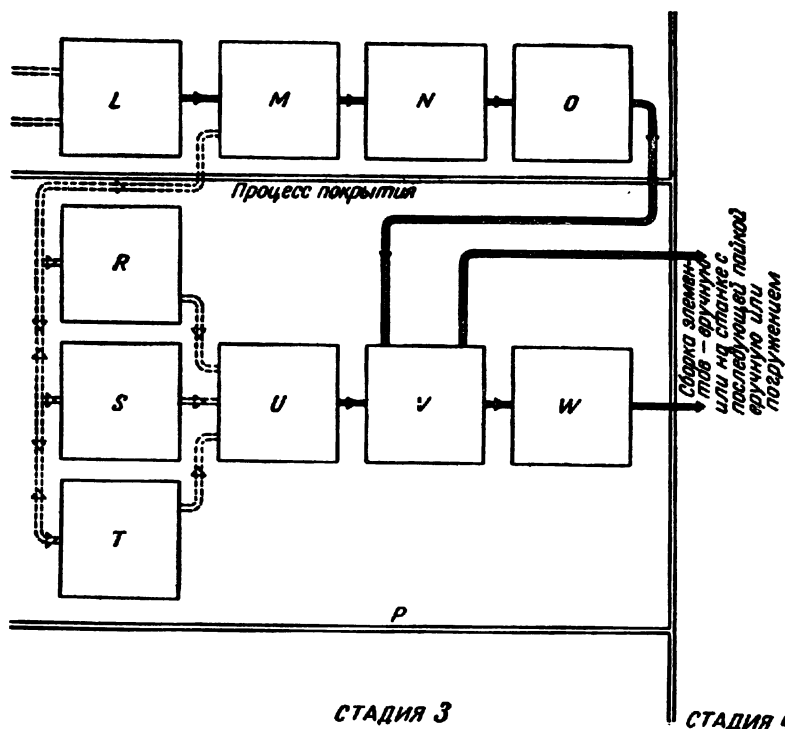
2-я стадия. Выбор материала платы для различных целей.

3-я стадия. Процессы выполнения изображения схемы на плате.

4-я стадия. Установка элементов.

*A*—изготовление чертежа печатного монтажа по эскизу схемы; *B*—нанесение изображения на бристо́льский картон или прозрачную пластиковую пленку специальными красками; *C*—контуры полос и концевых выводов, нанесенные на прозрачный пластик обратной засветкой; *D*—фотографирование на светочувствительные материалы для получения контрастных негативов и позитивов; *E*—металлическое покрытие—серебро, никель, медь или сплавы,—нанесенное химическим осаждением или испарением; *F*—для специальных применений: при высокой температуре, низких потерях или в микроминиатюрном оборудовании (стекло, керамика, слюда и т. п.); *G*—для приборов общего назначения: счетные машины, радио и телевизионные транзисторные схемы—гетинакс; *H*—покрытие медью; *K*—для специальных применений: радиочастоты, микроволны, высокие напряжения—эпоксид-

ного монтажа одной стороны платы с монтажом другой. Без этого соединения сцепление печатного монтажа с платой было бы недостаточным. После полной обработки платы негативное изображение смывается и печатная плата готова для установки элементов.



печатного монтажа.

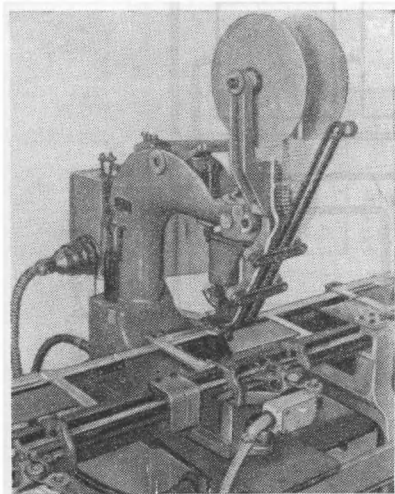
ные смолы, полистирол, стекловолокно, пропитанное фторопластом; L — платы обрезаются под размер и пробиваются отверстия (улучшение сцепления металлопокрытия с пластмассовым основанием); M — трафаретным способом печатается негативное изображение монтажа, при этом остаются свободными те участки поверхности платы, на которые будет наноситься изображение печатного монтажа; N — распыление проводящего материала, например серебра или коллоидального графита; O — электроосаждение серебряного или медного покрытия и удаление ненужного изображения; получение покрытия толщиной 0,025 — 0,05 мм с обеих сторон платы и внутри отверстий; P — процесс травления фольги; R — офсетная печать для средних или больших количеств выпускаемых плат; S — печать трафаретным способом пригодна для средних количеств выпускаемых плат; T — печать фотографическим способом применима для изготовления больших и малых количеств, возможно получение деталей высшего качества; U — травление лишней меди оставляет на плате рельефное изображение печатного монтажа; V — промывка и нейтрализация удаляет кислотные остатки, обработка поверхности изображения предохраняет его от окисления; W — платы обрезаются под размер, а отверстия сверлятся или пробиваются.

### Станки-автоматы для установки элементов

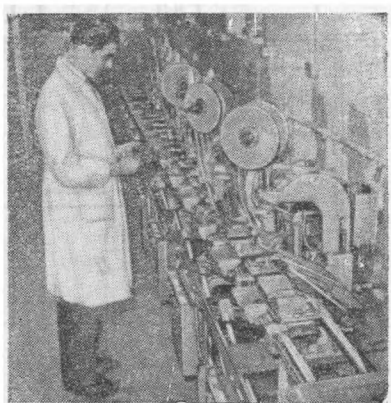
Автоматические станки (США) делятся на два основных класса:

1. Станки поточной линии, на которых плата движется под последовательным рядом установочных головок, причем каждая головка устанавливает какой-либо один тип элемента.

2. Станки, в которых плата перемещается под одной установочной головкой, через которую подаются различные элементы. Управление такими станками производится с помощью перфокарт.



Фиг. 4. 4. Механическая головка для установки элементов.

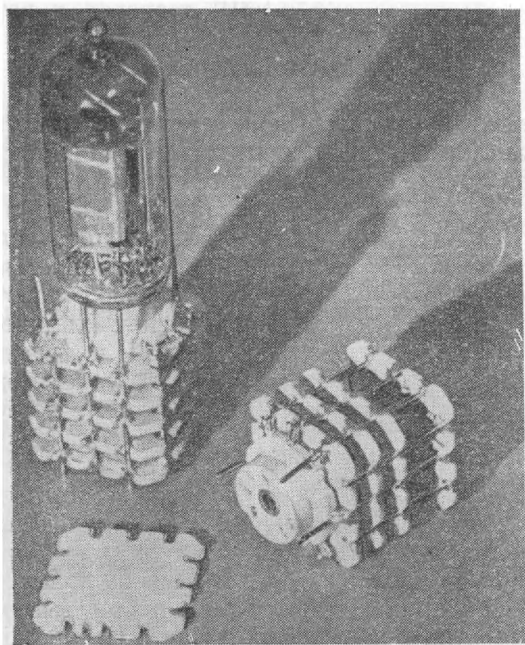


Фиг. 4. 5. Конвейер сборочных машин.

Недостатком станков обеих систем является возможность установки элементов только цилиндрической формы и ограниченных размеров, хотя могут быть созданы специальные головки для установки элементов разнообразной формы (трансформаторов, ламповых панелей и т. п.).

В Англии применяются полуавтоматические методы установки элементов, обеспечивающие приемлемую гибкость без больших капитальных затрат, свойственных полностью автоматическим станкам. В результате изучения экономической стороны вопроса применения таких станков было определено, что если не требуется выпускать очень большое количество одинаковых схем, применение станков, способных монтировать до 10 000 схем в день, экономически невыгодно. По-видимому, целесообразнее применять комбинированную сборку — частично ручную, частично простыми станками — и тем обеспечивать необходимую гибкость и приемлемую стоимость.

На фиг. 4.4 показан типичный станок, где элементы устанавливаются оператором, а на фиг. 4.5 — поточная линия таких станков с конвейером для ускорения производства. В станках этого типа монтажная плата, предварительно просверленная, останавливается



Ф и г. 4. 6. Типичные модули и плата.

магнитным выключателем под установочной головкой, в соответствующие отверстия вставляется элемент и его выводы расклепываются с другой стороны платы. Перед установкой элемента его выводы обрезаются и формируются этим же станком.

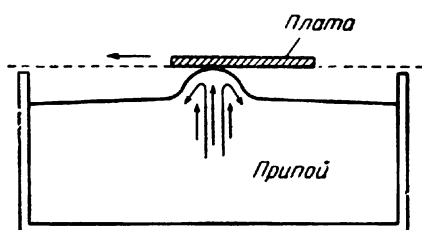
В одной из американских систем поточные линии станков производят (начиная от сырья или полуфабрикатов) керамические платы, угольные композиционные сопротивления и пластмассовые, высококачественные керамические и другие конденсаторы. Машины также печатают соединительные проводники и монтируют элементы, сделанные на керамических платах. Эти квадратные платы с приблизительными размерами  $19 \times 19 \times 1,6$  мм набираются в блоки, образующие модуль, который выполняет одну или несколько электронных функций, причем электронная лампа вставляется в ламповую

панель, установленную на верхней плате. Контрольные автоматы контролируют физические и электрические характеристики, получаемые на различных участках поточной линии. Несколько типичных модулей показано на фиг. 4.6.

«Микромодульные» системы описаны в гл. 7.

### Автоматическая пайка

Так как печатный монтаж выполняется на плоскости, пайка всех соединений выводов элементов с монтажом может быть сведена в одну операцию. Разработано несколько систем как автоматической пайки,



Фиг. 4. 7. Пайка волной припоя.

так и пайки погружением. Несомненно, если эта операция выполняется тщательно с хорошо отработанной системой и с химически чистыми платой и выводами элементов, то успех может быть гарантирован на 100%. Однако из-за дефектов выводов элементов, следов коррозии на меди, недостаточной чистоты

и т. п. пайку некоторых соединений часто приходится выполнять вручную.

Существует много систем многоточечной пайки, начиная от многожальных паяльников, капиллярной пайки, выпуклых припойных колпачков и т. п. и кончая прямым погружением в припой, погружением с предварительным облуживанием, разбрызгиванием припоя пульверизатором, пайкой волной припоя и другими методами.

По способу прямого погружения плата обрабатывается флюсом и после предварительного разогрева погружается стороной печатного монтажа в ванну с припоем, с поверхности которого удален шлак. Эта операция производится один раз или дважды, с последующим встряхиванием для удаления лишнего припоя. Предварительное облуживание печатного монтажа перед сверлением отверстий и установкой элементов в некоторых случаях также полезно; для этой цели часто используется накатка нагретым роликом или другие подобные технологические приемы.

Пайка волной припоя обладает многими достоинствами, потому, что к поверхности постоянно поступает свежий припой, и, кроме того, в данный момент нагревается только небольшая площадь платы. На фиг. 4.7 показан принцип действия волновой паяльной машины, в которой над уровнем припоя в ванне немного выступает



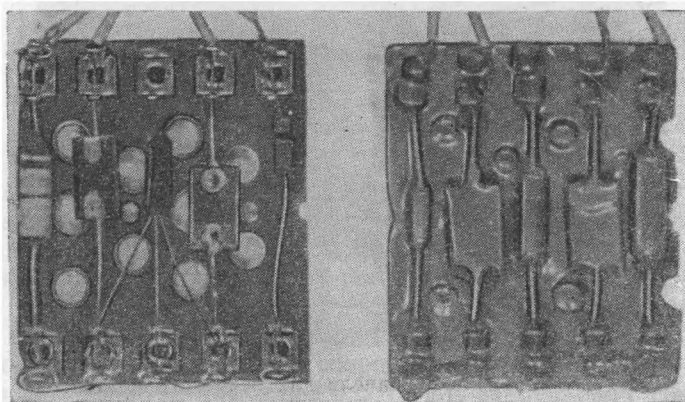
волна припой, создаваемая насосом, накачивающим припой через трубу.

Платы, подлежащие пайке, после обработки флюсом и прогрева передвигаются над этой волной со скоростью примерно 0,6 м/мин, при этом все соединения быстро пропаиваются. Температура ванны поддерживается в пределах  $245 \pm 5^\circ \text{C}$ .

### Защита печатного монтажа

Эта проблема распадается на две части: 1) защита проводников из медной фольги и 2) защита изоляционного материала платы. Лучше всего было бы покрыть всю плату каким-нибудь материалом, выполняющим обе функции, и если это покрытие скрепляет элементы с платой, то оно обеспечит также защиту от воздействия ударов и вибрации.

Значительный опыт использования пластических масс в тропических условиях показывает, что если защита неполная, ее лучше



Ф и г. 4. 8. Защита от ударных нагрузок транзисторных схем с печатным монтажом.

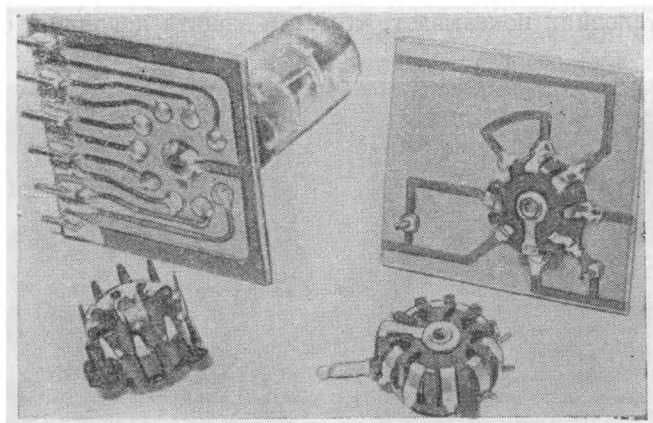
не применять. Покрытие поверхности смолой защищает медь от коррозии, но не обеспечивает равноценной защиты изоляции в условиях высокой влажности, ибо большинство покрытий препятствует выделению влаги, которая могла бы быстрее выделиться, если бы не было покрытия.

В США для защиты блоков с печатным монтажом использовались составы, состоящие из эпоксидных и сернистых (полисульфидных) смол. Они создают прочное покрытие, которое невозможно снять при ремонте. На фиг. 4.8 показан метод покрытия, использую-

щий мягкую сернистую резину, которую можно разрезать ножом для замены элементов. Элементы могут припаиваться, несмотря на наличие этого покрытия, так как оно не повреждается от соприкосновения с паяльником в течение нескольких секунд. Этот материал апробировался длительное время и может применяться при температурах до 100° С. Блоки с таким покрытием проходили испытания на влаго-, ударо- и виброустойчивость.

### Специальные элементы для печатного монтажа

Применение установочных станков в виде поточной линии определило необходимость цилиндрической формы элементов с осевыми выводами при максимально возможной стандартизации диаметров выводов. В дополнение к трубчатым малогабаритным элементам с осевыми выводами были разработаны более крупные элементы, такие,



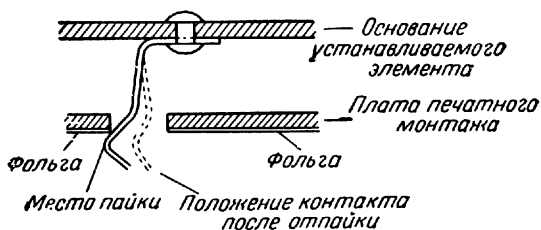
Ф и г. 4. 9. Ламповые панели для печатного монтажа.

как трансформаторы, электролитические конденсаторы, выключатели, реле, переменные конденсаторы и т. п. с плоскими выводами для ручной установки перед пайкой.

*Ламповые панели.* Для печатного монтажа были специально разработаны два различных типа ламповых панелей пальчиковых ламп. Один из них вставляется в отверстие, просверленное в печатной плате, и, таким образом, легко устанавливается автоматами. Другой тип имеет выводы, вставляемые в отверстия, количество которых равно числу этих выводов — обычно 7 или 9, но в особых случаях может быть больше или меньше.

Об относительных достоинствах каждого типа можно судить по фиг. 4.9. Преимущество ламповой панели, вставляемой в одно отвер-

ствие, заключается в легкости сборки. После установки в плату она готова для пайки погружением. Ее недостатком является отсутствие возможности вести проводники через участок платы, занятый панелью, что необходимо, делать во многих схемах, когда, например, защитная сетка пентода соединяется с катодом или когда в двойном триоде объединяются катоды. Другой тип панели, в котором для каждого вывода требуется отдельное отверстие, позволяет прокладывать проводники через участок, занятый панелью, для взаимных соединений. Если выводы имеют наклон наружу, это увеличивает расстояние между ними по кругу и освобождает еще больше пространства для взаимных соединений.



Фиг. 4. 10. Отпайка пружинящего контакта в печатном монтаже.

*Постоянные сопротивления, конденсаторы и т. п.* Малогабаритные элементы с осевыми выводами можно устанавливать всеми типами автоматических сборочных машин без доработки. Необходимо только придать выводам элементов нужную форму перед установкой их в предварительно просверленные отверстия печатной платы. Во многих машинах операция резки и формирования выводов производится автоматически в сборочных головках.

Выводы обычно загибают под платой для закрепления элементов. Это помогает при пайке погружением, исключает качание элементов и предохраняет от возникновения местных натяжений в медной фольге, к которой элементы припаяны.

*Элементы больших размеров: трансформаторы, переменные конденсаторы, реле, катушки промежуточной частоты и т. п.* Многие из этих элементов перед пайкой погружением можно устанавливать автоматическими методами, используя пружинящий эффект. Метод распайки таких пружинных контактов показан на фиг. 4.10.

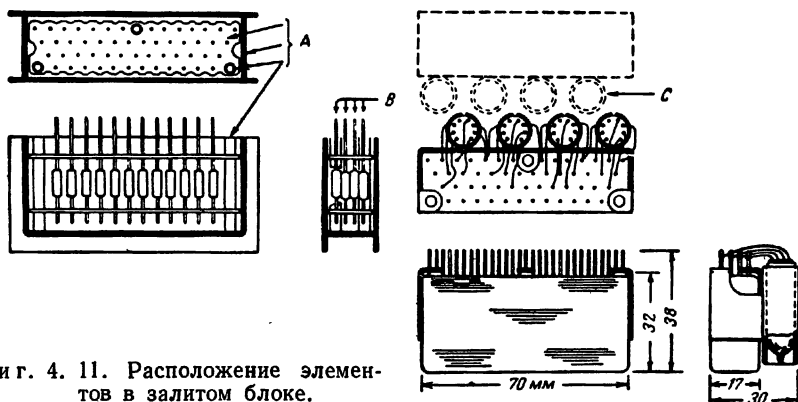
Этот способ позволяет отпаивать отдельные выводы и в случае необходимости заменять элемент.

Для легких элементов (например, катушек промежуточной частоты) при соответствующей конструкции крепления выводов не обязательно применять крепежные скобы, но для тяжелых элемен-

тов, таких, как трансформаторы, дроссели и т. п., имеет смысл добавлять крепежные поддерживающие скобы или зажимы для защиты от деформаций и поломок выводов. Эти более крупные элементы обычно крепятся вручную, так как их количество не оправдывает применения установочных автоматов.

### ЗАЛИВКА СХЕМ

Заливка схем с малогабаритными элементами обычно применяется к высококачественным электронным блокам, в которых важно отсутствие повреждений, вызываемых влагой, ударами или вибрацией. Залитые блоки в общем случае невозможно ремонтировать,



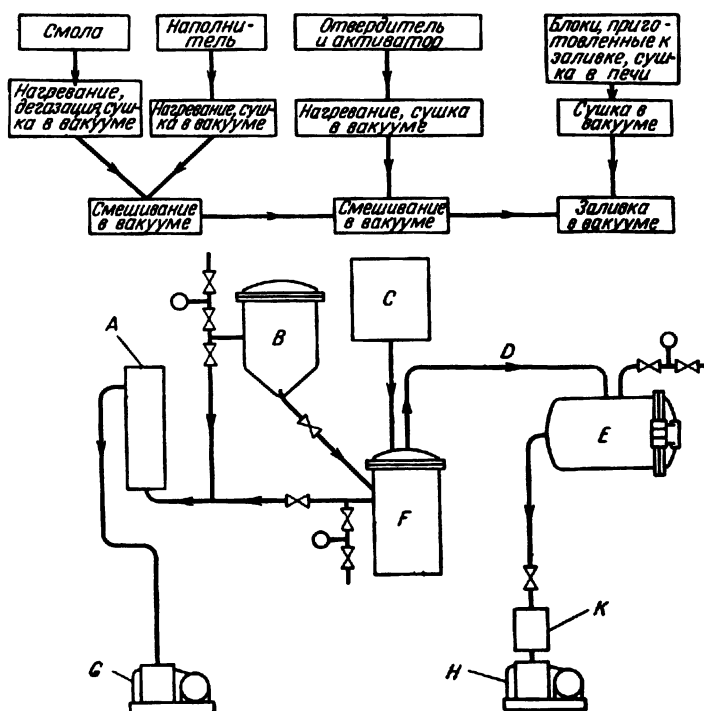
Фиг. 4. 11. Расположение элементов в залитом блоке.

Вверху—мелкие сборки элементов в отливке; внизу—законченный блок.

А—сборочное приспособление для заливки с помощью запрессованных трубочек; В—четыре ряда элементов; С—асимметричное расположение ламповых держателей позволяет плотнее группировать блок.

что ограничивает применение этой технологии в бытовом радио и телевидении. Применение заливки схем способствует миниатюризации, позволяя обходиться без монтажных скоб и располагать элементы близко друг к другу.

На фиг. 4.11 показано, как свыше 50 миниатюрных элементов можно разместить в объеме  $39 \text{ см}^3$  ( $7 \times 1,75 \times 3,2 \text{ см}$ ). Это соответствует примерно 1,25 элемента на  $1 \text{ см}^3$ . На практике существует широкий выбор заливочных материалов, однако отзывы об их качестве очень противоречивы. Процесс заливки часто сопровождается большими трудностями и для достижения успеха требует знания химии, электроники и организации производства. Типичная схема различных стадий процесса заливки представлена на фиг. 4.12.



Фиг. 4. 12. Схема заливочного агрегата.

A — скруббер; B — сушильный бункер для наполнителя; C — отвердитель и активатор; D — подающая труба; E — вакуумная камера заливки; F — камера сушки и смешивания смолы; G — вакуумный насос; H — вакуумный насос; K — пароотделитель

### Заливочные материалы

Существует два типа заливочных смол: полиэфирные и эпоксидные. Хотя полиэфирные смолы в некоторых случаях еще применяются, они все больше вытесняются эпоксидными.

Преимущества последних заключаются в их большой способности к сцеплению (адгезии), лучших механических свойствах и малой усадке после остывания. Недостатками этих смол являются трудность обработки, возможность разрушения поверхности элементов аминовым отвердителем, более короткий срок существования жидкой фазы (перед заливкой) и более высокая стоимость. Наибольшее значение из них имеет трудность механической обработки.

Опыт в течение нескольких лет показал, что, когда эпоксидные смолы с соответствующими ускорителями отверждения и наполни-

телями применяются в правильно сконструированных блоках, эти блоки могут выдерживать все ударные, вибрационные и климатические испытания.

Существуют следующие типы эпоксидных смол, применяемых для заливки:

- 1) немодифицированная смола с аминовым ускорителем отверждения;
- 2) немодифицированная смола с кислым ангидридным ускорителем отверждения;
- 3) модифицированная смола с аминовым ускорителем отверждения;
- 4) немодифицированная или модифицированная смола с полиамидным ускорителем отверждения.

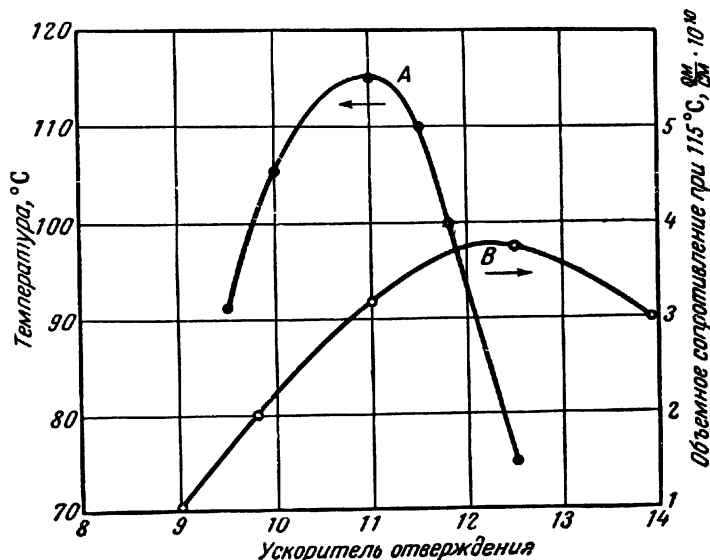
Существуют и другие комбинации, но они обычно не применяются.

Большинство эпоксидных смол обладает высокой вязкостью при комнатной температуре, и, чтобы сделать их применимыми (так называемыми холоднотвердевающими), часто добавляют разбавители, реагирующие или не реагирующие со смолой. Для получения некоторых специальных свойств можно добавлять и другие модификаторы; так, например, жидкие полисульфидные каучуки (тиокаучуки) с большим успехом применяются в тяжелых блоках, где немодифицированная смола была бы неприемлемой.

Чрезвычайно важно при отверждении смолы применять строго определенное количество ускорителя отверждения, рекомендованное изготовителем, иначе будут ухудшены электрические и механические свойства (особенно температуростойчивость). Это так называемое стехиометрическое количество ускорителя отверждения для каждого типа смолы довольно критичное, как можно видеть из фиг. 4.13, где сравниваются два первичных алифатических амина.

Улучшение ускорителей отверждения позволило значительно увеличить температуростойчивость смол. Вместо прежних ускорителей отверждения с размягчением при температурах около 70°С новые ускорители позволяют эксплуатировать соответствующим образом сконструированные блоки при температурах до 200°С. Это улучшение достигается применением материалов с сильными поперечными связями, которые, имея плотную структуру, более хрупки и обладают худшей адгезией, чем материалы с меньшими поперечными связями. Это означает, что не всегда целесообразно заменять один материал на другой (с лучшей температуростойчивостью) без тщательных испытаний, так как хрупкий материал, ломающийся при низких температурах, во многих случаях непригоден для применения в электронном оборудовании, даже если он и обладает превосходными электрическими и температурными свойствами.

Весьма распространенным модификатором для смол является полисульфидный каучук (тиокаучук) — жидкость малой вязкости, частично реагирующая со смолой после введения. Тиокаучук можно добавлять в любой пропорции от 10 : 1 до 1 : 1, и тем самым из одного типа смолы можно получать множество материалов для различных назначений. Особенно удобно применять пропорцию 1 : 1,



Ф и г. 4. 13. Влияние содержания ускорителя отверждения на электрические и температурные свойства.

По оси абсцисс отложено количество ускорителя отверждения в г долях на 100 частей смолы. По оси ординат — температура тепловой деформации; A — диэтилентриамин; B — триэтилентетрамин.

так как сначала может добавляться к тиокаучуку аминовый ускоритель отверждения, а затем полученная смесь вводится в равное количество смолы, которая застывает при комнатной температуре и обладает высокой адгезией ко многим материалам. Этот состав с большим успехом используют для герметизации штепсельных разъемов, которые в результате выдерживают тяжелые климатические испытания и испытания на герметичность.

Выбор между аминовыми и ангидридно-кислотными ускорителями отверждения обычно производится с точки зрения их целесообразности. Так, последние ускорители труднее применять и они требуют повышенной температуры при проведении процесса, но, с другой стороны, они обладают лучшими электрическими свойст-

вами, а новейшие образцы этих ускорителей имеют повышенную температуроустойчивость. Некоторые аминовые ускорители являются твердыми, и практические результаты применения того или иного типа ускорителя различаются сравнительно мало. Преимуществами так называемых «холодных» ускорителей не всегда удается воспользоваться, так как имеющиеся место экзотермические реакции повышают температуру заливной схемы. Обычно невозможно вести процесс отверждения смол без нагревания, хотя они иногда и застывают при комнатной температуре; предпочтительнее, чтобы смола превращалась в студенистую форму и застывала в печи, так как тогда процесс становится управляемым. Типичная система смола — ускоритель становится студенистой при температуре  $65^{\circ}\text{C}$ , т. е. достаточно низкой, чтобы избежать повреждения большинства электронных элементов, включая и полупроводники.

В связи с тем что синтетические смолы обладают большими коэффициентами линейного расширения по сравнению с металлами, стеклом и керамикой, во время циклических температурных испытаний при понижении температуры залитого монтажа до  $-40^{\circ}\text{C}$  возможны поломки как деталей, так и монтажа схемы. Включение неорганических примесей, таких, как слюда, мел, кварцевый порошок и т. п., уменьшает температурный коэффициент расширения, увеличивает теплопроводность и снижает стоимость получаемого продукта. Несмотря на некоторое ухудшение электрических свойств из-за повышения поглощения воды, включение соответствующей примеси, хорошо растворенной в смоле, вполне оправдывается, и для большинства случаев применение смол невозможно без использования этих примесей.

Все смолы дают при затвердевании усадку. Частично эта усадка происходит перед застыванием, или желатинизацией. После желатинизации происходит дополнительная усадка, являющаяся наиболее серьезной, так как она вызывает напряжения, которые могут повредить такие детали, как чувствительные к деформации магнитные сердечники, тонкие пленочные сопротивления и т. п. Усадка перед желатинизацией приводит к понижению уровня в отливке, но в остальном она безвредна.

Когда снижение веса имеет важное значение, как, например, в самолетном электронном оборудовании, применяют пористые или пенные материалы, как твердые, так и эластичные. Эти материалы состоят из изоцианатов, связанных с алкидными смолами, причем последняя реакция нагревает материал, заставляя его расширяться. Это вещество является термореактивным материалом, и, следовательно, его температура застывания должна быть такой, чтобы обеспечивалась требуемая плотность, например для твердой пены  $\sim 100 \text{ кг/м}^3$ . Так как изоцианаты неприятны в обработке даже для опытных химиков, они часто применяются замороженными



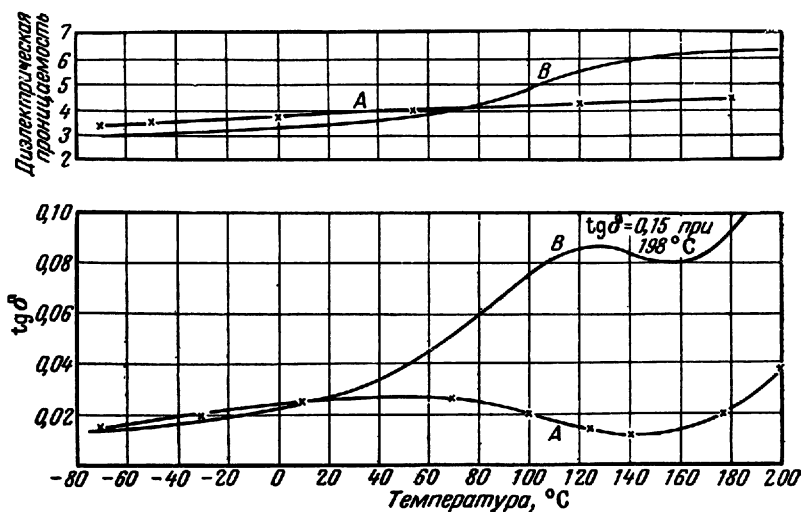
в виде порошка или таблеток; при нагревании возникает реакция, которая завершается при требуемой плотности.

Отдельные узлы, предназначенные для пористой заливки, обычно заключаются в металлические кожухи, в которые после сборки вливается и получает возможность расширяться пенистый материал. Выделяющееся тепло и повышение давления могут повредить термочувствительные элементы, а под воздействием ударов и вибрации материал может превратиться в порошок. Вообще пенообразный материал не следует применять в обычных заливаемых схемах, кроме тех случаев, когда нет другого выхода для получения желаемого результата, но и тогда следует использовать его с большой осторожностью, учитывая возможные затруднения.

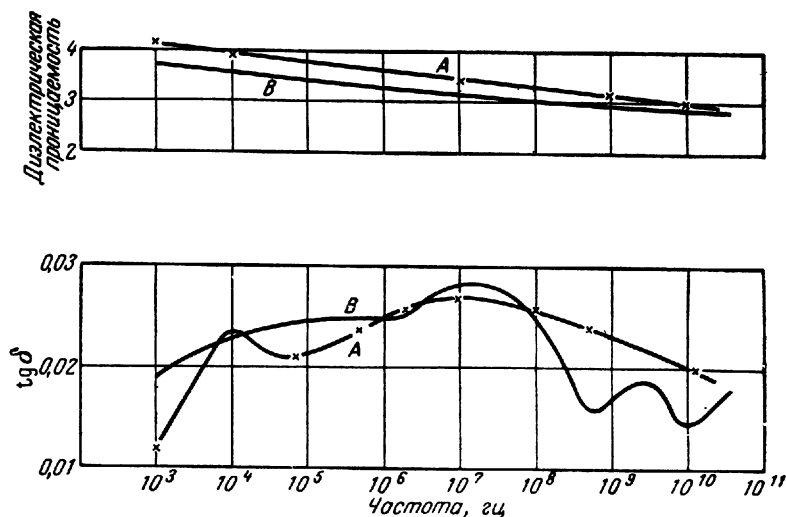
### Электрические свойства заливочных материалов

Существенным свойством всех материалов, обладающих хорошей адгезией, является содержание полярных диполей, которые не всегда следуют приложенному электрическому полю; это вызывает потери, зависящие как от температуры, так и от частоты (фиг. 4.14 и 4.15). Все смолы, годные для заливки, относятся к такому типу. Проверка диэлектрических свойств этих материалов показывает, что наименее пригодные из них, имеют диэлектрическую проницаемость менее 2,5 и тангенс угла потерь менее 0,001, измеренные на частоте 1 *Мгц*. Таким образом, все материалы с малыми потерями, характеристики которых так необходимы на ультравысоких частотах, исключаются, что приводит к невозможности заливать такие узлы аппаратуры, как высокочастотные схемы и генераторы, а также линии и схемы промежуточной частоты, где требуется предельная стабильность параметров в широком диапазоне температур. Многие фирмы пробовали устранить этот недостаток, но безуспешно. Например, смола из стиролдивинилбензина имеет превосходные характеристики с точки зрения малых потерь, но зато обладает большой степенью усадки и малой температуроустойчивостью, а ее слабые адгезионные свойства могут привести к проникновению водяных паров в местах соприкосновения внешних выводов со смолой.

У типовых заливочных смол диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь, измеренные на частоте 1 *Мгц*, лежат в пределах 3,5—4,0 и 0,01—0,05 соответственно. Практически эти значения параметров достаточны для всех низкочастотных схем, но существует еще одно свойство, особенно важное в высоковольтных приборах, работающих при высоких температурах, — это объемное сопротивление материала. До некоторой степени представляет интерес и поверхностное сопротивление; в этом отношении эпоксидные смо-



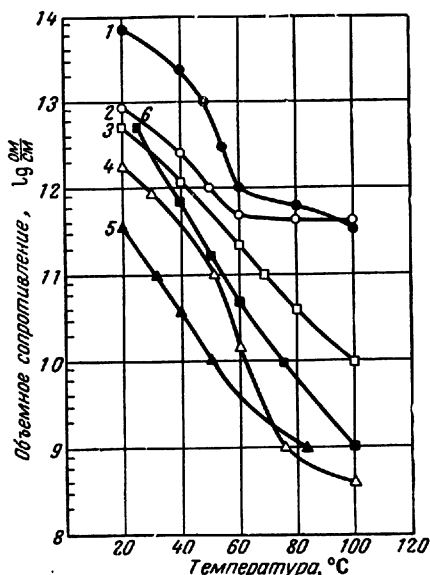
Фиг. 4. 14. Зависимость тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости от температуры при  $f=1$  Мгц.  
 А—немодифицированная эпоксидная смола; В—модифицированная эпоксидная смола.



Фиг. 4. 15. Зависимость тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости от частоты.  
 А—немодифицированная эпоксидная смола; В—модифицированная эпоксидная смола.

лы являются превосходным материалом, и можно считать, что они вполне обеспечивают отсутствие утечки тока по поверхности.

Зависимость объемного сопротивления от температуры для некоторых типовых смол показана на фиг. 4.16. Вообще считается, что величина сопротивления  $10^{16}$  ом/см самая высокая, какая может быть достигнута на стандартном оборудовании, используемом в нормальных условиях, в то время как сопротивление, равное  $10^8$  ом/см,



Фиг. 4.16. Влияние температуры на объемное сопротивление различных смол.

1 — модифицированная эпоксидная смола, ароматический аминовый ускоритель; 2 — немодифицированная эпоксидная смола, ароматический аминовый ускоритель; 3 — модифицированная эпоксидная смола (реактивный растворитель); 4 — модифицированная эпоксидная смола, первичный аминовый ускоритель; 5 — полисульфидная смола/эпоксидная смола (60/100), первичный аминовый ускоритель; 6 — полисульфидная смола/эпоксидная смола (100/100), первичный аминовый ускоритель.

рассматривается как слишком низкое. Однако эти цифры следует учитывать только как ориентировочные и в каждом отдельном случае решать в зависимости от конкретных требований и реальных условий выполняемой работы.

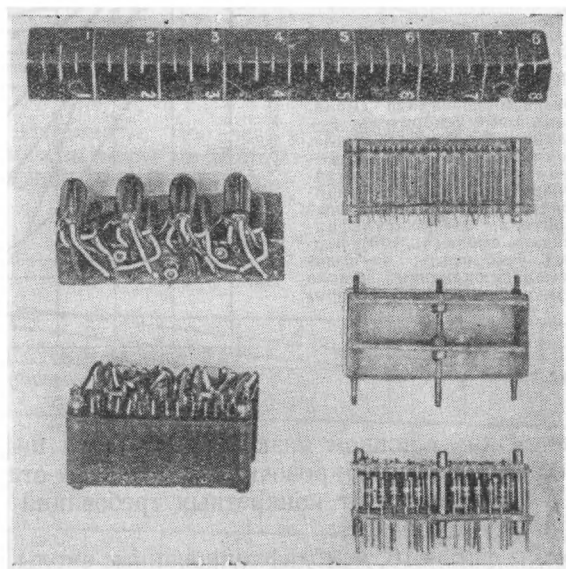
Как видно из фиг. 4.16, немодифицированные смолы, использующие ароматические аминовые ускорители отверждения, дают достаточно ровные характеристики в диапазоне температур 20—100° С. Любая модификация вызывает некоторое ухудшение электрических свойств: так, применение тиокаучука понижает удельное сопротивление до  $10^8$  ом/см при 100° С (что для большинства применений более чем достаточно). Смесь 1 : 1 эпоксидной смолы и тиокаучука, например, применяется для герметизации штепсельных разъемов. Сопротивление изоляции имеет величину в несколько сотен мегом при температуре 70° С после длительной выдержки в условиях высокой влажности. В большинстве практических случаев достаточно иметь сопротивление изоляции 10 Мом (так, например, эта величина

принята для ненагруженных штепсельных разъемов, не соединенных с кабелями).

При проектировании залитых схем следует учитывать, что они не поддаются ремонту во время эксплуатации; это обстоятельство вместе с соображениями веса и стоимости главным образом и ограничивает их применение.

### Примеры залитых конструкций

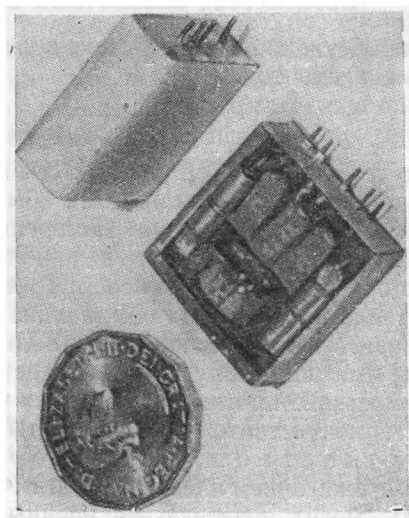
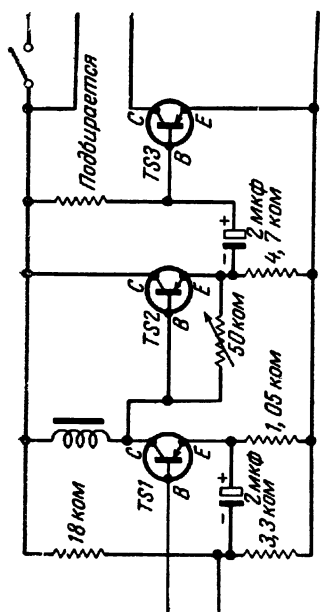
Типичная конструкция с применением сверхминиатюрных ламп показана на фиг. 4.11. Такая сборка позволяет максимально плотно замонтировать элементы и лампы. Другая конструкция показана на фиг. 4.17.



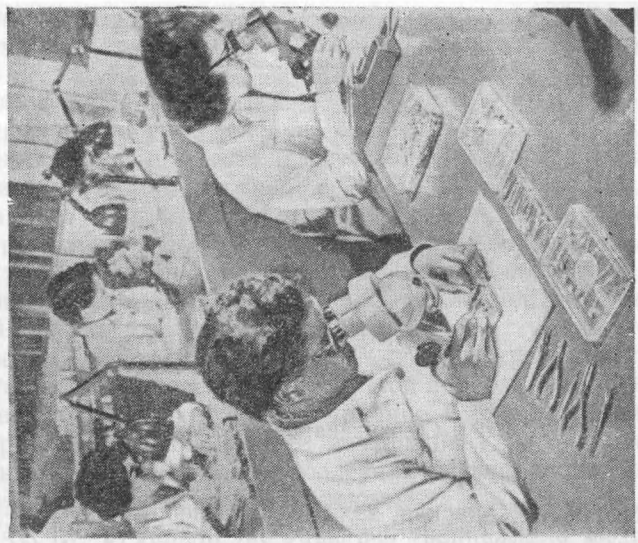
Фиг. 4. 17. Сборка залитого блока.  
Масштаб в дюймах.

Пример залитого транзисторного блока приведен на фиг. 4.18. Размеры блока  $6 \times 20 \times 20$  мм. В нем размещено 12 элементов, что соответствует плотности монтажа, равной примерно 5 элементам в  $1 \text{ см}^3$ . Воздействие заливочных смол на транзисторы и элементы обсуждается ниже.

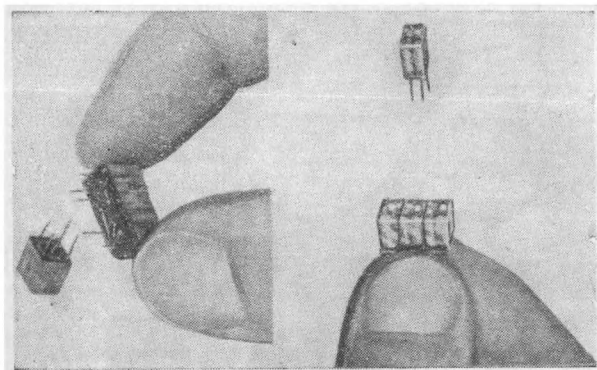
Конструкция сверхминиатюрных усилителей для слуховых аппаратов показана на фиг. 4.19. Эти усилители содержат одиночный



Ф и г. 4. 18. Трехкаскадный транзисторный усилитель.  
а — принципиальная схема; б — сборка в капсуле размерами 6,5 × 19 × 19 мм, открытая и залитая смолой.



Ф и г. 4. 19. Сборка слуховых аппаратов.



Фиг. 4. 20. Сверхминиатюрные залитые усилители.

транзисторный *RC*-каскад, залитый кремнеорганическим каучуком. Они имеют коэффициент усиления по мощности 20 дб, вес 0,5 г и размеры  $4 \times 6,5 \times 7,5$  мм. В случае надобности каскады можно добавлять; несколько таких усилителей показано на фиг. 4.20.

### Воздействие заливочных смол на элементы

Ниже обсуждается воздействие заливочных смол на каждый из основных элементов.

#### Сопротивления

**Угольные сопротивления.** Обыкновенные углеродистые объемные сопротивления обычно не претерпевают изменений при заливке их смолами. Измерения, проводившиеся в течение нескольких лет, показали, что величина сопротивлений не изменяется и что они редко растрескиваются или ломаются даже при резких сменах тепла и холода. Их номинальная мощность также не меняется, оставаясь такой же, как и у незалитых сопротивлений. Следует помнить, что, поскольку смола обладает плохой теплопроводностью, выделяемое на сопротивлениях тепло может вывести из строя соседние термочувствительные элементы.

**Высокостабильные сопротивления,** изготовленные вжиганием пленки пиролитического угля на керамический стержень, могут подвергаться вредным изменениям при заливке. Они обычно покрываются силиконовыми лаками, слабо сцепляющимися с углем. При заливке смола может прилипнуть к силиконовому слою и снять его с угольной пленки. В высокоомных миниатюр-

ных сопротивлениях, где угольный слой предельно тонок и нанесен в виде спирали, покрытие иногда повреждается именно таким образом.

**Высокостабильные сопротивления**, металлопленочные и особенно оксиднопленочные, показали хорошие результаты, хотя прошло еще недостаточно времени, чтобы полностью оценить временной фактор.

**Проволочные сопротивления**. Проволочные сопротивления, работающие при значительных нагрузках, обычно не заливаются. Вследствие высокой температуры поверхности (вплоть до 400°С при полной нагрузке) в них может проявиться весьма значительный эффект различного расширения составных элементов сопротивления. Сопротивления в виде полый, открытой по краям керамической трубки с намоткой из тонкой проволоки особенно подвержены выходу из строя по этой причине. Смола при заливке заполняет трубку, и, поскольку ее коэффициент расширения в 6—8 раз больше, чем у керамики, последняя обычно лопается, разрушая тонкую проволоку сопротивления.

Там, где проволочные сопротивления применяются только как стабильные элементы схемы и не рассеивают заметного тепла, их, конечно, можно с успехом заливать, при этом наиболее подходящим типом являются сопротивления на трубках с закрытыми концами.

### *Конденсаторы*

**Керамические конденсаторы** не претерпевают изменений при заливке смолой, но так как они обладают более низким температурным коэффициентом расширения по сравнению со смолой (примерно 1 : 10), последняя часто растрескивается в них, когда блок, содержащий большие керамические конденсаторы, подвергается испытаниям на морозостойкость.

**Слюдяные конденсаторы** с посеребренными пластинами обычно покрываются различными материалами: воском, смолой или полиэтиленом. Восковое покрытие непригодно для заливки смолой, так как растапливается жидкой смолой и, поднимаясь к поверхности, создает пустоты, через которые может проникнуть влага. Для заливки конденсаторов этого типа с них тщательно снимают восковое покрытие и обезжиривают и только после этого приступают к заливке.

**Полистироловые конденсаторы**, используемые в специальной аппаратуре, а также (в особых случаях) очень большие высокостабильные конденсаторы большой емкости при заливке впоследствии выходили из строя под воздействием напряжений, вызываемых различием коэффициентов расширения. При этом полистироловая пленка, имеющая часто толщину всего 6 мк, разрывается. Другой причиной выхода из строя является растворение полисти-

рола в смоле, находящейся в жидком состоянии. Это особенно опасно при использовании полиэфирных смол, так как большинство из них содержит 30—40 частей стирола.

Бумажные конденсаторы выпускаются либо в запаянных алюминиевых коробках, либо в виде деталей, покрытых смолой или воском. При заливке конденсаторов, заключенных в алюминиевый корпус или покрытых смолой, не возникает никаких затруднений.

Воск, применяемый для покрытия этих конденсаторов, имеет высокую температуру плавления и часто может успешно заливаться смолой, но все же существует такая же возможность их повреждения, что и в случае слюдяных конденсаторов с посеребрёнными пластинами.

### Резонансные контуры

При заливке схемы с резонансным контуром, содержащим высокочастотную катушку индуктивности с воздушным, железным или каким-либо другим сердечником, сильно ухудшается добротность, которая, кроме того, при повышении температуры падает часто до 50% от своего первоначального значения при комнатной температуре. Этот недостаток присущ полиэфирным и эпоксидным смолам, являющимся необходимыми составными частями заливочных материалов. Следует также иметь в виду, что незащищенные покрытиями медные провода могут корродировать под воздействием полиэфирных смол.

### Элементы с железными сердечниками

При заливке элементов с железными сердечниками (например, силовых трансформаторов) возникают проблемы, связанные с различием расширения, так как коэффициент расширения железа составляет около  $\frac{1}{8}$  коэффициента расширения смол. Эта разница часто компенсируется до некоторой степени введением неорганических примесей большой концентрации (слюда и т. п.). С этой целью разработана технология производства силовых трансформаторов, выдерживающих все климатические испытания, определяемые техническими условиями.

Железо-никелевые сердечники, применяемые в трансдукторах, магнитных усилителях и других катушках индуктивности, где важна стабильность характеристик при изменении температуры, очень чувствительны к давлению. Когда такие сердечники заливаются, давление, возникающее в процессе застывания, изменяет их магнитные свойства, а когда блоки подвергаются испытаниям на морозостойкость, их свойства резко ухудшаются. Некоторого улучшения



можно ожидать от заливки блоков смолами, содержащими большие концентрации примесей; предлагались также эластичные смолы, но они оказались непригодными вследствие затвердевания при низких температурах. Существуют различные способы преодоления этих трудностей; одним из наиболее перспективных является прокладка между сердечником и смолой слоя какого-либо материала с низким коэффициентом расширения.

### **Сухие выпрямители**

Существуют значительные трудности в заливке селеновых и купроксных выпрямителей, но их можно преодолеть применением специальной технологии и использованием полиуретана и подобных эластичных материалов. Небольшие кремниевые выпрямители можно заливать так же, как и транзисторы, но для мощных типов, требующих теплоотвода, нужна специальная технология.

### **Полупроводники**

Германиевые и кремниевые приборы в герметичных корпусах подвергались заливке в течение ряда лет при незначительном проценте выходов из строя. В связи с этим весьма важно, что нагревание германиевых полупроводников не может превышать  $70^{\circ}\text{C}$  и соответственно ограничивается температура отверждения.

Принято монтировать полупроводники с предварительным покрытием синтетическим каучуком, для того чтобы доводить до минимума давление, действующее на элемент, когда заливочная смола застывает и сжимается. Почему это действует эффективно, когда оба края элемента остаются незащищенными, не ясно, однако без применения покрытия имеют место выходы из строя из-за поломки стекла. Покрытие полезно также для предотвращения удаления краски с некоторых типов транзисторов, чем снижается действие фотоэлектрического эффекта. Для вывода из блока выделяющегося в нем тепла должны быть приняты обычные меры.

При заливке транзисторов, смонтированных на своих выводах, может возникнуть специфическое затруднение. Поскольку выводы очень тонки, а элемент легкий и закрепляется только с одного конца, вливание или впрыскивание смолы может сдвинуть транзистор и вызвать короткое замыкание с соседними элементами или между проводниками выводов.

### **Элементы в герметичных корпусах**

Заливка герметичных реле, переключателей, потенциометров и т. п. редко влияет на их свойства. Способ герметизации должен быть тщательно исследован на совместимость с выбранной смолой

(например, восковая герметизация может быть расплавлена выделяющимся теплом).

Если герметичный элемент велик по сравнению с залитым блоком, возникает опасность увеличения напряжений при застывании смолы.

### **ВЫВОДЫ**

Причинами возможных изменений параметров элементов при заливке являются:

1. Механические напряжения, вызванные:
  - а) сжатием элементов при застывании смолы;
  - б) повреждением залитого блока из-за дефектов заливки, неудачного расположения или превышения температуры;
  - в) различием теплового расширения.
2. Влияние температуры, вызывающее порчу элементов.
3. Проникновение влаги в блок.
4. Увеличение диэлектрической проницаемости и угла потерь.

## Глава 5

# МИНИАТЮРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

### ВВЕДЕНИЕ

*Определение миниатюризации.* В технической литературе еще не установилось дифференцированное определение понятия миниатюризации. На ранней ступени развития электроники было невозможно предвидеть уровень миниатюризации, существующий в настоящее время, и термины «миниатюрный» и «сверхминиатюрный» применялись к конструкциям, содержащим миниатюрные и сверхминиатюрные электронные лампы. Применение транзистора вызвало дальнейшее уменьшение размеров оборудования, обусловленное не только малыми размерами самого транзистора, но и пониженными рабочими напряжениями и токами. С появлением «микроминиатюризации» и «ультраминиатюризации» возникли затруднения в точном определении этих терминов.

В настоящей книге применяется следующая терминология:

нормальная конструкция — лампы довоенного типа и крупные элементы;

миниатюрная конструкция — миниатюрные лампы (типа B7G) и миниатюрные элементы;

сверхминиатюрная конструкция — сверхминиатюрные лампы, транзисторы и сверхминиатюрные элементы;

микроминиатюрная конструкция:

микромодули — плоские транзисторы и пленочные элементы (отдельные);

микросхемы — плоские транзисторы и пленочные элементы (объединенные в схемы);

твердые схемы — твердые схемы, изготовленные в одиночном или составном блоке (молекулярная электроника).

*«Философия» миниатюризации.* «Миниатюризировать» — значит сокращать размеры отдельных узлов или всего оборудования на один или несколько порядков. Уменьшение всех размерных величин в масштабе, хорошо известное в природе, не всегда возможно в электронике. Например, вес устройства находится в кубической зависимости от его линейных размеров, а поперечное сечение опорных элементов — только в квадратической. В природе мы видим уравновешенное изменение в соотношении между телом и конечностями при сравнении слона и паука с точки зрения пропорции.

В электронике малогабаритный элемент может выдерживать вибрацию и перегрузки лучше, чем крупногабаритный, а сверхминиатюрный — еще лучше.

При изменении масштабов оборудования необходимо систематическое изучение «размеров» каждого параметра. Если размер уменьшается вдвое, то собственная емкость уменьшается также вдвое (расстояние уменьшается вдвое, а площадь вчетверо). В импульсной схеме это позволяет увеличить вдвое сопротивление нагрузки (при неизменном времени нарастания). Следовательно, при неизменном уровне напряжения мощность уменьшается вдвое. Но так как размеры уменьшились вдвое, а поверхность охлаждения — вчетверо, мощность на единицу поверхности увеличится вдвое и схема будет перегреваться. Таким образом, в процессе миниатюризации при прочих равных условиях возникают проблемы рассеяния тепла. Для примера ниже приведено четыре типа конструктивного оформления 4-ламповой схемы стабилизации частоты:

Конструкция	Объем, см <sup>3</sup>
а) типовое шасси релейной стойки 48×18×25 см; не требует принудительного обдува . . . . .	21 700
б) типовое шасси аналогового вычислительного устройства 7,5×20×25 см с приточной вентиляцией . . . . .	3 800
в) типовое сменное шасси для цифрового вычислительного устройства 3,5×15×20 см; индивидуальное воздушное охлаждение и отвод тепла . . . . .	1 050
г) типовой сменный герметизированный блок цифрового вычислительного устройства 1,7×7,5×13 см, погруженный в масло; отвод тепла охлаждаемой водой . .	165

Как видно, полученное уменьшение объема превышает 100:1. Самая крупногабаритная конструкция шасси на первый взгляд является наиболее дешевой, но для всего вычислительного устройства, включающего 100 стоек или шкафов больших размеров, может потребоваться специальное дорогостоящее помещение в 200 м<sup>3</sup> с кондиционированием воздуха и подсобными помещениями. Если же малогабаритные блоки располагать как «кирпичи», то можно обойтись одним большим шкафом, поместив его в небольшой комнате и охлаждая медленным водяным потоком, протекающим по 20-миллиметровой трубе.

Изготовление блока с минимальными габаритами обходится наиболее дорого, но большая часть или целиком вся стоимость его изготовления возмещается экономией на рабочем и вспомогательном помещениях при значительном выигрыше в удобствах эксплуатации.

Таким образом, сложная электронная вычислительная машина совершенствовалась в течение ряда лет последовательными этапами, начиная от лабораторного макета и кончая совершенно новым устройством, сделанным на высоком техническом уровне.

В приведенных примерах миниатюризация облегчается функциональным разделением системы и ламповых схем на идентичные и подобные 4-ламповые секции. Это условие, несомненно, является первым требованием для обеспечения приемлемой гибкости при дальнейшем усовершенствовании, и проведение такой унификации необходимо, начиная с наиболее ранней стадии, когда разрабатывается логическая часть и проект конструкции устройства.

Между стадиями (б) и (в) (для приведенного выше примера) возможны различные промежуточные этапы развития. Например:

- 1) максимальная степень миниатюризации ламповых схем;
- 2) транзисторизация устройства.

Применение транзисторов дает возможность сразу же уменьшить объем на целый порядок, что сопровождается уменьшением мощности также на порядок, а все это радикально изменяет исходную точку зрения на возможные методы конструирования.

Полная транзисторизация разработанной системы связана с необходимостью вновь возвращаться к уровню лабораторного макета. Необходимо изыскать чрезвычайные средства для проведения этих стадий одновременно и в быстром темпе.

В настоящее время намечается новый этап миниатюризации, требующий предварительного выполнения дальнейшей миниатюризации всех элементов. Так, например, спротивления или конденсаторы изготавливаются еще относительно «большими» только из-за трудности обращения с ними при дальнейшем их уменьшении.

Если к стадиям (а) — (г) уменьшения габаритов транзисторного усилителя схемы стабилизации частоты в процессе дальнейшей миниатюризации добавить новую четырехкаскадную схему (д), то этот усилитель, используя стандартные элементы, выпускаемые промышленностью, можно сделать меньше спичечного коробка. Далее, пользуясь хорошо отработанным в биологии методом микрорасщепления и микроманипуляции, можно извлечь германиевые пластинки из транзисторов, а также активные части сопротивлений и конденсаторов и снова вмонтировать их в лабораторный макет (е) величиной с пятикопеечную монету.

Конструкция	Объем, см <sup>3</sup>
д) сверхминиатюрный четырехтранзисторный залитый блок 1×2,5×3 см . . . . .	8
е) микроминиатюрный четырехтранзисторный лабораторный макет 0,18×1,8×2,5 см . . . . .	0,8

Получается четырехкаскадная схема из «лабораторных» элементов, собранных «лабораторными» методами в форме «лабораторного» макета, и ее объем составляет 1/200 от объема ламповой схемы с жидкостным охлаждением и 1/26 000 от объема стандартного открытого шасси.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВА В МИНИАТЮРНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Интересно проанализировать использование пространства в оборудовании, чтобы ощутить сравнительно низкую общую эффективность использования объема даже самых лучших конструкций на стандартных деталях, несмотря на далеко идущую миниатюризацию активных и пассивных элементов. «Миниатюризация» при объективном анализе с точки зрения применения к оборудованию имеет три основные переменные:

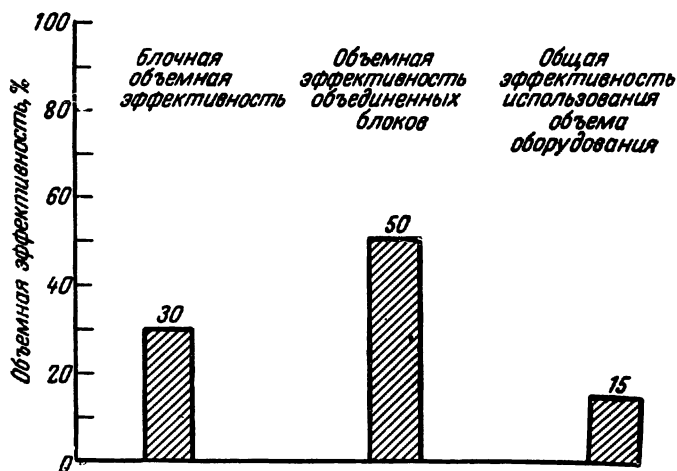
- 1) размер отдельных частей и элементов;
- 2) объемная эффективность, связанная со сборкой отдельных частей в блок; здесь принимаются в расчет потери пространства, полученные в процессе сборки функциональных блоков;
- 3) объемная эффективность, связанная со сборкой блоков в законченное оборудование. Здесь принимаются в расчет потери пространства, возникшие в процессе соединения блоков для получения действующего оборудования.

Полезно показать значение каждого из этих факторов относительно общей миниатюризации оборудования. Возьмем, например, компактный блок промежуточной частоты американской фирмы Helmet Radio, собранный из типовых транзисторных узлов для малогабаритного оборудования; размеры большинства элементов дают плотность 1,8 элемента на  $1 \text{ см}^3$  и более, а у некоторых (например, малогабаритных блокировочных конденсаторов и композиционных сопротивлений) она доходит до 70 элементов на  $1 \text{ см}^3$  и более. Несмотря на это, собранный экспериментальный блок промежуточной частоты при рациональном расположении элементов имеет плотность всего 2 элемента на  $1 \text{ см}^3$ . Даже если уменьшить почти до нуля объем наиболее распространенных элементов (композиционные сопротивления), можно убедиться, что изменение размеров всего оборудования будет незначительным. Так как объемная эффективность блока равна всего 27 %, то очевидно, что он состоит примерно из трех частей воздуха и одной части рабочих электронных элементов.

Следующий шаг в производстве — это объединение нескольких таких блоков в действующее устройство. Установлено, что в процессе объединения узлов получается дополнительная потеря пространства. Необходимо предусмотреть место для соединителей, панелей управления, батарей и других узлов, а также между блоками для размещения сложного соединительного монтажа. Необходимо предусмотреть также свободное пространство для извлечения блоков при ремонте или проверке. На практике эффективность объединенных вместе блоков составляет от 10 % для вычислительных схем (требующих большой печатной платы для размещения сложного

межблочного монтажа) до 50% для других схем, например приемников, для которых межблочный монтаж не требуется (фиг. 5.1).

Таким образом, размещение элементов в блоках и блоков в действующем оборудовании приводит к весьма низкой «общей эффективности использования объема оборудования», являющейся производной от блочной и объединенной объемных эффективностей. В практическом примере транзисторной вычислительной схемы

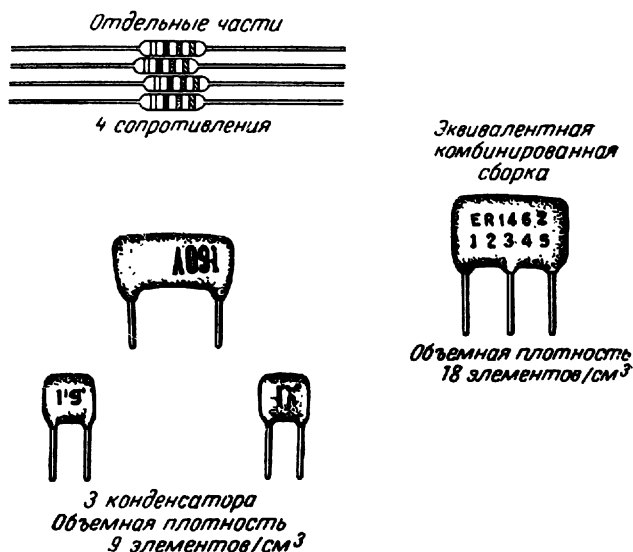


Фиг. 5. 1. Объемная эффективность применения обычных сверхминиатюрных элементов.

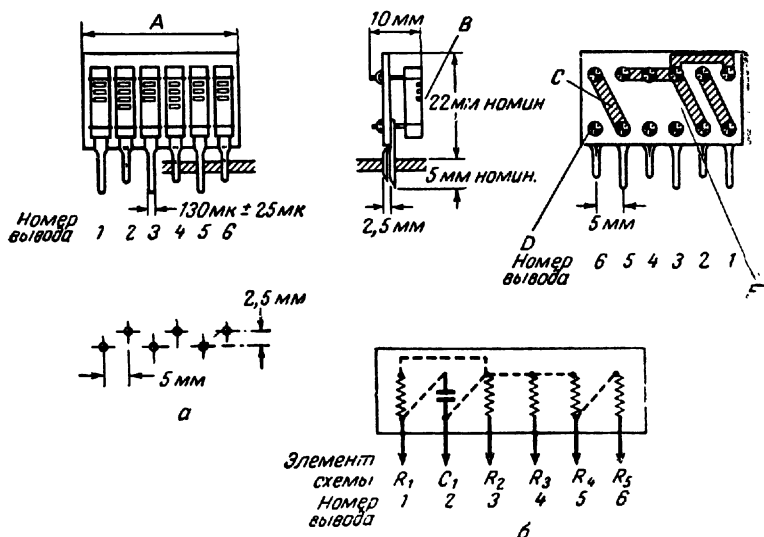
окончательная общая эффективность использования объема составляет около 5%, а в исключительных случаях может достигать до 15%, иными словами, в законченном оборудовании электронные элементы схемы занимают лишь 5—15% всего объема. Из приведенной диаграммы видно, что способ размещения миниатюрных элементов является чрезвычайно значительным фактором при определении общего объема оборудования.

### Комбинированные или предварительно собранные элементы

Одним из способов уменьшения пространства, занятого обычно используемыми малогабаритными элементами, такими, как сопротивления и конденсаторы, является комбинирование их в одной заливочной оболочке. Фиг. 5.2 иллюстрирует результат комбинации четырех сопротивлений и трех конденсаторов, которая позво-



Фиг. 5. 2. Комбинированные элементы.



Фиг. 5. 3. Предварительная сборка элементов.

$A = [5(N-1)+9]$  мм (не более), где  $N$  — количество элементов;  $B$  — элемент, вставляемый в гнезда;  $C$  — металлизированное соединение;  $D$  — выводы элементов, припаянные к схеме с противоположной стороны платы;  $E$  — покрытие из бесцветного защитного лака.



ляет удвоить плотность размещения таких элементов в том же объеме. На фиг. 5.3 показана система, позволяющая очень плотно монтировать малогабаритные элементы вместе с соединительным печатным монтажом.

### КОНСТРУКЦИЯ МИНИАТЮРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В настоящее время существует много примеров миниатюрных конструкций, — возможно, раньше всего были сконструированы радиоприемники и слуховые аппараты для тугоухих, размещаемые иногда в дужках очков, — все они, а также переносные радиотелефонные установки, являются портативными устройствами на транзисторах. В последнее время медицинской электронике потребовались малогабаритные устройства для заглатываемых датчиков и чувствительных к давлению телеметрических капсул.

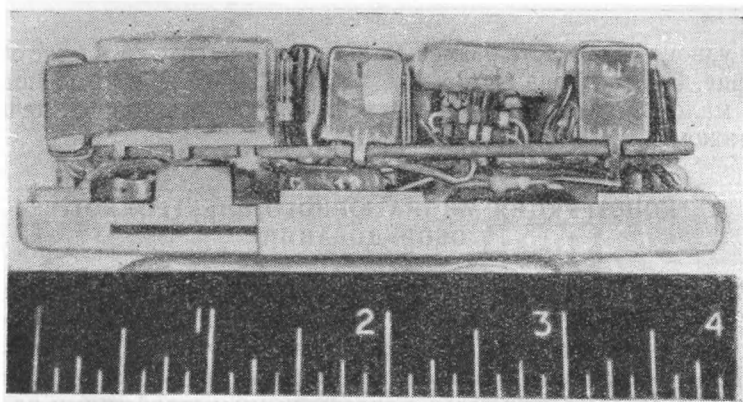
Основными преимуществами миниатюрных конструкций являются экономия объема и веса и повышенная ударопрочность. Отрицательными факторами являются трудности обслуживания и более высокие температуры в местах рассеяния энергии. Имеются также схемные трудности на низких частотах, а на высоких частотах возникают проблемы экранировки между плотно расположенными элементами.

Многие из этих проблем преодолены или частично решены в конструкции портативных радиоприемников, а применение ферритовых антенн позволяет выпускать транзисторные приемники в корпусах с ориентировочными размерами  $10 \times 5 \times 2,5$  см (фиг. 5.4).

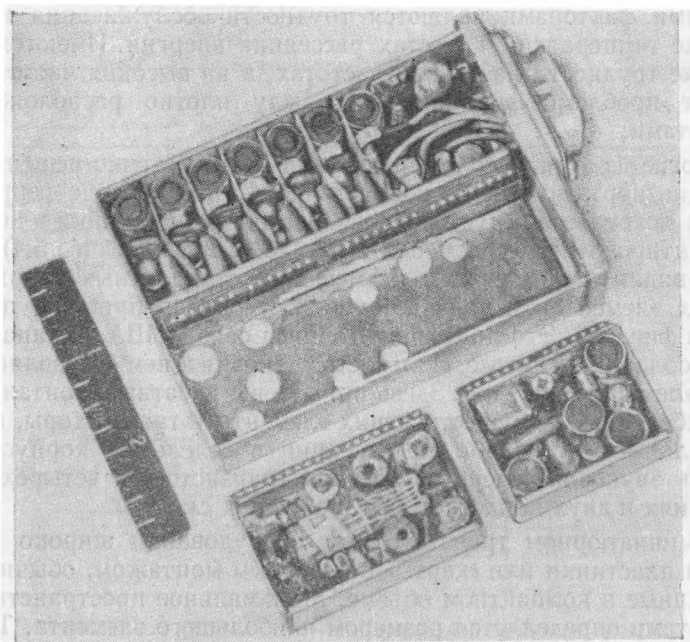
По-видимому, предел в размещении стандартных сверхминиатюрных элементов и транзисторов достигнут в примере, показанном на фиг. 5.5. Это приемник Корпуса связи США, устанавливаемый в солдатском шлеме. Плотность упаковки в нем составляет  $1,8 \div 2,1$  элементов на  $1 \text{ см}^3$ . Здесь применены печатный монтаж, самые малогабаритные из существующих элементы и транзисторы, а также специальные многоэлементные секции в отдельных корпусах, например звуковой генератор на двух транзисторах, четырех сопротивлений и двух конденсаторах в объеме  $4 \text{ см}^3$ .

В миниатюрном транзисторном оборудовании широко используются пластинки или «карты» с печатным монтажом, обычно смонтированные в компактном объеме. Минимальное пространство между картами определяется размером наибольшего элемента. Типовая конструкция этого вида показана на фиг. 5.6.

В США применяется многослойный печатный монтаж, при котором возможно увеличение количества внутренних соединений, что позволяет плотнее располагать элементы, но вместе с тем затрудняет



**Ф и г. 5. 4. Японский транзисторный портативный приемник.  
Масштаб в дюймах.**



**Ф и г. 5. 5. Модули приемника.  
Масштаб в дюймах.**

их замену. Если межплатные разъемы выполнять прямой пайкой или сваркой соединений между элементами, можно получить габаритные размеры модулей, показанные на фиг. 5.7.

Применение для внутренних соединений метода точечной сварки позволяет использовать элементы, взаимно поддерживающие друг друга, но при этом блок становится неремонтируемым. Пример такого способа приведен на фиг. 5.8.

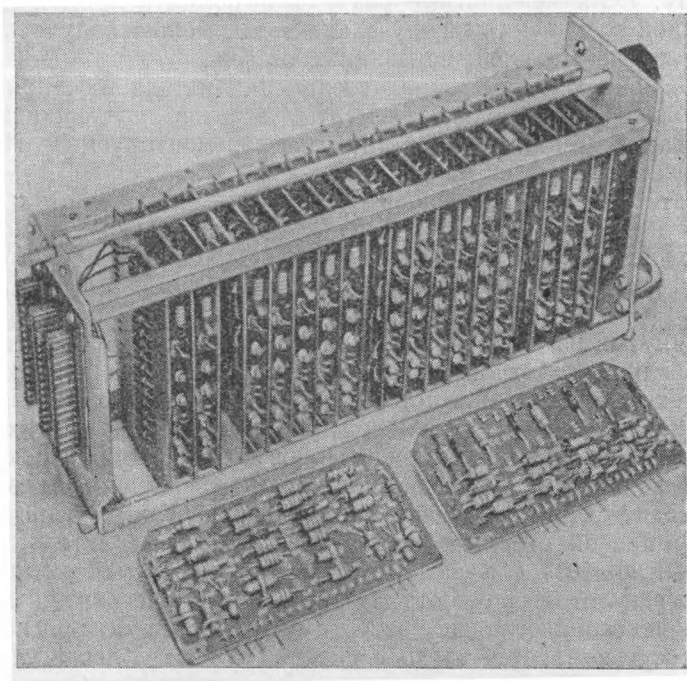
Миниатюрные вычислительные устройства, выпущенные в США, показаны на фиг. 5.9 и 5.10. В эту систему включен теплоотвод для удаления тепла из треугольных субблоков, подключенных к главной печатной плате, приведенной на фиг. 5.11 в натуральную величину.

Упомянутый выше слуховой аппарат для тугоухих выпускается в виде различных устройств. На фиг. 5.12 показана конструкция на четырех транзисторах, в которой два транзистора и связанные с ними элементы установлены в одной дужке очков, а два других транзистора и все входящие компоненты — в другой. Дужки показаны без крышек, вместе с оправой и шарнирами крепления, через которые проходит специальный соединительный кабель. В этой конструкции с правой стороны находится приемник-усилитель, затем пружинный контакт для соединения с ртутным элементом, а посередине — регулятор громкости. На переднем конце каждой дужки расположен соединительный разъем с тремя штырями, при помощи которых осуществляется связь с оправой очков. С левой стороны находятся два первых транзисторных каскада с микрофонной капсулой. Схема этого устройства показана на фиг. 5.13.

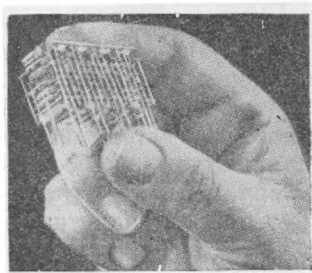
Имеются конструкции еще более миниатюрные, в которых весь усилитель и миниатюрная батарея помещаются в одном корпусе, устанавливаемом за ухом (фиг. 5.14); в будущем, несомненно, появятся и такие конструкции слуховых аппаратов, которые можно будет помещать в ушной раковине.

Представляет некоторый интерес описание технологии и процессов изготовления печатных схем миниатюрных усилителей.

Одной из первых по-настоящему миниатюрной печатной схемой на керамической плате была схема программного взрывателя, выпущавшегося до 1945 г. Национальным бюро стандартов. Она состояла из небольшой керамической платы, на которую способом трафаретной печати были нанесены проводники и угольные сопротивления, соединенные с небольшими керамическими дисковыми конденсаторами. Подобная работа велась также и другими лабораториями. С появлением транзисторов (1948 г.) блоки, выпущенные ранее, переводились на транзисторы. Каскады в типовой конструкции компактного транзисторного усилителя показаны на фиг. 5.15. В некоторых случаях вместо обычной стеатитовой керамики в качестве диэлектрической платы применялась керамика из титаната



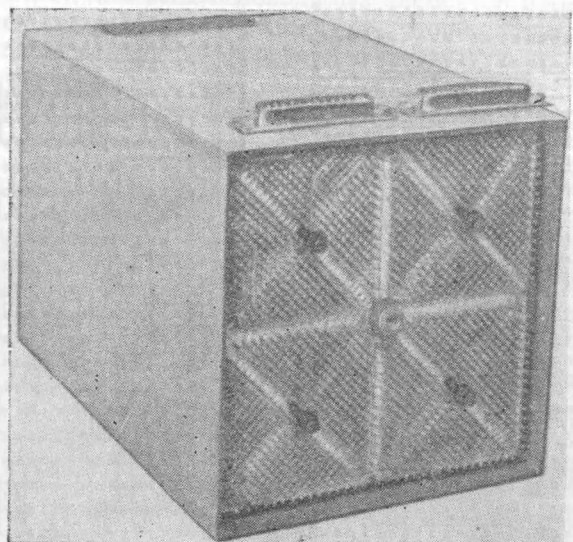
Ф и г. 5. 6. Карты с печатным монтажом, используемые в миниатюрном транзисторном оборудовании.



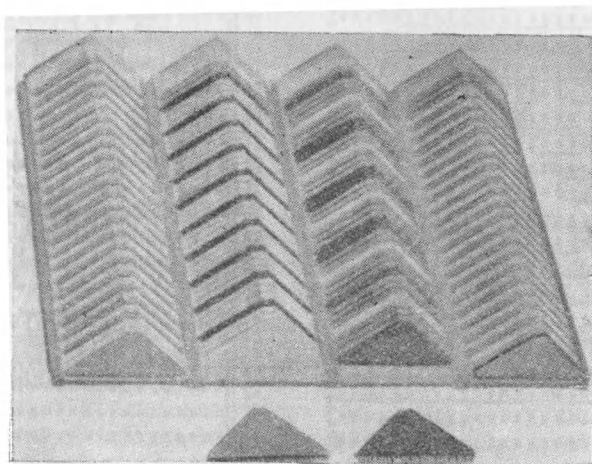
Ф и г. 5. 7. Сварной объем-  
ный модуль.



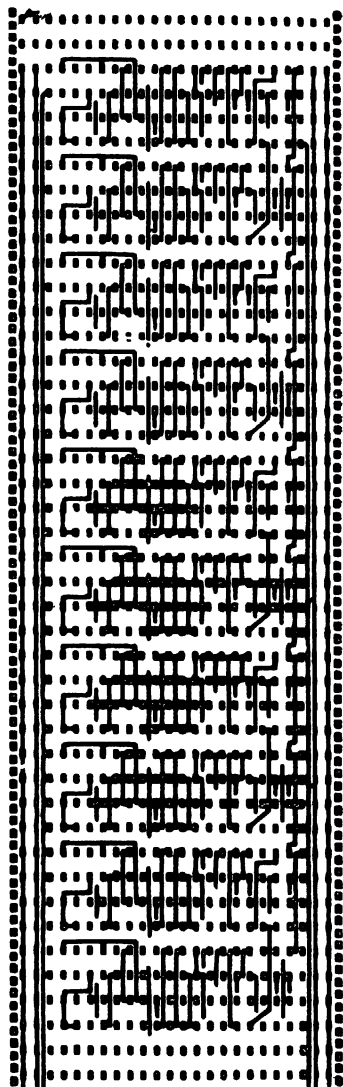
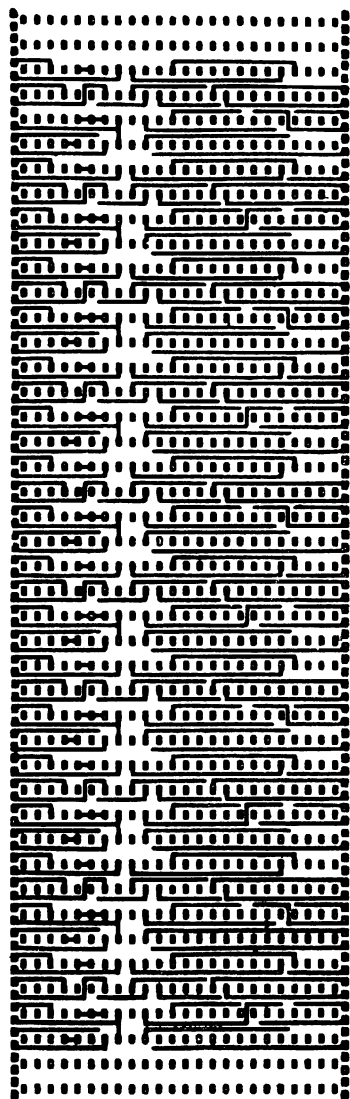
Ф и г. 5. 8. Логическая ячейка из вычис-  
лительного устройства.



Фиг. 5. 9.



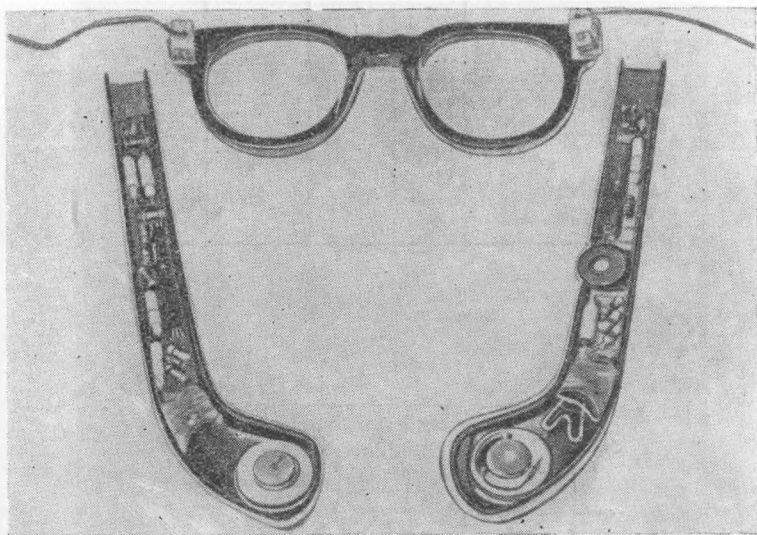
Фиг. 5. 10.



Фиг. 5. 11.

бария. Керамическая плата с размерами  $30 \times 17$  мм использовалась в качестве шасси для всех необходимых элементов и транзисторов.

**Монтаж.** Монтаж из серебряных проводников наносится на статитовые панели методом трафаретной печати с использованием комбинации пневматических цилиндров для выполнения необходимых операций после того, как оператор устанавливает блок в зажимное



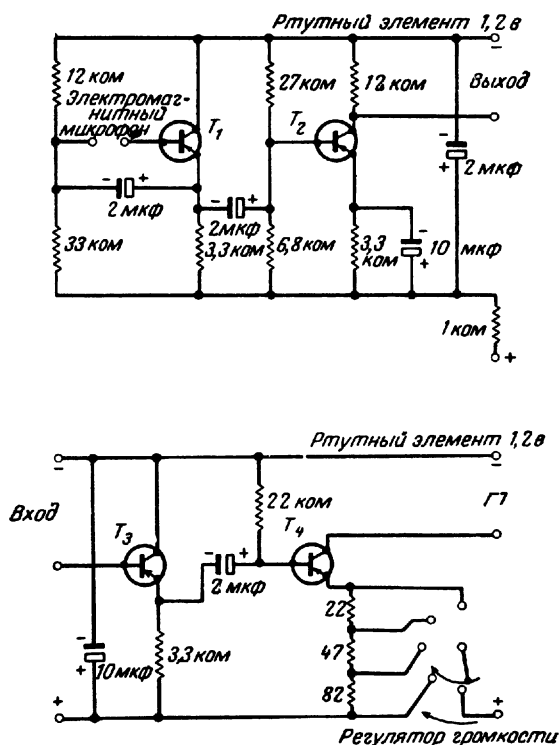
Фиг. 5. 12. Конструкция «очкового» слухового аппарата.

приспособление. Ножной педалью осуществляется управление циклом трафаретного печатания, который включает в себя следующие операции: продвижение платы под шелковой сеткой, прижатие ее к экрану в соответствующем положении, перемещение отжимного валика по экрану для наложения серебра и, наконец, перемещение платы для ее съема. Вся операция занимает несколько секунд, причем обеспечивается высокая производительность. После того как серебряная краска несколько подсохнет, плату снова подвергают такой же обработке для нанесения монтажа с другой стороны. Когда и эта сторона высыхает, серебро обжигается для получения монтажа, состоящего примерно на 99% из чистого серебра.

Печатные сопротивления наносятся поверх серебряного монтажа таким же трафаретным способом, причем для нанесения каждого сопротивления требуемой величины необходим один прогон. После то-

го как нанесены все сопротивления, летучий растворитель удаляется из краски выжиганием.

**Сборка.** После подключения (пайкой) внешних выводов к серебряному монтажу в специальные углубления, полученные при прессовании каждого блока, устанавливаются четыре транзистора.



Ф и г. 5. 13. Схема «очкового» слухового аппарата.

ГТ—головной телефон с сопротивлением 600 ом.

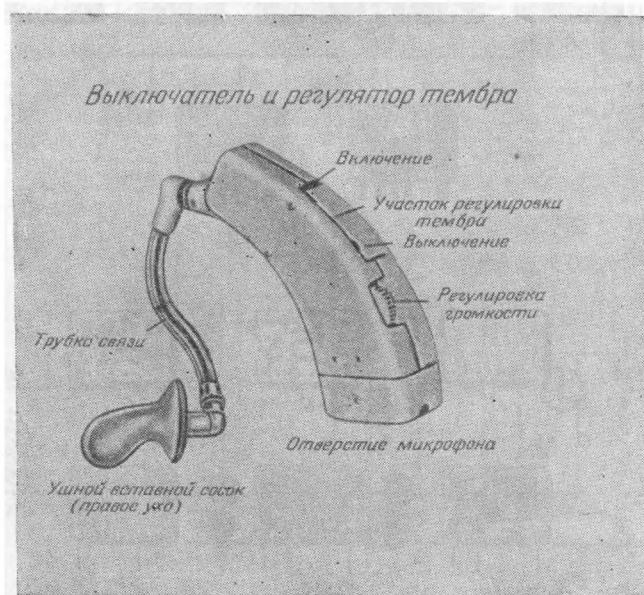
Затем на каждый транзистор надеваются луженый ободок и металлическая крышка, после чего транзисторные капсулы герметизируются пневматически управляемым паяльником в атмосфере сухого воздуха. Это делается в зажимном паяльном приспособлении, которое автоматически перемещает ряд стеатитовых блоков в следующее положение.

**Конденсаторы.** Керамические диски конденсаторов припаиваются над крышками четырех транзисторов. На эти диски в количестве 64 наносится серебряное покрытие во время процесса накатки.



Экранированные керамические диски перемещаются затем на большие керамические платы для обжига в печи.

**Контроль.** После того как запаиваются посеребренные диски конденсаторов, сборка усилителя завершена и блоки поступают на стенд проверки окончательных характеристик, где с помощью ряда



Фиг. 5. 14. Усилитель, помещаемый за ухом.

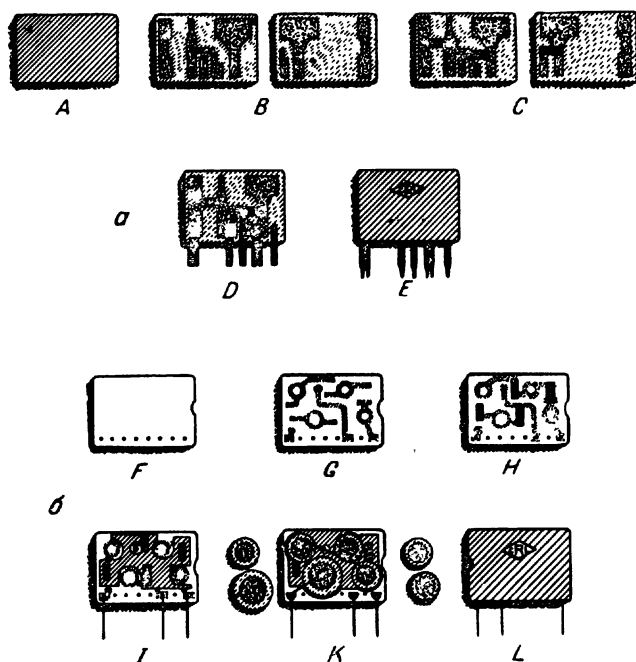
пластмассовых направляющих клиньев 7 зачищенных проволочных выводов усилителя подводятся к пружинным контактным зажимам испытательного стенда.

**Образование капсулы.** В последней операции по изготовлению транзисторного усилителя плата с печатным монтажом элементов закрепляется специальным держателем в подвешенном положении. Затем оператор небольшой деревянной лопаточкой наносит свежезамешанную эпоксидную смолу из бумажного стакана на каждый элемент.

После того как все 24 элемента покрыты смолой с одной стороны и смола затвердела, поддерживающая арматура удаляется, а для окончательной обработки изделия остается покрыть смолой другую его сторону.

Характеристики и схемы типовых 3- и 4-каскадных транзисторных компактных схем показаны на фиг. 5.16 и 5.17.

Наиболее интересным примером сверхминиатюрной конструкции является однокаскадный усилитель, помещенный в диск тол-



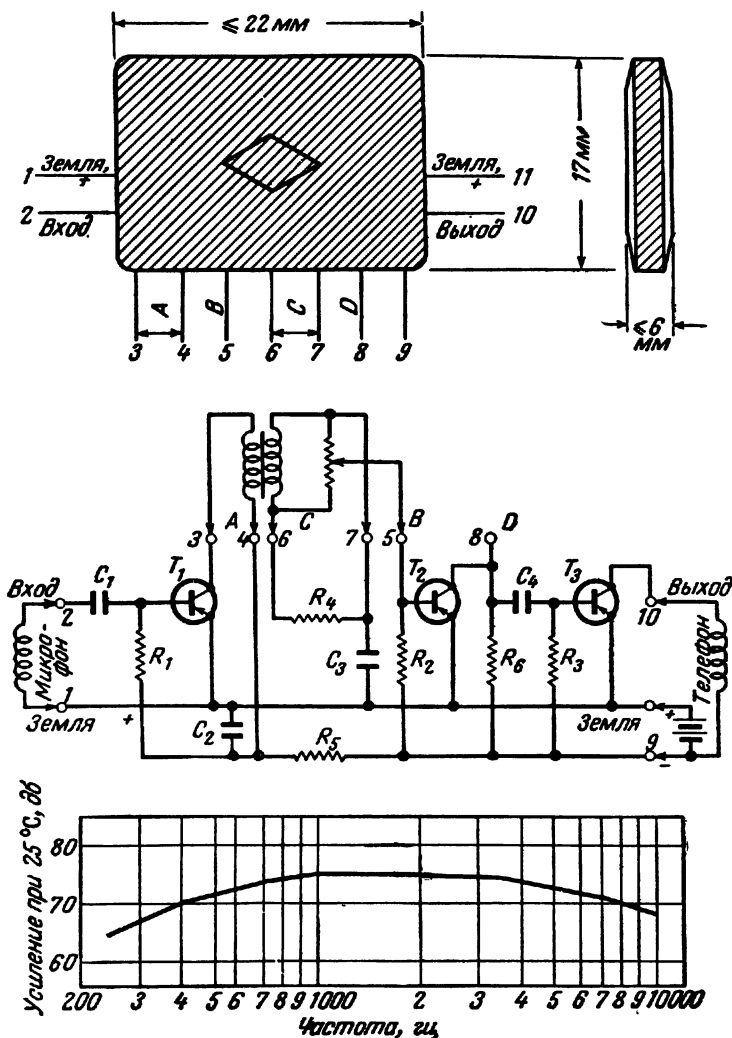
Фиг. 5. 15. Стадии производства компактного транзисторного усилителя.

*a* — диэлектрическая плата; *б* — стеатитовая плата.

*A* — диэлектрическая плата из титаната бария; *B* — посеребренные изображения на обеих сторонах, образующие конденсаторные пластины и схемный монтаж; *C* — сопротивления, соединяющие посеребренные поверхности, завершают электронную схему; *D* — выводы, впаянные на соответствующие места, обеспечивают электрические и механические соединения; *E* — законченный узел, готовый для установки; *F* — плата из стеатитовой керамики; *G* — серебрение монтажа и мест подключения емкостей; *H* — нанесение сопротивления на плату с монтажом; *I* — защитное покрытие; поверхности для пайки не покрываются; *K* — отдельные дисковые конденсаторы устанавливаются на место и припаиваются; *L* — законченный узел с условным номером и маркированными выводами.

щиной всего 6 мм. Характеристики этого усилителя приведены в табл. 5.1.

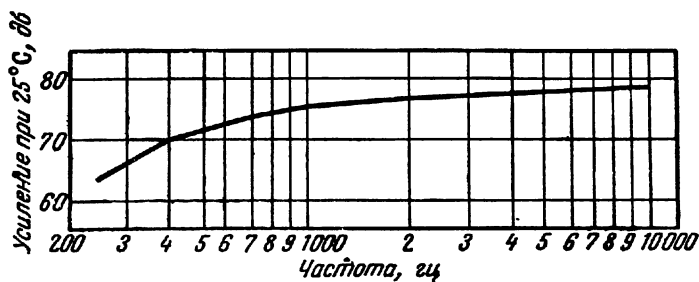
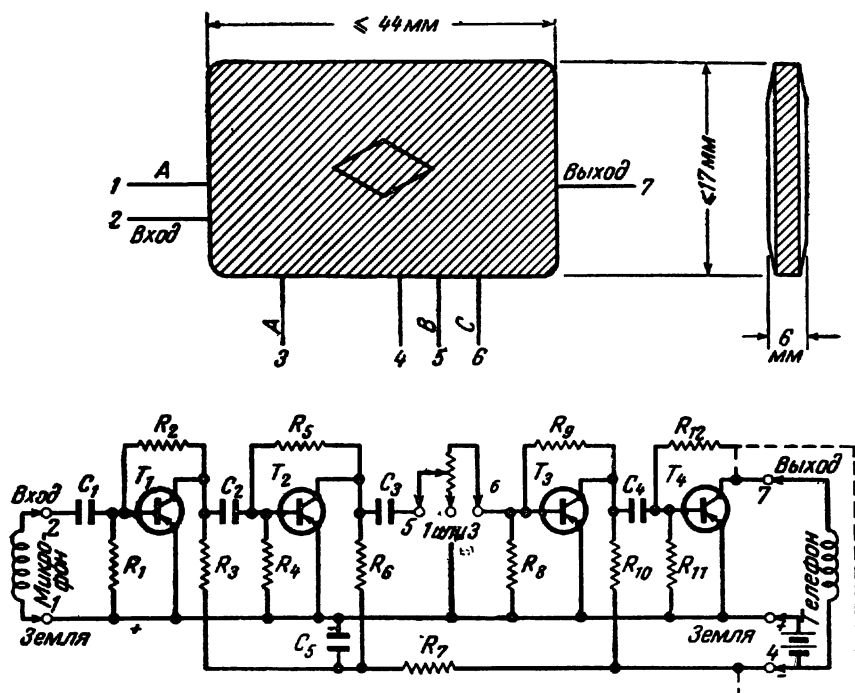
На фиг. 5.18 представлена частотная характеристика усилителя, а на фиг. 5.19 и 5.20 — общий вид этого блока сбоку и сверху. Усилители такой конструкции найдут широкое распространение



Фиг. 5. 16. Трехкаскадный усилитель ТА-10.

А—первичная обмотка; В—движок потенциометра; С—потенциометр и вторичная обмотка; D—контрольный вывод.

Усиление 75 дБ на 1 кГц. Входное сопротивление 1000 ом. Отношение сигнал/шум 39 дБ. Напряжение питания 1,345 в. Выходная мощность 1 мвт (макс.) при 10% нелинейных искажений; 0,36 мвт при 2% нелинейных искажений (измеренных на приемнике с входным сопротивлением 1000 ом). Потребляемый ток 4 ма. Частотная характеристика:  $\pm 5$  дБ в диапазоне 250—7000 гц.



Фиг. 5. 17. Четырехкаскадный усилитель ТА-11.

А—потенциометр, +напряжение питания, земля; В—движок потенциометра; С—потенциометр.

Усиление 75 db на 1 кГц. Входное сопротивление 1000 ом. Отношение сигнал/шум 38 db. Напряжение питания 1,345 в. Выходная мощность 1 мвт при 10% нелинейных искажений; 0,36 мвт при 2% нелинейных искажений. Потребляемый ток 4 ма. Частотные характеристики  $\pm 5$  db в диапазоне 250—7000 гц.

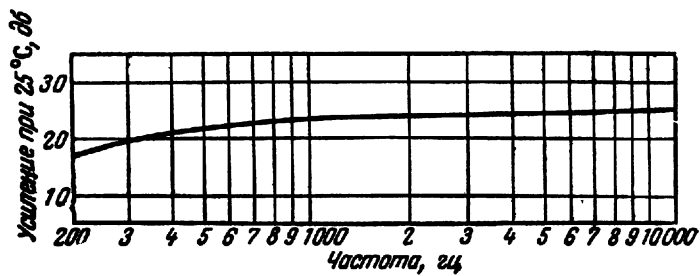
Таблица 5.1

Т и п	ТА-6	ТА-7
Усиление (миним.), <i>дб/1 кГц</i>	21	26
Входное сопротивление (но- мин.), <i>ом</i> . . . . .	1000	500
Уровень шума (максим.), <i>мв</i>	0,5	0,5
Напряжение питания (ртутный элемент), <i>в</i> . . . . .	1,3	1,3
Потребляемый ток, <i>ма</i> . . .	0,4—0,6	1,8—2,2
Частотная характеристика в диапазоне 250—20 000 <i>Гц</i> , <i>дб</i>	$\pm 2$	$\pm 5$
Полное сопротивление нагруз- ки, <i>ом</i> . . . . .	500—1500	1000 <i>ом</i> индуктивной на- грузки с активным со- противлением не более 250 <i>ом</i>
Выходная мощность, <i>ватт</i> . .	Достаточная для возбуждения ТА-7	1 <i>ватт</i> (не более) при 15%-ных искажениях и 0,36 <i>ватт</i> при 2%-ных искажениях.

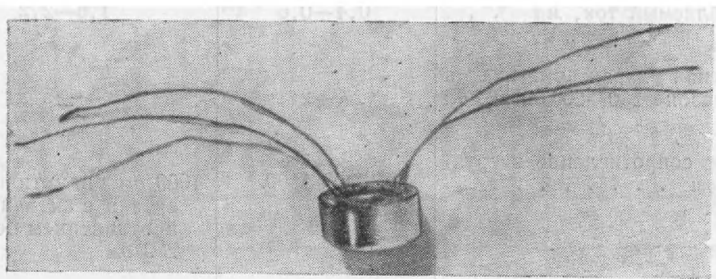
Примечание. Выводы—луженные полоски толщиной 0,13 мм, шириной 0,5 мм и длиной 6,5 мм.

Покрывание — сборка герметизирована фенольной смолой для защиты сопротивлений и конденсаторов от механических воздействий и влаги.

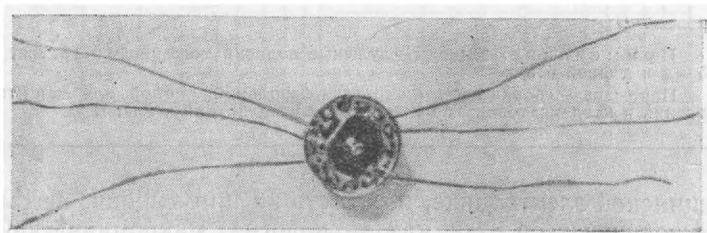
в медицинской электронике, и область их применения, несомненно, будет увеличиваться, так как технология микроминиатюризации (см. гл. 6—8) становится доступной. Типичный усилитель, показанный на фиг. 5.21, имеет размеры пилюли (диаметр 8 мм и длина 18 мм), которую легко проглотить. Внутри установлен чувствительный к температуре или давлению датчик, который модулирует частоту генератора, питаемого от батареи, позволяя исследовать желудочно-кишечный тракт пациента без применения трубок или



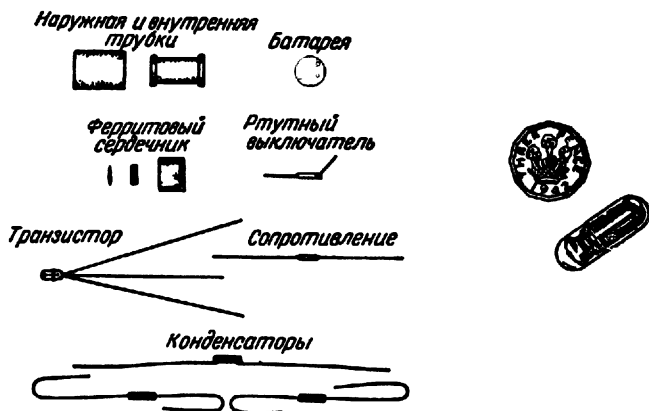
Ф и г. 5. 18. Характеристика сверхминиатюрного усилителя.



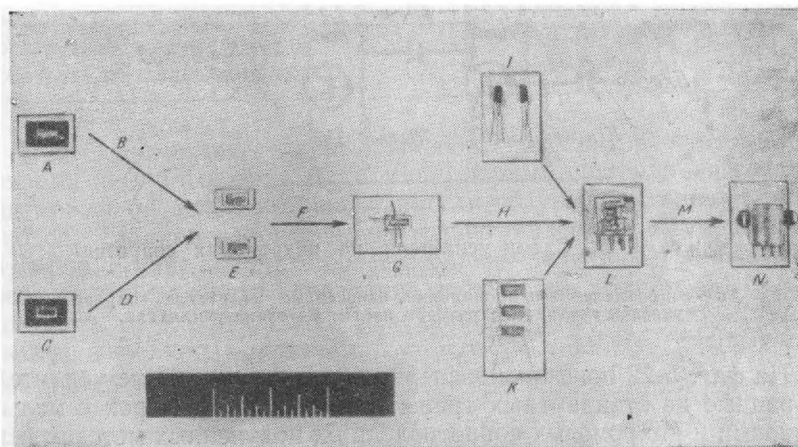
Ф и г. 5. 19. Вид блока усилителя сбоку.



Ф и г. 5. 20. Вид блока усилителя сверху.

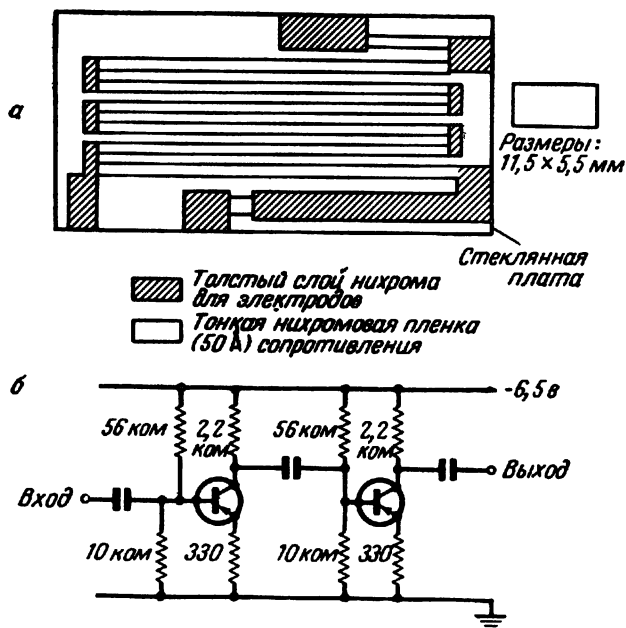


Фиг. 5. 21. «Пилюля» с радиопередатчиком.  
Демонстрировалась Медицинским исследовательским советом на выставке физического общества в 1960 г.



Фиг. 5. 22. Сверхминиатюрный двухкаскадный звуковой усилитель.  
А — изображение сопротивления на медной фольге, полученное фототравлением; В — испарение никрома (300 ом на квадрат); С — изображение проводника на медной фольге, полученное фототравлением; D — испарение никеля, затем серебра; E — блок сопротивлений для обеих усилительных схем; F — выводы, подсоединенные индиевым припоем; G — блок сопротивлений с подсоединенными выводами; H — сборка; I — транзисторы; K — тонкопленочные электроды из титаната бария, образующие керамические конденсаторы (0,1 мкф); L — собранная и залитая схема; M — включение в капсулу; N — окончательный капсулированный вариант; масштаб в дюймах.  
Усиление 25 дб в диапазоне 800 гц — 30 кГц; на частотах 200 гц и 80 кГц усиление на 3 дб ниже этого уровня.

проводов. Быстродействующий ртутный выключатель (термометр) срабатывает при изменении температуры, включая и выключая батарею.



Фиг. 5. 23. Схема усилителя на нихромовых сопротивлениях.

а — сопротивления и проводники, нанесенные на стекле, справа указаны габаритные размеры платы; б — схема усилителя.

На фиг. 5.22 показаны экспериментальные звуковые усилители, собранные на стандартных транзисторах, конденсаторах с малыми потерями и нихромовых сопротивлениях, полученных методом испарения. Схема и узел сопротивлений показаны на фиг. 5.23.

### ПЛОТНОСТЬ УПАКОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ

Принято сравнивать плотность упаковки элементов в виде числа элементов в  $1 \text{ м}^3$  оборудования. В предыдущем разделе (использование пространства в миниатюрном оборудовании) было показано, что этот критерий нельзя считать удовлетворительным, так как он не учитывает межблочных соединений и требований охлаждения. Тем не менее этот метод применяется для общего сравнения, но чтобы яснее показать преимущества метода микроминиатюризации, по-



видимому, целесообразнее сравнивать плотность упаковки в виде количества элементов в  $1 \text{ см}^3$ .

В табл. 5.2 дана сравнительная оценка плотностей упаковки элементов в  $1 \text{ м}^3$  и  $1 \text{ см}^3$ . Эта таблица может служить наглядной иллюстрацией к следующим трем главам, где описывается три метода микроминиатюризации.

Таблица 5.2

## Плотность упаковки оборудования

Тип конструкции	Элементы в $1 \text{ м}^3$	Элементы в $1 \text{ см}^3$ (примерно)
Нормальная ламповая конструкция . . .	$(35-180)10^3$	0,06
Миниатюрная ламповая конструкция . .	$(100-350)10^3$	0,25
Сверхминиатюрная ламповая конструкция	$(350-500)10^3$	0,4
Нормальная транзисторная конструкция .	$(1,0-1,5)10^6$	1,2
Транзистор со сверхминиатюрными элементами . . . . .	$(1,8-2,1)10^6$	2
Микромодульная конструкция . . . . .	$(18-21)10^6$	20
Конструкция с микросхемами . . . . .	$(50-100)10^6$	100
Конструкция с твердыми схемами . . . .	$(1000-1800)10^6$	1200

Приведенные выше данные являются идеализированными, так как они не учитывают в микроминиатюрных системах ни соединений между блоками, ни необходимости обдува и установки теплоотводов. Таблица демонстрирует только тенденцию к уменьшению размеров. Чтобы получить более реальные величины упаковки всей системы, приведенные значения плотностей, вероятно, следует разделить на коэффициент, находящийся где-то между 2 и 10. Анализ возможной достигнутой плотности упаковки твердых схем был проведен в работах [51, 61].

## Глава 6

### МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИЯ: МИКРОСХЕМЫ ИЛИ ПЛОСКИЕ КОНСТРУКЦИИ

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Рассмотрим основные положения, лежащие в основе микроминиатюризации. Доброкачественное сопротивление может состоять из тонкого слоя резистивного материала на керамике или стекле. Два примера сопротивлений показаны на фиг. 6.1; большая часть объема сопротивления занята корпусом, который может в 500 раз превышать объем рабочего элемента. Аналогично объем рабочего элемента кон-



Ф и г. 6. 1. Сравнение рабочего и общего объемов стандартных элементов.  
а—герметизированное сопротивление 2-го класса.

Объем рабочего элемента ~ 0,004 см<sup>3</sup>, общий объем 1,5 см<sup>3</sup>.

$$\frac{\text{Рабочий объем}}{\text{Общий объем}} \approx \frac{1}{360}.$$

б—негерметизированное сопротивление 1-го класса.

А—покрытие из силиконового лака; Б—колпачок (тугая посадка); В—спиральная бороздка; Г—конец с графитовым покрытием.

Объем рабочего элемента ~ 0,0008 см<sup>3</sup>, общий объем 0,45 см<sup>3</sup>.

$$\frac{\text{Рабочий объем}}{\text{Общий объем}} \approx \frac{1}{550}.$$

в—керамический конденсатор.

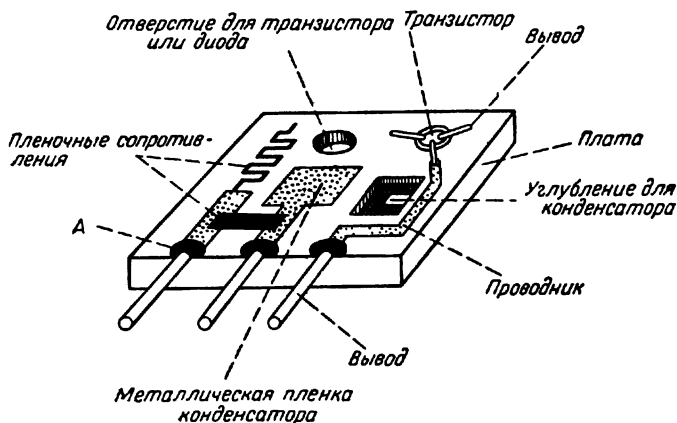
Объем рабочего элемента ~ 0,05 см<sup>3</sup>, общий объем 10 см<sup>3</sup>.

$$\frac{\text{Рабочий объем}}{\text{Общий объем}} \approx \frac{1}{200}.$$

денсатора в несколько сот раз меньше корпуса, в который он заключен. Транзистор очень мал по сравнению с электронной лампой, но и в этом случае большая часть его объема занята корпусом, а полупроводниковый рабочий элемент составляет лишь не-

большую часть. Например, объем рабочего элемента низковольтного транзистора равен  $\sim 10 \text{ мм}^3$  и даже меньше. Все изложенное выше справедливо и для полупроводниковых диодов, так как в них рабочий элемент также гораздо меньше корпуса.

Таким образом, одним из путей уменьшения размеров электронных узлов является освобождение от корпусов отдельных элементов. Однако это не простая процедура, потому что корпуса служат двум



Ф и г. 6. 2. Схематический чертеж для иллюстрации некоторых элементов микросхемы.

А — крепление из проводящего материала.

целям: во-первых, они поддерживают рабочую часть детали, а, во-вторых, предохраняют рабочую часть от повреждения и вредного воздействия окружающей среды. Поставленная задача решалась тремя различными способами, которые положили начало трем путям микроминиатюризации в виде микросхем, или плоских конструкций, микромодулей и твердых схем, или объемных конструкций. Настоящая глава посвящена проблемам, связанным с микросхемами, и результатам, достигнутым в сравнительно короткое время после их введения. По существу, микросхема — это плоская изоляционная пластина, или плата, на которую нанесены (или помещены в углубления) рабочие элементы сопротивлений, конденсаторов, диодов и транзисторов, причем эти элементы могут быть сделаны или нанесены различными способами (фиг. 6.2). В плате имеются отверстия для размещения транзисторов и диодов. На эскизе одно из отверстий показано пустым, а в другое вставлен транзистор. На плате видно также углубление для отдельно изготавливаемого конденсатора. Проводниками являются проводящие дорожки (с малым

сопротивлением), заменяющие проводники обычных схем. Сопротивления могут быть сделаны из различных материалов и различными способами, например в виде геометрических форм, показанных на фиг. 6.2. В качестве емкостей используются или готовые конденсаторы, вставляемые в углубления в плате, или конденсаторы, выполненные непосредственно на плате, являющейся в этом случае диэлектриком. Обкладками конденсатора при этом служат проводящие пленки на каждой стороне платы, сделанные, например, вакуумным распылением. Когда все составные части нанесены на плату или расположены внутри нее, отдельные элементы соответствующим образом соединяются и сборка герметизируется.

Каждую входящую в схему деталь можно изготавливать различными способами. В настоящей главе описано несколько методов и процессов, которые можно использовать для производства различных частей микросхем.

### ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ (основы технологии)

До описания материалов и процессов, применяемых в производстве активных и пассивных элементов микросхем, полезно дать краткий обзор различных методов изготовления и обработки применяемых материалов.

#### Механическая обработка

1. *Прессование.* Керамические материалы для плат, в которых используются порошковые компоненты, прессуются под давлением в различные формы. Спрессованная керамика затем нагревается до высокой температуры для получения готовых плат. Использование прессования особенно желательно, когда требуется получить большое количество одинаковых плат.

2. *Резка.* Твердые хрупкие материалы, как керамика, стекло и полупроводники, можно распиливать специальными дисками. Материал требуемой толщины помещают на движущуюся платформу и пропускают под вращающимся диском. Иногда применяются диски в виде кольца, причем режущей является внутренняя кромка. Другим способом резки является использование движущейся проволоки. Вольфрамовая или молибдено-вольфрамовая проволока специальным механизмом наматывается на два барабана сначала в одном, а затем в другом направлении. Материал прижимается к натянутой проволоке, и к месту резания подается масляная смазка и карборундовый порошок. Этот метод дает меньшую скорость резания, чем с вращающимися дисками, однако при этом возможна очень высокая точность резания, так как диаметр используемой проволоки может быть всего 0,1 мм.

3. *Нанесение ризок и ломка.* Тонкие керамические, стеклянные или полупроводниковые пластинки могут быть разделены на квадраты или прямоугольники методом нанесения ризок с последующей ломкой. Пластинки наклеиваются на липкую ленту и помещаются на линовальный станок. Иглой с алмазным наконечником на поверхности материала наносятся тонкие линии. Затем лента протягивается по острой кромке (например, край стола) и материал ломается точно по прочерченным линиям. После этого для отделения полученных пластинок лента отмачивается в растворителе.

4. *Ультразвуковое резание.* Твердые хрупкие материалы можно разделить на пластины требуемой формы обработкой ультразвуком. Магнитострикционный преобразователь на ультразвуковой частоте возбуждает колебания резца из мягкого металла в смазке, содержащей абразивы. Действие резца и абразивов заключается в том, чтобы вызвать микротрещины в твердом материале. Этот метод позволяет получать детали сложной формы при использовании недорогих резцов; применяя достаточную мощность, можно делать глубокие разрезы за несколько секунд.

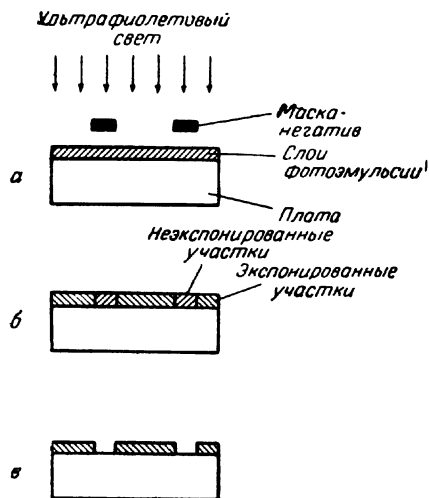
5. *Обработка абразивами или песком в воздушной струе.* При воздушной обработке твердые абразивные материалы, как, например, порошкообразная окись алюминия или мелкие карборундовые частицы, направляются под большим давлением воздушной струей на плату, при этом плата выкрашивается. Этот метод позволяет делать отверстия сложной формы в очень хрупких материалах. Избирательность обработки достигается нанесением маски из упругого материала, например пластмассовой пленки. Абразивные частицы отскакивают от пленки, и обрабатывается только поверхность платы под отверстиями в пленке. Для масок могут быть использованы и другие материалы, если они не будут изнашиваться до окончания обработки материала платы.

### Использование фотослоя

Фотозащитный слой состоит из органической непроводящей фоточувствительной эмульсии и в течение многих лет применяется для производства плат с печатным монтажом. Он играет важную роль в процессе изготовления микросхем, в котором он действует как маска, непосредственно нанесенная на плату.

Стадии использования фотозащитного слоя показаны на фиг. 6.3. Плата сначала тщательно обезжиривается соответствующим растворителем и затем покрывается фотоземлемой обычной способом (например, шоопирование, разбрызгивание пульверизатором или нанесение кистью). Защитному слою дают высохнуть и затем экспонируют его в ультрафиолетовых лучах через маску, являющуюся негативным изображением монтажа платы (фиг. 6.3, а), в результате

чего получают экспонированные и неэкспонированные участки (фиг. 6.3, б). Фотослой затем обрабатывается в органическом растворителе, например в трихлорэтилене, до тех пор, пока не растворятся



Фиг. 6.3. Стадии использования фотозащитного слоя.

а — экспонирование; б — после экспонирования; в — после обработки.

а также зажимы и фиксаторы, обеспечивающие надежное закрепление.

неэкспонированные участки (фиг. 6.3, в). Поверхность платы остается покрытой пленкой в необходимых местах и готова для нанесения монтажа вакуумным распылением, печатанием, электро- или химическим осаждением. В конце любого из этих процессов защитный фотослой можно при необходимости удалить с платы метиленхлоридом.

Оборудование, которое используется для этого процесса, подобно применяемому при контактной печати. Это большой, тщательно выполненный негатив, уменьшенный при фотографировании до требуемых размеров, вакуумный станок, необходимый для обеспечения тесного контакта между негативом и поверхностью платы, обеспечивающие надежное за-

## Процессы осаждения

1. *Вакуумное распыление.* Осаждение тонкой пленки в вакууме — это хорошо известный процесс, при котором материал нагревается в вакууме до тех пор, пока не начнет испаряться. Пары материала расходятся от источника во всех направлениях по прямым линиям и осаждаются на ближайшей холодной поверхности. Если требуется нанести материал на определенных участках, плата покрывается маской и пары материала осаждаются через отверстия в маске. Для получения четкого изображения испарение должно происходить в высоком вакууме, потому что испаренные атомы смогут двигаться по прямым линиям, если только они не будут отклоняться на своем пути другими атомами или молекулами. Более того, чем выше вакуум, тем меньше вероятность того, что осажденная пленка будет окислена. Достаточный вакуум получается при давлении не более  $10^{-5}$  мм рт. ст.

Другие методы осаждения тонкой пленки в вакууме включают в себя процесс разбрызгивания и электронной бомбардировки. Подробности этих процессов даны в учебниках по вакуумному осаждению (например, [109]).

2. *Электроосаждение.* Это хорошо известный гальванический процесс, используемый для нанесения материала на электропроводящие платы. Плата, покрытая соответствующей маской, является катодом, а металл, который нужно нанести, — анодом. Они погружаются в кислоту или щелочь, и через гальваническую ванну пропускается ток. Маска на плате должна служить защитой против химического действия электролита.

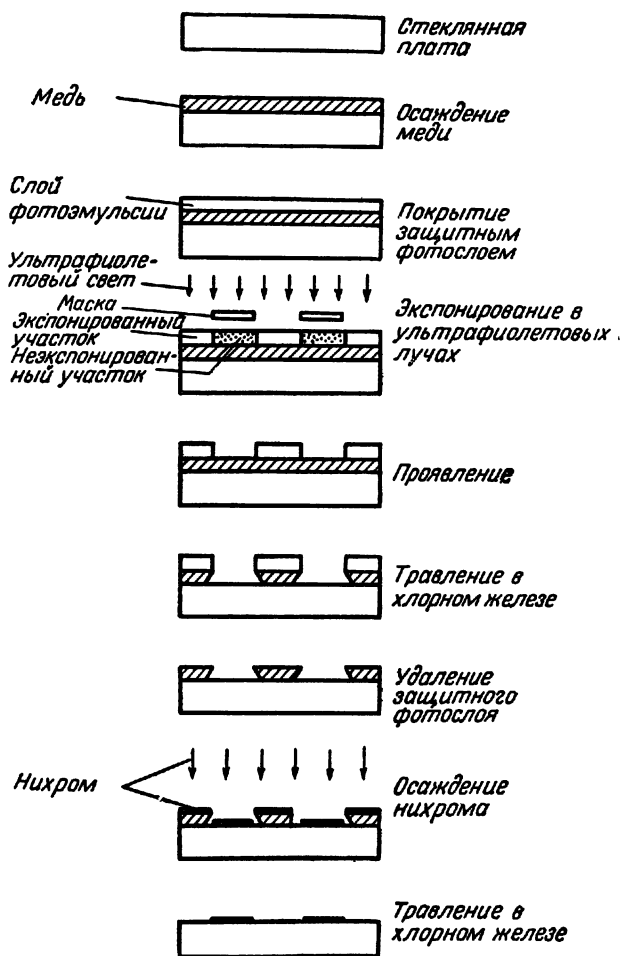
3. *Химическое осаждение.* Возможно осаждать металл на проводящую или изоляционную плату прямо из раствора, без использования электрического тока. Процесс является чисто химическим, и реакции, которые при этом имеют место, довольно сложны. Так, золото из чистого раствора может быть химически осаждено путем замещения другим металлом. Никель может быть осажден также прямо из соответствующего раствора, доведенного до определенной температуры.

4. *Трафаретная печать.* Трафаретная печать или сеточно-графический метод — это процесс, обычно применяемый для того, чтобы наносить красками различные геометрические изображения на платы. Процесс состоит из следующих основных стадий: 1) готовится сеточный трафарет таким образом, чтобы его участки, через которые должна наноситься краска, оставались открытыми, в то время как остальная часть оказалась покрытой маской; 2) плата располагается точно под маской; 3) отжимным валиком через трафарет наносится краска, при этом незащищенные трафаретом участки платы покрываются краской.

Первоначально экраны делались из шелка, в настоящее время их обычно делают из тонких проволочных сеток. Один из методов, используемых при изготовлении микросхем, состоит из следующих операций: 1) готовят фотопозитив требуемого изображения, 2) с этого позитива изображение контактным способом экспонируют на фотопленку, 3) пленку промывают в воде для удаления неэкспонированных участков, 4) пленка и ее пластиковая подложка переносятся на сетку из нержавеющей стали и 5) пластиковая подложка удаляется.

Сеточно-графический метод можно использовать для изготовления проводников, сопротивлений, защитных покрытий и индуктивностей на платах для микросхем.

5. *Изготовление масок.* Маска надлежащей формы используется при нанесении вакуумным распылением пленки на определенные участки микросхемы. Маски делаются из медной фольги фотомеханическим способом. Увеличенное точное изображение маски вычер-



Фиг. 6. 4. Стадии изготовления маски, необходимой для получения четкого изображения из никрома и других материалов.



чивается на ватмане и уменьшается с помощью фотографирования до нужных размеров. Медная фольга покрывается фотозащитным слоем и экспонируется в ультрафиолетовых лучах через негатив изображения. После экспонирования соответствующих участков фотозащитного слоя он сушится и проявляется. Далее следует промывка в хлорном железе до полного вытравления экспонированных участков фольги. Необходимо тщательно отрегулировать продолжительность травления, чтобы предотвратить зазубривание фотослоя, которое придало бы маске неточные размеры.

Более точным методом является использование промежуточной органической маски на плате. Этот метод особенно пригоден для производства никелево-хромовых сопротивлений весьма точных размеров. Стадии этого процесса показаны на фиг. 6.4. Стеклопластиковая пластинка очищается и покрывается слоем меди толщиной около 2000 Å. Для скрепления меди со стеклом необходим промежуточный слой хрома толщиной около 5 Å, причем важно, чтобы этот слой был очень тонким и непроводящим, так как в противном случае он шунтировал бы полученные нихромовые сопротивления. Плата покрывается фотозащитным слоем и высушивается. Затем с помощью вакуумного станка фотографический негатив прижимается к фотозащитному слою, который экспонируется в ультрафиолетовых лучах. Затем фотослой проявляется и плата травится хлорным железом для удаления меди с неэкспонированных участков. Этот процесс при отрегулированном времени травления сопровождается лишь незначительным зазубриванием меди. Остающийся фотозащитный слой удаляется, например, в горячем четыреххлористом углероде, после чего на поверхность платы распыляется нихром. Плата снова травится хлорным железом, который выборочно удаляет оставшуюся медную пленку с ее нихромовым покрытием и оставляет требуемое нихромовое изображение на стеклянной поверхности. Выборочное травление возможно, потому что нихромовая пленка (50 Å) очень тонка по сравнению с медной пленкой, что дает возможность вытравливать медь с обеих сторон из-под нихромовой пленки, которая затем осторожно удаляется. В результате этот процесс дает медную маску, имеющую тесный контакт с поверхностью. При этом возможна потеря в размерах полученного изображения всего несколько микрон.

### МАТЕРИАЛЫ ПЛАТ

Перед началом разработки микросхемы очень важно решить, какой материал применить для платы. Можно использовать 3 вида материалов:

- а) неорганические материалы (керамика, стекло и т. п.);
- б) пластмассы (фторопласт и т. п.);

в) полупроводниковые материалы (германий, кремний и т. п.).

Керамика является, по-видимому, самым подходящим материалом, так как позволяет наносить на нее серебро или другие необходимые компоненты химическим осаждением, осаждением в вакууме или вжиганием. При выборе соответствующего материала с высокой диэлектрической постоянной можно получать конденсаторы с большой емкостью, металлизирова обе стороны платы. Стекло преимущественно применяется, когда требуется гладкая поверхность.

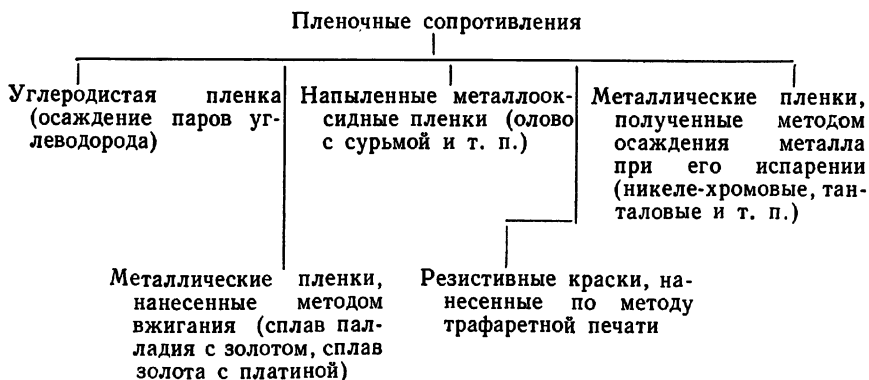
Пластики, имеющие превосходные электрические характеристики, все же не являются достаточно хорошими материалами для плат, так как свойственная им низкая теплоустойчивость ограничивает их применение в процессе с использованием вжигания; к тому же большая упругость их паров и содержащиеся в порах газы создают трудности при использовании их в вакуумных системах.

Использование полупроводниковых пластин в качестве материала платы обладает определенными преимуществами, так как такие элементы схемы, как, например, транзисторы, диоды и некоторые сопротивления, могут составлять непосредственно часть самой платы.

Недостаток использования полупроводника в качестве материала плат для микросхем заключается в том, что до печатания деталей на поверхность платы приходится наносить изолирующую пленку, что может послужить причиной электрического пробоя.

### РЕЗИСТИВНЫЕ ПЛЕНКИ

Сопротивления для микросхем делаются в виде пленок, нанесенных на поверхность платы одним из следующих способов:



а. *Углеродистая пленка.* Процесс образования угольной пленки состоит в осаждении паров углеводорода на керамическую плату при температуре около  $900 - 1100^{\circ} \text{C}$ . Углеводород диссоциируется, и

получается угольная пленка, связанная с платой. Величина сопротивления регулируется давлением паров, температурой нагрева и временем экспозиции. Увеличение сопротивления и окончательная подгонка производятся алмазным кругом, прорезающим изолирующие дорожки в покрытии.

Хотя в принципе технология изготовления разрезной углеродистой пленки возможна, она для микросхем неудобна.

*б. Металлические пленки, нанесенные методом вжигания.* Пленки благородных металлов, таких, как сплав золота с платиной, нанесенные на стекло или глазурованную керамическую плату методом вжигания, чрезвычайно стабильны. От пропорции, в которой смешиваются металлы, зависят удельное сопротивление и температурный коэффициент.

Сплав 80 % золота и 20 % платины дает удельное сопротивление 60  $\text{мком/см}$  и имеет температурный коэффициент 0,025 %, в то время как сплав 60 % золота и 40 % платины дает температурный коэффициент 0,06 %. При изготовлении сопротивления сначала покрывают плату из химически чистого стекла компаундом из золота и платины, смешанным с эфирным маслом (например, розмариновым или лавандовым), и затем нагревают в воздушной среде при температуре около 400° С. При этом происходит восстановление чистых металлов из смеси с маслами, но в таком виде металлы не пристаю́т к стеклу и их можно частично удалить острым резцом для увеличения сопротивления и подгонки его до нужной величины. Затем плата нагревается снова до температуры 600 или 700° С (в зависимости от типа платы), в результате чего получается пленка металла, чрезвычайно прочно сцепленная с платой.

Изменение величины сопротивления между этими двумя нагревами ничтожно, и им можно пренебречь.

Интересный метод подгонки металлических сопротивлений был предложен в работе [132]. Принцип его состоит в осаждении довольно толстой пленки металла, которая впоследствии анодируется. Наиболее подходящими материалами в этом случае являются тантал, ниобий и титан. После осаждения пленки ее сопротивление можно увеличить анодированием поверхности с целью получения окисной пленки, которая может быть или изолятором, или полупроводником. Так как толщина окисной пленки прямо пропорциональна напряжению анодирования, этот метод позволяет управлять толщиной остающегося чистого металла с высокой степенью точности.

*в. Пленки окиси металлов, нанесенные разбрызгиванием.* Пленки окиси металлов употребляются в течение нескольких лет и хорошо известны в Америке. Наиболее распространены комбинации олова и сурьмы. Хлориды этих металлов разбрызгиваются на стеклянную или керамическую поверхность, нагретую до красного каления. В результате происходящей реакции получается подобный стеклу

слой оксида, который можно варьировать по толщине от нескольких сотен до многих тысяч ангстрем. Электрическое сопротивление пленки изменяется в широких пределах в зависимости от состава разбрызгиваемого раствора.

Из оловяно-сурьмяных сплавов наиболее подходящая оксидная пленка для стабильных сопротивлений получается при 7% сурьмы и 93% олова; это соединение имеет наименьший температурный коэффициент.

В процессе производства многие факторы влияют на пленку, например температура нагрева и т. п. С другой стороны, пленки сами по себе чрезвычайно стабильны; продолжительные термотренировочные испытания показали, что после работы в течение нескольких тысяч часов можно получить стабильность порядка 0,1—0,2%.

г. *Металлические пленки, нанесенные вакуумным распылением.* Более значительные удельные сопротивления, чем у вжигаемых металлических пленок, получены с помощью сплава никеля с хромом (нихром). Тонкие пленки этого материала хорошо использовать в качестве сопротивлений на платах микросхем [108]. Характерные

Таблица 6.1

Толщина, Å	Сопротивление квадрата, ом
50	300
80	210
90	180

свойства сплава, используемого для сопротивлений, осажденных на стеклянной плате, даны в табл. 6.1. Методом вакуумного напыления нихром осаждается на стеклянную плату, нагретую примерно до 350° С в вакууме не менее 10<sup>-4</sup> мм рт. ст. Наиболее подходящим источником является вольфрамовая коническая спираль, покрытая глиноземной пастой, содержащей воду. Паста

нагревается до 1750° С в вакууме, и вода испаряется. Такие источники могут использоваться до 10 раз.

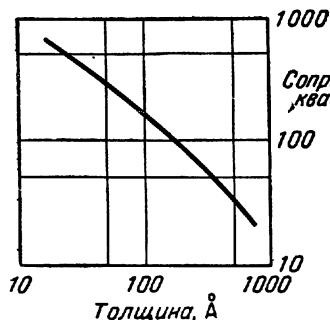
Когда вместо стекла используется в качестве платы керамика, сопротивление пленки при равной толщине получается примерно в 4 раза выше. Это объясняется относительно большей шероховатостью керамики по сравнению со стеклом. На фиг. 6.5 показано изменение сопротивления пленки от толщины при использовании стеклянной платы.

Как правило, чем выше температура источника, тем выше процентное содержание никеля в сплаве. При температуре 1600° С получается сплав с 80% никеля и 20% хрома, близкий по составу к первоначальному (испаряемому) сплаву.

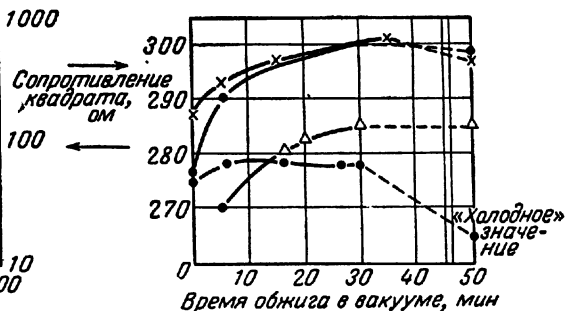
Очень важно нагревать плату во время осаждения, иначе возможно получение неустойчивых пленок. Стеклянные платы нагреваются до температуры 350° С. Минимальной толщиной пленки является толщина 50 Å, когда нужно получить стабильное сопротивление квадрата со значением порядка 300 ом. Практически удовлетвори-

тельным является значение 250—300 ом. Пленка с сопротивлением квадрата 300 ом позволяет получить сопротивление 30 000 ом при 25 мм длины и 0,025 мм ширины.

Чтобы управлять толщиной пленки во время осаждения, нужно применять контролирующее устройство. Оно состоит из стеклянной пластинки с металлическими электродами, между которыми во время работы осаждается сплав. Постоянный контроль сопротивления при помощи измерительного мостика позволяет остановить осаждение,



Фиг. 6. 5. Зависимость сопротивления пленки от толщины.



Фиг. 6. 6. Зависимость стабильности сопротивления от обжига.

когда будет достигнуто требуемое значение сопротивления, при этом необходимо сделать определенный припуск на изменение сопротивления, получаемое при окончательной температурной обработке.

Для стабилизации параметров осажденная пленка нихрома должна подвергнуться температурной обработке. Это можно сделать в вакуумном испарителе или в отдельной печи. На фиг. 6.6 показано различие в сопротивлениях для четырех образцов в зависимости от времени обжига. Как правило, сопротивление повышается с увеличением времени обжига и после удаления из печи падает до «холодного» значения. Из этих примеров ясно, что окончательное значение сопротивления предсказать трудно.

Благодаря хорошему температурному коэффициенту сопротивления из нихромовых пленок применяются в микроминиатюрных узлах, где требуется высокая стабильность. Однако полученные сопротивления не являются вполне удовлетворительными, так как, чтобы сделать сверхминиатюрный узел, требуется сопротивление шириной не более 0,025 мм. Это практически достижимо, но требует скрупулезной точности во время процесса изготовления и связано с большой вероятностью случаев брака. Сопротивление нихрома слишком мало для изготовления высокоомных сопротивлений

( $>500$  ком) при сравнительно малой площади для применения в микросхемах.

Для этих целей может подойти сплав 20% хрома, 3% железа, 3% алюминия и 74% никеля. Первые эксперименты осаждения этого сплава при  $t = 1650^\circ \text{C}$  на холодную стеклянную пластину дали пленки с сопротивлением квадрата в 400 ом. Пленки имеют хорошую адгезию и высокую стабильность. Исследование этого материала продолжается, но в то же время ведутся поиски сплавов с гораздо большим сопротивлением.

д. *Распыленные танталовые пленки.* С помощью электронной дифракции было обнаружено, что тонкие распыленные пленки тантала имеют мелкую кристаллическую структуру. Поэтому сопротивление распыленной танталовой пленки в несколько раз больше сопротивления такой же пленки из сплошного тантала. Кроме того, недостатки в кристаллической структуре дают температурный коэффициент порядка  $0,01\%/^\circ \text{C}$  по сравнению с  $0,3\%/^\circ \text{C}$  для чистого кристаллического тантала.

Танталовые пленки реагируют с кислородом, и на их поверхности образуются тонкие слои окислов, в результате чего сопротивление пленок растет. Поэтому желательно стабилизировать пленки предварительной термической обработкой в воздухе. Сопротивления, сделанные распылением из тантала и прошедшие температурную обработку, довольно стабильны. Испытания дали среднее значение изменения сопротивления примерно 0,2% после 800 часов выдержки при  $100^\circ \text{C}$ .

е. *Резистивные краски.* Для обычных микросхем требуются краски, которые обладали бы сопротивлением квадрата, равным 10 000 ом. Они состоят из 100 вес. ч. жидкой эпоксидной смолы, 7 вес. ч. соединения  $\text{BF}_3\text{P}$  и 15 вес. ч. газовой сажи. Растворители не применяются при образовании красок из-за испарения летучего растворителя и вытекающей отсюда необходимости управлять оставшимся количеством растворителя в краске для получения большей воспроизводимости сопротивлений.

Так как  $\text{BF}_3\text{P}$  — связанное вещество, оно очень медленно реагирует с эпоксидной смолой при температуре ниже определенного критического значения, равного  $150^\circ \text{C}$ . Поэтому однажды приготовленная краска сохраняется и годна к употреблению при комнатной температуре в течение нескольких месяцев. Сопротивления выдерживаются 30 мин при  $t = 225^\circ \text{C}$ .

Некоторые свойства печатных сопротивлений в диапазоне 10—100 ком даны в табл. 6.2 [110].

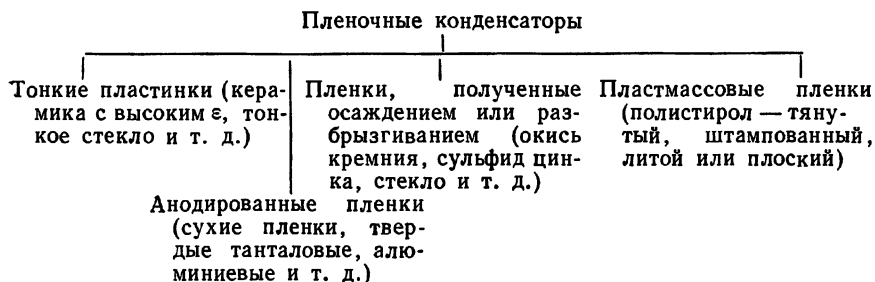
Если величина сопротивления меньше своего номинального значения, его можно увеличить шлифовкой, а сопротивления, превышающие номинальное значение, уменьшить воздействием горячего воздуха.

Таблица 6.2

Зависимость от температуры	$\pm 5\%$ — среднее изменение сопротивления от значения сопротивления при $t = 25^\circ \text{C}$ при изменении температуры от $-55$ до $+85^\circ \text{C}$
Коэффициент напряжения	$0,0035\%/\text{в}$
Температурная цикличность, 0,5 цикла между $-55^\circ$ и $+85^\circ \text{C}$	$-0,3\%$ — среднее изменение сопротивления от первоначального значения

### КОНДЕНСАТОРЫ

В то время как сопротивления сравнительно легко осаждают в виде металлических пленок на отдельных элементах микроминиатюрных конструкций, для конденсаторов дело обстоит сложнее. Так, если плата не является составной частью конденсатора (его диэлектриком), емкости часто выполняются в виде самостоятельных, предварительно испытанных элементов, соответствующим образом прикрепленных к плате. Конденсаторы, предназначенные для использования в микроминиатюрных схемах, должны быть тонкопленочные или плоские. Различные способы их производства указаны ниже:



а. *Тонкие пластинки.* Диэлектрики для конденсаторов можно сделать в виде пластинок или пленок толщиной  $6,5 \text{ мк}$  (стекло) или от  $25 \text{ мк}$  до  $0,25 \text{ мм}$  (керамика). Для получения очень больших значений емкостей тонкие пластинки с высокой диэлектрической постоянной изготавливаются путем прокатки или осаждением в вакууме.

Например, для титаната бария можно ожидать, что  $\epsilon$  будет равно не менее 1000. Таким образом, при плате толщиной  $25 \text{ мк}$  можно получить конденсатор емкостью  $0,025 \text{ мкф}$  на площади приблизительно  $1 \text{ см}^2$ . Необходимо позаботиться о том, чтобы ферроэлект-

рические свойства и низкая точка Кюри материала не вредили его работе в качестве конденсатора; при использовании последнего в транзисторных схемах с присущими им низкими рабочими температурами низкая точка Кюри не вызывает опасений.

Керамические конденсаторы с высокой диэлектрической постоянной  $\epsilon$  изготавливаются из смеси порошкообразного титаната, следов присадки, смолистого связующего вещества и растворителя. Из этой смеси делается пленка толщиной 0,6 мм, которая затем высушивается до 0,3 мм. Листы этой пленки, разрезанные на квадраты со стороной 11 мм, обжигаются в три приема. При первом обжиге образуется материал в виде твердой керамики. Второй обжиг в сухом водороде восстанавливает титанат бария и делает его проводящим. Третий, непродолжительный обжиг в воздухе снова окисляет восстановленный титанат бария. В результате на каждой стороне квадратной керамической пленки получается тонкая поверхностная пленка титаната бария, образующая диэлектрик конденсатора.

Во время третьего обжига происходит также процесс формирования серебряных электродов, которые были раньше нанесены на керамику. Эти посеребренные слои являются электродами конденсатора.

б. *Высушенные анодированные пленки.* Фольга из алюминия высокой чистоты анодируется в электролитической ванне, как для обычного электролитического конденсатора. Затем она высушивается, и одновременно наносится разведенный раствор эпоксидной смолы, чтобы заполнить трещины и изолировать пленку. Получаемая диэлектрическая пленка состоит из 80 % окиси алюминия и 20 % эпоксидной смолы.

в. *Пленки из окиси тантала.* Опытные конденсаторы изготавливались путем получения оксидной пленки тантала в смеси фосфорной кислоты и амилового спирта. Толщина диэлектрика составляла примерно 1200 Å. После высушивания на оксидированную поверхность осаждался испарением слой окиси цинка и затем электроды из серебра.

Двуокись магния более распространена, чем окись цинка, но последнюю легче осаждать испарением. Эти осажденные оксидные покрытия увеличивают пробивное напряжение, но точный механизм их действия еще недостаточно изучен. Конденсатор, изготовленный таким методом, имеет емкость 0,1 мкф на площади 0,6 см<sup>2</sup> при cos  $\phi$  не менее 0,01.

г. *Анодированный распыленный тантал.* Одно время считалось невозможным или непрактичным делать танталовые конденсаторы, нанося электроды непосредственно на пленку окиси тантала. Попытки сделать это всегда приводили или к короткому замыканию, или к низкому пробивному напряжению, поэтому полагали, что



для отрицательной обкладки нужно использовать или электролит, или полупроводник. Однако Берри и Слоан [112] получили конденсаторы, используя распыленную танталовую пленку как основу для анодированной оксидной пленки. Эти конденсаторы представляют особый интерес для конструкторов микросхем, потому что, имея форму тонкой пленки на плоской плате, они хорошо согласуются с другими методами производства микросхем.

Танталовые пленки изготавливались методом катодного распыления с использованием соответствующих масок для получения пленок желаемой конфигурации. Этот процесс происходил в атмосфере аргона при напряжении 5000 в в течение 1 час и при давлении около  $10^{-2}$  мм рт. ст. Танталовая пленка толщиной порядка 5000 Å служила анодом в электролитической ванне, в результате чего на ней формировался оксидный слой. Электролит состоял из щавелевой кислоты, воды и этиленгликоля, взятых по весу в отношении 1 : 2 : 3. Анодирование продолжалось в течение 4—5 час при температуре 105° С и плотности тока около 1 ма/см<sup>2</sup>, причем толщина оксидного слоя была пропорциональна напряжению электролиза. Электрод наносился осаждением испаренного золота или алюминия через соответствующие маски.

Емкость таких узлов пропорциональна площади электродов и обратно пропорциональна напряжению электролиза. В табл. 6.3 даны приближенные значения емкости электродов диаметром 6,5 мм при различных напряжениях электролиза [112].

Таблица 6.3

Напряжение электролиза	Емкость, пф	Напряжение электролиза	Емкость, пф
5	250 000	100	30 000
10	185 000	150	20 000
20	92 000	200	15 000
40	68 000		

По-видимому, широкое распространение этих емкостей объясняется достоинством распыленной танталовой пленки по сравнению с прокатанными или тянутыми танталовыми листами.

Температурный коэффициент пленки остается постоянным и равным  $+250 \cdot 10^{-6}$  в интервале температур от  $-196^\circ$  до  $+170^\circ$  С. Коэффициент мощности на частоте 100 гц равен примерно 0,008 при температуре до  $+100^\circ$  С; при возрастании температуры он увеличивается и при температуре  $+250^\circ$  С достигает значения 0,05. Ток утечки значительно меньше, чем в электролитических конденсаторах и равен примерно  $4 \cdot 10^{-11}$  а для электродов диаметром

6,5 мм. Пробивное напряжение приближается к напряжению электролиза, поэтому рекомендуется, чтобы рабочее напряжение не превышало половины напряжения электролиза. Ограничение по высокой частоте для этих конденсаторов менее выражено, чем у электролитических конденсаторов. Потери на высоких частотах незаметны до 50—100 кГц. При 100 Гц  $\cos \varphi = 0,008$  и повышается до 0,5 при 100 кГц.

Увеличение  $\cos \varphi$  с частотой показывает, что главным фактором, влияющим на высоких частотах, является последовательное сопротивление конденсатора. Возможно, что оно уменьшится, если осадить тантал на подложку из другого металла.

д. *Реактивно распыленные пленки.* Конденсаторы с сухой оксидной пленкой, содержащие два электрода из алюминия, разделенные диэлектриком из окиси тантала, были получены путем реактивного распыления тантала<sup>1</sup>.

Реактивное распыление — это процесс, в результате которого оксиды получаются путем химической реакции между распыленным металлом и кислородом, присутствующим в аппарате с тлеющим разрядом.

Конденсаторы с диэлектриком из окиси тантала изготавливаются следующим образом. На изоляционной плате осаждается обычным процессом испарения алюминиевый электрод, затем эта плата помещается в камеру для распыления, где она покрывается окисью тантала. Эта операция проводится в остаточной атмосфере кислорода при давлении  $10^{-2}$  мм рт. ст. После этого плата возвращается в камеру осаждения для нанесения второго алюминиевого электрода на верхнюю поверхность пленки. Требуемая конфигурация электродов получается с помощью защитной металлической маски.

Пробные конденсаторы имели емкость 0,008—0,012 мкФ с  $\tan \delta \leq 0,01$  при частотах до 30 кГц. Значение емкости порядка 0,1 мкФ/см<sup>2</sup> при пробивном напряжении 14 в было получено на пленке толщиной 1800 Å.

Преимущество этого метода производства танталовых оксидных конденсаторов заключается в том, что в течение всего процесса используется только вакуумное осаждение и ни на одной стадии не применяется погружение в электролит, как в методе, описанном выше. Другое преимущество реактивного распыления состоит в отсутствии необходимости использовать тантал как основу для электрода. Это важно при работе на высоких частотах, так как использование в качестве основы для электрода материала с высоким сопротивлением, как, например, тантала, в случае электрохимического метода повышает тангенс угла потерь на частотах около 1 кГц.

<sup>1</sup> Брит. пат. 42094/60.

Технология реактивного распыления совместима с технологией изготовления тонких пленок в микросхемах и может использоваться там, где необходимо ввести в схему конденсатор большой емкости.

е. Пленки, осажженные при испарении в вакууме. Существует много материалов, которые можно осадить испарением для использования в качестве диэлектрика. Возможность получения конденсаторов только путем испарения заманчива для производства микросхем, но при этом возникает много проблем, которые нужно решить, чтобы надежность тонких пленочных конденсаторов достигла значения, требуемого для элементов микросхем. В табл. 6.4 приведены материалы, которые можно было бы успешно осаждать в вакууме для использования в качестве диэлектрика в случае преодоления связанных с этим трудностей.

Таблица 6.4

Материал	Диэлектрическая постоянная	Емкость 1 см <sup>2</sup> для пленки толщиной 1 мк, пф	Трудности [производства]	Особые преимущества
Двуокись кремния (SiO <sub>2</sub> )	4	4·10 <sup>3</sup>	Очень трудно испарять	Работает при высоких температурах
Оксид кремния (SiO)	6	6·10 <sup>3</sup>	Потери на низких частотах	—
Фтористый магний (MgF <sub>2</sub> )	5	5·10 <sup>3</sup>	Склонность к появлению трещин	—
Фтористый кальций (CaF <sub>2</sub> )				
Фтористый натрий—алюминий (3NaF · AlF <sub>3</sub> ) криолит	5	5·10 <sup>3</sup>	Появление трещин?	Низкая температура испарения
Алюминат магния (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) — шпинель	7-10	10·10 <sup>3</sup>	Появление трещин	
Метасиликат кальция (CaSiO <sub>3</sub> )		6·10 <sup>3</sup>		
Стекло	5—8	5—8·10 <sup>3</sup>	Стабильность? Ограниченная способность стекла к испарению	Большая диэлектрическая прочность
Двуокись титана (TiO <sub>2</sub> )	100	1·10 <sup>5</sup>	Чрезвычайная склонность к разложению	
Титанат бария (BaTiO <sub>2</sub> ) и т. д.	1000—20 000	(1—2)·10 <sup>6</sup>	То же	Возможно ферроэлектрическое взаимодействие с малыми полями?

Получение большой стабильности и низкого температурного коэффициента с такими диэлектрическими пленками является более сложной проблемой, чем получение тех же параметров для пленочных сопротивлений; очень тонкие пленки для конденсаторов больших емкостей непригодны, если они не будут стабильными. По-видимому, если окажется возможным получать стабильные пленки небольшой толщины, скажем 1 мк, то конденсаторы с большой емкостью следует изготовлять в виде многослойных элементов.

*ж. Пластмассовые пленки.* В Англии были получены тонкие пленки из высокомолекулярного полистирола и его сополимеров с полиметилстиролом [10]. Эти пленки наносятся из раствора на миларовую или мелинексовую подложку (полиметилтен-терафталат); после металлизации и разрезания на части для изготовления металлизированных конденсаторов пленка снимается с подложки. Так были получены пленки толщиной до 13 мк.

Допустимая рабочая температура составляет 70° С, однако есть надежда, что ее можно увеличить до 100° С, когда будут разрешены такие проблемы, как удаление оставшегося растворителя и т. п.

К сожалению, полистирол имеет диэлектрическую постоянную всего 2,5. Были проделаны эксперименты с наполнителями с высокой диэлектрической проницаемостью, и была получена на тонкой (не более 25 мк) пленке, извлеченной из растворителя, диэлектрическая проницаемость, равная 5. Конденсаторы с диэлектриком из пластмассы было бы трудно делать как составную часть интегральной микросхемы, однако их можно выполнять в виде отдельных элементов.

*з. Полупроводниковые конденсаторы.* Использование конденсаторов с диэлектриком из германия или кремния подробно разбирается в гл. 8. Такие конденсаторы могут состоять из  $p$  —  $n$ -перехода с обратным смещением или оксидного слоя на кремнии. Они являются составной частью схемы, но при необходимости могут быть сделаны как самостоятельные элементы и размещаться в углублениях на плате.

## СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ ПРОВОДНИКИ

Электрическое соединение элементов микросхемы успешно достигается путем осаждения на плату низкоомных проводников. Выбор типа соединительных проводников зависит до некоторой степени от материала подложки: соединительным проводником может служить токопроводящая краска, нанесенная методом вжигания, металл, осажденный при вакуумном испарении, или обладающая высокой удельной проводимостью пленка эпоксидной смолы.

*Серебряная краска (паста).* Для нанесения соединительных проводников на стеатитовые галеты методом трафаретной печати применяется серебряная краска, в состав которой входят серебро, летучий растворитель и измельченное стекло (фритта). Последний компонент пасты обеспечивает ей высокие адгезивные свойства при последующем обжиге керамической галеты в печи при температуре  $700^{\circ}\text{C}$  в течение 30 мин. Серебряная паста обладает высокой проводимостью, а получаемые при ее использовании соединительные проводники — весьма малым омическим сопротивлением, составляющим доли ома. Окисление такого серебряного проводника не ухудшает его рабочие характеристики, поскольку окись серебра также является хорошим проводником электрического тока.

Однако длительная работа микросхемы с серебряными соединительными проводниками в среде с высокой влажностью может привести к выходу схемы из строя, что вызывается миграцией серебра. В связи с этим при использовании проводников, полученных методом вжигания серебра, важно герметически изолировать собранную микросхему для предотвращения вредного воздействия высокой влажности.

*Металл, нанесенный методом вакуумного осаждения.* Если при таком способе используется не серебро, получаемый тип соединительных проводников не подвержен действию миграции. Золото, медь и алюминий могут служить примером металлов, пригодных для напыления проводников микросхем. Как правило, при нанесении соединительных проводников отпадает необходимость в высокой четкости их конфигурации и метод вакуумного осаждения с применением маски оказывается вполне пригодным. Если в качестве материала подложки используется стекло, необходимо сначала нанести методом вакуумного осаждения первичный слой хрома, так как сцепление золота или меди непосредственно со стеклом неудовлетворительно. Толщина пленки в  $1000\text{ \AA}$  достаточна для получения низкоомного монтажного проводника как на стеклянной, так и на керамической платах.

*Токопроводящая эпоксидная смола.* Низкоомные соединительные проводники микросхем могут быть выполнены также из эпоксидной смолы с металлическим наполнителем. В качестве наполнителя пригодны серебро и золото, количество которых по объему должно превышать 70%, если необходимо получить малое удельное сопротивление проводника. После приготовления смеси ее наносят стеклянной палочкой на галету и выдерживают при  $100^{\circ}\text{C}$  для отверждения смолы.

Указанный способ не рекомендуется для широкого производства микросхем, так как он не поддается автоматизации, однако он может оказаться полезным при соединении отдельных деталей в какой-либо микросхеме.

### Катушки индуктивности

Вопросы изготовления катушек индуктивности (включая трансформаторы), пригодных для непосредственного включения в микросхемы, еще полностью не решены. Необходимо, чтобы катушки индуктивности выполнялись в форме, совместимой с другими плоскими деталями.

В обычных схемах используемые индуктивности меняются с изменением частоты. В табл. 6.5 приведены расчетные значения максимальной индуктивности, практически необходимые для разных частот.

Таблица 6.5

Частота, Мгц	0,1	0,5	1,0	5,0	10,0	50,0	100,0
Индуктивность, мкгн	10 000	1000	350	35	15	1,5	0,5

Добротность  $Q$ , требующаяся для таких катушек, зависит от функции, выполняемой ими в данной схеме, однако величина  $Q$ , равная 100, по-видимому, наиболее подходит для большинства применений.

Индуктивность катушки длиной  $l$  в единицах системы МКС определяется по формуле

$$L = \mu \mu_0 \frac{N^2 A}{l} \text{ гн},$$

где  $\mu$  — эффективная относительная магнитная проницаемость среды;  $\mu_0$  — абсолютная магнитная проницаемость в свободном пространстве;  $N$  — общее число витков;  $A$  — площадь поперечного сечения соленоида;  $l$  — длина соленоида.

Число витков на единицу длины вычисляется по формуле

$$k = \frac{N}{l};$$

откуда

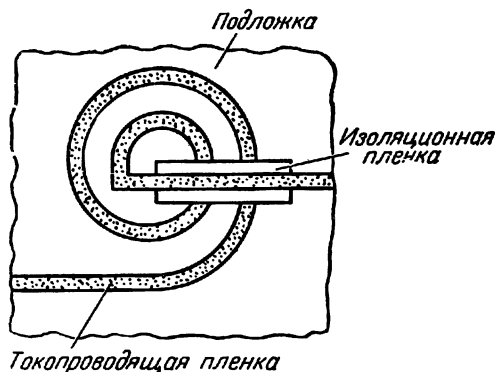
$$L = \mu \mu_0 k^2 l A = \mu \mu_0 k^2 V \text{ гн},$$

где  $V$  — объем магнитного сердечника соленоида.

Таким образом, индуктивность зависит от полного объема сердечника, магнитной проницаемости и числа витков на единицу длины. Приведенными выше формулами следует пользоваться осмоторительно, поскольку увеличение числа витков с целью получения большой индуктивности при наличии сердечника с малым попереч-

ным сечением приводит к уменьшению величины тока насыщения катушки. В транзисторных схемах, обычно работающих на слабых токах, это уменьшение не столь важно. Однако здесь ввиду необходимости применять в микросхемах сердечники малого объема возникают определенные трудности их изготовления.

Существует два подхода к миниатюризации катушек индуктивности. Первый заключается в непосредственной намотке миниатюрных тороидов, описанных в гл. 7. Фирме RCA удалось изготовить



**Ф и г. 6. 7. Тонкопленочная спиральная ка-  
тушка индуктивности.**

катушки (с индуктивностью до 10 мГн и внешним диаметром около 5,1 мм), которые можно включать в микросхемы как отдельные элементы, закрепляя их на плоской подложке. Второй подход сводится к изготовлению печатных спиральных катушек индуктивности.

На фиг. 6.7 изображена спиральная катушка индуктивности, изготовленная путем осаждения через соответствующую маску методом вакуумного испарения. Индуктивность таких катушек составляет всего около 1 мкГн, поэтому их применение ограничивается областью высоких частот.

Если нанести две спирали на обе стороны подложки, можно получить трансформатор. Толщина подложки, разделяющей первичную и вторичную обмотки в виде спиралей, определяет взаимную индуктивность. Коэффициент взаимоиנדукции в этом случае очень мал, так как материал подложки не является ферромагнитным. Катушки индуктивности, выполненные методом осаждения в вакууме, обладают преимущественно воспроизводимости, поскольку размеры маски могут быть выдержаны весьма точно.

Во многих случаях вместо катушек индуктивности можно использовать транзисторные схемы, эквивалентные индуктивностям. По-

добная схема описана в работе [104], где в качестве реактивного элемента используется лишь конденсатор.

Применяются также два полупроводниковых прибора, используемые в некоторых схемах в качестве катушек индуктивности или трансформаторов. Первое устройство представляет собой диод — ограничитель тока, описанный в гл. 2. При смещении левее точки запираания (см. фиг. 2.12) диод представляет собой малое сопротивление для постоянного тока и высокое сопротивление для переменного тока, т. е. удовлетворяет требованию, предъявляемому к сглаживающему дросселю. Второй прибор является полевым тетродом, описанным в работе [111]. Это униполярное устройство может работать как трансформатор, однако помимо связи по переменному току, в нем имеется также связь по постоянному току; кроме того, прибор весьма сложен в изготовлении.

### ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Разработка методов конструирования микросхем привела к созданию нескольких типов пассивных цепей, в которых сопротивления и емкости распределены по всей пленке, а не сосредоточены в пределах отдельных элементов. Цепи с распределенными постоянными, описанные в работе [113], позволяют конструировать пассивные схемы уменьшенных размеров, некоторые функции которых были бы невозможны при использовании ограниченного числа сосредоточенных элементов.

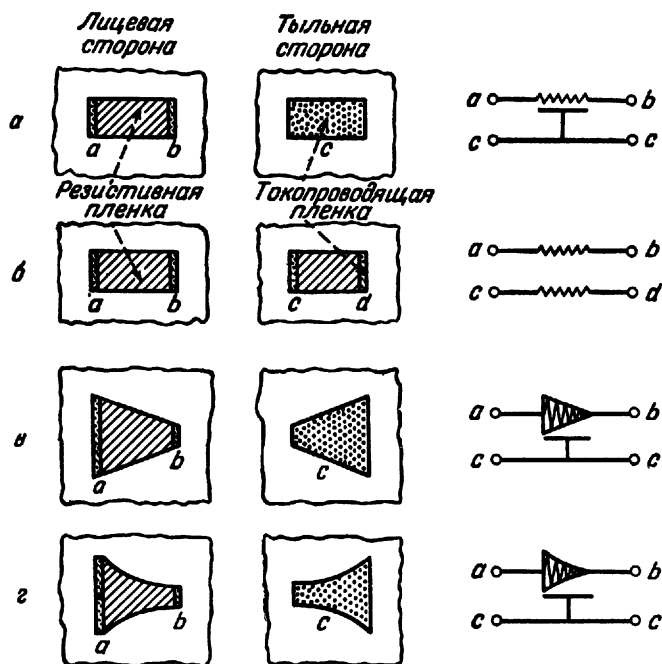
На фиг. 6.8 показаны примеры конструктивного выполнения нескольких простых  $RC$ -цепей с распределенными постоянными, изготавливаемых для микросхем. Каждая цепь состоит из резистивной пленки, осажденной на подложку с высокими диэлектрическими свойствами, и второй резистивной или токопроводящей пленки, нанесенной на тыльную сторону подложки в соответствии с расположением пленки на лицевой стороне. Токопроводящие участки  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  образуют входной и выходной концы резистивных пленок. Наиболее простыми цепями с распределенными постоянными являются цепи фиг. 6.8,  $a$  и  $b$  при равномерном сопротивлении квадрата пленки и равномерной емкости на единицу площади. Они эквивалентны линиям передачи с постоянным волновым сопротивлением без последовательных индуктивностей и шунтирующих емкостей. Цепи фиг. 6.8,  $в$  и  $г$  эквивалентны суживающимся линиям передач.

На фиг. 6.9 показан синтез простой цепи с распределенными параметрами. Начиная с единственной  $RC$ -цепи, число последовательно включенных сопротивлений и шунтирующих конденсаторов возрастает равномерно, так что общее сопротивление  $R$ , включенное последовательно, и общая емкость  $C$ , включенная параллельно, остаются постоянными. В предельном случае такая цепь становится



фильтром нижних частот с распределенными параметрами. Некоторые из возможных двух- и четырехполюсных цепей простейшего вида с распределенными постоянными показаны на фиг. 6.10.

На фиг. 6.11 и 6.12 представлены нормированные характеристики как простой  $RC$ -цепи, так и составленных из звеньев, а также

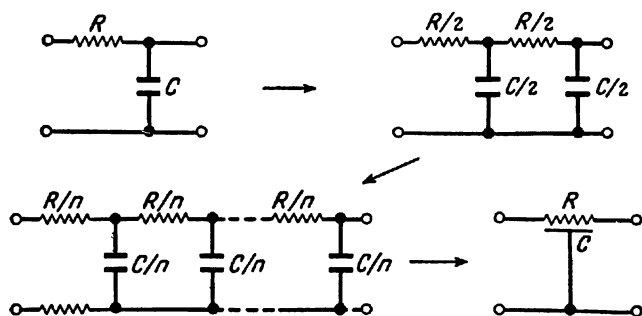


Фиг. 6. 8. Цепи с распределенными постоянными.

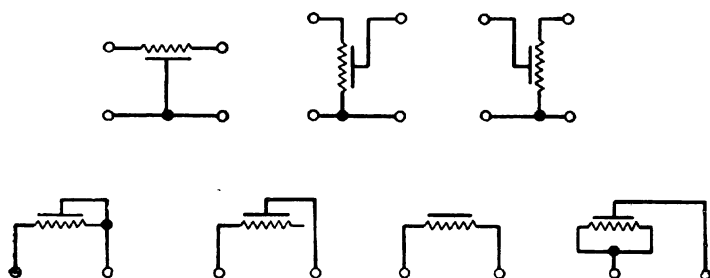
а — простая  $RC$ -цепь; б — простая  $RR$ -цепь; в — линейно суживающаяся  $RC$ -цепь; г — экспоненциально суживающаяся  $RC$ -цепь.

предельного вида цепи с распределенными постоянными. При конечном числе звеньев амплитудная характеристика каждой цепи падает пропорционально числу звеньев. В предельном случае амплитудная характеристика цепи с распределенными постоянными падает, непрерывно увеличивая крутизну. Подобным же образом фазовая характеристика каждой цепи с конечным числом звеньев приближается к своему конечному значению пропорционально числу звеньев в цепи. Фазовая характеристика предельной цепи с распределенными параметрами падает, постоянно увеличивая крутизну.

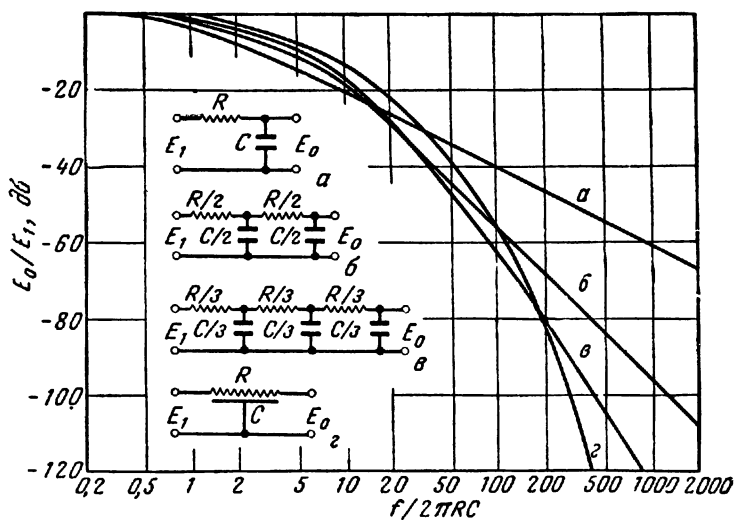
Фирма Royal Radar Establishment разработала цепи с распределенными параметрами, имеющие слоистую конструкцию, состоя-



Фиг. 6. 9. Пример синтеза простой  $RC$ -цепи с распределенными параметрами.

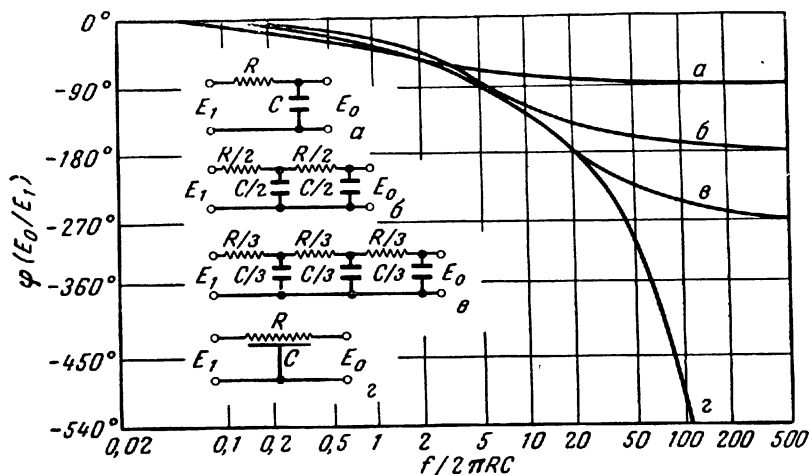


Фиг. 6. 10. Двух-и четырехполюсные цепи с распределенными параметрами.



Фиг. 6. 11. Амплитудные характеристики  $RC$ -цепей.

щую из нескольких пленок, осажденных в вакууме из паровой фазы на подложку из натриевого стекла. Первый слой (нихромовый) имеет толщину  $50 \div 200 \text{ \AA}$ , второй слой ( $\text{MgF}_2$ ) —  $3000 \div 6000 \text{ \AA}$ , верхний слой толщиной около  $500 \text{ \AA}$  выполняется из золота. Нихромовым сопротивлениям была придана несколько извилистая форма. При такой конструкции удалось добиться при частоте  $195 \text{ кгц}$  сдвига фаз до  $210^\circ$ .



Фиг. 6. 12. Фазовые характеристики  $RC$ -цепей.

Цепи с распределенными параметрами весьма подходят для конструирования схем на твердом теле. В этой связи они будут рассмотрены в гл. 8. Практически применимые схемы, в которых используются две из рассмотренных цепей, описаны ниже.

## ТРАНЗИСТОРЫ И ДИОДЫ

Транзисторы и диоды, предназначенные для использования в микросхемах, должны иметь размеры, совместимые с размерами остальных элементов, образованных методом осаждения. Так, например, стандартные транзисторы, небольшие по размеру в сравнении с электронными лампами, слишком велики для применения в микросхемах. Поэтому оказалось необходимым специально разработать весьма малые по размеру плоские полупроводниковые триоды. Плоские транзисторы могут быть заделаны в углубления платы или, если толщина их не превышает сотых долей миллиметра, могут быть смонтированы непосредственно на пленке, полученной методом осаж-

дения или печатным способом. Возможны в основном два подхода к решению вопроса изготовления транзисторов или диодов для использования в микросхемах: а) уменьшение размера корпуса настолько, что он будет сравним по величине с активным элементом самого полупроводникового устройства, и б) полное удаление корпуса при наличии соответствующих мер защиты активного элемента устройства от внешних воздействий.

Миниатюрный, полностью закрытый корпусом транзистор был разработан фирмой Mullard. Его электрические характеристики сходны с характеристиками сплавного германиевого транзистора ОС42 этой же фирмы, граничная частота которого составляет 6 Мгц. Активный элемент в этом транзисторе заключен в медный корпус диаметром 3,2 мм и высотой 1,3 мм. Эта же фирма изготовила диод, корпус которого по размеру равен корпусу рассмотренного триода, а электрические характеристики такие же, как у германиевого сплавного диода ААЗ12. Преимущество этих транзисторов и диодов заключается в герметизации, столь же надежной, как и у стандартных полупроводниковых устройств. Таким образом, при использовании их в микросхемах специальные меры предосторожности для предотвращения повреждения должны приниматься лишь в отношении остальных элементов схемы, нанесенных методом осаждения, в то время как транзисторы и диоды сами по себе уже должным образом защищены.

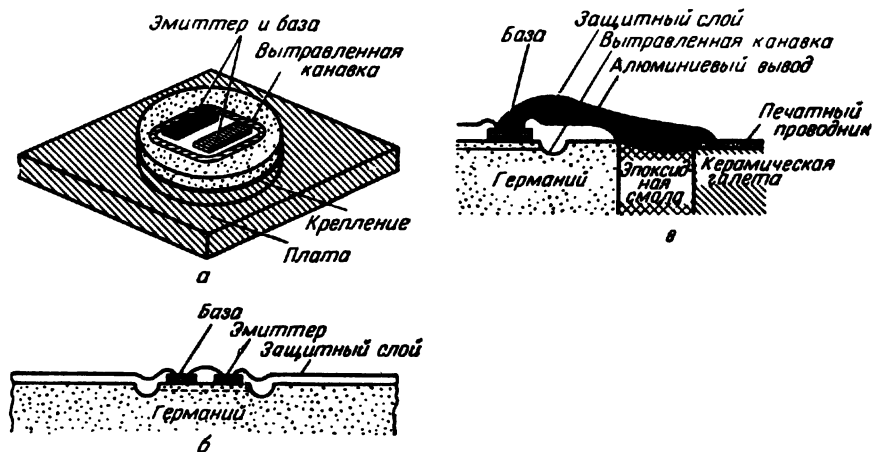
Полностью герметизированные транзисторы и диоды разработаны также фирмой General Electric Co. Конструкция полупроводниковых устройств этой фирмы включает корпус, выполненный из керамики и имеющий металлическую крышку и дно. Диаметр корпуса 3,2 мм, высота 1,3 мм. Выводы транзисторов и диодов, соединяющие их с соответствующими элементами схемы, выполняются в виде металлических лент.

Описание миниатюрных плоских полупроводниковых диодов и триодов с полностью герметизированными корпусами приведено в гл. 7.

Задолго до того, как возникла необходимость в микроминиатюризации, были предприняты попытки капсулировать транзисторы и диоды без применения металлических или стеклянных корпусов. В некоторых ранних конструкциях транзисторов, например, активный элемент заделывался в эпоксидную смолу. Такая конструкция оказалась неудовлетворительной из-за проникновения влаги на поверхность транзистора при повышенной влажности окружающего воздуха, что приводило к выходу приборов из строя.

Воздействие окружающей среды на поверхностные свойства германия и средства защиты его изучались в фирменных лабораториях и описаны в работе [106]. Было установлено, что светочувствительная эмульсия — фотослой фирмы Kodak — обеспечивает

надежную защиту поверхности транзистора при влажности воздуха, обычной для помещений. При испытаниях два негерметизированных, а лишь покрытых защитным слоем эмульсии германиевых транзистора, использовавшихся в схеме мультивибратора, удовлетворительно работали, не изменяя своих характеристик более года. Такой метод защиты известен как поверхностное пассивирование.

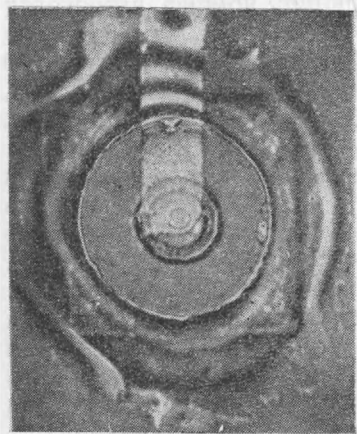


Фиг. 6.13. Конструкция транзистора.

*а* — транзистор с диффузионной базой, укрепленный на плате; *б* — поперечное сечение транзистора с диффузионной базой, готового к заделке в галету; *в* — поперечное сечение транзистора с диффузионной базой, заделанного в керамическую галету. Алюминиевые выводы нанесены методом вакуумного испарения.

Лаборатория фирмы Diamond Ordnance Fuze Laboratory (D. O. F. L.) использовала в своих микросхемах как сплавные, так и диффузионные транзисторы [110]. Первоначально были выбраны диффузионные германиевые транзисторы, поскольку, используя методы фотолитографии, активные области транзистора можно было соединять с печатными монтажными проводниками посредством метода вакуумного осаждения. На фиг. 6.13, *а* показана конструкция транзистора с диффузионной базой. Германиевый диск диаметром 1 мм и толщиной 127 мк припаян к плате, которая выполняет функцию коллектора транзистора. Базовый и эмиттерный контакты, площадь каждого из которых составляет  $0,3 \times 0,1$  мм, расположены в пределах площадки размерами  $0,3 \times 0,4$  мм, ограниченной вытравленной канавкой, ширина которой равна 10 мк. На верхнюю сторону германиевого диска наносят защитный слой светочувствительной эмульсии, который экспонируют через соответствующую маску. После проявления защитное покрытие над областями эмиттерного и базового контактов оказывается удаленным, как показано

на фиг. 6.13, б. Затем транзистор вставляют в специальное отверстие на керамической галете, а зазоры между транзистором и керамикой заполняют эпоксидной смолой, обеспечивающей механическое закрепление транзистора в галете и образующей изолирующую перемычку, на которую вакуумным испарением можно нанести выводы. Выводы, соединяющие транзистор с серебряными проводниками галеты, выполненными методом вжигания, образуют путем



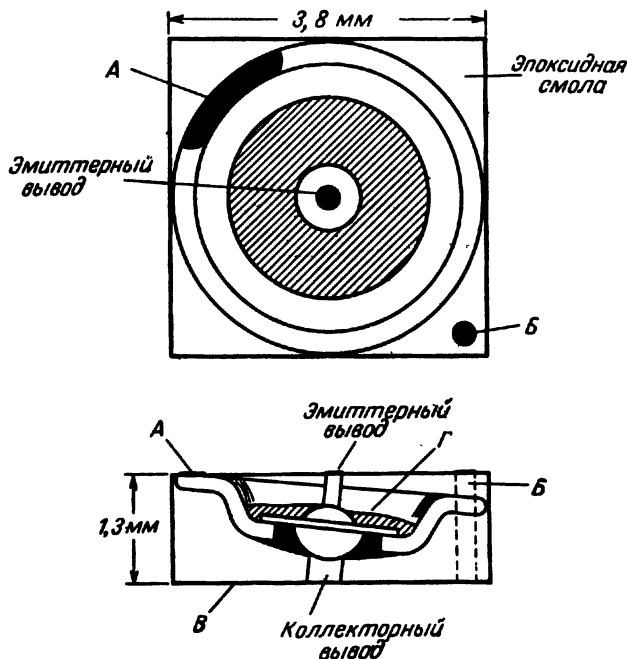
Фиг. 6. 14. Микрофотография диффузионного диода.

напыления алюминия в вакууме через соответствующую маску. На фиг. 6.13, в показано поперечное сечение готового транзистора с алюминиевыми выводами. Микрофотография диффузионного диода с алюминиевым выводом, нанесенным методом вакуумного осаждения, приведена на фиг. 6.14.

Фирма Royal Radar Establishment исследовала возможность полной заливки германиевых сплавных транзисторов эпоксидной смолой. Активные элементы транзистора, приобретенные фирмой у других изготовителей, пассивировали слоем светочувствительной эмульсии, после чего проверяли электрические параметры транзистора. Затем транзистор помещали в квадратную формочку из силиконового каучука коллектор-

ной стороной вниз. Поскольку требовалось, чтобы все три вывода были расположены с одной стороны, между одним из углов формы и чашеобразной базой параллельно вертикальному ребру формы помещали дополнительный проводник. Транзистор вставляли в форму таким образом, чтобы его база была наклонена под небольшим углом. Форму с установленным в ней транзистором заливали эпоксидной смолой и помещали в вакуумную камеру для удаления пузырьков воздуха. По отверждении смолы капсулу извлекали из формы, шлифовали до необходимой толщины и затем полировали. В результате этих операций с одной стороны капсулы обнажался небольшой участок края чашеобразной базы (выступающий на поверхность, благодаря наклонному положению последней), служивший базовым контактом, а также торцы вывода эмиттера и дополнительного проводника, а с другой стороны — торцы вывода коллектора и дополнительного проводника, которые затем соединяли посредством металлической пленки, нанесенной вакуумным испарением на поверхность капсулы со

стороны коллектора. На фиг. 6.15 показаны вид сверху и поперечное сечение, а на фиг. 6.16—объемное изображение рассмотренного транзистора. Таким же образом были изготовлены сплавные плоскостные германиевые диоды. Транзисторы и диоды вставлялись



Фиг. 6. 15. Вид сверху и поперечное сечение транзистора со сплавным переходом.

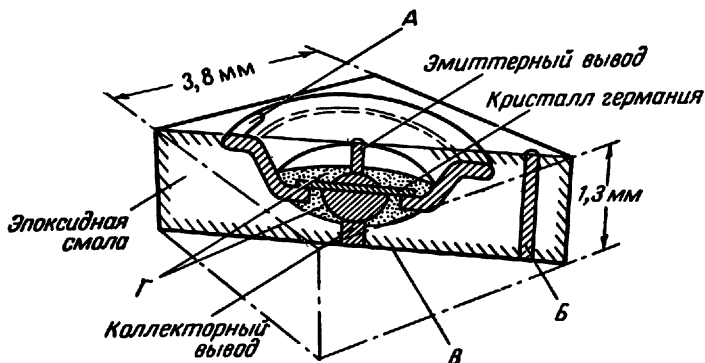
А—выступающий на поверхность участок края чашевидной базы; Б—дополнительный коллекторный вывод к верхней стороне транзистора; В—металлическая пленка, осажденная вакуумным испарением; Г—защитный слой светочувствительной эмульсии.

в специальные отверстия стеклянных подложек, а соединения между печатными проводниками и выводами полупроводниковых устройств выполнялись методом вакуумного испарения.

Ни один из рассмотренных выше транзисторов не обладает стойкостью к воздействию влажной атмосферы, поэтому при использовании их в микросхеме вся галета должна быть надежно герметизирована.

Для кремниевых полупроводниковых устройств хорошим защитным покрытием может служить специальное стекло с низкой точкой плавления. Стекло не оказывает вредного воздействия на характеристики полупроводниковых устройств и обеспечивает надежную

герметизацию. Микроминиатюрные кремниевые диоды, для герметизации которых используется низкоплавкое стекло (такие диоды не имеют корпуса), выпускаются фирмой Pacific Semiconductors Inc. Эти диоды разработаны в соответствии с микромодульной программой, однако они вполне пригодны для использования в микросхемах. Диаметр таких диодов при длине 2,0 мм составляет лишь 0,9 мм; таким образом, наиболее громоздкой частью этих устройств являются выводы.



Фиг. 6. 16. Объемное изображение транзистора со сплавным переходом.

А — выступающий на поверхность край чашевидной базы; Б — дополнительный коллекторный вывод к верхней стороне транзистора; В — металлическая пленка, нанесенная методом вакуумного испарения; Г — защитный слой светочувствительной эмульсии.

Диоды, имеющие весьма малые размеры, изготавливаются и другими фирмами [116]. Эти «точечные» диоды при толщине 0,8 мм имеют диаметр 1,3 мм. Их конструкция включает две золоченые торцовые платы, низкоплавкое стекло, некоторые специальные фтористоуглеродородные материалы и стандартный кристалл сплавного диода. Диоды полностью защищены от воздействия внешней среды путем герметизации. Для облегчения работы со столь малыми устройствами и распознавания анода и катода одна из торцовых металлических плат изготавливается из магнитного материала, а вторая — из немагнитного. В качестве инструмента для работы с этими диодами используется шариковая ручка с убирающимся наколеником, снабженная небольшим магнитом.

Все принципы, которыми руководствуются при изготовлении «точечных» диодов, остаются в силе при конструировании транзистора. Такой транзистор должен относиться к тому типу триодов, в которых основная часть кристалла представляет собой коллектор, а области базы и эмиттера располагаются с одной стороны, как это



имеет место в специальных высокочастотных или меза-транзисторах. В готовом устройстве коллекторным контактом будет служить плата из магнитного материала, а эмиттерным и базовым контактами — две платы в форме секторов. Для отделения области базы от области эмиттера кристалл транзистора выполняется с дополнительным осевым выступом. Диаметр транзистора, если не принимать во внимание выступ, составляет 1,3 мм, толщина равна 0,8 мм.

Конструкция микроминиатюрных герметизированных транзисторов, разработанных также фирмой Philco Corporation [124], сводится в основном к следующему: имеется стеклянное основание, через которое пропущены выводы транзистора, и верхняя металлическая крышка. Выводы располагаются в горизонтальной плоскости, что облегчает их соединение с другими элементами микросхемы. Готовый транзистор имеет следующие размеры: длина 4,6 мм, ширина 3,3 мм, высота 1,5 мм,

Фирма Texas Instruments Inc. выпустила в продажу меза-транзисторы в круглых микроминиатюрных корпусах диаметром 4,6 мм, высотой 1,3 мм. Три полосковых вывода выступают из корпуса радиально в горизонтальной плоскости и образуют эмиттерный, коллекторный и базовый контакты. Такая форма весьма удобна при использовании в микросхемах.

Микроминиатюрные полупроводниковые триоды, выпускаемые фирмой Sylvania, известны как дисковые транзисторы. Наружный диаметр такого триода составляет 5,8 мм, высота 1,8 мм. Проволочные выводы выступают из нижней части корпуса параллельно его вертикальной оси. В таком оформлении фирма выпускает целый ряд триодов, включая сплавные и меза-транзисторы.

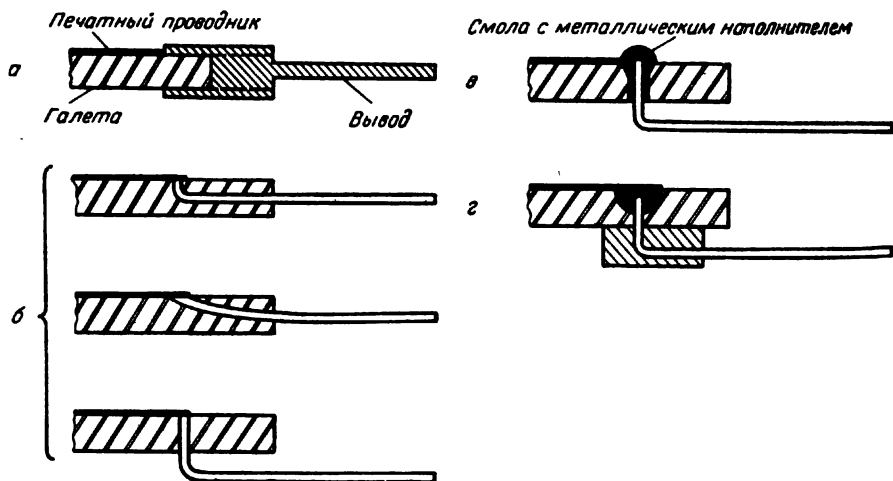
### Выводы плат

Выводы микросхемных галет выполняются различными способами. Одним из простых методов является припаивание тонких проводов к усиленным участкам печатного монтажа. Однако такой метод применим не всегда, поскольку замена отдельных плат микросхем в этом случае становится сложной операцией.

Лаборатория D. O. F. L. использовала для выводов прочную никелированную проволоку диаметром 0,4 мм, разрезанную на отрезки длиной 12,7 мм. Все выводы закреплялись на керамической галете за один прием при помощи соответствующего зажимного приспособления. При этом технология монтажа выводов включает в себя следующие операции: покрытие концов проволоки токопроводящим связующим веществом, размещение выводов в соответствующих пазах галеты и отверждение связующего вещества при температуре 100° С в течение 1 час. Выводы, закрепленные таким

способом на подложке, могут при выдергивании выдержать нагрузку до 0,9 кг и имеют сопротивление контакта менее 1 ом.

Некоторые возможные методы соединения выводов с монтажными проводниками на стеклянных галетах показаны на фиг. 6.17. Метод, практикуемый фирмой Royal Radar Establishment, иллюстрируется фиг. 6.17, а. Вывод, имеющий форму вилки, вставляется в паз,



Фиг. 6. 17. Некоторые возможные методы соединения выводов с печатными монтажными проводниками на микросхемных галетах.

а — вывод в форме вилки, закрепленный в пазу подложки посредством токопроводящего связующего материала; б — предварительная заделка выводов; в — выводы, закрепленные токопроводящей смолой в отверстиях галеты, просверленных посредством ультразвука; г — то же, что и в, но с усиленным креплением.

вырезанный в стеклянной подложке, и закрепляется в этом положении посредством токопроводящего связующего вещества, которое обеспечивает также электрическое соединение печатного монтажа подложки с закрепленным выводом. Подобное сочленение пазов стеклянной подложки и вывода повышает прочность соединения на скручивание, что особенно важно, если в дальнейшем выводы соединяются проволочными спиралями.

### Защита микросхем от внешнего воздействия

Несомненно, что платы должны предохраняться от загрязнения, вызывающего их порчу. Степень необходимой защиты плат в большей мере зависит от способа изоляции полупроводниковых элементов. Если полупроводниковые элементы являются полностью за-

крытыми миниатюрными устройствами, можно несколько смягчить требования, предъявляемые к защите законченной микросхемы. Если же полупроводниковые устройства защищены лишь слоем смолы, плату микросхемы следует герметизировать.

При использовании полностью закрытых транзисторов пакет плат можно изолировать заливочным составом. Когда коэффициенты теплового расширения смолы и платы различны, необходимо во избежание разрыва пленочных элементов схемы принимать меры предосторожности против непосредственного соприкосновения термореактивной смолы с печатной схемой. С этой целью перед операцией заливки на каждую плату следует наносить защитный слой упругого масляного лака, например силиконовой смазки.

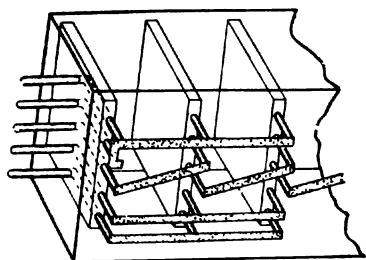
Если транзисторы защищены только слоем смолы, наилучшим и наименее дорогостоящим методом защиты, по-видимому, будет монтаж нескольких галет в одной общей герметичной капсуле. Другое решение заключается в герметизации каждой галеты отдельно посредством индивидуальной металлической, стеклянной или керамической капсулы. В этом случае выводы из капсулы можно протянуть через ряд уплотняющих стеклянных изоляторов («слезок»). Отрицательной стороной индивидуальной герметизации каждой платы является неизбежное увеличение объема микросхемы, сопутствующее этому методу. Количество плат, помещаемых в одну капсулу, диктуется экономическими соображениями, поскольку ремонтировать капсулу не представляется возможным и в случае неисправности ее выбрасывают.

### МЕЖСХЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

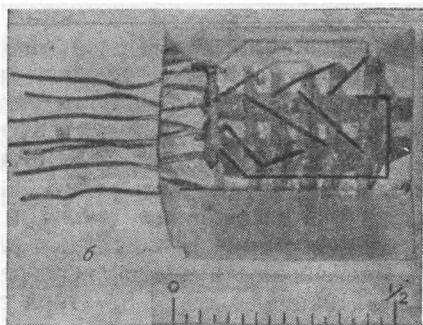
Метод соединения микросхем имеет большое значение, так как он непосредственно связан с проблемой надежности. Кроме того, соединения между схемами могут оказаться более громоздкими, чем сами платы.

Фирма D. O. F. L., например, применяет сборку микросхемных плат в пакет и заливку пластиком, причем все выводы располагаются с одной стороны. Выводы и пластик затем сошлифовывают, в результате чего торцы выводов, которые должны быть соединены, располагаются заподлицо с поверхностью пластика. Металлические пленочные проводники, соединяющие концы выводов, получают путем осаждения химическим способом слоя меди на всю поверхность и последующего вытравливания лишней меди для образования желаемой конфигурации проводников. На фиг. 6.18, *а* схематически показаны соединения выводов, а на фиг. 16.18, *б* — практическое осуществление соединения между микросхемами.

Другой подход, предложенный фирмой Royal Radar Establishment, заключается в использовании для соединения плат миниа-



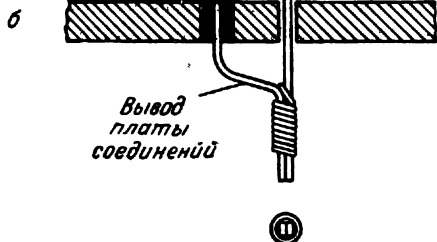
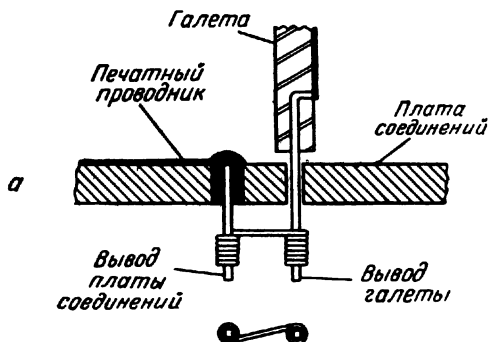
*a*



Фиг. 6. 18.

*a*—схема соединения выводов галет, собранных в пакет. Соединение выводов выполнено путем осаждения меди.

*б*—полусумматор D.O.F.L., состоящий из 5 микросхем типа HE—ИЛИ. Соединение выводов выполнено путем осаждения меди; масштаб в дюймах.



Фиг. 6. 19. Соединения выводов микросхемы и платы соединений.

*a*—двухспиральное соединение; *б*—односпиральное соединение.

турных проволочных спиралей. Каждая галета должна иметь некоторое количество прочно закрепленных выводов прямоугольного или квадратного сечения. Для этой цели вполне удовлетворительным является описанный выше вилкообразный вывод из омедненной проволоки нержавеющей стали. Выводы микросхем, расположенные на определенном расстоянии один от другого, вставляются в гнезда платы соединений, на которую печатным способом нанесены монтажные проводники. Как показано на фиг. 6.19, выводы микросхем соединены с выводами платы соединений посредством проволочных спиралей (двухспиральное и односпиральное соединения). Преимуществом такого метода является высокая надежность, обеспечиваемая применением проволочных спиралей, недостатком — дополнительный объем, необходимый для размещения выводов, соединенных проволочными спиралью. Такой метод соединения микросхем особенно удобен, когда каждая плата герметизируется отдельно, так как, используя соответствующий инструмент, легко отсоединить плату и заменить ее другой.

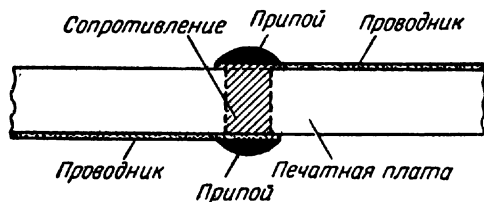
### ДРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОСХЕМ

*Регулируемые элементы схемы.* Включение регулируемых элементов в микросхему связано с некоторыми трудностями, поскольку, несмотря на микроминиатюрные размеры, для ручного управления ими требуется соответствующее свободное пространство. Вместе с тем вполне возможно изготовить и включить в микросхему подстроечные элементы, регулируемые отверткой. Эти соображения подсказывают, что микросхемы наиболее удобны для применения в вычислительных устройствах, где схема находится либо в состоянии «включено», либо в состоянии «выключено». Как величины сопротивлений, так и емкость конденсаторов, изготовленных методом осаждения на подложку, можно изменять путем обдува абразивными веществами. Так, например, величина сопротивления может быть увеличена, если часть резистивной пленки удалить путем обдува песком. Уменьшение величины емкости конденсатора достигается удалением части одной из обкладок также путем обдува песком. В принципе величина сопротивления может быть уменьшена посредством нанесения резистивной пленки на тыльную сторону галеты, но если микросхема полностью смонтирована, эта операция чрезмерно сложна. Однако указанные способы являются односторонними и пригодны лишь для подгонки номинала элемента схемы.

*p—n-переход с обратным смещением* представляет собой конденсатор, емкость которого можно изменять, меняя приложенное напряжение. Это, однако, не решает проблемы, поскольку в этом случае

для изменения напряжения, приложенного к конденсатору, потребовалось бы переменное сопротивление.

**Индикаторные лампы.** В счетных и хронизирующих цепях желательно иметь средства визуальной индикации двоичного состояния триггера или каскада двоичного счетчика. Учитывая это, фирма D. O. F. L. сконструировала миниатюрную индикаторную лампу накаливания для применения в разрабатываемых ею микросхемах.



Фиг. 6. 20. Поперечный разрез сопротивления, имеющего форму заклепки.

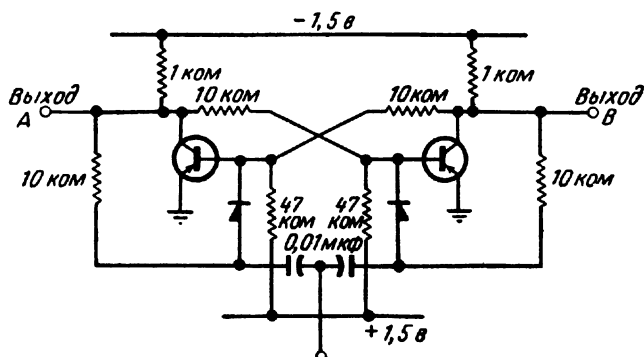
Диаметр такой лампы при длине 2,5 мм составляет 0,9 мм. Лампа дает хорошо видимый свет при питании током 35 ма и напряжении 1 в, что делает ее пригодной для использования в транзисторных схемах.

**Проходное сопротивление.** Фирма Bell Telephone Laboratory разработала (фиг. 6.20) конструкцию

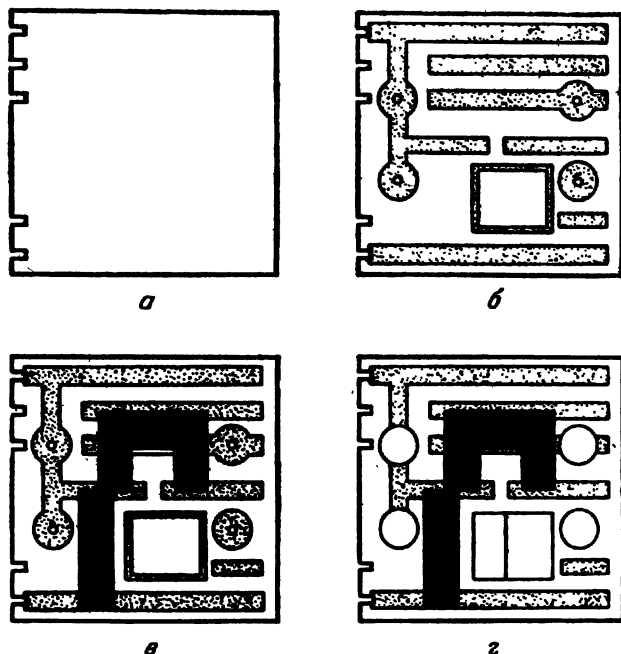
проходного сопротивления в форме заклепки, особенно удобную для применения в микросхемах. Длина сопротивления может быть выбрана равной толщине платы, в которую оно будет вмонтировано. Сопротивление будет в этом случае выполнять роль сквозного соединения между двумя сторонами монтажной платы. Торцы сопротивления делаются заподлицо с поверхностью платы и легко соединяются с печатными монтажными проводниками.

## МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСХЕМ

**Фирма Diamond Ordnance Fuze Laboratory.** Эта фирма явилась начинателем в разработке микроминиатюрных схем. Большая часть используемой ею технологии была уже описана в предыдущих разделах. Ниже будут рассмотрены приемы комбинирования и сочетания методов, позволившие изготовить ряд микросхем [110]. Для иллюстрации используемой технологии приведем поэтапное описание изготовления каскада двоичного счетчика (фиг. 6.21), схема которого состоит из 14 элементов. В качестве подложки применялась плата размерами 12,7×12,7 мм, толщиной 0,5 мм, причем для подложки использовались различные материалы, включая стеатит, форстерит, глинозем, кварц и титанат бария. В большинстве случаев применялся стеатит как наиболее доступный материал. Галеты нарезались одинакового размера, складывались стопкой, и на боковой стороне галет выбирались пять пазов. Отдельные галеты после этого имели форму, показанную на фиг. 6.22, а.



Фиг. 6. 21. Принципиальная схема двоичного счетчика.



Фиг. 6. 22. Этапы сборки плоской схемы двоичного счетчика.

а—чистая галета; б—галета с нанесенными монтажными проводниками; в—галета с нанесенными пленочными сопротивлениями; г—галета после обдува песком и образования отверстий и углублений.

На каждую сторону стеатитовой галеты были нанесены монтажные проводники, конфигурация которых показана на фиг. 6.22, б. Предпочтение было отдано методу вжигания серебряной пасты, хотя можно было бы применить метод вакуумного осаждения металлических пленок.

На выбранные участки галеты были нанесены сопротивления, перекрывавшие определенные места монтажных проводников (фиг. 6.22, в). Для образования сопротивлений были выбраны резистивные пасты, но могли быть использованы и металлопленочные сопротивления из сплавов или сопротивления, изготовленные методом вакуумного осаждения металла.

После отверждения резистивной пасты галету подвергали обдуву песком для образования четырех круглых сквозных отверстий и двух перекрывающихся квадратных углублений, по одному на каждой стороне галеты. Глубина каждой из этих прямоугольных выемок составляла половину толщины галеты (фиг. 6.22, г).

Конденсаторы емкостью 0,01 мкф представляли собой отдельные элементы размерами  $2,5 \times 2,5 \times 0,20$  мм. Изготовлены они были посредством соответствующей обработки керамического материала, состоявшего в основном из титаната бария. Верхняя и нижняя обкладки конденсатора были выполнены из серебра методом, описанным на стр. 229. Готовые конденсаторы были вставлены в углубления галеты тыльной стороной друг к другу, так что один оказывался несколько смещенным относительно другого. Электрическое и механическое их соединение осуществлялось посредством токопроводящего связующего вещества. Для соединения серебряного монтажа на поверхности галеты с дном углубления и обеспечения электрического соединения с местом контакта указанных двух конденсаторов была нанесена полоска токопроводящего связующего вещества. Зазор по периметру конденсаторов был заполнен эпоксидной смолой, прочно закреплявшей их в выемке галеты. Соединение верхних обкладок конденсаторов с серебряными монтажными проводниками на каждой из сторон платы было выполнено путем нанесения полосок токопроводящего связующего вещества или вакуумного осаждения алюминия.

Затем в отверстия галеты вставлялись и закреплялись на месте эпоксидной смолой транзисторы с диффузионной базой (см. фиг. 6.13). Соединение выводов транзисторов с серебряным монтажом галеты выполнялось путем вакуумного осаждения алюминия через выгравированную механическую маску с весьма тонкими прорезями.

Для крепления диодов к подложке использовалась эпоксидная смола. После этого в соответствующие отверстия галеты были вставлены диффузионные германиевые диоды. Соединение между выводами диода и серебряным печатным монтажом осуществлялось



также посредством алюминиевых проводников, осажженных в вакууме.

На следующем этапе изготовления схемы в предварительно вырезанные пазы галеты укладывались прочные выводные проводники, закреплявшиеся на месте с помощью токопроводящей эпоксидной смолы, обеспечивавшей также электрический контакт с серебряным монтажом галеты.

На фиг. 6.23 показан готовый двоичный счетчик. Следует отметить симметричную компоновку деталей на галете, а также двусторонний монтаж элементов его схемы.

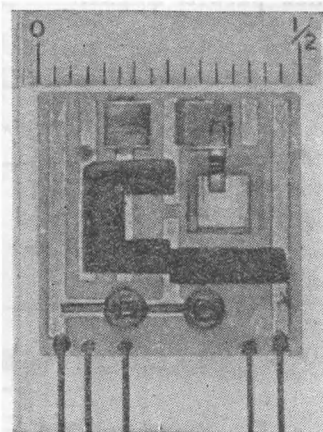
Далее следовала сборка нескольких галет в пакет и герметизация последнего. Готовое устройство, герметизированное путем заливки эпоксидной смолы, показано на фиг. 6.18. Применялась также и герметизация галет посредством металлических капсул; в этом случае для пропуска выводов использовались стеклянные изоляторы.

Конечной операцией являлась проверка электрических параметров готового устройства в различных условиях окружающей температуры, механических ударных и вибрационных нагрузок.

На фиг. 6.24 представлена микроминиатюрная схема типа НЕ — ИЛИ, состоящая из 5 элементов. Эта микросхема включает сплавной транзистор и все монтажные соединения, выполненные с помощью токопроводящего вещества. Размеры театитовой подложки  $6,3 \times 6,3 \times 0,5$  мм, т. е. меньше, чем у галеты двоичного счетчика.

Как микросхема двоичного счетчика, так и микросхема типа НЕ — ИЛИ были подвергнуты специалистами лаборатории фирмы тщательному теоретическому и экспериментальному анализу, с тем чтобы выявить условия и требования при проектировании схем, выполняемых методами микроминиатюризации. Было установлено, что при этом должны соблюдаться следующие правила:

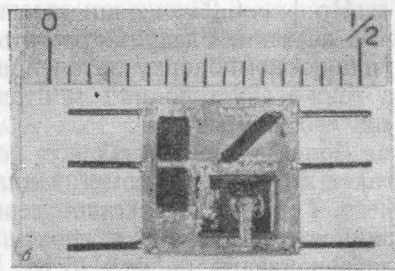
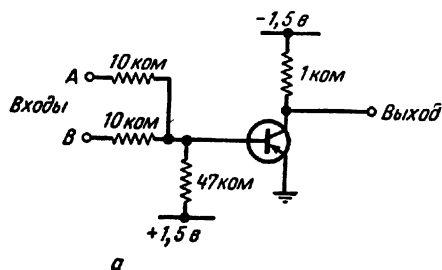
- а) схема должна быть хорошо продумана;
- б) схема должна быть максимально простой и содержать минимально возможное количество необходимых деталей;
- в) разработку схемы следует проводить с расчетом на малое потребление мощности;
- г) схема должна допускать широкий разброс параметров входящих в нее деталей;



Фиг. 6. 23. Галета с полностью собранной микросхемой, двоичного счетчика.

д) количество вводов, выводов и монтажных проводников следует свести к минимуму.

Фирма *Royal Radar Establishment*. Подход этой фирмы к микроминиатюризации схем отличается от описанного выше тем, что всякий раз, когда это возможно, элементы схемы изготавливаются путем осаждения в вакууме. Ниже приводится описание некоторых этапов работы фирмы.



Фиг. 6. 24. Микроминиатюрная схема типа НЕ—ИЛИ.

а — принципиальная схема.

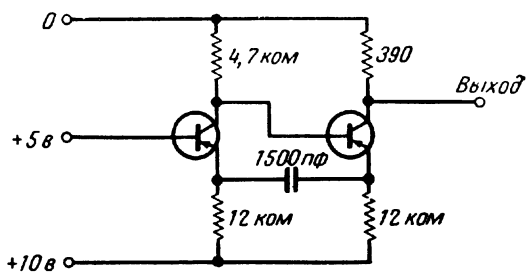
Таблица напряжений

А	В	Выход
0	0	-1,5
-1,5	0	0
0	-1,5	0
-1,5	-1,5	0

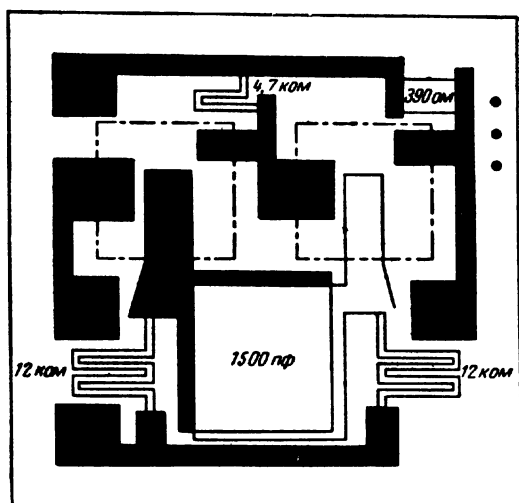
б — галета с печатным монтажом; масштаб в дюймах.

В качестве наиболее подходящего материала для металлопленочных сопротивлений был выбран хромоникелевый сплав (нихром). Для получения требуемых значений сопротивлений необходимы пленки толщиной 50—100 Å, обеспечивающие активное сопротивление квадрата в пределах 200—300 ом. Для стабильности и воспроизводимости сопротивлений важно, чтобы поверхность подложки была достаточно гладкой в сопоставлении с толщиной пленки 50 Å, что исключает применение в качестве материала подложки керамики и определяет использование для этой цели стекла.

Первой схемой, выбранной для микроминиатюризации, была схема мультивибратора с эмиттерной связью, показанная на фиг. 6.25. Схема не имеет точек пересечения проводников, характерных для обычного мультивибратора, что значительно уменьшило трудности, связанные с изготовлением микросхем. Если в микросхеме имеют место пересечения проводников, приходится пользоваться одним из следующих способов: 1) делать изолирующие прослойки между двумя



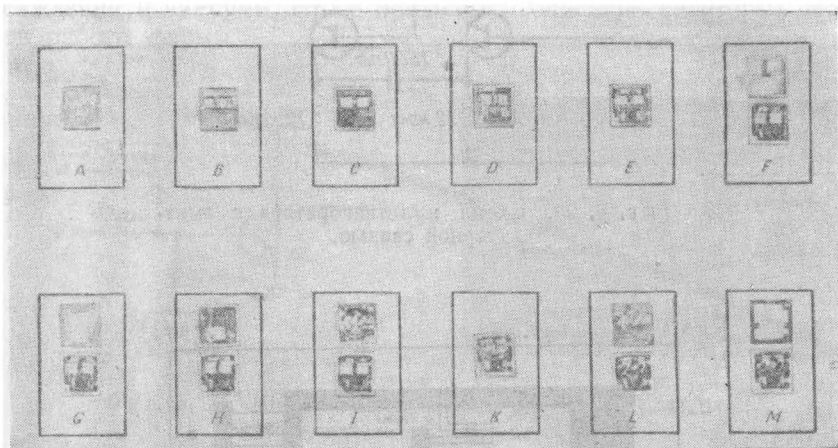
Ф и г. 6. 25. Схема мультивибратора с эмиттерной связью.



- Токопроводящая пленка
- Резистивная пленка
- Габарит транзистора

Ф и г. 6. 26. Компоновка микросхемы мультивибратора с эмиттерной связью.

проводниками; 2) производить монтаж на обеих сторонах галеты; 3) использовать транзисторы с двойным коллекторным и (или) двойным эмиттерным выводами. Компоновка микросхемы мульти-вибратора с эмиттерной связью показана на фиг. 6.26. Крепление



Фиг. 6. 27. Последовательность операций при изготовлении микросхемы мультивибратора с эмиттерной связью.

*A*—галета из натриевого стекла; *B*—вырезание двух квадратных отверстий с помощью ультразвукового сверла; *C*—нанесение медной пленки методом вакуумного осаждения; *D*—травление меди и получение негативного изображения схемы; *E*—нанесение никромовой пленки и вытравливание медного покрытия; *F*—нанесение нижней обкладки конденсатора осаждением золота; *G*—нанесение диэлектрической прокладки конденсатора осаждением окиси кремния; *H*—нанесение верхней обкладки конденсатора осаждением алюминия; *I*—нанесение золотых соединительных проводников; *K*—установка транзисторов в отверстия галеты; *L*—соединение выводов транзисторов с элементами схемы путем нанесения золотых монтажных проводников; *M*—нанесение защитного слоя окиси кремния на готовую схему.

выводов непосредственно к галете в данном случае не предусматривалось: временные выводы в виде тонких проволок припаивались к соответствующим образом усиленным участкам монтажных проводников.

Последовательность операций при изготовлении микросхемы, целиком выполненной методом вакуумного осаждения, показана на фиг. 6.27. В качестве материала подложки было выбрано натриевое стекло, поскольку его легко достать в виде предметных стекол для микроскопов. Кроме того, коэффициент теплового расширения натриевого стекла ( $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ см/}^\circ\text{C}$ ) хорошо согласуется с коэффициентом никрома ( $12 \div 13 \cdot 10^{-6} \text{ см/}^\circ\text{C}$ ). Однако применение боросиликатного стекла было бы предпочтительней в связи с долговременной стабильностью его свойств в условиях повышенной влажности и низкой ионной проводимостью при высокой температуре.

Галеты размерами  $15,2 \times 15,2 \times 1,0$  мм нарезались из стеклянной пластины с помощью ультразвукового сверла, сконструированного таким образом, что одновременно с этой операцией в галете вырезались два отверстия размерами  $3,8 \times 3,8$  мм.

После очистки подложки на ее поверхность методом вакуумного осаждения наносили слой меди толщиной не менее 1000 Å. Подслоем служила пленка хрома толщиной около 5 Å.

Затем, используя метод покрытия защитным слоем светочувствительной эмульсии и травления хлорным железом, описанный выше (стр. 223), на поверхности галеты получали негативное изображение всей схемы. Галету помещали в установку для вакуумного испарения, где ее нагревали до  $350^\circ\text{C}$  и наносили на всю ее поверхность слой нихрома.

При последующем вытравливании меди хлорным железом получалась конфигурация микросхемы в пленке нихрома толщиной около 75 Å. Пленка оставалась нетронутой в тех местах, где требовались сопротивления, а также там, где она могла быть закорочена пленкой золота, если требовался токопроводящий слой. В последнем случае нихром выполнял роль подслоя для золотой пленки.

На следующем этапе изготовления галету и несколько масок закрепляли в двух специальных держателях, которые можно было поворачивать таким образом, что любая маска могла быть размещена точно между галетой и источником испаряемого материала. Держатели с галетами и масками устанавливали в камере для испарения, причем все манипуляции с держателями производились извне. В камере имелось четыре источника испаряемого материала, которые можно было менять местами, поворачивая их держатели. В установке можно было одновременно разместить и обработать до 8 галет. Расстояние между галетой и соответствующей маской составляло 3 мм, а это означало, что для получения резко очерченных кромок элементов схемы в камере необходимо было поддерживать вакуум ниже  $10^{-4}$  мм рт. ст.

Вслед за этим в определенной последовательности производилось осаждение пленок через соответствующие маски. Нижняя обкладка конденсатора наносилась путем испарения золота. Затем посредством установленного в вакуумной камере вспомогательного нагревателя галету нагревали до  $200^\circ\text{C}$  и наносили слой диэлектрика. В качестве диэлектрика для конденсатора наиболее подходящей оказалась окись кремния, которую получали испарением смеси кремния с его двуокисью. Галете давали остыть, после чего осаждали верхнюю алюминиевую обкладку конденсатора. Следующая операция заключалась в осаждении на определенные участки нихромовой пленки пленочных проводников из золота.

Галету затем извлекали из вакуумной камеры и в квадратные отверстия вставляли транзисторы (см. стр. 244), закрепляемые на месте эпоксидной смолой, которая, заполняя зазоры, служила также перемычкой, позволяющей наносить проводники для соединения с выводами транзистора. После этого галету снова устанавливали в вакуумную камеру для нанесения проводников, соединяющих монтаж с выводами транзистора. Конечная операция процесса заключалась в напылении защитной пленки окиси кремния на поверхность холодной галеты.

Несколько позже фирма получила возможность работать с герметизированными транзисторами фирмы Mullard. Применение этих транзисторов потребовало изменения описанной выше компоновки элементов схемы, так как выводы транзисторов нужно было припаивать к усиленным металлическим участкам микросхемы. Схемы, изготовленные таким методом, удовлетворительно работали в лабораторных условиях в течение нескольких тысяч часов.

Фирма продолжает работу над изготовлением микросхем, совершенствуя, в частности, конструкции выводов микросхем, межсхемные соединения, методы окончательной герметизации и проводя климатические испытания готовых схем.

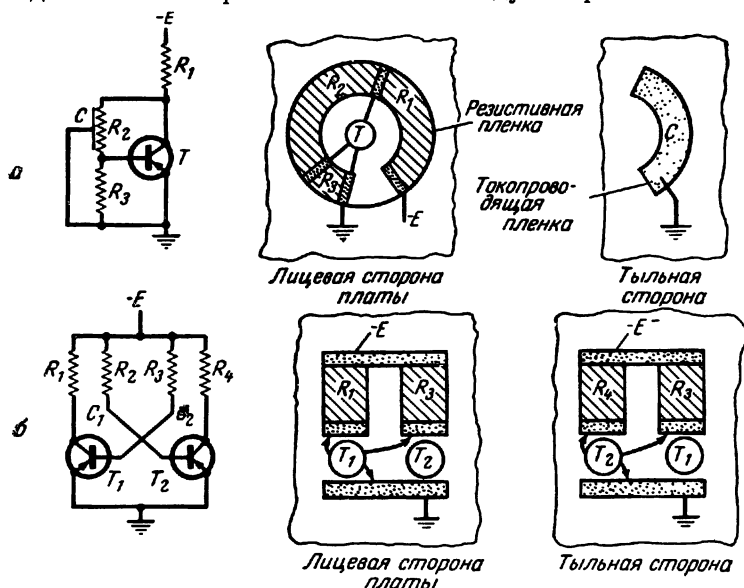
Фирма *Varo Manufacturing Co. Inc.* Эта фирма разработала несколько микросхем, две из которых, включающие цепи с распределенными параметрами, описаны ниже [113].

Первая представляет собой *RC*-генератор, вторая — мульти-вibrator (фиг. 6. 28).

Три расположенных кольцом сопротивления наносятся как единая резистивная пленка, на которую осаждают токопроводящие контакты для подсоединения выводов транзистора. На участок тыльной стороны платы, находящийся под сопротивлением  $R_2$ , осаждают токопроводящую заземленную пленку, получая в результате цепь с распределенными параметрами. Сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  определяют соответствующую точку смещения транзистора. Выводы транзистора, вставляемого в отверстие в центре платы, припаиваются к пленочным контактам. В описании [113] не приводятся подробных экспериментальных данных, касающихся разработанных микросхем, однако подходящим методом изготовления таких схем может быть следующий. Подложка выполняет роль диэлектрической прокладки конденсатора, следовательно, требуется керамический материал с высокой диэлектрической постоянной. Сопротивления образуются путем вакуумного испарения и осаждения никрома через соответствующие маски, а контакты, также осажденные вакуумным испарением, можно выполнить из золота.

В схеме мультивибратора (фиг. 6.28) имеется четыре сопротивления, расположенных попарно на обеих сторонах платы так, что вторая пара находится точно под первой. Между сопротивлениями

образуется емкостная связь через подложку (цепь с распределенными параметрами, фиг. 6.8, б). Пленочные сопротивления  $R_1$  и  $R_4$  выполняют роль нагрузочных сопротивлений транзистора, а сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  регулируют ток смещения. Межкаскадная связь достигается через емкость  $C_1$  между сопротивлениями  $R_1$



Фиг. 6. 28. Типовые схемы, включающие цепи с распределенными постоянными.

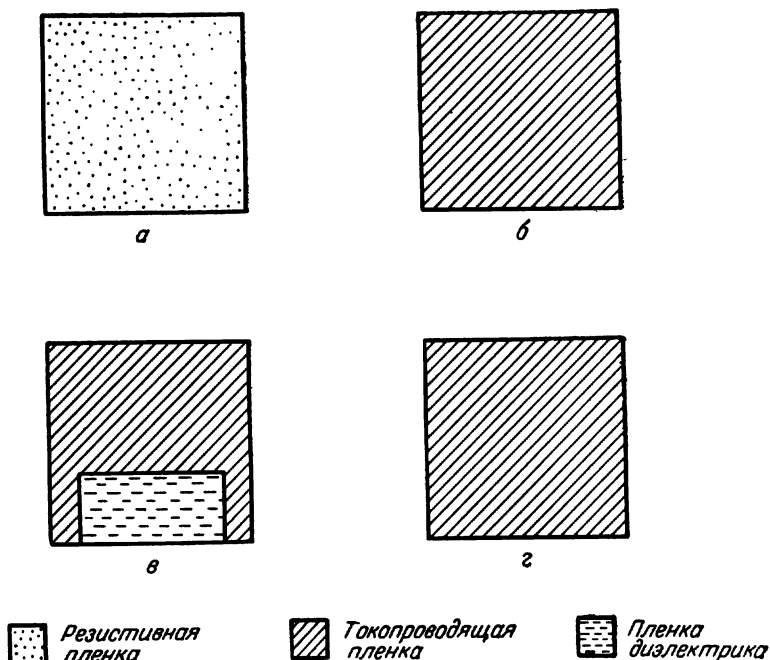
а—схема генератора; б—схема мультивибратора.

и  $R_2$  и емкость  $C_2$  — между сопротивлениями  $R_3$  и  $R_4$ . Выводы припадающих здесь обычных транзисторов припаиваются к контактам, нанесенным на соответствующие места резистивных пленок.

*Фирма Haloid Xerox.* Метод, применяемый этой фирмой [120], заключается в том, что микросхемы изготавливаются путем химического травления заранее нанесенных на керамические галеты многослойных пленок.

Основным элементом этой системы является плата с резистивной емкостью, состоящая из керамической галеты, на которую методом вакуумного осаждения нанесены токопроводящая, резистивная и диэлектрическая пленки. Этот метод отличается от обычного метода изготовления микросхем тем, что отдельные слои наносятся на подложку не в определенной геометрической конфигурации, а, за исключением пленки диэлектрика, осаждаются на всю поверхность платы без применения маски. Каждый последующий слой,

нанесенный методом вакуумного осаждения, полностью перекрывает предыдущий. Конфигурация отдельных слоев определяется выборочным травлением после извлечения платы из вакуумной камеры.



Фиг. 6. 29. Последовательность операций при изготовлении платы с  $RC$ -цепью.

*а*—нанесение резистивной пленки; *б*—нанесение токопроводящей пленки; *в*—нанесение пленки диэлектрика; *г*—нанесение токопроводящей пленки.

При изготовлении плат с резистивной емкостью соблюдается следующий порядок операций. Керамическая галета помещается в установку для вакуумного испарения, снабженную тремя отдельными испарительными головками, по одной на каждый из трех материалов, предназначенных для испарения. Первой (фиг. 6.29, *а*) на галету наносится резистивная пленка, толщина которой регулируется по контрольному квадрату. Далее осаждают слой токопроводящего материала (фиг. 6.29, *б*). Затем перед галетой помещают маску и наносят пленку диэлектрика (фиг. 6.29, *в*). Применение маски не преследует цели образовать какой-то элемент схемы, она только ограничивает образование пленки определенным участком галеты. Последним наносят второй токопроводящий слой



(фиг. 6.29, з). Следует заметить, что все пленки наносятся при поддержании в камере вакуума. При первых экспериментах в качестве резистивного материала использовался хром, токопроводящего — алюминий и в качестве диэлектрика — окись кремния.

Плата с многослойным покрытием превращалась в функциональную  $RC$ -цепь в процессе последовательных операций наложения трафаретов и травления. Нанесение трафаретов осуществлялось ксерографическим методом, включающим следующие операции [100]:

1. Экспонирование положительно заряженной селеновой пластины через изображение схемы желаемой конфигурации. В результате на поверхности селеновой пластины получают фотографически точное скрытое электростатическое изображение схемы.

2. Проявление электростатического изображения путем нанесения на селеновую пластину отрицательно заряженного пластмассового порошка. Частицы порошка прилипают к пластине лишь на участках скрытого изображения схемы.

3. Перенос контактным способом образованного порошком изображения схемы на галету, тыльная сторона которой заряжена положительно. Отрицательно заряженные частицы переходят с поверхности селеновой пластины на поверхность галеты.

4. Закрепление изображения, полученного на галете, в парах растворителя.

Накладывание порошкового трафарета ксерографическим методом — весьма быстрый процесс, и образование защитного слоя изображения на галете занимает около 2 мин.

Начальным этапом изготовления платы с  $RC$ -цепью является осаждение на токопроводящую пленку защитного слоя изображения, соответствующего верхним обкладкам конденсаторов и соединительным проводникам. Следующий этап — травление, в ходе которого удаляются открытые участки пленки, но остаются нетронутыми защищенные участки. Сопротивления образуют вторичным осаждением защитного слоя и последующим травлением, удаляющим открытые участки резистивной пленки. Завершающей операцией изготовления схемы является удаление защитного слоя.

Примечательно, что здесь нет необходимости вытравливать пленку диэлектрика при образовании конденсаторов, поскольку емкость плоского конденсатора пропорциональна площади меньшей обкладки.

Используя принцип платы с резистивной емкостью, можно изготавливать схемы, включающие сопротивления с номиналами от нескольких ом до 1 мгом и конденсаторы с емкостью от нескольких пикофард до  $\sim 0,02$  мкф. Указанные диапазоны значений подобны получаемым при изменении геометрической формы и размеров пленок путем применения масок по методу вакуумного осаждения,

В работе [120] описывается модульный метод, используемый для межсхемного соединения плат с  $RC$ -цепью. Эти платы имеют контактные ножки, вставляющиеся в гнезда общей платы с нанесенным печатным монтажом межсхемных соединений. Отдельно герметизированные транзисторы и диоды припаиваются к соответствующим участкам печатного монтажа платы межсхемных соединений.

*Фирма Hughes Aircraft Co.* Технические приемы конструирования микросхем, предложенные этой фирмой, отличаются от рассмотренных выше тем, что все элементы схемы, как активные, так и пассивные, представляют собой отдельные устройства, вставляемые в отверстия подложки. Такие конструкции [116] были разработаны как один из методов включения в функциональные схемы «точечных» диодов и транзисторов, описанных выше (стр. 246). Эти активные элементы схемы, каждый толщиной 0,8 мм, используются в сочетании с пассивными элементами, имеющими ту же толщину. Детали вставляются в специальные отверстия платы с двусторонним расположением печатных медных проводников, при этом на лицевой и тыльной ее сторонах остаются открытыми лишь верхние и нижние торцы диодов и транзисторов. Очевидно, толщина платы также должна составлять 0,8 мм. Отверстия в плате расположены на расстоянии 2,5 мм одно от другого и имеют вырез, соответствующий по форме дополнителю осевому выступу транзистора, что позволяет вставлять полупроводниковый триод такого типа в любое отверстие платы.

Полоски проводников печатного монтажа частично перекрывают каждое отверстие в двух диаметрально противоположных направлениях. Так как каждое отверстие сверху и снизу перекрывается двумя проводниками, необходимо было найти метод, позволяющий вставлять детали в отверстия. Это достигается путем расслаивания платы на две равные по толщине пластины. Одну помещают на стол лицевой стороной вниз и в отверстия вставляют детали в соответствии с предварительно вытравленной схемой, затем второй пластиной накрывают вставленные детали и обе половины скрепляют.

Последней операцией является припаивание перекрывающих отверстие проводников к вставленным в плату деталям. В тех случаях, когда требования надежности не очень жестки, торцы деталей и нависающие над отверстием участки проводников могут быть покрыты слоем припоя еще до сборки; тогда припаивание представляет завершающую операцию монтажа, после чего плату покрывают лаком. Для достижения максимальной надежности вместо пайки можно применять точечную сварку.

Для предварительной оценки плотности монтажа, достигаемой при использовании микросхем описанной конструкции, был выбран простой усилитель звуковой частоты на двух транзисторах. Этот

блок имеется также в микромодульном исполнении фирмы R. C. A., что позволяет провести прямое сравнение обоих методов.

Вся схема усилителя уместается на описываемой плате размерами  $9,1 \times 11,7 \times 1,1$  мм и занимает объем  $122 \text{ мм}^3$  при плотности монтажа 73,4 детали на  $1 \text{ см}^3$ , в то время как плотность монтажа эквивалентной микромодульной конструкции составляет лишь 49,8 детали на  $1 \text{ см}^3$ .

*Фирма Bell Telephone Laboratories.* Метод изготовления микросхем, разработанный фирмой, имеет то преимущество, что как сопротивление, так и конденсаторы выполняются из одной и той же пленки металла, благодаря чему значительно уменьшается количество необходимых соединительных элементов. Согласно описанию [114], тантал, по-видимому, обладает наилучшими свойствами и наиболее пригоден для изготовления микросхем по этому методу. Использование анодированного напыленного тантала в качестве диэлектрика для конденсаторов описано выше (стр. 230). Сопротивления могут быть выполнены в виде зигзагообразных линий, также из напыленного тантала (стр. 228).

В качестве материала подложки применяется стекло или керамика. При использовании керамики участки, предназначенные для конденсаторов, следует полировать. Поскольку тантал исключительно стоек к воздействию едких химических веществ, обычные способы травления с применением фоточувствительной эмульсии в данном случае непригодны, а желаемая конфигурация элементов схемы достигается методом осаждения меди (стр. 223). Вначале напыляют всю схему, после чего, применяя маски, покрывают оксидной пленкой нижнюю обкладку конденсатора. Верхние обкладки конденсаторов осаждают через маски методом вакуумного осаждения металла, например золота или меди. Соединительные проводники могут быть получены путем напыления испаренного металла на соответствующие участки танталовой пленки. Металлические пленки следует наносить также на те участки, где в дальнейшем потребуется пайка.

Изготовленные фирмой микросхемы на подложках толщиной 1,3 мм включали сопротивления с номинальными значениями до 121 ком и конденсаторы емкостью 0,01 мкф. Транзисторы и диоды крепятся на подложке особо. В качестве примера чрезвычайно высокой четкости конфигурации, которой удалось добиться при нанесении медной пленки через маску, можно указать, что ширина зигзагообразных линий сопротивлений и промежутков между двумя соседними линиями составляла лишь 0,1 мм.

*Фирма I. B. M.* Технология изготовления фирмой тонкопленочных микросхем заключается в последовательном нанесении методом вакуумного испарения нескольких пленок, образующих многослойную конструкцию; при этом токопроводящие слои отделяются один

от другого изолирующими пленками. Пассивные элементы осаждаются на стеклянную плату размерами  $7,6 \times 7,6$  мм. Для образования сопротивлений используется нихром, для изолирующих слоев и диэлектрических прокладок конденсаторов — окись кремния, для соединительных проводников — алюминий. Эта плата крепится к плате большего размера ( $15,2 \times 15,2$  мм), на которой смонтированы активные элементы и выводы [50].

Этапы изготовления многослойной коммутационной схемы типа ИЛИ иллюстрируются картой последовательности технологических операций (фиг. 6.30). Как видно, соединение между слоями осуществляется через зазоры в изолирующих слоях. Все операции процесса изготовления микросхемы могут выполняться за один цикл работы вакуумного испарителя, при этом последовательная смена масок перед платой производится извне посредством специального механизма.

Транзисторы и диоды в виде открытых активных элементов подсоединяются к тонкопленочной микросхеме посредством тонких проволок, прикрепляемых способом термокомпрессии к электродам транзистора или диода и к пленкам, напыленным на стеклянную плату. Малая плата с нанесенной многослойной схемой закрепляется на плате-основании большего размера либо путем спайки предварительно луженных участков, либо посредством токопроводящего связующего вещества,

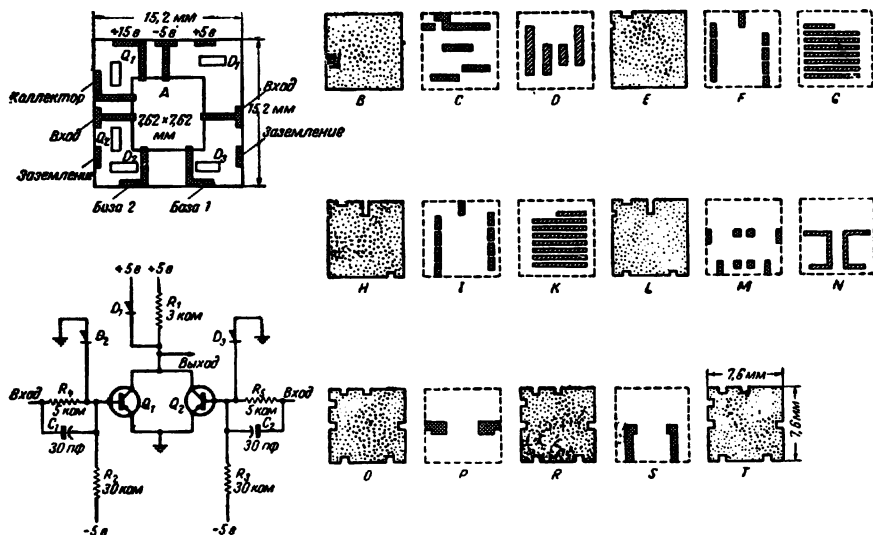
*Стэнфордский исследовательский институт.* Принципы микроминиатюризации схем, применяемые институтом, значительно отличаются от описанных выше. Поставленная цель заключалась в достижении плотности монтажа, близкой к  $155 \cdot 10^6$  активных элементов на  $1 \text{ см}^2$  платы, что сравнимо с плотностью размещения нейронов в мозге человека [50, 129].

Сущность этого принципа микроминиатюризации сводится к образованию элементов схемы в толще осажденной пленки путем использования различных методов механической микрообработки. Так, одним из предложенных активных элементов является тетрод, в котором предусмотрено управление холодной эмиссией из катода к аноду. Тетрод должен иметь шесть электродов, выступающих в вакуумную полость, внешние размеры которой меньше размеров куба с длиной ребра 1 мк. Специалисты института полагают, что, применяя специальные технологические приемы, в тонкую пленку можно встроить множество таких элементов.

Различные проблемы, связанные с изготовлением элементов микронного размера и электрическим соединением их, были изучены в институте теоретически и начаты предварительные экспериментальные работы над методами механической микрообработки.

*Фирма Mullard.* В качестве оборудования, которое могло служить пробным камнем для подтверждения эффективности исполь-

зуемых методов, был выбран цифровой интегратор. Требовалась плотность монтажа около  $18,3$  элемента в  $1 \text{ см}^2$  при общем объеме  $131 \div 164 \text{ см}^3$ . Интегратор необходимо было выполнить из нескольких блоков, которые можно было бы снимать и заменять новыми в случае выхода из строя. Каждый блок мог содержать не более 100 транзисторов с вспомогательными элементами. Таким образом,



Фиг. 6. 30. Маски, используемые фирмой I.V.M. при изготовлении многослойной тонкопленочной микросхемы.

A — участок ( $7,6 \times 7,6 \text{ мм}$ ) для размещения пассивных элементов; соединительные проводники выполняются из алюминия.

B — слой 1. Пленка  $\text{SiO}_2$ , служащая подслоем для микросхемы.

C — слой 2. Соединительные участки; материал Al.

D — слой 3. Сопротивление  $R_1$ ; сопротивление квадрата  $200 \text{ ом}$ ; мощность рассеяния  $\sim 75 \text{ мвт}$ ; материал — нихром.

E — слой 4. Изолирующая пленка  $\text{SiO}_2$ .

F — слой 5. Соединительные участки; материал Al.

G — слой 6. Сопротивление  $R_2$ ; сопротивление квадрата  $200 \text{ ом}$ ; мощность рассеяния  $\sim 0,80 \text{ мвт}$ ; материал — нихром.

H — слой 7. Изолирующая пленка  $\text{SiO}_2$ .

I — слой 8. Соединительные участки; материал Al.

K — слой 9. Сопротивление  $R_3$ ; сопротивление квадрата  $200 \text{ ом}$ ; мощность рассеяния  $\sim 0,80 \text{ мвт}$ ; материал — нихром.

L — слой 10. Изолирующая пленка  $\text{SiO}_2$ .

M — слой 11. Соединительные участки; материал Al.

N — слой 12. Сопротивления  $R_4$  и  $R_1$ ; сопротивление квадрата  $200 \text{ ом}$ ; максимальная мощность рассеяния  $5 \text{ мвт}$ ; материал — нихром.

O — слой 13. Изолирующая пленка  $\text{SiO}_2$ .

P — слой 14. Нижние обкладки конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ ; материал Al.

R — слой 15. Диэлектрическая прокладка конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ ; материал  $\text{SiO}_2$ .

S — слой 16. Верхние обкладки конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ ; емкость  $4650 \text{ пф}$  на  $1 \text{ см}^2$ ; материал Al.

T — слой 17. Верхний защитный слой микросхемы; материал  $\text{SiO}_2$ .

Примечание. Помимо 17 показанных слоев, на плату напыляли алюминиевые проводники для соединения различных вводов и выводов.

в данном случае возможность замены отдельных плат не обязательна, хотя при изготовлении оборудования более общего назначения это качество почти наверное было бы необходимым.

**Потребляемая мощность.** Весьма важно, чтобы мощность рассеяния на каждую схему поддерживалась на минимальном уровне, отвечающем требованию надежной работы.

В свете этих требований был рассмотрен ряд логических схем:

1) логическая схема на транзисторах с непосредственной связью,

2) резистивная логическая схема на транзисторах и

3) логическая схема на диодах, переключаемая малыми уровнями или током базы.

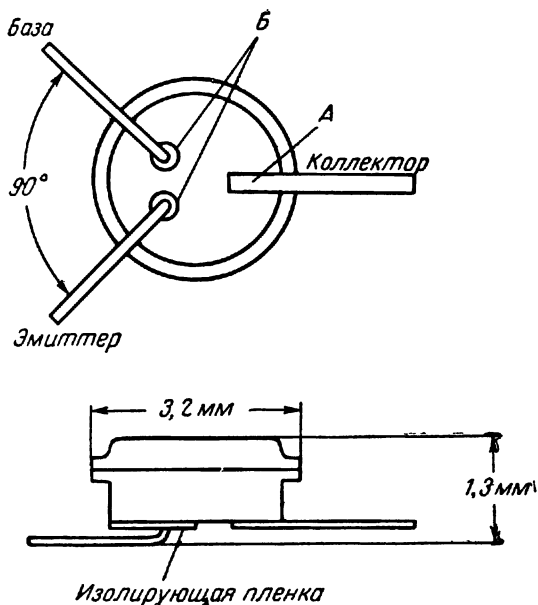
Если рассматривать эти схемы с точки зрения изготовления их элементов, становятся очевидными следующие различия.

При изготовлении логической схемы на транзисторах с непосредственной связью большая часть площади галеты используется для размещения транзисторов. Однако все сопротивления и конденсаторы имеют низкие номинальные значения с допусками 10 и 20% соответственно, вследствие чего можно добиться высокой плотности монтажа. Кроме того, мощность рассеяния схемы очень мала ( $\sim 3$  мвт) и, по-видимому, никаких трудностей, связанных с дрейфом характеристик элементов схемы из-за перегрева, не возникает.

В резистивной логической схеме используется меньше транзисторов, но требуются сопротивления с допуском, не превышающим 5%. Помимо этого, в каждой схеме по крайней мере одно сопротивление должно иметь номинальное значение порядка десятков килоом. Такое сопротивление, выполненное даже в виде зигзагообразной линии, занимает на галете относительно много места. Рассеяние мощности в основной схеме также довольно велико, поскольку для того, чтобы иметь возможность присоединить на вход или выход основной схемы, например, 5 цепей, требуется мощность около 20 мвт.

При использовании логической схемы, переключаемой малыми уровнями или током базы, как и при изготовлении логической схемы на транзисторах с непосредственной связью, много места на галете занимают транзисторы и диоды. Все сопротивления должны иметь довольно низкие номиналы (в пределах 2—10 ком) и допуски, не превышающие 5%. Однако благодаря оригинальной компоновке этой схемы можно значительно расширить допустимые отклонения от номинала, и в действительности допуск схемы может достигать 20%. Это происходит потому, что главное требование заключается в том, чтобы относительные величины сопротивлений в схеме поддерживались в пределах 5%, однако их абсолютные значения совсем не столь критичны. Отсюда, поскольку все сопротивления наносятся на галету одновременно, не составляет большого труда

поддерживать относительные значения в пределах не более 5%, а абсолютные — в пределах 20%. Мощность рассеяния в этой схеме составляет около 5 мвт на каскад, и, следовательно, трудностей, связанных с перегревом, быть не должно.



Фиг. 6. 31. Микроминиатюрный транзистор фирмы Mullard.

А — соединение точечной сваркой; Б — уплотняющие стеклянные изоляторы.

Микроминиатюрные транзисторы и диоды. Микроминиатюрные транзисторы и диоды, изготавливаемые фирмой Mullard, были кратко описаны в предыдущих разделах. Для обеспечения максимальной надежности эти полупроводниковые устройства тщательно герметизируются. Более подробное их описание приводится ниже.

На фиг. 6.31 показан внешний вид транзистора и диода фирмы Mullard. Высота корпуса такого полупроводникового устройства составляет 1,3 мм, общий диаметр 3,2 мм. Выводы эмиттера и базы расположены на верхней поверхности корпуса и проходят наружу через уплотняющие стеклянные изоляторы. Выводы, выступающие из стеклянных изоляторов, согнуты под прямым углом и плотно прилегают к торцу корпуса. Изоляция их от корпуса осуществляется посредством тонкой пленки смолы, которая одновременно закреп-

ляет выводы в нужном положении. Коллектор (в виде капли) транзистора находится в данной конструкции триода в электрическом контакте с корпусом, поэтому вывод коллектора приварен к верхнему торцу корпуса посредством точечной сварки. Расположение выводов показано на фиг. 6.31.

Такие полупроводниковые устройства были изготовлены в большом количестве и показали исключительную прочность. Никаких трудностей, связанных с припаиванием выводов триодов и диодов к монтажным проводникам микросхемы, не встречалось, несмотря на то, что выводы выступали за кромку корпуса лишь на 1 мм.

В настоящее время выпускаются микроминиатюрные варианты транзистора ОС42 и диода ААЗ12. Эти образцы были выбраны с целью изготовления микросхемы цифрового интегратора, а также изучения и решения проблемы герметичного капсулирования.

Конструкции пассивных элементов схем. Все пассивные элементы схем получают путем осаждения испаренных в вакууме металлов и диэлектриков на стеклянную подложку через маски, определяющие их конфигурацию. После напыления пассивных элементов устанавливаются в соответствующие места транзисторы и диоды и припаиваются их выводы. Затем герметизируют пакеты галет, образуя либо готовое устройство, либо отдельные его блоки.

Величины сопротивлений определяются используемым материалом, толщиной и геометрией пленки, поэтому широкий диапазон значений сопротивлений может быть получен просто путем варьирования формы и размеров образцов.

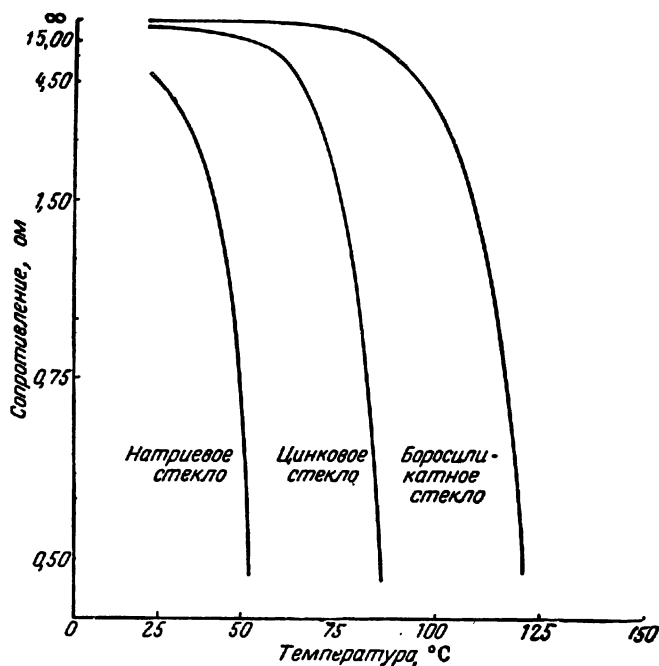
Конденсаторы изготавливают, нанося методом вакуумного осаждения сначала нижнюю металлическую обкладку, затем слой диэлектрика и, наконец, металлическую пленку, образующую верхнюю обкладку. Емкость конденсатора зависит от материала, используемого в качестве диэлектрика, его толщины и площади обкладок.

**П о д л о ж к а.** В качестве материала подложки было выбрано стекло, наиболее подходящий тип которого был определен в результате исследований. Интересно отметить, что натриевое стекло, чаще всего имеющееся в распоряжении, оказывается неудовлетворительным по двум причинам. Высота неровностей на его поверхности достигает  $50 \text{ \AA}$  и в значительной степени меняется от образца к образцу. Так как размер неровностей в этом случае имеет тот же порядок, что и толщина резистивной пленки, трудно получить равномерную по толщине пленку, а следовательно, и сопротивления с малыми допусками.

Кроме того, натриевое стекло отнюдь не является нейтральным, поскольку под действием электрического поля в нем начинается миграция ионов натрия, причем с повышением температуры этот



процесс значительно усиливается. Явление миграции ионов натрия имеет место в условиях абсолютного отсутствия влаги и никак не связано с дополнительным действием электролиза, возникающего на поверхности влажного натриевого стекла. Удельная проводимость стекла почти полностью зависит от присутствия подвижных

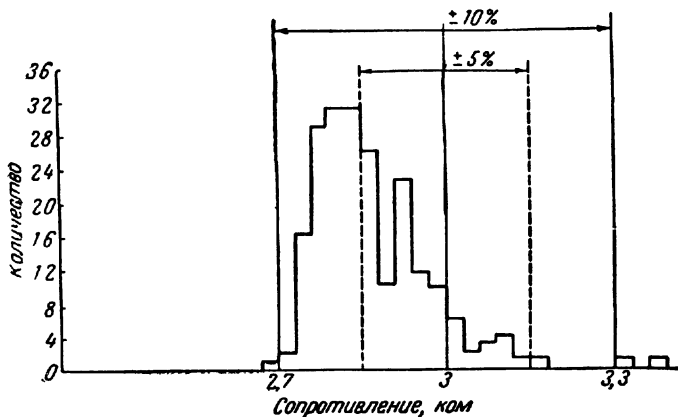


Фиг. 6.32. Зависимость электрического сопротивления различных типов стекла от температуры.

ионов натрия, поэтому измерение этого параметра может помочь в выборе наиболее подходящего типа стекла. На фиг. 6.32 представлены кривые зависимости удельного электрического сопротивления трех типов стекла от температуры. Кривые показывают, что натриевое стекло наименее пригодно для использования в качестве материала подложки, особенно если предполагаемая рабочая температура составит не менее 100° C. Наиболее подходящим для этой цели оказывается боросиликатное стекло.

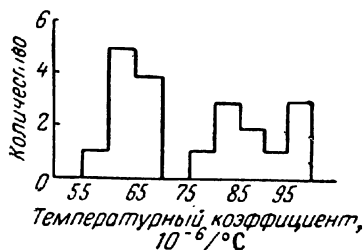
**Сопротивления.** В качестве резистивного материала используется нихром, осажденный в вакууме из паровой фазы. Изготавливаются сопротивления с допуском  $\pm 5\%$  (без подгонки путем соскабливания части пленки и т. п.) и температурными коэффици-

ентами порядка  $100 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . Номинальную мощность этих сопротивлений устанавливать довольно трудно, так как многое зависит от правильности нанесения сопротивления на плату схемы.



Фиг. 6.33. Типичное распределение значений сопротивлений в партии 200 штук.

Одним из путей определения этого параметра может служить практически допустимая мощность рассеяния на  $1 \text{ см}^2$  резистивной пленки. Так, сопротивления с мощностью рассеяния  $4 \text{ вт/см}^2$  работали при комнатной температуре, а также при повышенной температуре окружающей среды без признаков ухудшения в течение длительного времени.



Фиг. 6.34. Типичное распределение температурных коэффициентов сопротивлений в партии 200 шт.

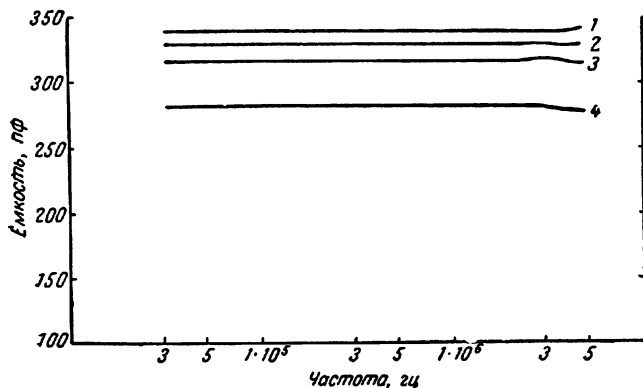
Результаты измерения величины сопротивлений и их температурных коэффициентов для партии, состоявшей приблизительно из 200 штук, показаны на фиг. 6.33 и 6.34.

**Конденсаторы.** Из различных диэлектриков, которые потенциально могут быть использованы при изготовлении тонкопленочных конденсаторов, основная часть работы была проведена с использованием в качестве диэлектрика окиси кремния.

Емкость конденсатора в микросхеме определяется толщиной пленки диэлектрика, ее диэлектрической проницаемостью и площадью между обкладками.

Емкость конденсатора в микросхеме определяется толщиной пленки диэлектрика, ее диэлектрической проницаемостью и площадью между обкладками. Емкость изготовленных фирмой типовых

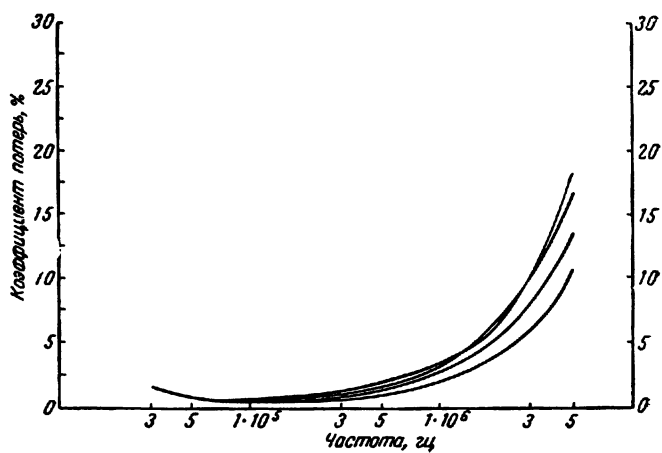
конденсаторов составляла около  $0,01 \text{ мкф/см}^2$ , коэффициент потерь в диэлектрике (при частоте  $1\,500 \text{ гц}$ )  $0,1 \div 1,0\%$  и омическое сопротивление утечки  $10^9 \text{ ом}$ . Емкость на  $1 \text{ см}^2$  можно по желанию варьировать, изменяя толщину слоя диэлектрика в пределах приблизительно  $0,001\text{—}0,03 \text{ мкф/см}^2$ , в то время как другие параметры остаются более или менее постоянными; главная особенность здесь состоит в том, что рабочее напряжение более тонкого слоя диэлектрика ниже и составляет приблизительно  $25 \text{ в}$ .



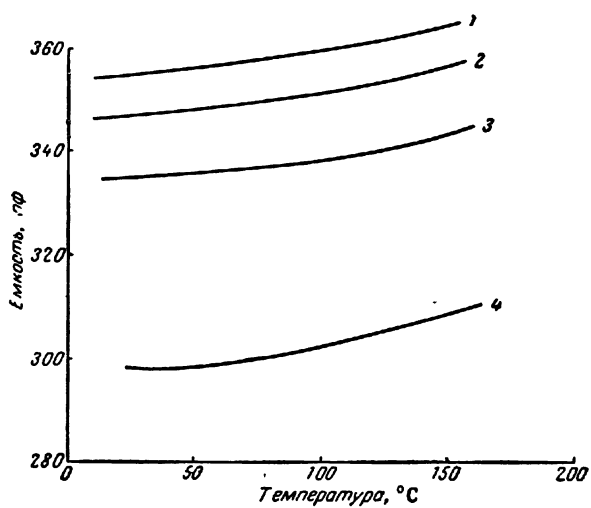
Фиг. 6.35. Зависимость емкости конденсаторов от частоты

Для оценки элементов микросхем было изготовлено большое количество конденсаторов. Измерения емкости и коэффициента потерь в диэлектрике этих конденсаторов производились при частотах в диапазоне  $50 \text{ гц} — 5 \text{ Мгц}$ . На фиг. 6.35 показаны полученные в результате измерений типичные кривые зависимости емкости от частоты, на фиг. 6.36 — зависимости коэффициента потерь в диэлектрике от частоты для той же партии конденсаторов. При частотах  $0 \div 1,0 \text{ Мгц}$  коэффициенты потерь в диэлектрике значительно ниже, чем у керамических конденсаторов такой же емкости, выполненных на тонких галетах с высокой диэлектрической постоянной. Температурный коэффициент емкости измерялся в пределах  $25\text{—}100^\circ \text{С}$ . На фиг. 6.37 показана зависимость от температуры емкости четырех конденсаторов на типовых подложках, при этом температурный коэффициент для диапазона температур  $20\text{—}100^\circ \text{С}$  находился в пределах  $(150 \div 260) \cdot 10^{-6}/^\circ \text{С}$ .

Результаты этих исследований, несмотря на то, что они проводились в течение относительно короткого промежутка времени, весьма многообещающи и дают возможность сделать ряд предварительных выводов. В условиях чрезвычайно высокой относительной



Ф и г. 6.36. Зависимость коэффициента потерь в диэлектрике от частоты.



Ф и г. 6.37. Зависимость емкости конденсаторов от температуры.

влажности и температурных колебаний незащищенные конденсаторы ухудшают свои качества, если на них подается напряжение постоянного тока, и претерпевают очень незначительные изменения при питании переменным током. Хранение без нагрузки приводит лишь к очень малым изменениям их емкости и сопротивления утечки.

В нормальных лабораторных условиях температуры и относительной влажности конденсаторы проявили исключительную стабильность как при постоянном, так и при переменном напряжении до 20 в.

**Методы соединений и герметизация.** Для соединения элементов микросхемы с монтажными проводниками в настоящее время применяется тонкожуженая медная проволока, припавиваемая мягким припоем к токопроводящим участкам вблизи кромок подложки. Пайку можно производить либо электропаяльником с весьма тонким жалом, либо неконтактным методом при помощи нагрева струей горячего газа. В обоих случаях полученные соединения отличаются исключительной прочностью и надежностью электрического контакта. Возможны и другие методы соединения элементов микросхем, например термическое сжатие, сварка ультразвуком и другие. Соединения, полученные этими методами, уступают пайке мягким припоем по механической прочности, но обеспечивают весьма надежный электрический контакт. Однако прежде чем рассматривать эти способы как реальную замену пайки мягким припоем, необходимо длительное изучение их.

Межсхемные соединения можно выполнять, применяя либо печатный монтаж, либо отдельные провода (как в микромодульной технике), либо другие подобные методы. Выбор метода диктуется степенью сложности оборудования, требующейся миниатюризацией, а также, если необходимо, заменяемостью отдельных микросхем.

Герметизации подвергаются или отдельные микросхемы, или целые пакеты микросхем. При герметизации отдельных микросхем используемые приемы зависят от назначения схемы и могут включать изоляцию каждой микросхемы в плоских стеклянных капсулах, покрытие соответствующей смолой или другим защитным составом, а также ряд других средств.

Пакеты микросхем, составляющие готовый блок, можно капсулировать, применяя металлические футляры со стеклянными изоляторами для пропускания выводов и полной герметизацией при заполнении капсулы инертным газом. При некоторых применениях может оказаться необходимым заливать капсулу, специальным компаундом, обеспечивающим опору для плат и ослабляющим ударные и вибрационные нагрузки.

Описанные выше различные методы изготовления микросхем были выбраны по той причине, что они иллюстрируют различный подход к достижению одной и той же конечной цели — получению

функциональной схемы, размещенной внутри или на поверхности небольшой платы. Но здесь следует также упомянуть о ряде других фирм, опубликовавших отчеты о работе над микросхемами. Применяемые ими методы конструирования микросхем подобны приведенным выше и описаны в литературе [121—123, 132].

Пока еще не имеется данных по надежности ни одной из систем микроминиатюрных схем, вместе с тем, как указано во введении, микросхемы будут внедряться в промышленность только в том случае, если их надежность будет по меньшей мере равна надежности схем, собранных из обычных деталей. Можно полагать, что микросхемы будут высоконадежными, однако до настоящего времени количество изготовленных и испытанных образцов недостаточно, чтобы располагать сколько-нибудь значительными статистическими данными.

## Глава 7

### МИКРОМОДУЛЬНЫЙ СПОСОБ МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИИ

*Программа разработки микромодулей.* Эта программа была подготовлена Корпусом связи армии США в сотрудничестве с фирмой R. C. A., являющейся ведущим подрядчиком по осуществлению этой программы. Программа была рассчитана на 4 года и начала

Годы	1	2	3	4
1-й этап: разработка микроэлементов и микромодулей				
		2-й этап: разработка блоков и отдельных видов оборудования на микро- модулях		
		3-й этап: разработка производственного оборудо- вания для изготовления микромодулей		

Ф и г. 7.1. План выполнения программы разработки микромодулей.

выполняться в апреле 1958 г. План выполнения четырехлетней программы с указанием оборудования, которое предполагалось разработать в течение каждого из двухлетних этапов, представлен на фиг. 7.1.

#### Детали, используемые в качестве микроэлементов

Выбор размеров микроэлементов (7,6×7,6 мм) был обусловлен инженерными соображениями, основанными на изучении конструкций деталей и производственных возможностей. На выбор принятой

геометрии микроэлементов оказали свое влияние допустимые мощность рассеяния на микромодуль (0,5—1,0 *вт*), рабочие частоты (до 100 *Мгц*), максимальное напряжение (75 *в*) и возможность применения в схемах общего назначения (фильтрах и генераторах промежуточных, высоких и звуковых частот и логических схемах электронно-вычислительных устройств). Размеры квадрата 7,6×7,6 *мм* оказались наименьшими, при которых на галетах могут быть размещены многие элементы с желаемыми уровнями значений, включая электролитические конденсаторы с высокой диэлектрической постоянной, кварцевые генераторы на 7 *Мгц* и выше, катушки с индуктивностью до 10 *мгн*, транзисторы, диоды, керамические резонаторы, стеклянные конденсаторы, металлопленочные сопротивления и даже некоторые электромеханические детали, такие, как потенциометры и подстроечные конденсаторы. На галетах такого размера свободно умещаются металлопленочные сопротивления с номиналом до 1 *ом*; такие сопротивления пригодны для применения почти в любых схемах на транзисторах. На одной галете размещается до четырех микросопротивлений, изготовление которых теперь не представляет трудности.

Выбранные размеры галеты позволяют также использовать любую керамическую подложку (из глинозема, ферритов, стекла, стеатита) толщиной всего 0,25 *мм*, в то время как при размерах платы 12,7×12,7 *мм* толщина ее должна составлять не менее 0,5 *мм*. Эти требования к толщине подложки вытекают из весьма жестких условий, предъявляемых к ровности ее поверхности и соответствующей прочности, необходимых для возможности машинной обработки. Поскольку большинство микроэлементов выполняются двумерными (пленочные сопротивления, полученные методом вакуумного осаждения, конденсаторы и монтажные проводники), а ряд других деталей (кристаллы, керамические фильтры, танталовые конденсаторы с твердым электролитом) имеют размеры, один из которых весьма мал, важно, чтобы подложка не занимала сколь угодно значительного в процентном отношении объема. Более тонкая (0,25 *мм*) подложка позволяет также добиваться более высоких значений емкости прецизионных конденсаторов и конденсаторов с температурной компенсацией при низкой диэлектрической постоянной их диэлектрика и увеличивать емкость блокировочных и разделительных конденсаторов, имеющих диэлектрик с высокой диэлектрической постоянной.

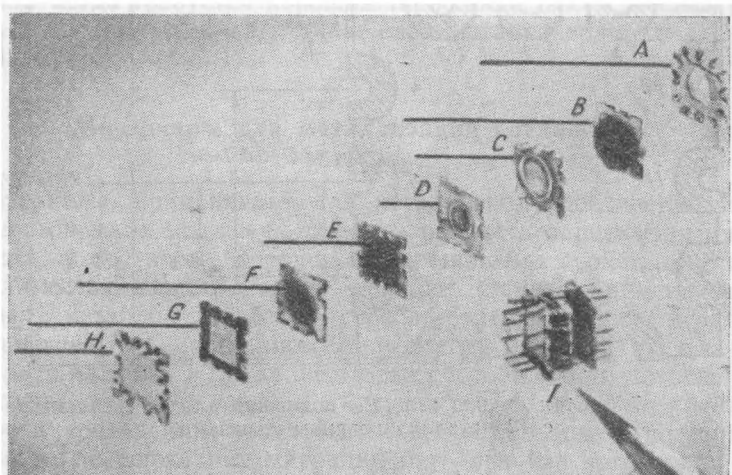
Предполагается, что до 70—80% всех электронных схем можно в конечном счете выполнять непосредственно в форме микромодулей. Эффективность микромодульной системы не будет снижаться и в случае необходимости применения специальных крупногабаритных деталей, если их размеры кратны основному размеру квадратной галеты 7,6 *мм*. Например, батарея с поперечным сечением



$22,8 \times 15,2$  мм легко совмещается со стандартным микромодулем ( $7,6 \times 7,6$  мм), образуя компактный электронный узел. Такая геометрическая совместимость всех элементов и является основной целью этой системы.

### Галеты-подложки для микроэлементов

Отдельные элементы типового микромодуля и микромодуль в собранном виде показаны на фиг. 7.2. Размеры стандартной галеты указаны на фиг. 7.3. Инструменты, формы, зажимы и т. п. изготавливаются с расчетом на работу с такими галетами, имеющими 12 металлизированных пазов. После испытания методов обработки и



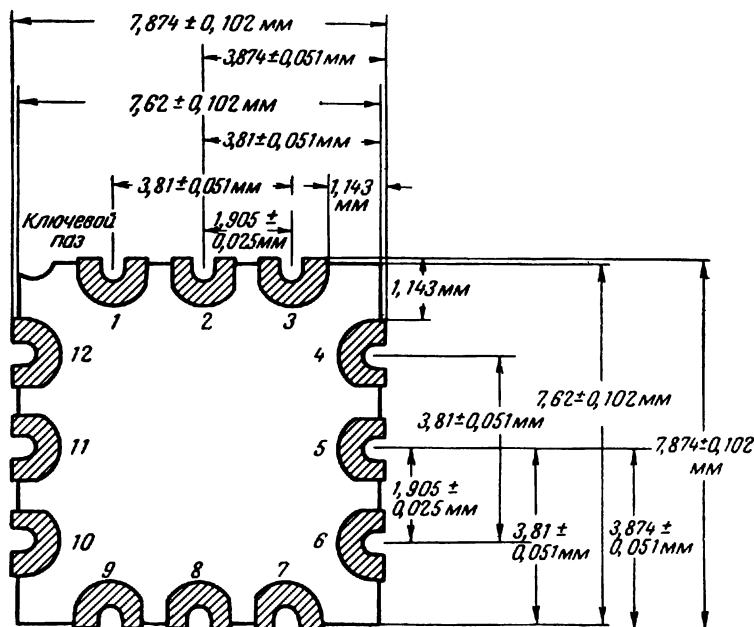
Фиг. 7.2. Отдельные элементы микромодуля и микромодуль в собранном виде («этажерка»).

A — концевая галета с отверстием; B — катушка индуктивности и конденсатор, смонтированные на одной галете; C — транзистор; D — диод; E — сопротивления; F — электролитический конденсатор; G — керамический конденсатор; H — концевая галета; I — «этажерка» (собранный микромодуль).

сборки в микромодули общая конструкция галет этого типа по сравнению с их первоначальной конструкцией не изменилась.

**Стандартизация выводов.** Обычные электронные детали учитываются и определяются только по их электрическим параметрам. Для того чтобы переход к микроэлементам, используемым в микромодульной технике, не был слишком резким, необходимо, чтобы и в этом случае учет и определение можно было производить подобным же образом. Между тем микроэлемент является весьма

гибкой деталью схемы, поскольку его можно монтировать в горизонтальной плоскости в четырех положениях, затем перевернуть тыльной стороной вверх и снова 4 раза повернуть в горизонтальной



Ф и г. 7.3. Стандартная галета — подложка для микроэлемента с 12 металлизированными пазами.

плоскости, т. е. один микроэлемент может занимать 8 различных положений. Дополнительная гибкость обеспечивается еще и возможностью выбора любого из 12 металлизированных пазов. Однако в будущем для облегчения учета деталей, упрощения и удешевления их производства необходимо будет путем стандартизации свести к минимуму разнообразие в выводах микроэлементов.

### Материалы для изготовления подложки

Был проведен статистический анализ образцов галет толщиной 0,25 и 0,5 мм. В результате анализа были составлены таблицы распределения образцов по толщине, степени коробления и ширине (длине). Установлены следующие допуски: по толщине  $\pm 25$  мк, по степени коробления 25 мк максимально, по ширине (длине)  $\pm 100$  мк.

Наиболее сложной является проблема коробления. Степень коробления галеты измеряется разностью между толщиной, измеренной с помощью микрометра, измерительные плоскости которого больше галеты, и толщиной в центре галеты, измеренной посредством микрометра с остроконечными измерительными штифтами. Ширина (длина) измерялась обычным микрометром.

Галеты из окиси алюминия толщиной 0,25 мм не отвечают полностью требованиям любых применений в связи с неудовлетворительными поверхностными свойствами. Поэтому разрабатываются иные методы изготовления галет из этого материала, с тем чтобы добиться соответствия их качества предъявляемым требованиям.

Галеты, изготовленные целиком из окиси бериллия, или галеты с большим содержанием окиси бериллия можно применять в тех случаях, когда требуется хорошая теплопроводность; исследуются также и другие материалы, такие, как металлокерамика и азотистый кремний.

### **Материалы для металлизации соединений и пазов**

Материалы, применяемые для металлизации соединений и пазов керамических подложек, должны обладать определенными качествами, в частности хорошими адгезивными свойствами, токопроводимостью и способностью к пайке. Однако применение некоторых металлов (особенно серебра) затрудняется миграцией, возникающей при постоянном напряжении в условиях влажной среды. Это явление, а также некоторые способы его предотвращения достаточно подробно описаны в литературе. Для обеспечения надежности соединений предпочтительнее использовать не серебро, а такие не подверженные миграции металлы, как золото или палладий. Вместе с тем целый ряд методов устранения миграции серебра еще не получил полной оценки, и поэтому окончательное решение вопроса еще не найдено.

При изготовлении микромодулей, промежутки между микроэлементами которых весьма малы, значительную важность приобретает явление неустойчивости кристаллической решетки металлов, приводящее к образованию нитевидных наростов.

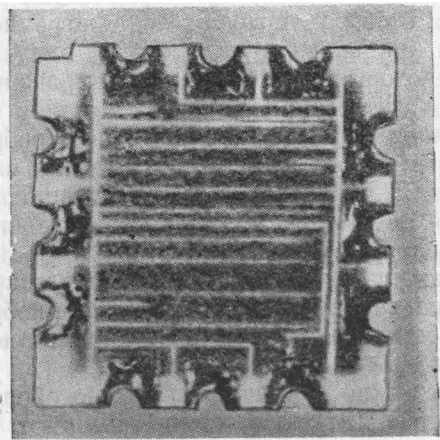
В связи с тем что олово особенно сильно подвержено образованию наростов, а припой, содержащие олово, кадмий, цинк и т. д., также причиняют в этом отношении много беспокойства, часто весьма важен выбор мягкого припоя, не имеющего в своем составе этих элементов. Свинец, по-видимому, свободен от свойства образовывать нитевидные наросты сколько-нибудь значительного размера, а золото вообще их не образует. С учетом этих фактов было проведено исследование нескольких сплавов свинца с золотом

с целью возможного использования их в качестве мягкого припоя вместо сплава олова с золотом.

Детально был изучен легкоплавкий свинцово-золотой сплав, содержащий 85% свинца и 15% золота. Точка плавления этого сплава  $216^{\circ}\text{C}$ , а его свойства как припоя оказались, по-видимому, перспективными. Применяемые для металлизации пазов галет серебро, золото и палладий легко «облуживаются» этим припоем при использовании в качестве паяльного флюса канифоли. Медь также можно «лудить» свинцово-золотым сплавом. Для этого офлюсованное медное изделие погружают в ванну с расплавленным припоем. Сам свинцово-золотой сплав легко спаивается без применения флюса. При точечной спайке покрытых сплавом медных соединительных проводников с металлизированными палладием пазами галеты, «облуженными» методом погружения в тот же припой, были получены соединения достаточной прочности. Проводятся дальнейшие испытания этого сплава для подтверждения его свойства не образовывать нитевидных наростов.

### Сопротивления

На фиг. 7.4 показано типовое микросопротивление, изготовленное фирмой *Weston Instruments Division*. Сопротивление состоит из четырех отдельных элементов, выполненных методом осаждения



Фиг. 7. 4. Металлопленочное сопротивление, изготовленное методом вакуумного испарения.

На одной галете размещается до 4 отдельных сопротивлений. Пределы значений каждого сопротивления  $10 - 10^4 \text{ ом}$ . Номинальная мощность  $0,125 \text{ вт}$  для каждого сопротивления. Максимальный температурный коэффициент  $200 \cdot 10^{-6}$ .

дения хромо-никелевого сплава в вакууме из паровой фазы. Резистивные пленки нанесены на обе стороны подложки из глинозема, обладающей высокой плотностью. Конструкция этого микросопротивления удовлетворяет требованиям технических условий ВВС США MIL-10509-B в отношении допускаемых отклонений от

номинальных значений и стабильности (допуски на номинальное значение и стабильность работы в течение срока службы и в различных условиях окружающей среды  $\pm 1\%$ ).

Подгонку значений сопротивлений можно осуществлять различными методами. В таблице приводятся некоторые из возможных способов, исследованных фирмой.

Таблица

## Перечень методов получения требуемых значений сопротивления

№ метода	Используемый принцип	Описание
1	Электротравление	Разграничительные линии образуют посредством электротравления. Необходимая конфигурация сопротивления придается высокоомной пленке с помощью многократно используемого шаблона, накладываемого на галету
2	Электротравление	Разграничительные линии образуют посредством электротравления. Необходимую конфигурацию сопротивления получают путем покрытия высокоомной пленки защитным слоем, нанесенным методом трафаретной печати
3	Электротравление	Разграничительные линии образуют посредством электротравления. Необходимую конфигурацию сопротивления получают путем покрытия высокоомной пленки защитным слоем светочувствительной эмульсии и последующего экспонирования через соответствующий негатив
4	Химическое травление	Разграничительные линии образуют посредством химического травления. Необходимую конфигурацию сопротивления получают путем покрытия высокоомной пленки защитным слоем, нанесенным методом трафаретной печати
5	Химическое травление	Разграничительные линии образуют посредством химического травления. Необходимую конфигурацию сопротивления получают путем покрытия высокоомной пленки защитным слоем светочувствительной эмульсии и последующего экспонирования через соответствующий негатив

№ метода	Используемый принцип	Описание
6	Осаждение высокоомной пленки с предварительным нанесением подслоя	Разграничительные линии образуют посредством снятия участков пленки, под которыми имеется подслой окиси хрома. Необходимую конфигурацию высокоомной пленки получают путем нанесения методом трафаретной печати подслоя окиси хрома до операции металлизации
7	Напыление	Разграничительные линии образуются при бомбардировке подложки ионами резистивного материала в камере напыления. Необходимую конфигурацию высокоомной пленки получают путем применения соответствующих масок
8	Обдув частицами абразивного материала	Разграничительные линии образуют посредством обдува крупнозернистым песком. Необходимую конфигурацию сопротивления получают путем покрытия высокоомной пленки защитным слоем, нанесенным методом трафаретной печати
9	Ультразвуковые колебания	Разграничительные линии образуют путем использования ультразвуковых колебаний инструмента, приводимого в соприкосновение с высокоомной пленкой. Необходимую конфигурацию сопротивления получают посредством надлежащего перемещения инструмента
10	Ультразвуковые колебания	Разграничительные линии образуют путем использования ультразвуковых колебаний инструмента, приводимого в соприкосновение с высокоомной пленкой. Необходимая конфигурация придается пленке инструментом, действующим через абразивную пасту. На контактной поверхности инструмента негативно воспроизведена требуемая конфигурация пленки
11	Электротравление	Разграничительные линии образуют посредством электротравления с использованием специального зонда. Необходимую конфигурацию сопротивления получают путем перемещения зонда
12	Вакуумное испарение	Требуемая конфигурация сопротивления осаждается при металлизации подложки через маску с соответствующими прорезами

## Продолжение

№ метода	Используемый принцип	Описание
13	Профильная подложка	Подложка изготавливается с рельефным изображением разграничительных линий. После металлизации необходимая конфигурация сопротивления достигается путем сошлифования выпуклых участков подложки
14	Электронный луч	Разграничительные линии образуют посредством бомбардировки высокоомной пленки электронами из электронной пушки. Конфигурация пленки определяется перемещением электронного луча, которое регулируется программой, заложенной в электронно-вычислительную машину
15	Электрический зонд	Разграничительные линии образуют посредством соприкасающегося с высокоомной пленкой остроконечного зонда, через который пропускается постоянный ток. Конфигурация пленки определяется перемещением зонда

В методе № 14 используется видеоизмененный электронный микроскоп, ускоряющее напряжение которого равно 100 кВ, а сила тока электронного луча  $\sim 10$  мА. Когда сфокусированный электронный луч такой интенсивности встречает на своем пути какой-либо предмет, кинетическая энергия электронов преобразуется в тепловую и температура в точке столкновения повышается до 100 000° К и выше. Следует особо отметить, что, регулируя интенсивность электронного луча, температуру нагрева можно варьировать в широких пределах, начиная от комнатной температуры. Так, в случае обработки металлической пленки, нанесенной на керамическую основу, энергия электронного луча может быть отрегулирована таким образом, что металл будет возгораться, а керамическая подложка останется нетронутой. Режущее действие электронного луча исключительно эффективно. Между металлической пленкой и зернистой структурой подложки имеется четкое различие, что позволяет видеть, как при испарении металла происходит действительно полное его удаление.

Электронный луч можно использовать также для изоляции отдельных участков, причем нетрудно получить изоляцию с сопротивлением, превышающим 100 000 мом. По-видимому, этот метод даст в будущем наиболее ценные результаты, а применение вычислительных устройств для регулирования электронного луча поз-

волит весьма просто программировать весь процесс резания при изготовлении микроэлемента. Нет также никаких причин, препятствующих тому, чтобы сопротивление отдельных элементов контролировалось в процессе резания: можно не только вырезать необходимую конфигурацию пленки, но и останавливать процесс в момент достижения желаемого значения сопротивления. Такой метод является в высшей степени производительным и, как можно предполагать, обеспечит в будущем большую экономию средств. Это утверждение справедливо, в частности, потому, что ширина электронного луча может быть установлена настолько узкой, насколько это окажется необходимым для получения желаемой ширины захвата при резании.

Последний метод (№ 15) предполагает использование электрического зонда. Метод характеризуется применением тщательно отполированной металлизированной подложки и использованием режущего действия, возникающего благодаря прохождению электрического тока от остроконечного электрического зонда через металлическую пленку к второму электроду. Наилучшие результаты получены в тех случаях, когда в качестве катода использовался зонд. Таким способом можно вырезать линии любой желаемой ширины. Нужно отметить, что давление, оказываемое зондом, настолько мало, что при соприкосновении с подложкой на ней не остается никаких царапин. Вместе с тем при правильном выборе напряжения режущее действие зонда возникает мгновенно и отличается чистотой и эффективностью.

Как видно из таблицы, рассмотренные 15 методов включают как высокоэффективные, так и не отличающиеся большой эффективностью средства выполнения необходимых операций. Среди них, по-видимому, весьма перспективны электронный луч и электрический зонд. Можно полагать, что методы с применением электронного луча и электрического зонда в будущем будут широко использоваться благодаря своей гибкости, эффективности и пригодности применения в будущей высокопроизводительной технологии производства.

### Конденсаторы

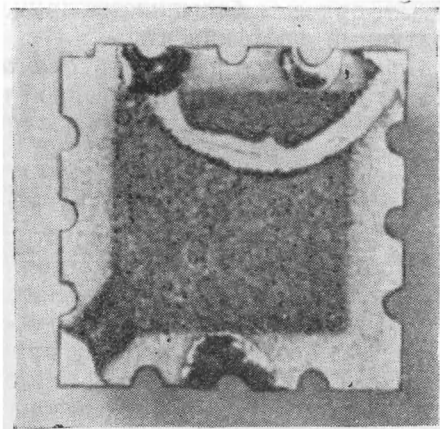
Разработаны и изготовлены как нафтилфенолоксазоловые конденсаторы, так и конденсаторы общего назначения, в которых используется диэлектрик толщиной 254 мк. Изготовлены также прецизионные конденсаторы емкостью до 39 пф, в которых в качестве диэлектрика используется нафтилфенолоксазол. В применяемых конденсаторах общего назначения емкостью до 5 000 пф используются диэлектрические галеты, поставляемые несколькими фирмами.



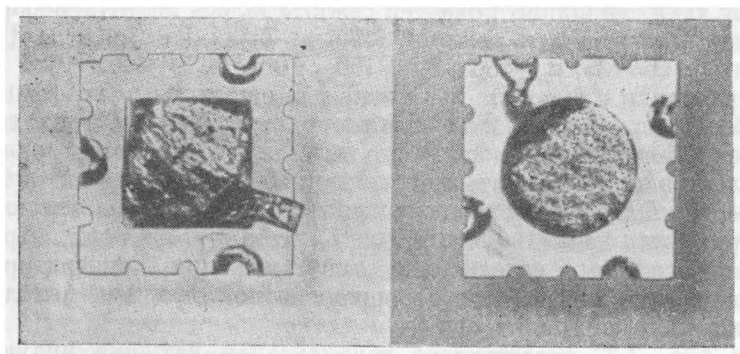
Для получения больших емкостей применяется многослойная тонкопленочная конструкция конденсатора, показанная на фиг. 7.5. При использовании 10 слоев емкость конденсаторов общего назна-

Фиг. 7. 5. Многослойный конденсатор.

При десятислойной конструкции емкость нафтилфенолоксазоловых конденсаторов достигает 1350  $\mu\text{ф}$  при номинальном напряжении 50 в. Тангенс угла диэлектрических потерь 1,5%. При десятислойной конструкции емкость конденсаторов общего назначения достигает 0,3  $\mu\text{кф}$  при номинальном напряжении 50 в. Тангенс угла диэлектрических потерь 1,5%.



чения удалось довести до 0,3  $\mu\text{кф}$  при напряжении 50 в. Танталовый конденсатор с твердым электролитом, номинальное значение емкости которого при 12 в составляет 1  $\mu\text{кф}$ , показан на фиг.7.6.



Фиг. 7. 6. Танталовые конденсаторы с твердым электролитом.

Подобные же конденсаторы емкостью до 50  $\mu\text{кф}$  при 50 в были выпущены фирмой Mallory. Объем этих танталовых конденсаторов в 25 раз меньше объема многих соответствующих конденсаторов обычных конструкций.

### Катушки индуктивности

Требования, предъявляемые к катушкам, используемым в опытно-оборудовании, обуславливают величину индуктивности в 1,5 *мгн*, причем в большинстве применений необходим нулевой температурный коэффициент.

*Материалы, используемые для изготовления сердечников.* Разработка сердечников с повышенной начальной магнитной проницаемостью была разделена на два этапа: 1) разработка ферритов для высокочастотного применения и 2) разработка сердечников с нулевым температурным коэффициентом.

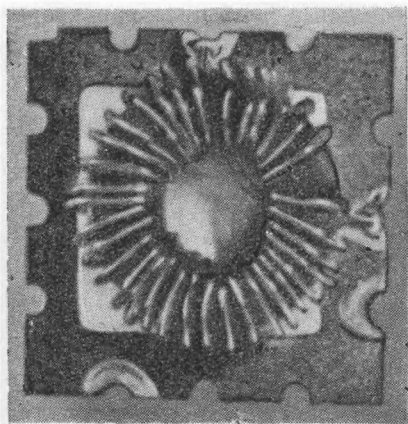
В никель-цинковые ферриты добавлялись в различных количествах, превышающих стехиометрические пропорции, окиси бария, кобальта, молибдена и иттрия. После смешения, прессования и обжига производились измерения с помощью *Q*-метра Бунтона  $\mu_0$  и *Q*. Каждая из этих рецептур обеспечивала увеличение начальной магнитной проницаемости при повышении температуры обжига, но лишь примеси кобальта и бария способствовали расширению полезного частотного диапазона ферритов. Ферриты с примесью бария имеют малый отрицательный температурный коэффициент ( $T_c$ ), равный  $-100 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , в то время как ферриты с примесью кобальта отличаются высоким положительным температурным коэффициентом, составляющим  $+3000 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

Помимо исследований, направленных на уменьшение температурного коэффициента путем добавления в порошок бария, изучалось также влияние примесей сажи. Удалось достичь воспроизводимости образцов и режима обжига; были изготовлены также ферриты с  $Q=135$ ,  $\mu_0 = 50$  и  $T_c = 150 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C} (\pm 100 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C})$ .

Сердечники с высоким  $\mu$  и низким температурным коэффициентом были изготовлены и без добавок сажи. Окислы в их составе имели малый размер частиц, что облегчало условия их спекания. Никель-цинковые ферриты нового состава имеют  $\mu_0 = 105$  и  $T_c = 15 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . Обжиг этих же сердечников при более высоких температурах давал  $\mu_0 = 175$  и  $T_c = 587 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . Другие опытные составы, содержащие для снижения температурного коэффициента окислы в порошкообразной форме, находятся в стадии изучения.

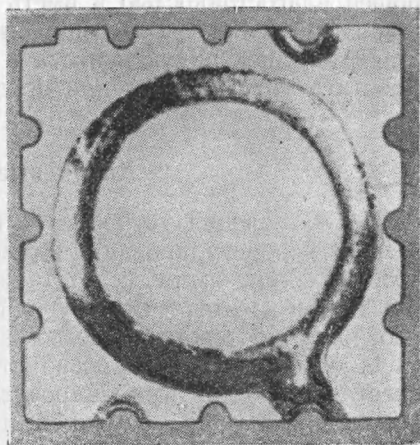
На фиг. 7.7. представлена тороидальная катушка индуктивности в микромодульном исполнении. Катушки индуктивности, разработанные в соответствии с осуществляемой в настоящее время программой, включают прецизионные трансформаторы на 50 и 4,3 *Мгц* и высокочастотные дроссели общего назначения для использования в фильтрах. Обмотка всех этих катушек выполнена на ферритовых сердечниках различных типов, имеющих, однако, тороидальную форму, для сведения к минимуму поля рассеяния

и предотвращения, таким образом, нежелательной связи с другими элементами схемы. Обычно катушка монтируется на галете вместе с настроенным конденсатором. Программа предусматривает изготовление катушек с индуктивностью до 1500  $\mu\text{кгн}$ , но при имеющихся в распоряжении материалах для сердечников вполне достижимы



Фиг. 7. 7. Торондальная катушка индуктивности.

Катушка предназначена для использования на высокой частоте (50  $\text{Мгц}$ ) или промежуточной частоте (4,3  $\text{Мгц}$ ). Индуктивность 1,5  $\text{мгн}$ .



Фиг. 7. 8. Кварцевый кристалл в микромодульном исполнении.  
Частотный диапазон 7÷70  $\text{Мгц}$ .

индуктивности до нескольких миллигенри. При изготовлении катушек индуктивности основные усилия были направлены на разработку материалов для ферритовых сердечников с точно регулируемы температурными характеристиками. Разработанный фирмой R. C. A. типовой сердечник, предназначенный для использования в точно настроенных контурах, рассчитанных на частоты 4,3 и 50  $\text{Мгц}$ , имеет девиацию, не превышающую  $30 \cdot 60^{-8}$ , и характеристику на несколько порядков лучше, чем характеристики типовых высокочастотных ферритов.

*Пропиточные материалы.* Значительная работа была проведена с целью найти пропиточные составы, обеспечивающие катушкам индуктивности дополнительную защиту от воздействия влаги и резких изменений температуры и вместе с тем не оказывающие вредного воздействия на их характеристики и электрические свойства, обеспечивающие надежную работу катушек индуктивности в диапазоне рабочих температур. К числу основных свойств, необходимых

для пропиточного состава, следует отнести следующие: пропиточный состав не должен вступать в реакцию со связующим веществом, применяющимся при склеивании катушки, или с изоляционным покрытием провода; он должен выдерживать резкое изменение температур в диапазоне от  $-65^{\circ}$  до  $+100^{\circ}$  С, не оказывая вредного воздействия на рабочие характеристики; должен отличаться хорошей влагостойкостью и иметь необходимые электрические свойства, обеспечивающие удовлетворительные рабочие характеристики катушек индуктивности в требуемом диапазоне температур. Работа в этом направлении продолжается.

### Кварцевые кристаллы

В изготовлении устройств с кварцевыми кристаллами, используемых для регулирования и стабилизации частоты в электронном оборудовании, имеет место та же тенденция к миниатюризации, что и при изготовлении других схемных элементов. Полагают, что плотность монтажа кварцевых кристаллов может быть увеличена до 14—15 на 1 см<sup>2</sup>, что позволит кварцевым устройствам стать совместимыми с другими микроэлементами, разрабатываемыми в соответствии с микромодульной программой.

Изготовлены микрокристаллы, работающие на частотах 7—20 Мгц и на высших гармониках 20—70 Мгц. Номинальная потребляемая мощность в условиях эксперимента составляла для этих устройств 5 и 1 мвт соответственно. Типовой микрокристалл представлен на фиг. 7.8.

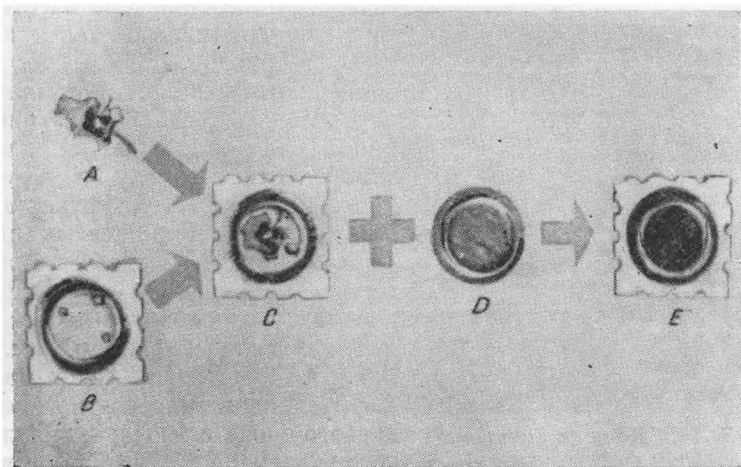
### Транзисторы

Работа по микроминиатюризации ведется над несколькими вариантами прототипа и окончательными конструкциями транзисторов, монтируемых на галете. Основной задачей является достижение надежной герметизации. В результате опыта, полученного при изучении ряда способов герметизации, для серии разрабатываемых транзисторов наилучшим подходом к решению вопроса, по-видимому, является метод, иллюстрируемый фиг. 7.9. Такая конструкция имеет следующие преимущества:

- 1) используются триоды с проверенными электрическими параметрами;
- 2) основание сравнимо с штенгелем, следовательно, конструкция в основном достаточно простая;
- 3) внутреннее соединение выводов активного элемента транзистора можно производить с помощью сварки, благодаря чему отпадает вопрос о применении флюса, обычно используемого при пайке;

4) для крепления крышки транзистора пригодны различные методы, включающие пайку, термокомпрессию, контактную сварку и т. д.;

5) конструкция позволяет приблизиться к требуемой минимальной толщине. Изготовлены экспериментальные галеты из окиси алюминия толщиной 0,5 мм. Применявшееся при этом давление



Фиг. 7. 9. Транзистор в микромодульном исполнении.

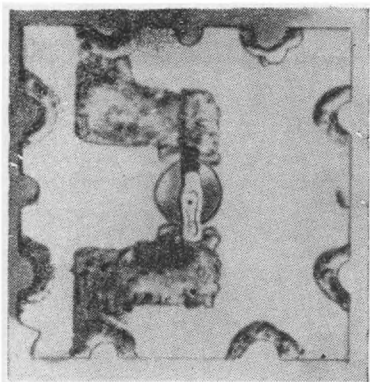
А—транзистор; В—специально подготовленная галета; С—транзистор, заделанный в галету; D—крышка транзистора; E—готовый микротранзистор.

составляло около 227 кг. Окись алюминия не крошится и хорошо пропаявается, обеспечивая достаточную герметичность;

6) конструкция пригодна для монтажа высокочастотных транзисторов.

На фиг. 7.9 показан типовой транзистор, герметически закрытый для максимальной защиты от воздействия окружающей среды. Этот транзистор эквивалентен триоду типа 2N384 и герметизирован методом горячей пайки. Для монтажа используется обладающая большой прочностью галета из окиси алюминия, имеющая углубление со сквозными отверстиями для выхода соединительных проводников транзистора. Поверх каждого отверстия наплавляют каплю припоя, которую соединяют с соответствующим пазом галеты посредством металлизированной линии на тыльной стороне галеты. На кромки углубления накладывают металлизированное кольцо, которое покрывают слоем припоя. Затем в углубление помещают транзистор, а его выводы точечной сваркой подключают

к соединительным проводникам. Герметизация транзистора завершается припайванием к кольцу крышки из металлической фольги. Эта операция выполняется без паяльного флюса, с помощью ультразвука, обеспечивающего необходимую очистку, способствующую отличной герметизации припоем. Характеристики таких транзисторов идентичны характеристикам триодов обычной конструкции и отвечают стандартным требованиям. Очевидно, что такая технология пригодна для изготовления как германиевых, так и кремниевых триодов.



Фиг. 7.10. Диод в микромодульном исполнении.

Кремниевый диод группы F-2, предназначенный для использования в вычислительных устройствах. Максимальный ток 500 ма. Диапазон рабочих температур от  $-55$  до  $150^{\circ}\text{C}$ .

В соответствии с упомянутой программой разработано шесть типов диодов, включая диоды, эквивалентные диоду с золотым контактом 1N277, диффузионному плоскостному кремниевому диоду 1N643, ряду диодов-стабилизаторов напряжения и опорных диодов, а также диодов, эквивалентных переменной емкости. На фиг. 7.10 показана конструкция диффузионного плоскостного кремниевых диода и диода, эквивалентного переменной емкости. Диоды изготовлены как отдельные устройства и монтируются на галете после их изготовления. Герметичная защита обеспечивается стекло-

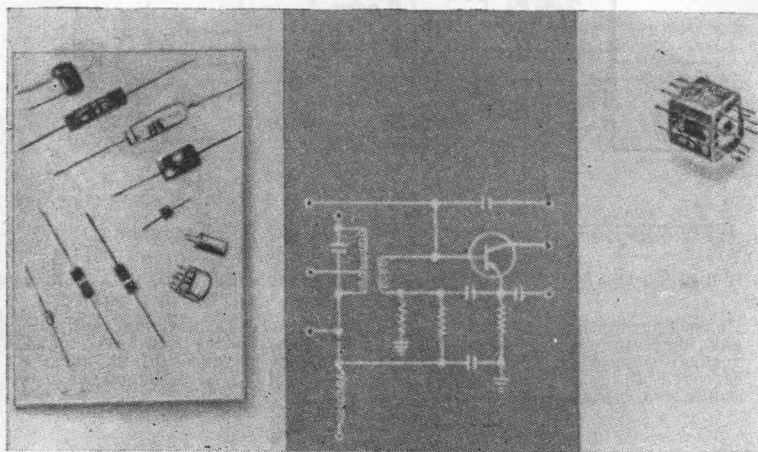
видным покрытием, наносимым непосредственно на полупроводниковое устройство, благодаря чему образуется прочная связь активного элемента с галетой. В данном случае разработанные устройства имеют достаточно малые размеры и позволяют размещать на одной плате несколько диодов или приборов иного типа. Другие применяемые диоды изготавливаются подобно показанному выше транзистору.

### Схемы

Фирма R. C. A. разработала и поставляет целый ряд схем в микромодульном исполнении. На фиг. 7.11 представлен усилитель промежуточной частоты на  $4,3\text{ Мгц}$ . Имеется полный комплект схем в микромодульном исполнении для связного приемника на  $50\text{ Мгц}$  с частотной модуляцией. Помимо показанного на фиг. 7.11 усилителя, в микромодульном исполнении выпускаются усилители высокой частоты, смесители, кварцевые генераторы, усилители про-

межуточной частоты, ограничители, частотные детекторы и усилители звуковой частоты.

Краткое описание типовых схем дано в пояснениях к фиг. 7.12—7.25. Все эти схемы выполнены в виде герметизированных отдельных микромодулей. Показанные на схемах точки входов и выходов



Фиг. 7. 11. Типовой усилитель промежуточной частоты в микро-модульном исполнении.

Средняя частота 4,3 Мгц, усиление 20 дб, ширина полосы по уровню 6 дб  
200 кгц.

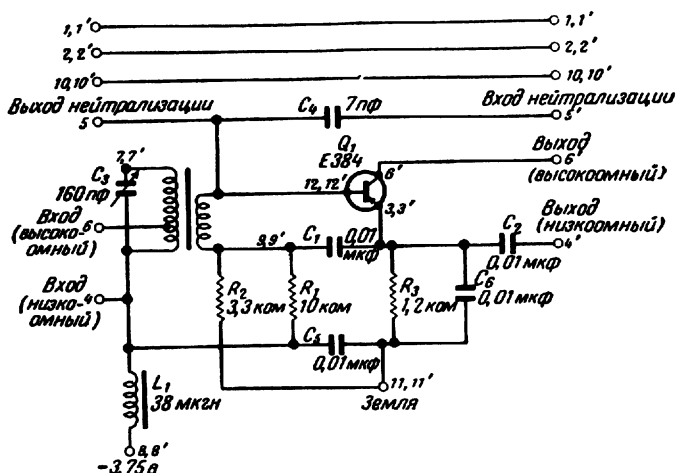
снабжены выводами длиной 20 мм. При желании выводы могут быть отрезаны, а соединения выполнены посредством покрытых припоем ленточных проводников на кромках концевых галет.

Все выводы выходят из модуля в соответствии с монтажной сеткой с шагом 0,62 мм.

Рекомендуемое расстояние между микромодулями при размещении их на сборочной плате составляет 10 мм между центрами двух соседних модулей.

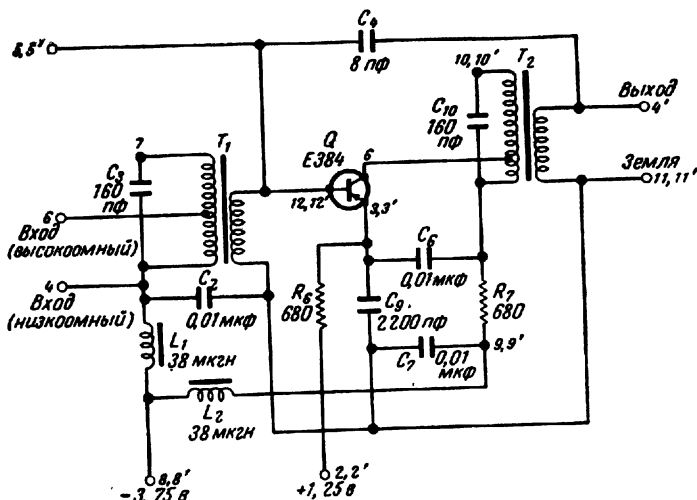






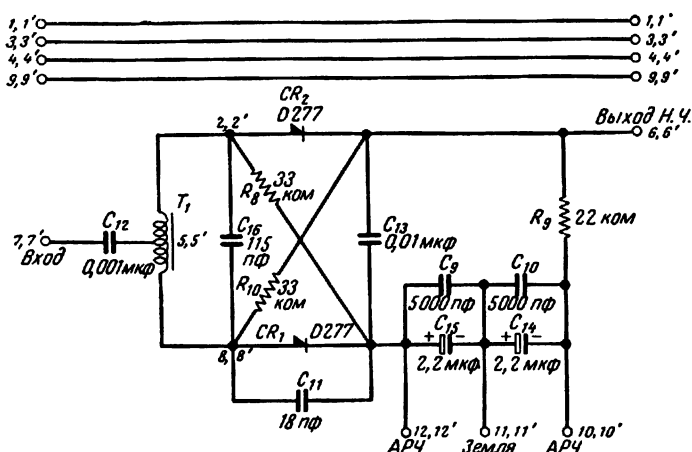
Ф и г. 7. 14. Однокаскадный усилитель промежуточной частоты на 4,3 Мгц DM0015A.

Микромодуль DM0015A, разработанный для применения в схемах приемников с частотной модуляцией, состоит из микротранзистора, включенного по схеме с общим эмиттером и одноконтурной индуктивной связью с нейтрализацией. В модуль входят также развязывающие фильтры, необходимые для его изоляции от других частей схемы приемника. Для образования полного комплекта усилителя промежуточной частоты можно последовательно соединить два и более таких микромодулей. В качестве последнего каскада этой системы можно использовать ограничитель DM0016A в микромодульном исполнении.



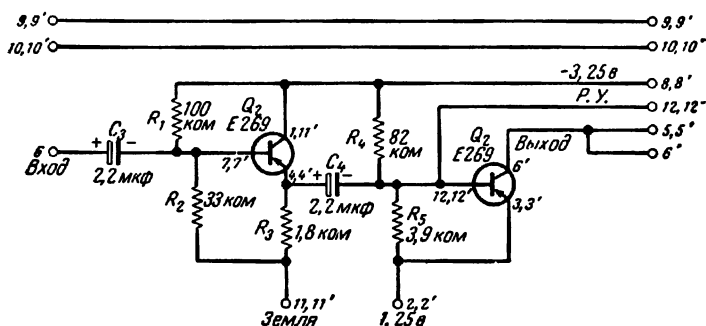
Ф и г. 7. 15. Микромодуль DM0016A—полный каскад ограничителя на 4,3 Мгц, предназначенный для использования в ЧМ-приемниках.

Основной функцией модуля является ограничение амплитуды сигнала промежуточной частоты, подаваемого на частотный дискриминатор DM0017A. Модуль DM0016A содержит микротранзистор, включенный по схеме с общим эмиттером с нейтрализацией и постоянно настроенной трансформаторной связью. Модуль включает необходимые развязывающие цепи для изоляции от других частей приемной системы. Этот модуль предназначен для работы в качестве последнего каскада усилителя УПЧ, состоящего из двух или более модулей DM0015A, соединенных последовательно.



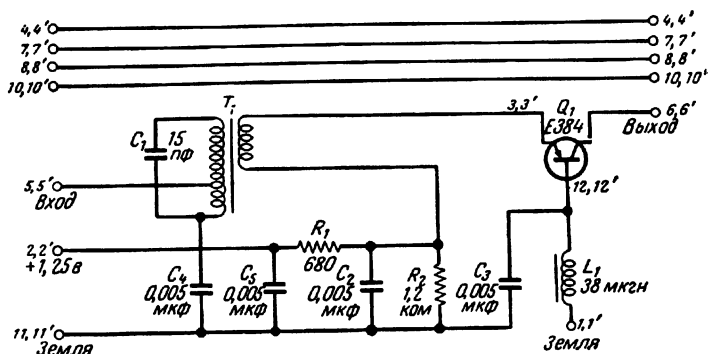
Ф и г. 7. 16. Микромодуль DM0017A — полный каскад дискриминатора на 4,3 Мгц, предназначенный для использования в ЧМ-приемниках.

Модуль DM0017A содержит два микродиода, включенных по схеме дискриминатора. Модуль демодулирует ЧМ-сигнал, поступающий от каскада ограничителя DM0016A, и содержит схемы связи по постоянному току для подачи напряжения АРЧ.



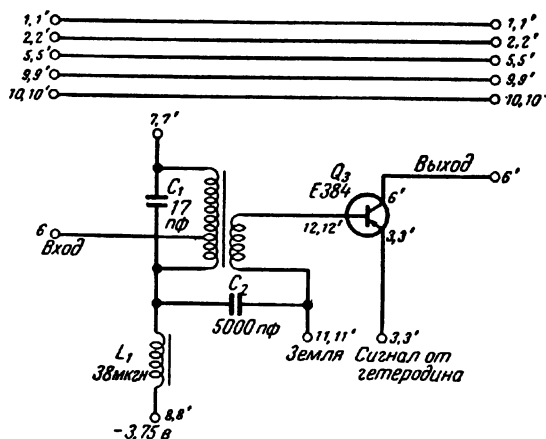
Ф и г. 7. 17. Микромодуль DM0018A — каскад усилителя н. ч. с низким уровнем сигнала. Предназначается для использования в качестве предоконечного или выходного усилителя в радиоприемниках и усилителях н. ч.

Модуль DM0018A содержит два микротранзистора, включенных по схеме эмиттерного повторителя и схеме с общим эмиттером. Предусмотрена возможность внешней регулировки уровня (Р. У.).



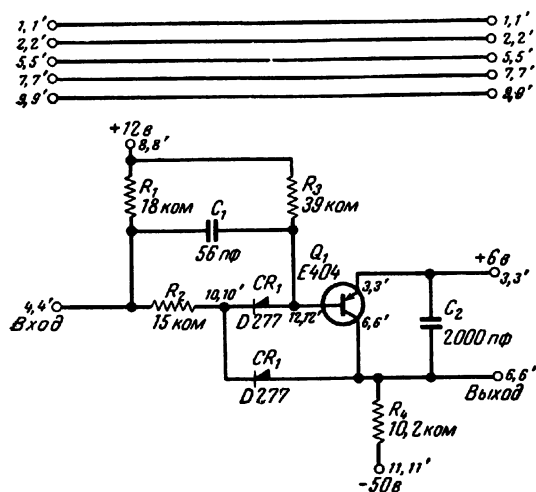
Ф и г. 7.18. Микромодуль DM0020A — усилитель высокой частоты на 49,4 МГц, предназначенный для использования в ЧМ-приемниках.

Основная функция микромодуля заключается в обеспечении высокой избирательности и усилении сигнала, подаваемого на смеситель (микромодуль DM0021A). Модуль DM0020A содержит микротранзистор, включенный по схеме с общей базой с постоянно настроенной трансформаторной связью. Модуль включает необходимые развязывающие цепи для изоляции от других частей приемной системы.



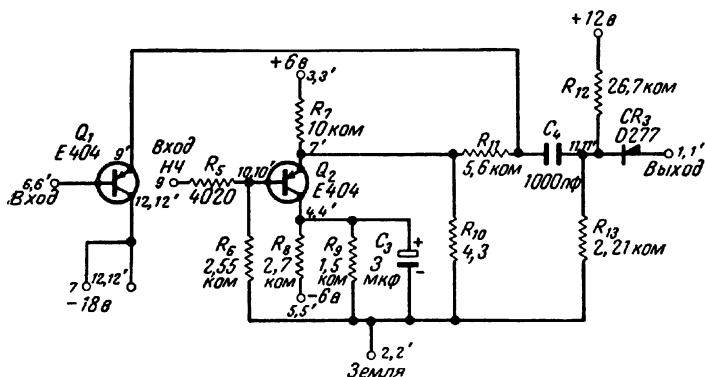
Ф и г. 7.19. Микромодуль DM0021A — каскад смесителя на 4,3 МГц, предназначенный для использования в ЧМ-приемниках.

Этот модуль смешивает сигнал 45,1 МГц гетеродина (микромодуль DM0029A) с принимаемым сигналом 49,4 МГц для получения сигнала промежуточной частоты 4,3 МГц. Модуль DM0021A содержит микротранзистор, включенный по схеме с общим эмиттером. Принимаемый сигнал подается на базу, а сигнал гетеродина — на эмиттер.



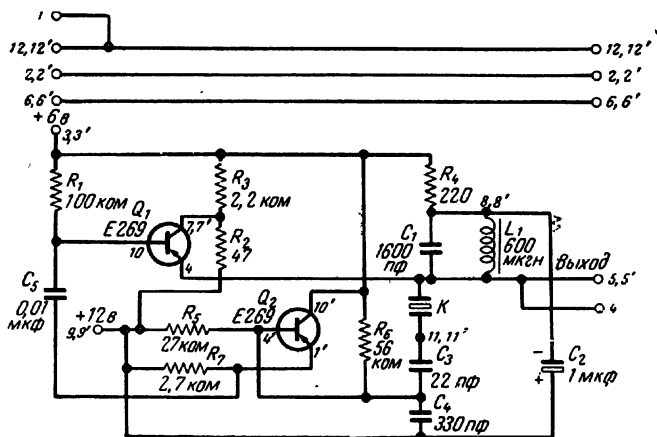
Фиг. 7.20. Микромодуль DM0022A — генератор пилообразного напряжения.

Схема выполнена в виде каскада обычного стробированного свип-генератора, предназначенного для использования в вычислительной технике. При подаче на этот модуль отрицательного импульса генерируется линейное пилообразное напряжение, длительность которого равна ширине входного импульса. Микромодуль DM0022A можно использовать для возбуждения микромодульного временного модулятора DM0023B.



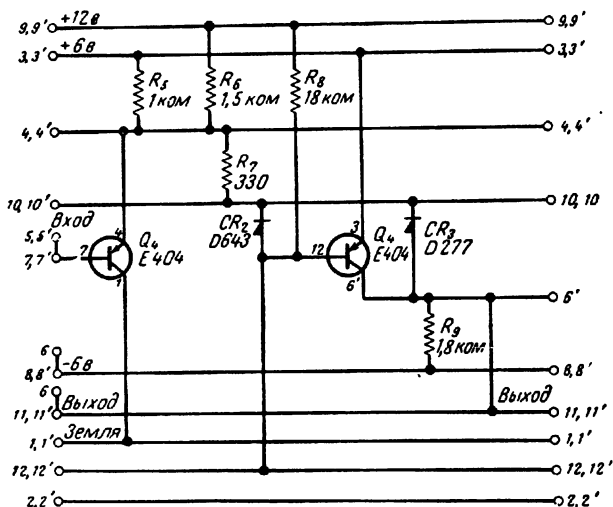
Фиг. 7.21. Микромодуль DM0023B — временной модулятор.

Схема выполнена в виде полного каскада широтно-импульсного модулятора, предназначенного для использования в системах временного уплотнения. Модуль DM0023B имеет входы низкой частоты и пилообразного сигнала и генерирует импульсы, ширина которых пропорциональна амплитуде низкой частоты, а скорость изменения ширины импульсов — частоте этого сигнала н. ч.



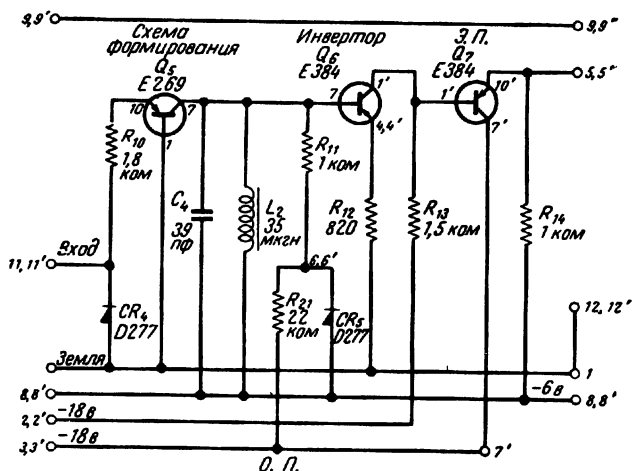
Ф и г. 7.22. Микромодуль DM0024A — полный каскад кварцевого синусоидального генератора.

Этот модуль, предназначенный для использования в вычислительной технике, содержит два микротранзистора, соединенных по схеме транзисторного генератора с обратной связью. Микромодуль DM0024A можно непосредственно соединить со схемой формирования импульсов (микромодульный ограничитель DM0025A) для получения импульсов с частотой повторения 192 кГц.  
К — кристалл кварца 192 кГц (наружный).



Ф и г. 7.23. Микромодуль DM0025A — ограничитель.

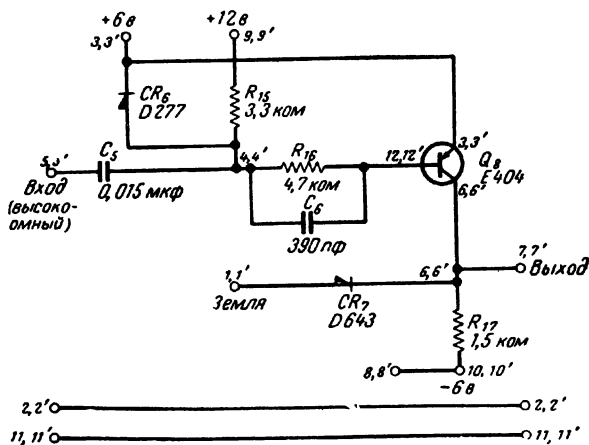
Схема двухкаскадного формирования импульсов с непосредственной связью, предназначенная для использования в вычислительной технике при преобразовании синусоидальных сигналов в импульсные. Микромодуль DM0025A содержит два микротранзистора, включенных по схеме эмиттерного повторителя и схеме с общим эмиттером. При возбуждении микромодульным генератором DM0024A с частотой 192 кГц на выходе получается несимметричный прямоугольный импульс.



Ф и г. 7.24. Микро модуль DM0026B — схема формирования импульсов.

Схема используется для окончательного формирования импульсов с частотой повторения 192 кГц, при возбуждении несимметричными прямоугольными импульсами, подаваемыми с микро модульного ограничителя DM0025A. Микро модуль DM0026B состоит из схемы формирования, инвертора и каскада эмиттерного повторителя. Каскад инвертора содержит отрицательную обратную связь для ограничения усиления и улучшения частотной характеристики.

О. П. — отдельное питание для развязки; Э. П. — эмиттерный повторитель.



Ф и г. 7.25. Микро модуль DM0027A — полный каскад импульсного усилителя.

Микро модуль DM0027A, предназначенный для использования в вычислительной технике, содержит микротранзистор, включенный по схеме с общим эмиттером, и открывается отрицательным импульсом, подаваемым на базу транзистора. На выходе получается положительный прямоугольный импульс, который может быть использован для запуска импульсных схем. При возбуждении схемой формирования импульсов DM0026B этот усилитель можно использовать для запуска двоичного делителя частоты DM0013A.

### ТВЕРДЫЕ СХЕМЫ ИЛИ ТРЕХМЕРНЫЙ МЕТОД МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИИ

Последний из трех методов микроминиатюризации осуществляется в виде схем или устройств, наименование которых еще не установилось: схемы на твердом теле, твердые схемы, микроэлектроника, молекулярная электроника, функциональные электронные узлы, молектроника, полупроводниковые схемы и другие. В настоящей главе применяется термин «твердые схемы»<sup>1</sup>.

Метод микроминиатюризации по принципу твердых схем более сложен, чем микросхемный или микромодульный способы. Однако полагая, что элементарная теория полупроводников читателю уже известна, объяснение твердых схем не составит большого труда.

Полупроводниковые твердые схемы представляют собой электронные устройства, образованные на монокристаллической полупроводниковой плате. Каждая такая плата выполняет функции какой-либо стандартной схемы, располагающей несколькими обычными активными и пассивными элементами. Для получения различных схем активные элементы (транзисторы и полупроводниковые диоды) и пассивные элементы (сопротивления, конденсаторы и цепи с распределенными постоянными), расположенные на плате, соединяют определенным образом. Варьируя элементы и соединения, можно получать неограниченное разнообразие схем. Твердые схемы дают наибольший выигрыш в размерах и весе по сравнению с любым описанным ранее методом микроминиатюризации.

В настоящей главе излагаются методы и приемы обработки, используемые в технологии изготовления твердых схем, и приводится описание ряда действующих твердых схем.

Первое предположение о возможности применения метода твердых схем сделано в печати еще в 1952 г. Даммером [135]. Выступая на симпозиуме, состоявшемся в Вашингтоне и обсуждавшем успехи, достигнутые в разработке высококачественных электронных элементов, он отметил, что «с внедрением в промышленность тран-

---

<sup>1</sup> Следует указать, что после того, как эта глава уже была написана, термин «твердые схемы» был зарегистрирован как марка фирмы Texas Instruments Inc., США штат Техас, г. Даллас.

зисторов и принимая во внимание ту большую работу, которая ведется в области полупроводников вообще, теперь, по-видимому, становится вполне возможным изготавливать электронное оборудование без соединительных проводников в виде цельного блока. Такой блок может состоять из нескольких слоев различных материалов, обладающих изоляционными или токопроводящими свойствами, выпрямляющим или усиливающим действием. Электрическое соединение слоев можно в этом случае осуществлять непосредственно, путем вырезания отдельных участков слоев, выполняющих различные функции». Время подтвердило правильность этого предположения.

### НЕКОТОРЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТВЕРДЫХ СХЕМ

Хотя сложные полупроводниковые устройства можно анализировать, опираясь на основные принципы, определяющие движение тока в твердых телах, то обстоятельство, что они являются трехмерными (объемными), значительно усложняет эту задачу. Отсутствие точного математического истолкования для многих даже обычных транзисторных конструкций само по себе является признаком сложности математического выражения процессов в трехмерных устройствах. Простой теоретической методики, которую можно было бы использовать для выполнения желаемой схемы в форме функционального устройства, пока не имеется.

По этой причине полупроводниковые твердые схемы конструируются путем сравнительного сопоставления определенных областей полупроводника с обычными схемными элементами. Некоторые области рассматриваются как сопротивления, другие — как конденсаторы, диоды, транзисторы или какое-либо другое устройство, которое может быть образовано полупроводником. Число таких областей может быть любым и зависит от заданной схемы. Поскольку эти области целиком находятся в пределах полупроводниковой платы, получаемая в результате конструкция представляет собой единое целое.

Несмотря на то, что нередко оказывается невозможным определить отдельно каждую из областей функционального устройства, такое конструктивное решение, говоря языком, применяемым к обычным схемным элементам, дает возможность переходить от какой-либо обычной схемы к ее эквиваленту в форме твердой схемы. Если известны электрические свойства отдельных областей, можно высчитать динамические параметры готовой схемы в целом. В качестве альтернативного решения может служить имитация функций областей твердой схемы посредством обычных элементов и ее оценка с помощью макетной схемы.



## Сопротивления

Область между любой парой омических контактов на однородном полупроводнике действует как сопротивление, причем эквивалентное значение электрического сопротивления зависит от удельного электрического сопротивления материала, длины и площади поперечного сечения области, что выражается формулой

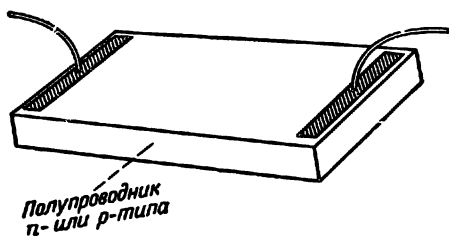
$$R = \frac{\rho l}{a},$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление,  $\text{ом}\cdot\text{см}$ ;  $l$  — длина;  $a$  — площадь поперечного сечения.

Такие сопротивления достаточно линейны и при напряжениях, встречающихся в транзисторных схемах, довольно точно подчиняются закону Ома.

Поскольку ток течет по всему сечению материала, значение таких сопротивлений с течением времени и с изменением нагрузки не претерпевает значительных изменений в отличие от тонкопленочных сопротивлений, изготовленных методом осаждения. Температурный коэффициент омического сопротивления (ТКС) можно точно устанавливать путем выбора соответствующих материалов. Например, при использовании кремния с высоким удельным сопротивлением можно получить ТКС порядка  $7000 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ . Материалы с низким удельным сопротивлением и большим количеством примесей будут иметь меньший температурный коэффициент.

Области сопротивлений могут быть образованы из платы с равномерным распределением примесей, как показано на фиг. 8.1, или изготовлены методом диффузии, когда образуется весьма тонкий поверхностный слой с другим типом проводимости, противоположным тому, которым обладает подложка (фиг. 8.2). Во втором случае образующийся  $p-n$ -переход является барьером, который ограничивает область прохождения тока слоем вблизи поверхности. Поскольку значение удельного сопротивления для сопротивлений, изготовленных диффузионным методом, меняется в зависимости от толщины диффузионного слоя, эквивалентное сопротивление вычислить не так легко, как для объемных сопротивлений. При конструировании нередко оказывается достаточно пользоваться уравнением

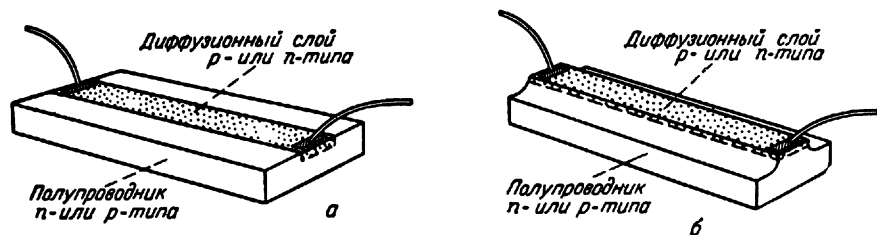


Фиг. 8.1. Объемное сопротивление.

$$R = R_s \frac{l}{W},$$

где  $R$  — активное сопротивление,  $\text{ом}$ ;  $R_s$  — удельное сопротивление слоя,  $\text{ом на квадрат}$ ;  $l$  — активная длина сопротивления;  $W$  — ширина сопротивления.

При изготовлении объемных сопротивлений обычно используют материал с высоким удельным сопротивлением, в то время как для сопротивлений с диффузионным слоем можно применять материалы с очень малым удельным сопротивлением. Сопротивления как первого, так и второго типов изготавливаются из монокристаллов, что

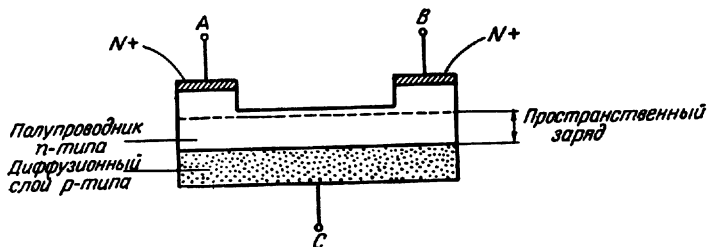


Фиг. 8.2. Сопротивления из диффузионного слоя.  
а — диффузионное сопротивление, изготовленное с использованием оксидной маски; б — диффузионное меза-сопротивление, изготовленное с применением травления.

определяет их весьма хорошие шумовые характеристики, ибо при этом ток течет в пределах одного кристалла, а не от одной частицы резистивного материала к другой. Каких-либо абсолютных пределов величины сопротивления, которой можно достичь при использовании метода диффузии, не имеется, однако ограничения в отношении габаритных размеров и значений удельного сопротивления обычно используемых материалов приводят к тому, что максимальное значение сопротивлений не превышает 40 000  $\text{ом}$  (для объемных сопротивлений).

### Переменные сопротивления

Метод изготовления полупроводникового переменного сопротивления между электродами А и В показан на фиг. 8.3. Конструк-

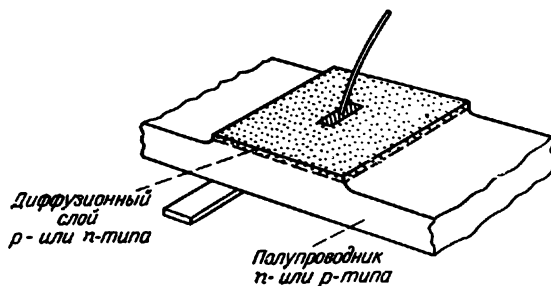


Фиг. 8.3. Переменное сопротивление

ция его, по существу, одинакова с конструкцией униполярного транзистора, описанного в гл. 2. Величина активного сопротивления определяется величиной области пространственного заряда, когда на управляющий электрод  $p-n$ -перехода подано обратное смещение. Как и в униполярном транзисторе, весьма высокое сопротивление можно получить, если образовать достаточно тонкий канал, что при большом смещении приводит к снижению тока до минимума. Активное сопротивление, естественно, шунтируется емкостным сопротивлением перехода.

### Конденсаторы

Конденсаторы с использованием полупроводников могут быть изготовлены двумя способами. На фиг. 8.4 показан конденсатор с  $p-n$ -переходом. Как отмечено в гл. 1, хорошо сформированный



Фиг. 8. 4. Конденсатор, образованный  $p-n$ -переходом.

$p-n$ -переход с обратным смещением обладает емкостью и малым током утечки благодаря наличию обедненного слоя в месте перехода. Емкость, образуемая диффузионным переходом, рассчитывается по формуле

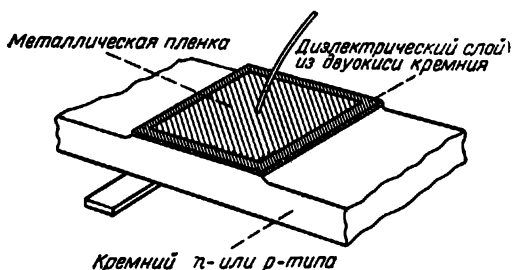
$$C = AK \left( \frac{qa}{12KV} \right)^{1/3},$$

где  $C$  — емкость,  $nф$ ;  $A$  — площадь перехода,  $см^2$ ;  $K$  — диэлектрическая постоянная;  $q$  — заряд электрона ( $1,602 \cdot 10^{-19}$   $к$ );  $a$  — градиент концентрации примесей в переходе;  $V$  — приложенное напряжение,  $в$ .

Следует отметить, что емкость является функцией приложенного напряжения. Именно это свойство используется для изготовления конденсаторов переменной емкости, регулируемых напряжением

и применяемых для электронной настройки и других подобных целей. Во многих случаях, однако, этот эффект оказывается вредным. Кроме того, твердая схема, в которой используется емкость  $p$  —  $n$ -перехода, должна быть собрана таким образом, чтобы в любых рабочих условиях переход всегда имел обратное смещение. Если допустить прямое смещение перехода, то результатом может быть закорачивание двух элементов схемы.

Для кремниевых устройств с большим количеством примесей по обе стороны перехода достижима емкость до  $100\,000\text{ пф/см}^2$ .



Фиг. 8. 5. Кремниевый конденсатор с оксидной пленкой.

Такие конденсаторы могут оказаться полезными лишь при работе с низкими напряжениями, так как уже при напряжении в несколько вольт будет иметь место лавинный или зенеровский пробой. Конденсаторы, выдерживающие напряжение в несколько сотен вольт, можно изготовлять путем уменьшения количества примесей с одной из сторон перехода. Однако емкость таких конденсаторов составляет лишь несколько тысяч пикофард на  $1\text{ см}^2$ .

Емкость перехода определяется главным образом общей концентрацией ионизированных примесей и не зависит от температуры. Наряду с емкостью перехода имеет место проводимость перехода, которая в кремниевых устройствах составляет при нулевом смещении около  $5 \cdot 10^{-4}\text{ мо/см}^2$ , при обратном смещении проводимость перехода значительно меньше.

Материал перехода представляет собой последовательное сопротивление, которое при высоких частотах оказывает вредное воздействие. Наименьшие трудности вызывает изготовление кремниевых конденсаторов с высокой добротностью, рассчитанных на частоты менее  $1\text{ Мгц}$ .

Другой тип кремниевого конденсатора, показанный на фиг. 8.5, изготовляют путем окисления (нагрева) поверхности кремниевой платы и использования слоя окиси в качестве диэлектрика. Поскольку окись образуется на монокристаллической подложке, она

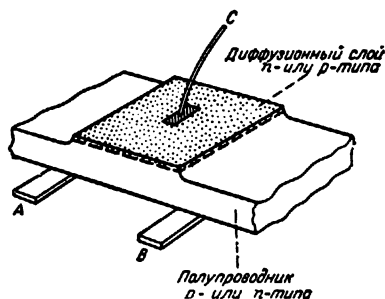
лишена каких-либо дефектов. Верхней обкладкой конденсатора служит металлическая пленка, осажденная через соответствующую маску методом вакуумного испарения. Были изготовлены кремниевые конденсаторы с пленкой окиси толщиной 8000 Å, которые без пробоя выдерживали напряжение 90 в. Образующаяся в этом случае окись представляет собой, как полагают, двуокись кремния, которая отличается высокой стойкостью к воздействию температуры. Испытания показали, что температурная характеристика такого конденсатора остается плоской вплоть до 150° С. Содержание диэлектрика в двуокиси кремния довольно низко и составляет около 4,5%, но даже при этом легко могут быть получены емкости до 10 000 пф/см<sup>2</sup>.

Большим преимуществом этих конденсаторов по сравнению с конденсаторами, использующими свойства перехода, является их относительная нечувствительность к изменениям приложенного напряжения. Кроме того, они являются неполярными. По этим причинам конденсаторы, изготовленные с использованием двуокиси кремния, предпочтительны для твердых схем, в которых требуются элементы, отличающиеся особой стабильностью в работе.

### Цепи с распределенными постоянными

Цепи с распределенными постоянными были описаны в гл. 6 при рассмотрении конструкций микросхем. Такие цепи могут быть изготовлены также из полупроводника и использоваться в твердых схемах. RC-цепь с распределенными постоянными представлена на фиг. 8.6. В цепь входит образованный  $p-n$ -переходом конденсатор, на который в рабочем состоянии должно подаваться обратное смещение. Альтернативным решением может быть применение конденсатора, изготовленного с использованием двуокиси кремния и обладающего тем преимуществом, что у него отсутствует полярность.

Такие элементы могут применяться в качестве фазосдвигающей схемы, фильтра нижних частот для сигналов, подаваемых на входы  $AC$  и снимаемых с выходов  $BC$ , или в качестве легко образуемого сопротивления с шунтирующей емкостью при соединении выводов  $B$  и  $C$ .



Фиг. 8.6. RC-цепь с распределенными постоянными, образованная конденсатором, использующим свойство  $p-n$ -перехода.

Очевидно, путем придания полупроводниковому кристаллу, обкладке конденсатора или диффузионному слою соответствующей формы можно получить большое разнообразие простых  $RC$ -цепей с распределенными постоянными.

### Катушки индуктивности

Последним нерассмотренным пассивным элементом схемы является катушка индуктивности. Индуктивность измеряется количеством магнитных силовых линий на единицу тока. Поскольку для образования замкнутых силовых линий требуется какой-то ограниченный объем, трудно представить себе катушку индуктивности, сравнимую по величине со спичечной головкой.

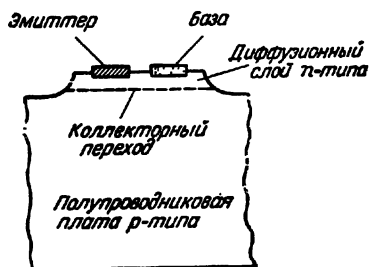
Одним из возможных решений вопроса является имитация требующихся функций. Например, в цепи задержки вместо катушки индуктивности можно использовать полупроводниковую линию задержки, вместо индуктивно-емкостных настроенных контуров —  $RC$ -цепи; устройства, использующие эффект поля, могут выполнять функции дросселей, а согласование полных сопротивлений в схеме может устранить необходимость в трансформаторах. Кроме того, в настоящее время для изготовления катушки индуктивности можно выполнить миниатюрную спираль из полупроводникового материала. Однако когда важна величина индуктивности или когда в индуктивно-емкостной цепи не представляется возможным пожертвовать избирательностью, повышенной за счет боковых частот, наилучшим решением будет комбинированное («гибридное») устройство, представляющее собой сочетание твердой схемы с отдельной катушкой индуктивности.

### Транзисторы

В принципе в твердые схемы можно встраивать почти все типы транзисторов. Весьма пригодным для этой цели является транзистор с диффузионной базой, поскольку при его изготовлении требуется лишь однократный процесс диффузии, что делает его совместимым с остальными элементами твердой схемы. Поперечное сечение такого транзистора, описанного в гл. 2, показано на фиг. 8.7.

Процесс изготовления транзистора с диффузионной базой заключается в следующем. Кремниевую плату подвергают регулируемому процессу диффузии для получения диффузионного слоя определенной толщины и градиента концентрации примесей. Затем путем использования масок и метода вакуумного испарения на поверхность платы наносят и слегка сплавляют небольшие по площади эмиттерный и коллекторный электроды. Если используемый полупроводниковый монокристалл обладает дырочной проводимостью

( $p$ -типа), а диффузионный слой — электронной проводимостью ( $n$ -типа), то соответствующий эмиттерный электрод выполняется из алюминия для получения после сплавления  $p$  —  $n$ -перехода, а соответствующий базовый электрод выполняется из золота с добавлением примеси для получения  $n$  —  $n^+$ -перехода. Площади эмиттерного и базового электродов обычно составляют  $25 \times 75$  мк. Участок вокруг электродов закрывают маской, и плату подвергают травлению, чтобы изолировать транзистор и получить небольшой по площади коллекторный переход. Соединительные проводники могут крепиться к верхним электродам термокомпрессионным способом. Область коллектора, функцию которой выполняет сама полупроводниковая плата, неразрывно связана с остальной частью твердой схемы.



Фиг. 8.7. Поперечное сечение транзистора с диффузионной базой.

Эмиттер выполнен из сплава  $p^+$ -типа; база выполнена из сплава  $n^+$ -типа; полупроводниковая плата  $p$ -типа представляет часть платы, образующей твердую схему.

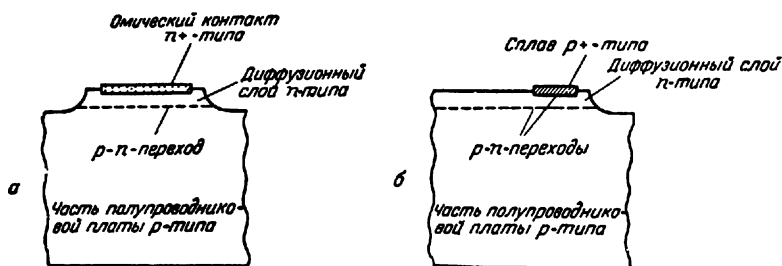
Диффузионный метод является весьма гибким и широко используется в производстве для изготовления некоторых мощных транзисторов и ряда полупроводниковых триодов, рассчитанных на весьма высокие частоты. Кроме того, потенциально этот метод изготовления транзисторов является наиболее дешевым.

Транзисторы с диффузионными базой и эмиттером и сплавные транзисторы (см. гл. 2) также можно использовать в твердых схемах, но при изготовлении первых требуется более чем однократный процесс диффузии, а вторые несколько усложняют компоновку схемы.

## Диоды

Наиболее подходящим типом диода для использования в твердых схемах является, несомненно, диффузионный. Как указывалось в гл. 2 и показано на фиг. 8.8 а, для диода требуется лишь один диффузионный слой. Технология изготовления диодов такого типа идентична технологии изготовления транзисторов с диффузионной базой, за исключением того, что наносится и сплавляется лишь один электрод. Соединительный проводник должен крепиться только к этому электроду, так как другая сторона перехода представляет собой саму полупроводниковую плату — основную часть твердой схемы.

Другой тип диода, представленный на фиг. 8.8. б, образован сплавным переходом на диффузионном слое и соответствует эмиттерному диоду рассмотренного выше транзистора. Этот диод может использоваться в сочетании с поверхностным резистивным слоем. В связи с высокой концентрацией примесей на обеих сторонах перехода пробивное напряжение поверхностно-сплавного диода не превышает 1 в. Этим он резко отличается от указанного выше диода, образованного переходом между диффузионным слоем и монокристаллом, пробивное напряжение которого может достигать



Фиг. 8.8. Поперечное сечение диодов, изготовленных диффузионным методом.

а — диод, образованный между диффузионным слоем и полупроводниковым монокристаллом; б — диод, образованный между сплавным переходом и диффузионным слоем.

весьма высокого значения. Диоды, изготавливаемые путем непосредственного сплавления с полупроводниковой платой, также могут использоваться в твердых схемах, однако они менее пригодны, так как требуют дополнительного этапа обработки.

В твердых схемах могут быть образованы и многие другие устройства, например униполярные транзисторы, туннельные диоды,  $p-n-p$ -устройства, гелиоэлементы и термоэлектрические элементы.

### Элементы твердых схем

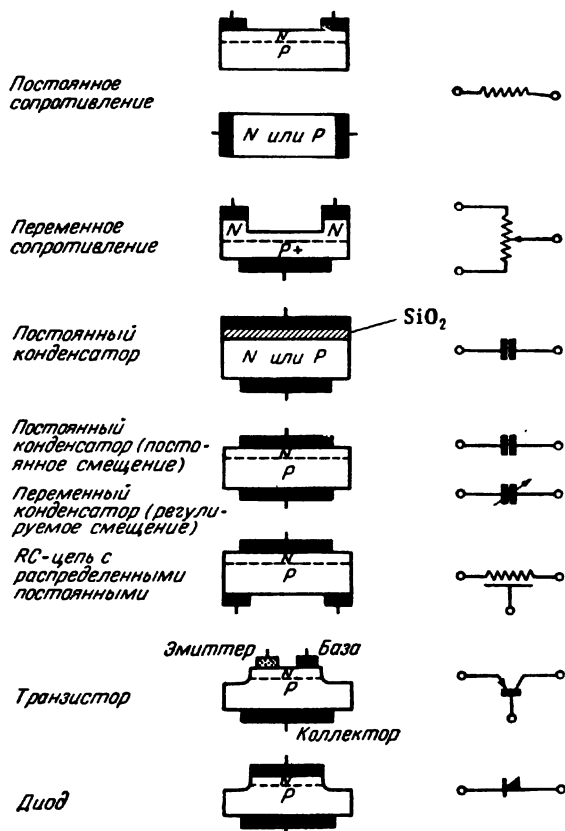
Различные элементы твердых схем, описанные в этом разделе, представлены на фиг. 8.9. Здесь показаны, конечно, лишь немногие из схемных элементов, которые можно применять в твердых схемах, в частности не показаны многие другие виды активных элементов.

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТВЕРДЫХ СХЕМ

Технология, используемая при изготовлении любого полупроводникового устройства, в большой степени определяется соотношениями производительности и желаемыми рабочими характе-



ристикami готового изделия. К этим характеристикам относятся не только электрические параметры, но и такие факторы, как надежность и температурная стабилизация. При изготовлении твердых схем имеют место два дополнительных соображения: конструктивная гибкость и функциональная оптимизация. Поскольку



Ф и г. 8. 9. Некоторые из элементов, используемых в твердых схемах.

каждая твердая схема является законченной схемой, а не отдельным схемным элементом, для выполнения какой-либо аппаратуры потребуется изготовление большого количества различных видов схем. Технологические процессы изготовления твердых схем должны в связи с этим обеспечивать возможность изменения конструкции схемы, не требуя дорогостоящей и трудоемкой механической оснастки. С другой стороны, эти технологические процессы должны

допускать возможность функциональной оптимизации схем. Полная оптимизация транзистора всегда связана с необходимостью конструктивных компромиссов; конструктор, занимающийся разработкой транзистора, вынужден, например, находить компромиссное решение между малым сопротивлением базы и высоким усилением по току, между тем как конструктор, разрабатывающий какую-либо схему, для достижения лучшей характеристики может



Фиг. 8. 10. Карта последовательности технологических операций при изготовлении твердых схем.

использовать в этой схеме транзисторы, имеющие одновременно и малое сопротивление базы и высокое усиление по току. Чтобы достичь той же степени оптимизации в твердой схеме, обе транзисторные характеристики должны быть получены при использовании одной полупроводниковой платы. Это вынуждает вводить дополнительный контроль технологических процессов, в котором нет необходимости при изготовлении обычных транзисторов.

Для безусловного выполнения указанных выше требований и практического производства твердых схем приходится использовать единственное в своем роде сочетание технических способов и приемов, включающих нанесение светочувствительных покрытий, оксидных масок и применение газовой диффузии. Несмотря на то что многие из этих способов уже использовались при изготовлении меза-транзисторов, их возможности в полном объеме с точки зрения технологии становятся очевидными в производстве твердых схем.

Последовательность технологических операций, указанная на фиг. 8.10, может оказаться пригодной для инженеров-разработчиков при изготовлении многих типов полупроводниковых устройств.

Поскольку важнейшие методы хорошо известны, они будут здесь рассмотрены лишь вкратце; при этом основной упор будет сделан на применении их в изготовлении твердых схем. Важно отметить этапы, на которых устройства обрабатываются одновременно, и этапы, на которых они обрабатываются по отдельности. Для достижения единообразия, надежности и высокого выхода годных изделий возможно большее число этапов должно включать одновременную обработку, т. е. изготовление большого количества схем в одно и то же время, в одних и тех же условиях и на той же полупроводниковой плате.

### Подготовка материала

В производстве твердых схем используется полупроводниковый материал, выращенный в форме монокристалла, который затем разрезается на части, шлифуется и полируется точно так же, как это делается при изготовлении других полупроводниковых устройств. Этот этап обработки может стать излишним, если окажется экономичным выпуск дендритовых (ветвистых) кристаллов. Для изготовления твердых схем применяются как кремний, так и германий; вместе с тем кремний, по-видимому, превосходит германий благодаря более высокому собственному сопротивлению, легкости образования маски для выборочной диффузии и лучшим результатам, достигаемым при стабилизации поверхности. На германии маски для диффузионного процесса образуются путем нанесения соответствующего покрытия методом испарения, что, однако, значительно усложняет эту операцию. Поэтому в последующем изложении рассматривается только применение кремния.

При данной форме удельное электрическое сопротивление исходного материала определяет значение любого объемного сопротивления, имеющегося в готовом устройстве, поэтому величина удельного сопротивления должна точно регулироваться. Величины удельного сопротивления исходного материала, составляющие около  $10 \text{ ом} \cdot \text{см}$ , вполне удовлетворительны для получения значений сопротивлений, наиболее часто встречающихся в устройствах типа вычислительных машин. Кроме того, удельные сопротивления в этом диапазоне значений оказались мало поддающимися влиянию последующей обработки материала.

### Образование перехода

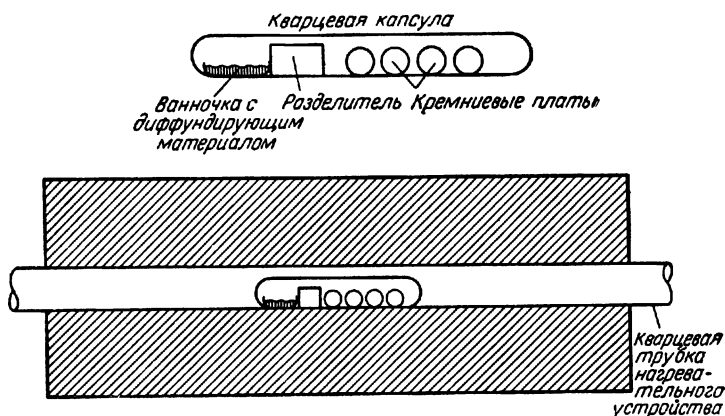
Для образования  $p-n$ -переходов в массу полупроводника вводится сплавным или диффузионным методом контролируемое количество примесей. По первому методу примесный металл, например алюминий, сначала осаждается на поверхности полупровод-

ника. Затем полупроводниковая плата нагревается до температуры, при которой плавится металл и некоторое количество полупроводника. После охлаждения область расплава затвердевает, приобретая монокристаллическую структуру и ту же ориентацию, что первоначально имелась у полупроводника. Примеси осажденного металла оказываются включенными в кристаллическую решетку области перекристаллизации, обеспечивая ей желаемый тип проводимости. Для получения  $p-n$ -перехода проводимость этой области должна быть противоположной типу проводимости, которым обладает остальная масса полупроводника. Поскольку сплавной метод заключается в процессе плавления и затвердевания, протекающих весьма быстро, некоторые трудности вызывает регулирование проникновения примесей в глубину полупроводниковой платы. Количество примесей, введенных в перекристаллизованный слой, зависит от металлургических свойств системы металл — полупроводник (фазовой диаграммы состояния) и термодинамики теплового процесса (отклонения от равновесия). На практике эти факторы ограничивают концентрацию примесей довольно узкими пределами.

Диффузионный метод в противоположность сплавному методу является относительно медленно протекающим процессом введения примесей в полупроводник, благодаря чему в этом случае успешнее достигается регулирование концентрации и проникновения примесей в глубину. Диффузионный метод заключается в нагревании кремния приблизительно до  $1200^\circ$  в присутствии примесного газа. Газообразная примесь диффундирует в полупроводниковую плату, образуя в зависимости от характеристики примеси диффузионный слой  $n$ - или  $p$ -типа. При получении диффузионным методом перехода  $n$ -типа в кремниевой плате  $p$ -типа в качестве диффундирующего вещества можно использовать алюминий, бор, галлий, индий или таллий. Выбор того или иного материала зависит от желаемой глубины проникновения и поверхностной концентрации примесных атомов. Различные примеси диффундируют с разной скоростью, поэтому два вида примесей могут быть подвергнуты одновременному процессу диффузии с целью образования двух  $p-n$ -переходов в одно и то же время. Толщина диффузионного перехода в кремнии может контролироваться с точностью от нескольких десятков микрон до сотых долей микрона.

Для регулирования поверхностной концентрации необходимо контролировать количество примесных атомов, достигающих поверхности кремниевой платы во время процесса диффундирования. Это выполняется путем помещения диффундирующего материала вместе с полупроводниковой платой в герметически закрываемую капсулу, в которой поддерживается вакуум (метод закрытой трубки), либо путем регулирования температуры, а следовательно,

и давления паров диффундирующего материала независимо от температуры кремния (метод открытой трубки), либо путем нанесения диффундирующего материала непосредственно на полупроводниковую плату перед нагреванием (метод «окрашивания»). Каждый из указанных приемов имеет свои преимущества. Выбор какого-либо метода зависит от изготавливаемого устройства и точности, необходимой для обеспечения надежного контроля параметров этого устройства.

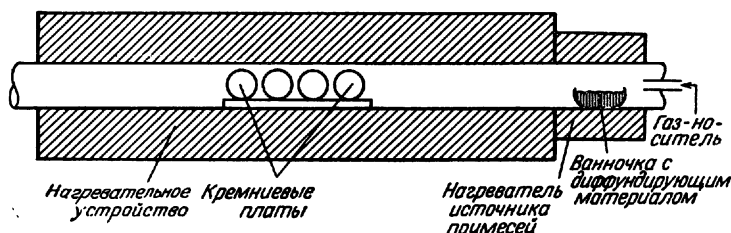


Фиг. 8. 11. Схема устройства для процесса диффузии по методу закрытой трубки.

Схема устройства для диффузии по методу закрытой трубки показана на фиг. 8.11. В кварцевую капсулу помещают кремниевые платы, затем устанавливают разделитель и небольшую кварцевую ванночку с диффундирующим материалом. Из капсулы затем удаляют воздух и, герметически закупорив ее, помещают в нагревательное устройство, где платы и диффундирующее вещество нагреваются до одинаковой температуры.

Схематическое изображение оборудования, необходимого для процесса диффузии по методу открытой трубки, представлено на фиг. 8.12. При этом методе требуется два нагревателя, установленных один за другим. Меньший нагреватель служит источником примесей, больший — выполняет роль диффузионной камеры. В сквозную кварцевую трубку со стороны источника примесей подается газ-носитель (аргон, водород, азот или кислород), расход которого регулируется. Диффундирующий материал нагревается в меньшем нагревателе и испаряется с регулируемой интенсивностью. При прохождении над ванночкой — источником примеси — газ-носитель захватывает пары диффундирующего материала и не-

сет их к нагретым полупроводниковым платам, где они и осаждаются. Платы нагреваются до более высокой температуры, чем испаряющаяся примесь. Температура как в меньшем нагревателе, так и в диффузионной камере регулируется с такой же тщательностью, как и при использовании метода закрытой трубки.



Ф и г. 8. 12. Схема устройства для процесса диффузии по методу открытой трубки.

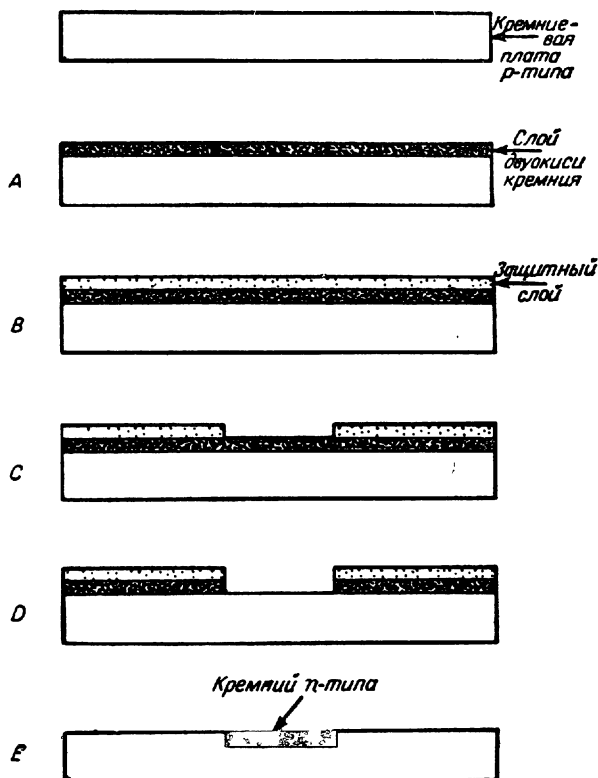
При методе «окрашивания» используется обогащенный раствор диффундирующего материала, который наносят на полупроводниковые платы. В некоторых случаях платы опускают в раствор, затем помещают их в нагревательную камеру и проводят процесс диффузии при повышенной температуре.

### Оксидные маски

Размеры площади переходов устройств сплавного типа можно варьировать путем увеличения или уменьшения участков, на которые наносят примесный металл. При изготовлении диффузионных устройств размеры площади переходов можно контролировать посредством образования на поверхности кремниевых плат оксидных масок. Если нагревать кремний в атмосфере окислителя, то образующийся на поверхности платы равномерный слой двуоксида кремния будет служить барьером для таких диффузионных примесей, как бор и фосфор. Выборочно удаляя отдельные участки слоя двуоксида кремния, можно успешно контролировать размеры диффузионных слоев.

Выборочное удаление отдельных участков оксидной пленки и образование маски осуществляется методом травления с использованием защитного слоя светочувствительной эмульсии. Подобные методы используются при изготовлении некоторых видов плат. Схематически этот метод представлен на фиг. 8.13. Защитный слой наносится обычно путем погружения в эмульсию. После высыхания эмульсии образуется тонкая пластичная пленка, обладающая фотографической чувствительностью к ультрафиолетовым лучам.

Экспозиция выполняется контактным способом через фотонегатив, изображение на котором получено с чертежа желаемой конфигурации маски в масштабе, в 50—100 раз превышающем действительный, с последующим уменьшением изображения при помощи



Фиг. 8. 13. Последовательные операции наложения оксидной маски для выборочного образования диффузионного слоя.

А—кремниевая плата с оксидным слоем; В—плата: нанесенным защитным слоем светочувствительной эмульсии; С—защитный слой после экспонирования и проявления; D—плата после удаления участка оксидного слоя фтористоводородной кислотой; E—плата после операции диффузии и удаления оксидной маски.

фотографических средств. Таким образом, для варьирования конфигурации оксидных масок необходимо менять только фотографические негативы. Специальный зажим для экспонирования позволяет накладывать негатив на плату в соответствии с другими негативами, наложенными ранее. Экспозиция светочувствительного

защитного слоя делает его нерастворимым в проявителе. Следовательно, участки защитного слоя, находящиеся под светонепроницаемыми местами негатива, будут удалены проявителем, в то время как участки слоя, приходящиеся на прозрачные места негатива, останутся нетронутыми. Если поместить теперь полупроводниковую плату в ванну с фтористоводородной кислотой, двуокись кремния будет удалена с тех участков, где она не защищена слоем эмульсии. Фтористоводородная кислота действует только на двуокись кремния, не разрушая ни расположенного ниже кремния, ни защитного эмульсионного слоя.

Помимо контролирования геометрии переходов, оксидные маски можно использовать также для регулирования концентрации примесей. Путем защиты масками одних участков в течение части диффузионного цикла, в то время как другие участки остаются защищенными в течение всего цикла, можно получать диффузионные слои различной толщины с различной концентрацией примесей. Например, на одной и той же полупроводниковой плате можно изготовить ряд диодов, характеризующихся различными пробивными напряжениями.

### Образование контактов

После образования переходов формирование активных областей схемы можно считать законченным. В готовой твердой схеме необходимо осуществить электрическое соединение слоев  $p$ - или  $n$ -типа и самой кремниевой платы. Нередко путь электрического тока проходит в пределах самого полупроводника, однако в конечном счете все же требуются некоторые внешние электрические соединения. Эти соединения осуществляются в два этапа: сначала на полупроводнике образуются металлические контакты, обладающие малым сопротивлением и не оказывающие выпрямляющего действия, затем к этим контактам крепятся выводы. Контакты получают путем осаждения металла на поверхность полупроводника и последующего образования сплава посредством тепловой обработки. Эта операция аналогична описанной при рассмотрении метода формирования сплавных  $p$ — $n$ -переходов, с тем отличием, однако, что в этом случае используемый примесный металл обладает проводимостью того же типа, что и полупроводник. Таким образом, образуются  $p$ — $p^+$ - или  $n$ — $n^+$ -переходы (плюс указывает на более высокую концентрацию примесей).

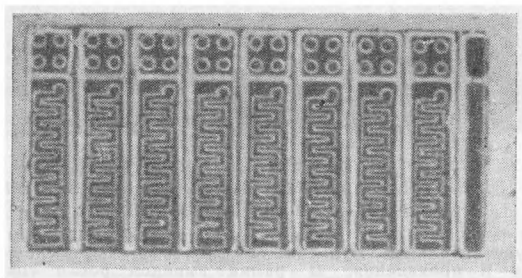
Эта операция, как и другие технологические операции, имеющие место при изготовлении полупроводниковых схем, не требует особых изменений при переходе на выпуск схем другой конструкции. Лишь размещение контактов будет различным для каждой новой схемы и изменится выбор металла, соответствующего типу прово-



димости слоев полупроводника. Следует отметить, что как гальванический метод, так и метод осаждения в вакууме из паровой фазы вполне согласуются с требованиями фотообработки. Если применяется гальваностегия, защитная маска из светочувствительной эмульсии может быть образована средствами фотографии непосредственно на неокисленном полупроводнике. Не проводящая тока маска обеспечит осаждение металла только на незащищенных участках поверхности полупроводника. Осаждение металла методом вакуумного испарения осуществляется обычно через металлические маски, которые и определяют форму контактов. Маски изготавливают из тонких листов металла методом травления с применением защитного слоя светочувствительной эмульсии. Здесь снова для изготовления новой схемы требуется только приготовление нового фотонегатива.

### Разделение плат на пластины требуемой формы

После образования переходов и контактов полупроводниковые платы могут быть разделены на отдельные пластины (платы меньшего размера) требуемой формы, которая в значительной степени определяется желаемой конфигурацией пути прохождения тока



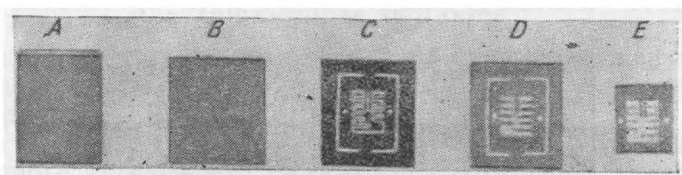
Фиг. 8. 14. Пример выборочного травления с использованием защитного светочувствительного эмульсионного слоя.

в пределах полупроводниковой пластины и варьируется в зависимости от конструкции схемы. Распиливание или разметка (с надрезом) с последующим разламыванием являются вполне удобными методами для разделения плат, однако таким путем можно получить пластины, форма которых ограничена только прямыми линиями. Возможно применение ультразвука, однако в этом случае при переходе на изготовление схем новой конструкции требуется смена дорогостоящей оснастки. Вполне удовлетворительным методом разделения плат на отдельные пластины является травление с исполь-

зованием фотообработки. В частности, используют накладывание защитных масок из светочувствительной эмульсии по методике, идентичной с применяемой при выборочном травлении оксидных пленок (см. фиг. 8.13), но при этом используется кислота, агрессивная по отношению к кремнию. В тех местах, где нет защитного слоя светочувствительной эмульсии, плата протравливается насквозь и, таким образом, разделяется на отдельные пластины. На этом этапе обработки в требующихся местах платы образуются меза-области, что достигается путем вытравливания определенных участков диффузионных слоев. Представленный на фиг. 8.14 пример иллюстрирует конструкции твердых схем, которые можно изготавливать методом травления с использованием защитных фотомасок.

### Крепление выводов

По завершении указанных выше операций обработки полупроводниковые пластины готовы для крепления выводов. Для массивной части полупроводниковой пластины в качестве выводов можно использовать коваровые полоски, на которых крепится сама



Фиг. 8. 15. Последовательные операции изготовления рамки выводов для твердой схемы.

*A*—очищенный металл; *B*—металл, покрытый защитным слоем светочувствительной эмульсии; *C*—защитный слой после экспонирования и проявления; *D*—рамка выводов после травления; *E*—рамка выводов после обрезки кромок и гальванического покрытия.

полупроводниковая пластина. Выводы диффузионных слоев крепятся к осажденным или сплавным контактам методом термокомпрессионного соединения. Коваровые выводы выполняются, как показано на фиг. 8.15, в форме кадровой рамки посредством травления с использованием защитного слоя светочувствительной эмульсии. Разные схемы могут потребовать различного размещения выводов, и благодаря методу травления с использованием защитного слоя устраняется необходимость в дорогостоящих штампах.

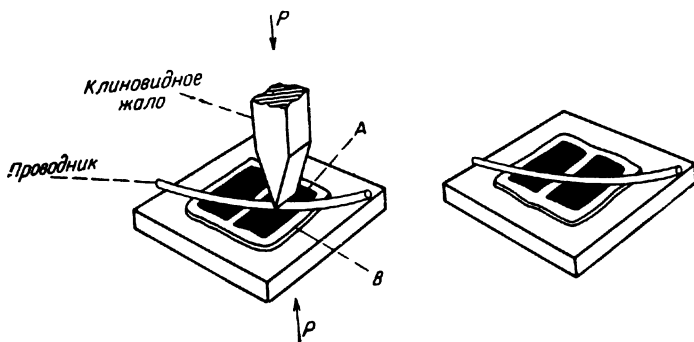
Монтажное основание твердой схемы, соответствующее ножке обычного транзистора, изготавливают путем размещения коваровой рамки с выводами между керамическим и коваровым кольцами.

На этом этапе изготовления твердых схем применяется обычный метод высокотемпературной сварки стекла с металлом. После обжига выводы покрывают слоем золота, и кремниевая пластина, содержащая схему, устанавливается на место. Затем пластины подвергают операции сплавления полупроводника с золоченым коваром. При изготовлении обычных мезатранзисторов этот технологический этап соответствует сплавлению коллектора с ножкой.

### Термокомпрессионное соединение

Соединения между различными точками твердой схемы и между самими полупроводниковыми платами твердых схем нередко выполняются с помощью тонкой (диаметром  $\sim 25$  мк) проволоки, прикрепляемой к платам посредством так называемого метода термокомпрессии [139].

Этот метод включает процесс нагревания соединительного проводника и платы во время прижима проволоки нагретым клиновидным жалом, как показано на фиг. 8.16. Давление  $350 \div 700$  кг/см<sup>2</sup>,



Фиг. 8. 16. Закрепление соединительных проводников термокомпрессионным методом.

А — полоска ковара; В — меза-область.

температура  $200 \div 300^\circ\text{C}$  и время выдержки 5 сек обеспечивают необходимые условия для соединения золотой проволоки с платой из германия. Подобный режим вполне пригоден и для присоединения проводника к кремниевой плате. Проводники из золота, серебра, алюминия и различных сплавов этих металлов можно соединять как непосредственно с полупроводником, так и через металлизированные участки полупроводника. Процесс термокомпрессионного соединения не включает в себя плавления соединяемых материалов, как это имеет место при методе сплавления: проволока лишь слегка вдавливается в полупроводниковую плату, что делает этот способ особо пригодным для присоединения проволочных проводников

к диффузионным слоям, толщина которых составляет несколько микронов. Соединение получается весьма прочным: при попытке выдернуть проволочный проводник либо обрывается проволока, либо вместе с проволокой с поверхности полупроводника вырывается кусочек материала, в то время как место соединения остается невредимым. Если использовать проволочный проводник, содержащий донорные или акцепторные примеси, оказывается возможным получить  $n - n^{+}$ - или  $p - n$ -переходы для германия  $n$ -типа и  $p - n$ - или  $p - p^{+}$ -переходы для германия  $p$ -типа.

Термокомпрессионный метод используется в основном в производстве диффузионных транзисторов, однако он подходит и для изготовления твердых схем.

### Сборка

Готовую схему следует соответствующим образом герметизировать для защиты от различных воздействий окружающей среды. Возможно, наилучшим способом герметизации является заключение собранной схемы в отдельную капсулу, однако применяются и другие методы. Этот этап в технологии изготовления твердых схем относится, по-видимому, к числу важнейших, поскольку от него в большой степени зависит надежность устройства.

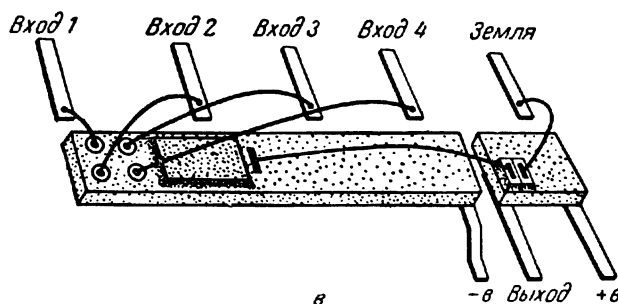
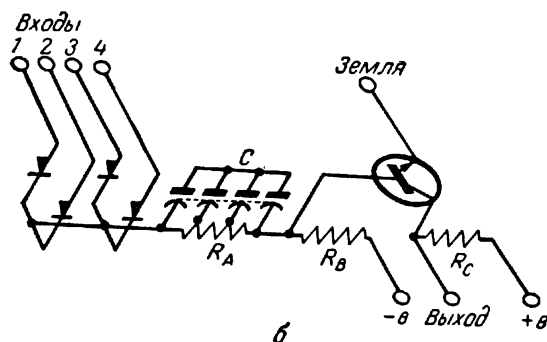
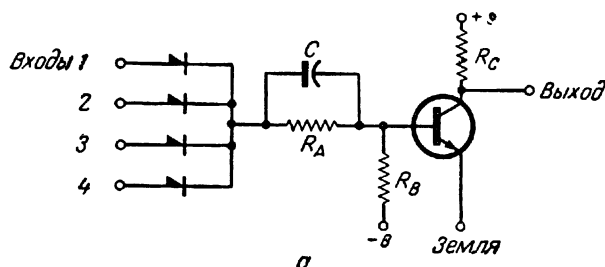
### ПРИМЕР КОНСТРУИРОВАНИЯ ТВЕРДОЙ СХЕМЫ

При конструировании какой-либо твердой схемы производится тщательный выбор материалов и определение требующихся диффузионных слоев, с тем чтобы получить оптимальную для данной схемы конструкцию транзистора. Поскольку транзистор составляет неотъемлемую часть схемы, его рабочие условия точно известны. Таким образом, конструкция транзистора в данном применении может быть точно приспособлена, что уменьшает число упоминавшихся ранее вынужденных компромиссных решений. При конструировании схем, требующих применения как транзисторов, так и диодов, до сих пор остается общепринятым метод, при котором оптимизируют характеристики транзисторов.

Диодная характеристика перехода эмиттер — база обычно отличается от диодной характеристики перехода коллектор — база. В частности, эмиттерный переход имеет относительно крутую характеристику и низкое пробивное напряжение, в то время как характеристика коллекторного перехода более полого, а пробивное напряжение высокое.

В процессе изготовления диффузионным методом транзисторных переходов в любом месте платы может быть образовано любое количество диодов с характеристиками, идентичными какому-либо

из переходов транзистора. Для получения на этой же плате других устройств вполне возможно применять процесс диффузии специально выбранных материалов.



Фиг. 8. 17. Методика конструирования твердой схемы.  
а—принципиальная схема типа НЕ—ИЛИ; б—принципиальная схема типа НЕ—ИЛИ, представленная в объемной форме; в—твердая схема типа НЕ—ИЛИ.

В качестве примера методики конструирования рассмотрим схему типа НЕ — ИЛИ, представленную на фиг. 8.17. Схема состоит из четырех диодов, трех сопротивлений, одного конденсатора

и одного транзистора. Все значения элементов схемы находятся в заданных пределах, следовательно, эта схема может быть непосредственно воплощена в твердую схему. Желательно заменить сосредоточенную резистивно-емкостную нагрузку в цепи базы транзистора на  $RC$ -цепь с распределенными постоянными. Кроме того, поскольку полярность напряжения, подаваемого на конденсатор, не меняется, вместо него можно использовать емкость  $p-n$ -перехода.

Хотя эту схему можно сконструировать на одной плате, на практике оказывается желательным отделить сопротивления во входной цепи схемы от нагрузочного сопротивления в цепи коллектора. Тогда все сопротивления окажутся размещенными на двух отрезках платы. Величины сопротивлений  $R_A$ ,  $R_B$  и  $R_C$  составляют обычно 4, 10 и 2  $ком$  соответственно. При использовании платы толщиной 50  $мк$ , изготовленной из кремния с удельным сопротивлением 10  $ом \cdot см$ , требуемые размеры областей этих сопротивлений составляют  $250 \times 508$   $мк$  для  $R_A$ ,  $250 \times 1270$   $мк$  для  $R_B$  и  $254 \times 254$   $мк$  для  $R_C$ .

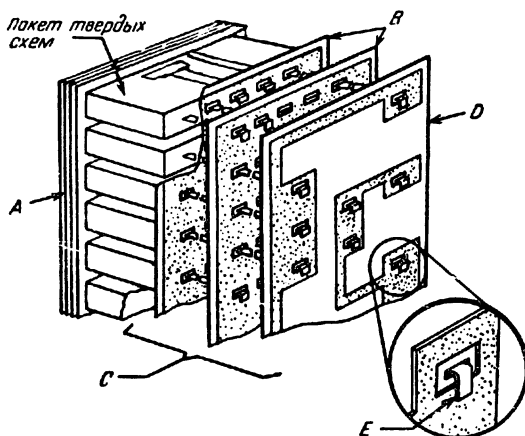
Сопротивления и другие элементы схемы можно разместить на плате в таком, например, порядке, как показано на фиг. 8.17, б. Взятая в качестве исходного материала кремниевая плата  $n$ -типа образует область коллектора транзистора, все сопротивления и катоды всех диодов. Для образования области базы, анодов диодов и конденсатора, шунтирующего сопротивление  $R_A$ , используется диффузионный метод, посредством которого создают слой  $p-n$ -типа.

Эмиттерная область транзистора создается путем образования диффузионного слоя  $n$ -типа. Указанные технологические операции производятся над кремниевыми платами большого размера, обычно  $5 \times 11$   $мм$ . После изготовления металлических контактов такая плата разрезается на 16 отдельных брусочков, каждый из которых представляет собой твердую схему типа НЕ — ИЛИ. Такая технология весьма практична, поскольку обеспечивает идентичность характеристик большого количества устройств. Последний этап технологического процесса производства твердой схемы заключается в подсоединении вводов, выводов и нескольких внешних соединительных проводников, связывающих отдельные элементы схемы, как показано на фиг. 8.17, в. Внешние соединительные проводники выполняются из золотой проволоки и крепятся методом термокомпрессии.

Теоретически возможно большое число вариантов компоновки схем такого типа. Правильный выбор оптимального варианта компоновки требует глубоких знаний применяющихся технологических способов и приемов, а также их возможностей. Эта работа выполняется инженерами-разработчиками твердых схем.

### МЕЖСХЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И СБОРКА СХЕМ В БЛОКИ

Благодаря весьма малым размерам готовых схем почти любая форма межсхемных соединений позволит добиться значительного сокращения размеров и веса сравнительно с размерами и весом изделия, собранного из обычных деталей. Вместе с тем требуются определенные усилия, для того чтобы сконструировать систему,



Фиг. 8. 18. Один из методов соединения твердых схем.

А — травленные листы омедненного тефлона, установленные в нормальном положении; В — листы подачи напряжений на входы схем; С — травленные листы омедненного тефлона (для наглядности листы разнесены один от другого); D — концевой лист, с которого снимается сигнал; E — изогнутый и приваренный к медному покрытию вывод.

в которой межсхемные соединения не занимали бы объем, больший, чем сами твердые схемы. Один из путей достижения этого — сборка схем в пакет — показан на фиг. 8.18. Соединение между схемами обеспечивается тонкими (толщиной 50 мк) листами омедненного тефлона. В связи с тем что расстояния между выводами весьма малы, выполнить монтаж всех схем на одном листе тефлона не представляется возможным, поэтому используют несколько листов. Необходимые напряжения подводятся к каждому к отдельному листу омедненного тефлона, на котором имеются расположенные в форме решетки отверстия для выводов.

Выводы либо пропускают через лист тефлона насквозь (в этом случае они изолированы от медного покрытия), либо, пропустив

через отверстие, их изгибают и приваривают к меди, обеспечивая, таким образом, электрическое соединение. После того как выполнены соединения, обеспечивающие подвод требуемых напряжений, накладывается концевой лист, с которого снимается выходной сигнал. Если оказывается необходимой кроссировка, можно использовать дополнительный концевой лист. Когда твердые схемы предполагается соединять описываемым способом, конструктор должен стремиться к такому размещению выводов каждого пакета, чтобы расстояния между выводами на концевом листе оказались возможно большими. Следует заметить, что отдельные листы можно использовать в качестве экранов, а также для заземления. Кроме того, такой метод соединения может быть полезным в с. в. ч.-устройствах на твердых схемах, где омедненные листы тефлона могут использоваться как микроминиатюрные линии передачи.

Возможно, конечно, применение и других методов межсхемных соединений. Вообще же схемы, которые не предусматривают размещения плат в одной плоскости, требуют значительно большего объема. Для одних лишь выводов потребуется объем, равный объему самой твердой схемы, а для монтажных проводников необходимо еще больше места.

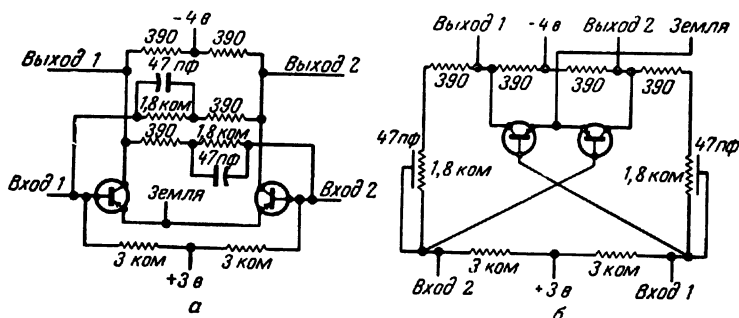
Однако этот дополнительный объем не будет пустовать, если его можно использовать для обеспечения более эффективной теплоотдачи. Миниатюризация устройств сопровождается повышением теплонапряженности. В частности, если электронное оборудование komponуется в меньшем объеме без изменения электрической схемы, то рассеяние тепла на единицу объема заметно возрастает. Решение этой проблемы осуществляется несколькими путями. Во-первых, твердая схема должна конструироваться с расчетом на минимальное потребление мощности. Во-вторых, каждой герметизированной сборке следует придавать такую форму, при которой отношение ее поверхности к занимаемому объему было бы высоким, что обеспечивает эффективное рассеяние тепла. Наконец, поскольку каждая твердая схема занимает весьма малый объем, нетрудно предусмотреть пути передачи тепла к теплоотводам. При пакетной конструкции блока, идентичного показанному на фиг. 8.18, это может быть сделано посредством размещения между платами металлических прокладок, соединенных с теплоотводами на обеих открытых сторонах блока. Кроме того, большая с конструктивной точки зрения свобода, предоставляемая твердыми схемами, позволяет разрабатывать новые схемы, требующие для своей работы значительно меньшей мощности.



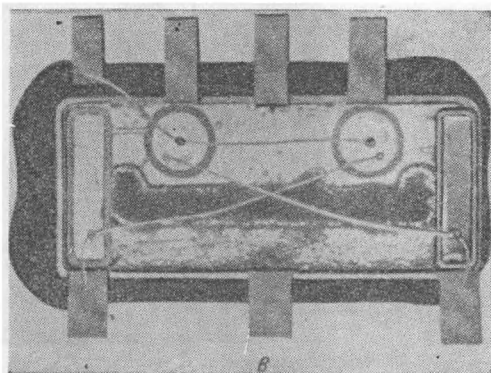
## ПРОИЗВОДСТВО ТВЕРДЫХ СХЕМ

## Фирма Texas Instruments Inc.

На фиг. 8.19 А и Б представлены некоторые твердые схемы, выпускаемые этой фирмой [141]. Рассмотрим одну из них — мульти-вibrator, представленный на фиг. 8.19. Схема состоит из восьми сопротивлений, двух конденсаторов и двух транзисторов. На фиг. 8.19, а показана обычная схема мультивибратора, а на фиг. 8.19, б —

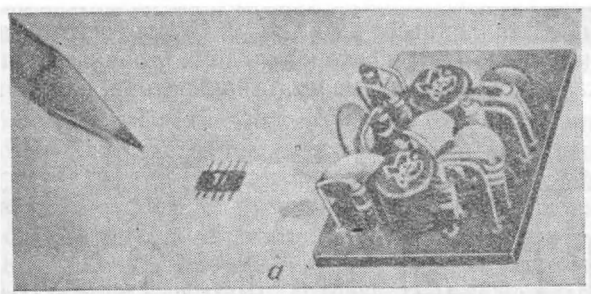


Фиг. 8. 19. Мультивибратор.  
а — типовая схема мультивибратора с двумя устойчивыми положениями, легко преобразуемая для выполнения в виде твердой схемы; б — другой вариант схемы, представленной на фиг. 8. 19, а, показывающий приблизительную компоновку полупроводниковой схемы; в — увеличенное изображение твердой схемы бистабильного мультивибратора. После герметизации размеры готового мультивибратора составляют  $6,0 \times 3,0 \times 0,6$  мм.

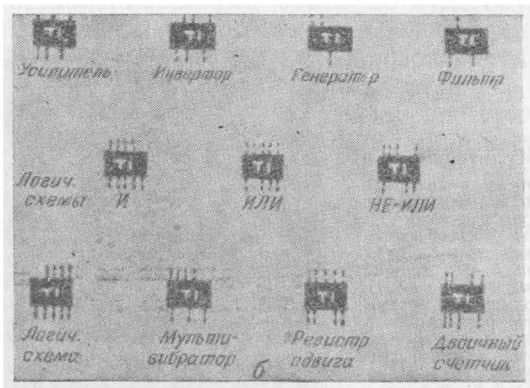


вариант этой же схемы, преобразованный для удобства физической компоновки твердой схемы. Единственное различие между схемами заключается в том, что во втором варианте вместо отдельных сопротивлений и конденсаторов в цепях обратной связи используются  $RC$ -цепи с распределенными постоянными. На фиг. 8. 20 показаны размещение и порядок соединения эквивалентных элементов твердой схемы. Мультивибратор состоит из полупроводниковой платы, в центре которой имеется прорезь, обеспечивающая необходимую

изоляцию между элементами схемы. Области сопротивлений располагают по кромкам платы, конденсаторы и транзисторы — над сопротивлениями и несколько выше поверхности платы, что достигается путем выборочного травления в процессе изготовления.



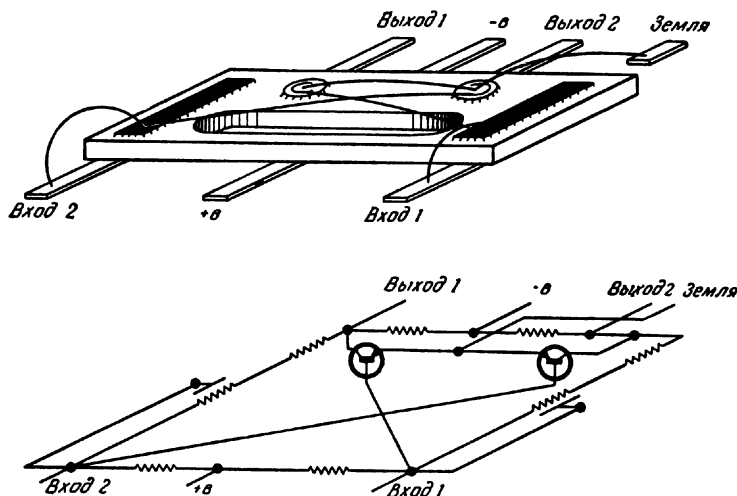
Фиг. 8. 19А. Сравнительные размеры обычной схемы с ее эквивалентом, выполненным в виде твердой схемы.



Фиг. 8. 19В. Твердые схемы, выпускаемые фирмой Texas Instruments Inc.

Для соединения элементов схемы наиболее удобен следующий порядок: за исходную точку берется ввод  $+3$  в, отсюда цепь разветвляется к двум сопротивлениям по  $3$  ком. За каждым из этих сопротивлений следует  $RC$ -цепь с распределенными параметрами; концы этих цепей соединены последовательно включенными сопротивлениями по  $390$  ом каждое. Коллекторные переходы транзисторов представляют собой части этих сопротивлений. Внешние соедине-

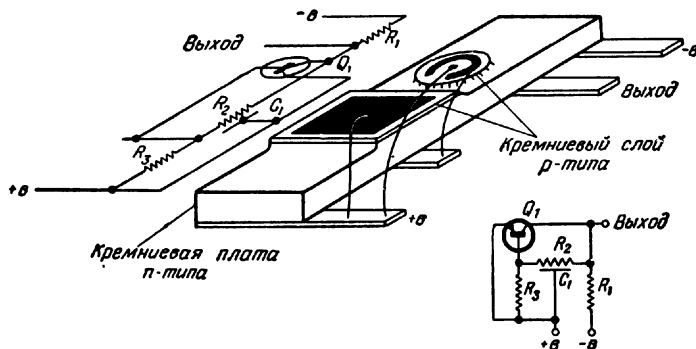
ния выполняются с помощью тонких проволок, крепящихся к соответствующим участкам платы. К плате присоединяются и изолируются друг от друга необходимые входы и выходы.



Фиг. 8. 20. Схема и объемное изображение мультивибратора (см. фиг. 8. 19).

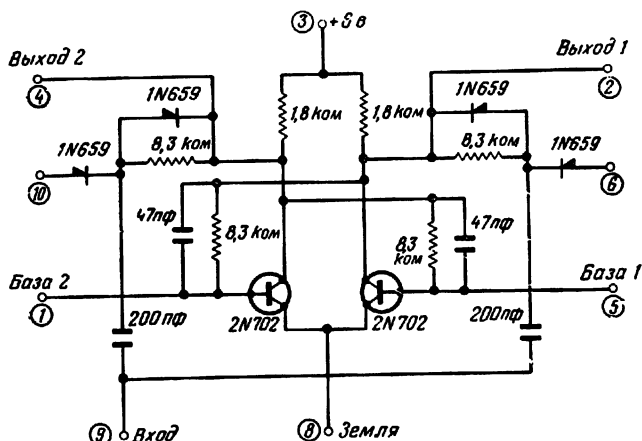
Размеры готового герметизированного мультивибратора  $6,0 \times 3,0 \times 0,6$  мм. Если не учитывать выводов, объем его равен  $\sim 11,5$  мм<sup>3</sup>, что соответствует плотности монтажа приблизительно 1220 деталей на 1 см<sup>3</sup>.

На фиг. 8.21 представлены объемное изображение и схема генератора с фазовым сдвигом. Здесь показана также компоновка эле-



Фиг. 8. 21. Генератор с фазовым сдвигом, выполненный на кремниевой плате.

ментов, облегчающая определение порядка соединения элементов в твердой схеме. Эта схема состоит из полупроводниковой платы с диффузионным слоем, полученным в процессе однократного диффундирования и выборочного травления для выделения областей транзистора и конденсатора. Тело платы образует цепь сопротивлений. Внешние соединительные проводники выполнены из тонких проволок, подключенных к плате и коваровым выводам.



Фиг. 8. 22. Схема устройства типа 502.

Выпускаемая фирмой твердая схема типа 502 (фиг. 8.22) предназначена для использования в вычислительных устройствах, регистрах сдвига и ждущих мультивибраторах. Ниже приведены параметры этой первой появившейся в продаже твердой схемы.

#### Механические характеристики:

Твердая схема заключена в металлическую капсулу и герметизирована путем сварки стекла с металлом. Выводы выполнены из золоченого коvara. Вес готовой схемы 0,05 г.

Максимальные номинальные значения при температуре окружающей среды 25°:

Максимальное напряжение питания . . . . .	8 в
Максимальное пусковое напряжение . . . . .	8 в
Допустимая температура при хранении . . . . .	от —55 до +125° С

#### Расчетные характеристики:

Напряжение питания . . . . .	6,0 в ±5%
------------------------------	-----------

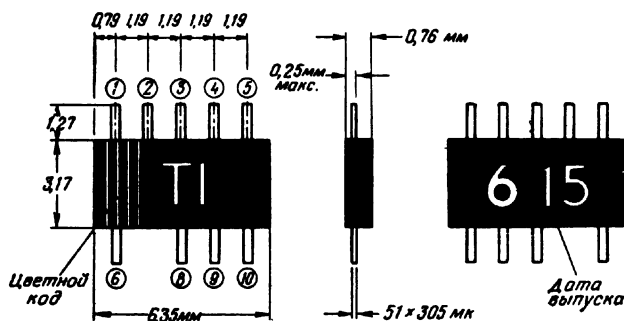
#### Входные параметры:

Минимальная ширина импульса . . . . .	1 мсек
Минимальное пусковое напряжение . . . . .	1,5 в
Максимальное пусковое напряжение . . . . .	4,0 в

Максимальная пусковая частота . . . . .	200 кГц
Максимальное время нарастания . . . . .	1 мксек
Напряжения на выходе:	
При нагрузке 10 ком на землю . . . . .	Вкл. 0,7 в (макс.) Выкл. 4 в (миним.)
При нагрузке 10 ком на $V_s$ . . . . .	Вкл. 0,8 в (макс.) Выкл. 4 в (миним.)
Форма сигнала на выходе (типовая):	
Вкл. (90%) . . . . .	1 мксек
Выкл. (90%) . . . . .	1 мксек
Диапазон рабочих температур . . . . .	от $-40$ до $+85^\circ \text{C}$

В числе других устройств, изготавливаемых этой фирмой в виде твердых схем, имеются (фиг. 8.23):

- 1) инверторы;
- 2) ждущие мультивибраторы;
- 3) схемы типа И;
- 4) схемы типа ИЛИ;
- 5) схемы типа НЕ — ИЛИ;
- 6) фильтры;
- 7) низкочастотные усилители.

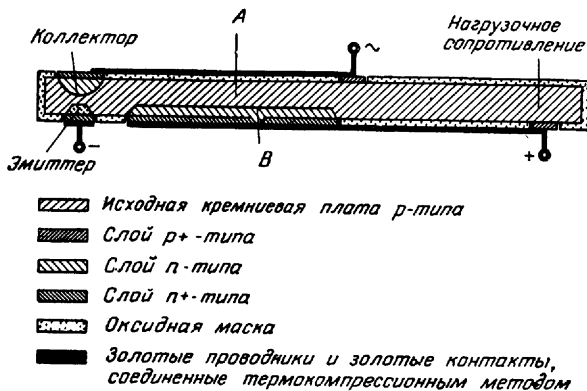


Фиг. 8. 23. Внешние размеры герметизированной твердой схемы.

Для логических схем, инверторов и двоичных счетчиков специалисты фирмы установили, что скорость коммутации у твердых схем нередко превышает коммутирующие схемы, собранные на обычных деталях. Это указывает на то, что когда транзистор составляет единое целое с полупроводниковой платой, а не монтируется на ножке, уменьшение емкости коллектора и устранение индуктивности выводов позволяют получить более высокую скорость коммутации.

### Фирма Plessey Company

На фиг. 8.24 показана конструкция генератора с фазовым сдвигом, выполненного методом твердой схемы. Эмиттер, коллектор и конденсатор образованы здесь путем глубокой диффузии в кремниевую плату  $p$ -типа. Требуемая конфигурация диффузионных слоев достигается посредством использования оксидных масок, которым в свою очередь придается необходимая форма, для чего



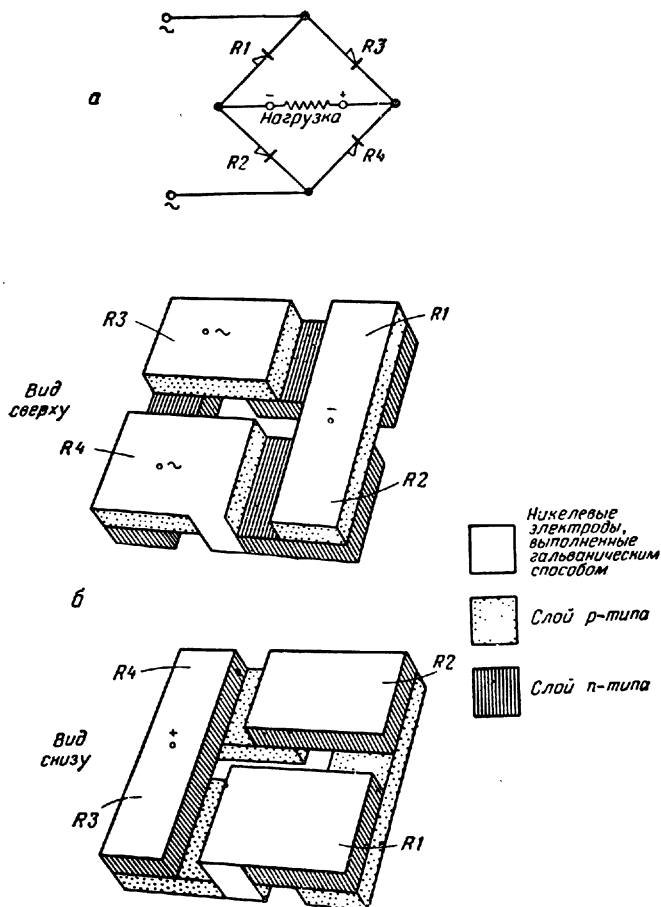
Фиг. 8. 24. Генератор с фазовым сдвигом, выполненный в виде твердой схемы.

А — сопротивление смещения (коллектор — база); В — фазосдвигающая  $RC$ -цепь с распределенными параметрами.

определенные их участки вытравливают по методу фотолитографии. Монтаж осуществляется напылением золотых соединительных проводников на оксидный слой, служащий в данном случае изоляцией. На тех участках платы, где эмиттер, коллектор и конденсатор выходят на поверхность, образуются области  $n^+$ -типа, а на участках, где размещены вводы от положительного и отрицательного полюсов батареи, образуются области  $p^+$ -типа. Интересной особенностью этой конструкции является использование для соединения далеко отстоящих элементов схемы не проволочных соединительных проводников, а проводников, нанесенных методом вакуумного осаждения золота.

Еще одним примером твердой схемы, конструкция которой разработана этой фирмой, является двухполупериодный выпрямитель по мостиковой схеме, показанный на фиг. 8.25. В этом случае из единой кремниевой платы, переход которой образован методом глубокой диффузии, вырезают четыре выпрямителя. Обычно для этой цели используют кремниевую плату  $p$ -типа толщиной 190 мк, в которой посредством диффузии фосфора образуют переход, распола-

гающийся на глубине 64 мк от поверхности. На одной стороне платы определенные участки слоя  $n$ -типа сошлифовывают и образуют тонкий диффузионный слой  $p^+$ -типа, для чего применяют, например, метод «окрашивания». Надежные омические контакты получаются



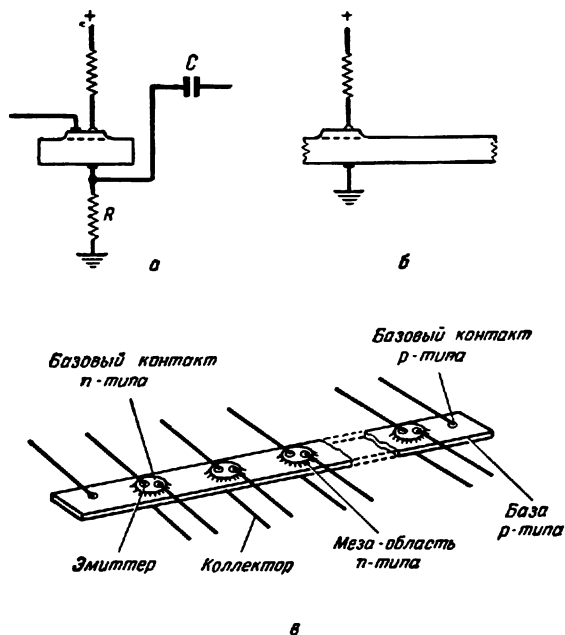
Фиг. 8.25. Мостиковый двухполупериодный выпрямитель. а — эквивалентная схема устройства и нагрузки; б — конструкция мостикового выпрямителя с отдельными областями, обладающими выпрямляющим действием.

путем нанесения гальваническим методом слоя никеля. После этого вырезают Т-образные пазы глубиной около 72 мк, как показано на фиг. 8.25, б. Области, обладающие выпрямляющим действием, изолируются одна от другой путем удаления никелевого покрытия

с кромок платы. Оставляются лишь полоски никелевого слоя, соединяющие  $R_1$  с  $R_2$  и  $R_3$  с  $R_4$ . Эти полоски соединяют накоротко оба  $p-n$ -перехода в центре платы, оставляя лишь четыре активных  $p-n$ -перехода по одному в каждом углу платы. Удаление никеля с требующихся участков платы осуществляется травлением с использованием защиты масками тех областей, где никелевый слой должен оставаться неповрежденным. Участки, покрытые никелем, залуживают припоем. Выводы и, если необходимо, теплоотводы крепятся к залуженным участкам платы.

### Фирма Radio Corporation of America

Конструктивное решение, найденное этой фирмой, заключается в соединении ряда активных элементов в единую схему, предназначенную для использования в вычислительных устройствах. Твер-



Фиг. 8. 26. Сдвигающий регистр.

а — обычная схема на тиристоре; б — схема на тиристоре с полупроводниковой линией задержки; в — интегральный сдвигающий регистр на тиристорах.

дые схемы этого типа [140] состоят либо из тириستоров, либо из униполярных транзисторов. Оба этих устройства описаны в гл. 2.

Тиристор [75] используется для изготовления интегрального сдвигающего регистра. Один каскад обычного сдвигающего регистра



на тиристорах представлен на фиг. 8.26, *а*. В некоторых пределах прикладываемого напряжения тиристор имеет характеристику с отрицательным сопротивлением (падающим участком) и может, следовательно, использоваться как двустабильный элемент для хранения одной цифры. При включении каскада импульс проходит по *RC*-цепи к соседнему каскаду и включает его. Постоянная времени *RC*-цепи должна быть достаточно большой для хранения информации в течение времени, необходимого для вывода предыдущей информации и введения последующей. *RC*-цепь является элементом памяти.

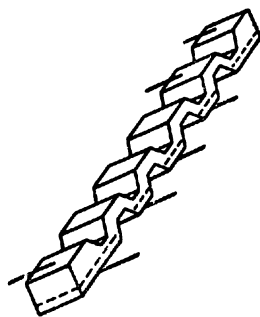
В схеме, представленной на фиг. 8.26, *б*, *RC*-цепь заменена линией задержки, выполненной в виде небольшого германиевого брусочка, к которому прикладывается сдвигающий импульс. Вдоль бруска распространяются неосновные носители от запущенного каскада. По истечении времени, равного времени пролета, неосновные носители достигают конца бруска, где они могут быть использованы для запуска следующего каскада на тиристорах.

На фиг. 8.26, *в* показан вариант полной схемы сдвигающего регистра. Информация перемещается вдоль бруска благодаря сдвигающему напряжению, приложенному к его концам. Таким образом, двоичное число, хранящееся в регистре, может быть сдвинуто. Каждый каскад имеет базовый контакт для записи информации.

Другим интегральным устройством, в котором используется униполярный транзистор, является логическая схема с непосредственной связью на униполярных транзисторах. На фиг. 8.27 представлено такое устройство, состоящее из ряда схем типа И. Оно содержит пять униполярных транзисторов, изготовленных на одном кремниевом бруске, четыре из которых используются как активные элементы, а пятый выполняет роль постоянного сопротивления.

Полупроводниковому бруску придана такая форма, что вентиляльные области транзисторов разделены и каждый транзистор соединяется с соседним лишь узкой кремниевой перемычкой. Напряжение, прикладываемое к концевым контактам бруска, вызывает появление тока вдоль бруска и соответственно выходного сигнала в случае, когда одновременно все четыре вентиляльные области имеют небольшое обратное смещение.

С другой стороны, если одна или более вентиляльных областей имеют большое обратное смещение, ток через брусок не протекает

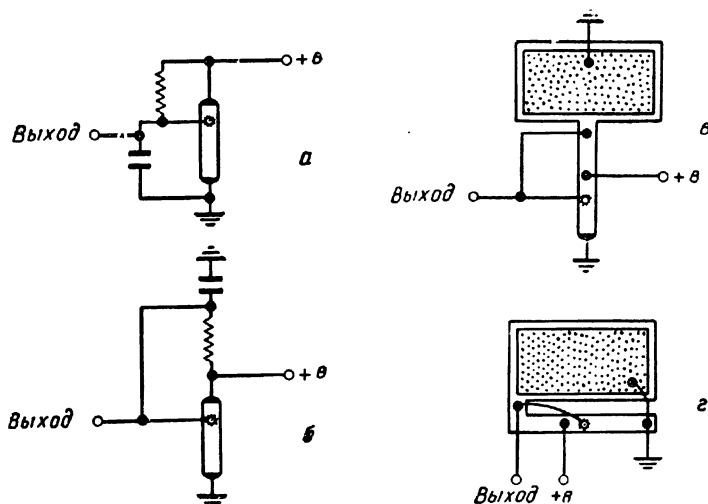


Фиг. 8. 27. Логическая схема с непосредственной связью на униполярных транзисторах, состоящая из ряда схем типа И.

и выходной сигнал отсутствует. Возможны и другие типы твердых схем, использующих интегральные униполярные устройства. Описание их можно найти в приводимой литературе.

### Фирма Royal Radar Establishment

В первых твердых схемах, сконструированных этой фирмой, в качестве активного элемента применялся транзистор с одним переходом [62]. Важным свойством этого транзистора является наличие



Ф и г. 8. 28. Релаксационный генератор, выполненный в виде твердой схемы.

*а* — обычная схема; *б* — эта же схема, представленная в виде, удобном для выполнения в форме твердой схемы; *в* — релаксационный генератор, выполненный в виде твердой схемы; *г* — более целесобразная компоновка твердой схемы.

области отрицательного сопротивления на входной характеристике, что делает его пригодным для применения в схемах генераторов реле, генераторов пилообразного напряжения и регенеративных импульсных усилителей. Транзистор с одним переходом представляет собой брусок кремния или германия с омическими контактами на его концах и  $p-n$ -переходом вблизи одного из контактов (см. также гл. 2). Для некоторых применений пассивные элементы схемы имеют достаточно малые величины и могут быть выполнены в составе твердой схемы. На фиг. 8.28, *а* в качестве примера приведена схема генератора или триггера, использующая транзистор с одним переходом.

Эта же схема представлена на фиг. 8.28, б в виде, удобном для воплощения ее в форме твердой схемы. Соответствующая твердая схема изображена на фиг. 8.28, в. Более целесообразная компоновка такой твердой схемы изображена на фиг. 8.28, г.

К моменту начала работы единственным транзистором с одним переходом являлся кремниевый или германиевый транзистор, выполненный сплавным способом. Рассматриваемую твердую схему следовало выполнить диффузионным методом, обеспечивающим наибольшую с конструктивной точки зрения свободу, для чего было необходимо, чтобы транзисторы имели эмиттер с диффузионным  $p-n$ -переходом. Предварительные эксперименты показали возможность такого варианта.

В кремниевую плату  $n$ -типа с удельным сопротивлением  $30 \text{ ом}\cdot\text{см}$  вводился способом диффузии бор, после чего на плату наносился слой металла и ее разрезали на бруски размерами  $0,25 \times 0,38 \times 1,52 \text{ мм}$ . При изготовлении эмиттерного перехода и двух омических базовых контактов использовались маски и выборочное травление.

Высота меза-области выдерживалась в строгих пределах, так как переход не следовало чрезмерно удалять от меняющегося поля, возникающего между базовыми контактами. При включении транзистора по схеме, приведенной на фиг. 8.28, а, была получена генерация на частотах до  $650 \text{ Кгц}$ .

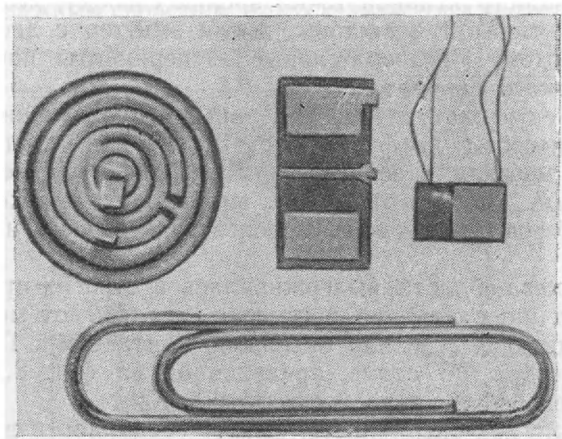
После того как специалисты фирмы убедились в возможности изготовления транзистора с одним переходом, была изготовлена твердая схема. Кремниевая плата  $n$ -типа с удельным сопротивлением  $30 \text{ ом}\cdot\text{см}$ , имевшая диффузионный слой бора, разрезалась на пластины размерами приблизительно  $5 \times 5 \times 0,25 \text{ мм}$ . Конденсатор, эмиттер и два базовых контакта изготавливались с использованием масок и выборочного травления. С помощью проволочной пилы в плате прорезали паз, затем к соответствующим участкам ее поверхности были припаяны выводы. Готовое устройство подвергалось электрическим испытаниям. Области транзистора или сопротивления подвергались выборочному травлению до получения генерации. При конденсаторе размерами примерно  $4,6 \times 3 \text{ мм}$  на эмиттере был получен слегка искаженный пилообразный сигнал. Это была первая твердая схема, изготовленная в Великобритании.

### Фирма Westinghouse Electric Corp.

Работа по конструированию твердых схем, проводимая фирмой по контракту с ВВС США, является наиболее крупной в этой области микроминиатюризации. К сожалению, ко времени издания книги еще не было опубликовано подробных отчетов

об исследованиях и конструировании. Однако фирма сообщила, что сконструированы следующие 8 видов твердых схем:

- 1) 5-ваттный усилитель низкой частоты с непосредственной связью между каскадами;
- 2) двухкаскадный видеоусилитель;
- 3) частотно-селективный усилитель с режекторным фильтром в цепи обратной связи, охватывающей весь усилитель;



Ф и г. 8. 29. Три типа твердых схем, изготавливаемых фирмой Westinghouse.

Слева направо: низкочастотный усилитель, мультивибратор прямоугольных импульсов, двухкаскадный видеоусилитель.

4) различные мультивибраторы: триггеры, одноконтурные мультивибраторы, релаксационные генераторы прямоугольных импульсов;

5) различные потенциометры, основанные на логарифмическом сложении двух входных сигналов;

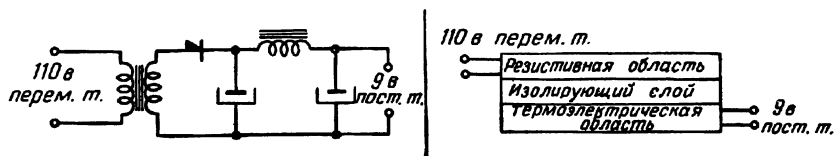
6) различные многопозиционные переключатели, в том числе переключатели типа ИЛИ, четырехслойные  $p-n-p-n$ -диодные переключатели и управляемые четырехслойные  $n-p-n-p$ -диодные переключатели;

7) аналого-цифровой преобразователь, использующий релаксационный генератор  $n-p-n-p$ -типа;

8) двухкаскадный охладитель, использующий эффект Пельтье, перекрывающий диапазон частот  $1 \text{ гц} - 3 \text{ Мгц}$  и используемый для охлаждения детекторов инфракрасного излучения.

На фиг. 8.29 в качестве примеров приведены твердые схемы фирмы Westinghouse. Здесь представлены усилитель низкой частоты, мультивибратор прямоугольных импульсов и двухкаскадный видеоусилитель.

На фиг. 8.30 показана еще одна интересная конструкция источника питания, выполненная в виде твердой схемы. Об этом устройстве фирма подробных данных также не сообщает.



Фиг. 8. 30. Схема источника питания, выполненного в виде твердой схемы, и ее эквивалентная схема в обычном исполнении.

Для преобразования переменного тока в тепло в схеме используется резистивная область. Благодаря явлению Зеебека тепло преобразуется затем в постоянный ток. Независимо от того, является ли такая схема целесообразной с точки зрения эффективности преобразования одного вида энергии в другой, она показывает, насколько велико число различных физических явлений, имеющих место в твердом теле, которые можно использовать для изготовления функциональных устройств, заменяющих обычные схемы.

### Фирма Fairchild Semiconductor

Эта фирма разрабатывает серию быстродействующих логических схем с малым потреблением мощности, предназначенных для использования в цифровых вычислительных устройствах. Фирма утверждает, что этой серии схем достаточно для выполнения всех логических операций в цифровой вычислительной машине при частоте повторения импульсов  $1 \text{ Мгц}$  и что для этого не требуется других элементов в логической части машины. Твердые схемы герметизируются в капсулы ТО-5 и ТО-18 и имеют 8 выводов. Продолжается работа с целью уменьшения размеров этих капсул. Мощность рассеяния элементов составляет в среднем  $30 \text{ мвт}$ , диапазон рабочих температур от  $-55$  до  $+125^\circ \text{C}$ .

### Фирма Merck, Sharp and Dohme

При изготовлении твердых схем использовался метод эпитаксиального выращивания [155]. Принципы выращивания эпитаксиальных слоев полупроводника на полупроводниковой затравке

кратко изложены в гл. 2. Там же описано практическое применение этого метода на примере изготовления германиевого транзистора.

В принципе эпитаксиальное выращивание можно широко использовать при изготовлении твердых схем. Слои различных типов проводимости с различными удельными сопротивлениями и градиентами сопротивлений можно наслаивать один на другой. В качестве электрической изоляции между соседними слоями можно применять относительно толстые осажденные пленки кремния. Например, какая-либо конструкция  $p - n - p$ -типа не обязательно действует как транзистор. Если слой  $n$ -типа относительно обширен и имеет высокую концентрацию примесей, электрическое взаимодействие всех трех слоев не имеет места и такая конструкция действует как два спаренных плоскостных  $p - n$ -диода. Таким образом можно наращивать целый ряд слоев и в то же время сохранять особенности, свойственные каждому из устройств, составляющих конструкцию.

Другое важное качество этого метода заключается в том, что слои с высокой концентрацией примесей можно образовывать во внутренних областях конструкции в процессе выращивания. Так,  $p^+$ - и  $n^+$ -слои могут быть размещены под другими слоями глубоко под поверхностью, что делает возможным образование обладающих высокой проводимостью участков в глубоких областях твердой схемы. Такое расположение слоев с высокой концентрацией примесей невозможно при использовании диффузионного или сплавного методов.

Для образования меза-областей на готовой конструкции или изоляции отдельных областей устройства можно использовать выборочное травление или выпиливание. Во время операции осаждения некоторые слои можно выполнять довольно толстыми для облегчения компоновки необходимых областей.

Однако применение этого метода изготовления твердых схем имеет определенные ограничения. Например, чрезвычайно тонкие слои оказывается невозможным размещать в глубоких областях твердой схемы, поскольку при образовании последующих слоев диффузионным методом могут быть нарушены свойства, присущие тонким слоям. Затруднительной может оказаться компоновка промежуточного слоя и в том случае, если требуется соединить его электрически. Вместе с тем метод эпитаксиального выращивания является мощным средством в изготовлении твердых схем, и весьма вероятно, что в будущем он найдет широкое применение.

Авторы работы [155] приводят конструктивные данные по твердой схеме, выполненной методом эпитаксиального выращивания. Активным элементом в этой схеме является  $p - n - p - n$ -переключатель. Схема состоит из восьми слоев, осажденных и выращен-

ных эпитаксиальным методом. Авторы утверждают, что они преследовали цель показать практическую возможность изготовления некоторых устройств на основе сложных слоистых монокристаллов, выполненных методом эпитаксиального выращивания.

Вполне возможно сочетать методы эпитаксиального осаждения с использованием оксидных масок, методов диффузии и сплавления, как это было показано на примере конструкции транзистора в гл. 2.

## ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

### Плотность монтажа

Плотность монтажа, достигнутая при изготовлении мультивибратора в виде твердой схемы, показанной на фиг. 8.16, составляет около миллиона деталей на  $1 \text{ дм}^3$  [141]. Эта цифра не учитывает объема, занимаемого выводами, в то время как он может превышать объем, занимаемый самими деталями. Однако если допустить, что детали и выводы занимают одинаковые объемы, в  $1 \text{ дм}^3$  оказывается возможным разместить 40 тыс. мультивибраторов (без учета рассеяния мощности). Если же мощность, необходимую для каждой схемы, принять равной 50 *мвт*, то в  $1 \text{ дм}^3$  будет рассеиваться мощность, равная 2,0 *квт*. Понятно, что такое рассеяние мощности недопустимо.

Рассеяние тепла, следовательно, накладывает определенные ограничения на плотность монтажа твердых схем. Поэтому высокие плотности монтажа (порядка сотни тысяч деталей на  $1 \text{ дм}^3$ ) не могут быть осуществлены в объеме  $1 \text{ дм}^3$ . На практике число каскадов твердых схем, соединенных вместе и образующих блок, должно быть много меньше, и более реальным будет рассматривать число каскадов, которое можно разместить в  $1 \text{ см}^3$ . Чем меньше блок, состоящий из твердых схем, тем выше для этого устройства отношение поверхности/объем и больше возможностей отвода тепла. Отсюда следует также, что чем меньше уровень мощности, при которой может работать твердая схема, тем выше достижимая плотность монтажа.

Коэффициент теплопроводности кремния равен  $148 \text{ вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$ , т. е. значительно больше, чем, например, коэффициент теплопроводности керамики ( $\sim 2 \text{ вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$ ), что облегчает решение проблемы отвода тепла из блока, собранного на твердых схемах. Таким образом, из трех рассмотренных методов микроминиатюризации метод твердых схем дает наиболее простое решение проблемы теплоотвода. Пока нет данных по методам компоновки твердых схем, обеспечивающих максимально допустимую плотность монтажа. Вместе с тем имеются попытки дать теоретическую оценку этой проблемы [140].

### Брак и экономичность

Основная трудность изготовления твердых схем заключается в высоком проценте брака при их производстве. Причина этого кроется в том факте, что в твердой схеме должен надежно работать каждый элемент. Если при использовании обычных схемных элементов можно негодные детали заменить, то в твердых схемах это редко возможно и все устройство бракуется. Анализ отбраковки твердых схем [147] показал, что для конкурентоспособности твердых схем процент брака на единицу элементов не должен превышать некоторого предела, зависящего от числа схемных элементов и метода их сочетания. Это требование должно строго соблюдаться. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

По-видимому, весьма важным требованием в отношении твердых схем является необходимость в технологическом процессе, при котором процент брака достаточно мал. Капиталовложения в оборудование для изготовления твердых схем, которые несколько превышают капиталовложения, требующиеся для производства устройств из обычных деталей, вполне оправданы, поскольку брак в первом случае обходится дороже.

Желательно конструировать твердые схемы с таким расчетом, чтобы степень интеграции, т. е. число схемных элементов, выполняемых на одной полупроводниковой плате, была достаточно гибкой и в каждый данный момент времени согласовывалась с процентом брака.

Значительное сокращение брака может быть достигнуто применением резервных каскадов, которые можно использовать для замены (обхода) неисправных каскадов в процессе производства. Конструкция, предусматривающая такую возможность, будет, по-видимому, желательной в производстве твердых схем.

Конструкция твердой схемы, обеспечивающая максимальную экономичность, довольно сложна и достигается в результате многих компромиссных решений. Нередко может оказаться предпочтительным изготавливать твердые схемы с меньшим числом элементов и затем соединять несколько полупроводниковых плат, чем выполнять большое количество схемных элементов на одной плате.

### Надежность

Специалисты фирмы Texas Instruments Inc. утверждают, что для превращения полупроводниковой платы в готовую твердую схему требуется лишь  $15 \div 20$  технологических операций. При столь небольшом числе производственных операций оказывается экономичной высокая степень технического контроля. Надежность является неотъемлемой частью твердой схемы, и, хотя полных данных по



испытаниям на срок службы, иллюстрирующих значительное повышение надежности, не имеется, следующие соображения подтверждают истинность этого положения:

а. Степень чистоты и структура кристаллической решетки исходного материала при изготовлении твердых схем тщательно контролируются, в то время как при других методах микроминиатюризации используется много разнородных материалов с меняющейся или неизвестной степенью чистоты.

б. Благодаря использованию монокристалла устраняется до 80% соединений, требующихся в обычных схемах. Различные области, образующие схемные элементы, находятся в пределах одного куска материала, что сводит к минимуму несогласование коэффициентов расширения. Помимо уменьшения числа паяных соединений, неизбежно имеющих место между выводами обычных деталей, сокращается число соединений между выводами и активными элементами деталей (например, соединения вывода сопротивления с угольным стержнем или металлической пленкой, вывода конденсатора с металлической фольгой или посеребренной слюдой). Использование металлических контактов, вплавленных в полупроводник, также уменьшает поверхности раздела между разнородными материалами.

в. Небольшое число технологических операций позволяет экономично осуществлять тщательный контроль производственных операций. Все этапы изготовления твердых схем выполняются на одном предприятии и на одной производственной линии, что позволяет применять полную статистическую методологию.

г. Поскольку твердые схемы герметизируются целиком, как активные, так и пассивные их элементы защищены от воздействия внешних условий.

д. Вследствие малой массы твердые схемы обладают высокой стойкостью к воздействию ударных и вибрационных нагрузок.

## Применение

Более высокая по сравнению с обычными схемами стоимость твердых схем диктует их применение в тех случаях, когда первостепенное значение приобретают вес и объем. Так, например, твердые схемы наиболее пригодны для применения в вычислительной технике, особенно если электронно-вычислительная машина должна быть невелика по размеру и транспортабельна. Схемы в вычислительных устройствах обычно многократно повторяются, что позволяет конструировать большие вычислительные системы на основе нескольких основных схем.

В связи с тем что число разработанных типов схемных элементов пока ограничено, требуется определенная изобретательность, для того чтобы построить все требующиеся типы устройств в форме твер-

дых схем. Отсутствие рассчитанных на большую емкость конденсаторов неизбежно замедляет разработку твердосхемных устройств малого размера, работающих на звуковой частоте. Отсутствие катушек индуктивности влечет за собой невозможность изготовления чисто твердых в. ч.-схем, хотя комбинированные конструкции, в которых используются отдельные катушки индуктивности, вполне возможны для применения. Можно полагать, однако, что эти затруднения являются временными.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Твердые схемы, несомненно, являются наиболее перспективной формой микроминиатюризации. Этот метод микроминиатюризации относительно нов, и работа, описанная в этой главе, должна рассматриваться лишь как закладывающая основы способа построения схем, который может в конечном счете совершить переворот в электронике. Можно предполагать, что в будущем многие функции, выполняемые в настоящее время микромодулями и микросхемами, с той же эффективностью будут выполняться твердыми схемами. Твердые схемы, будучи изготовленными на одной полупроводниковой плате, имеют перед другими методами микроминиатюризации то преимущество, что они не требуют при своем изготовлении длинного ряда последовательно осуществляемых технологических операций, имеют в своем составе мало соприкасающихся разнородных материалов, меньше подвергаются вредному воздействию различия коэффициентов теплового расширения и относительно просты в отношении отвода тепла. В настоящее время твердые схемы дороги, однако поскольку стали широко применяться методы, используемые при изготовлении транзисторов, то с дальнейшим ростом автоматизации и экономичности этих методов будет снижаться и стоимость твердых схем; следовательно, с экономической точки зрения перед твердыми схемами открываются многообещающие перспективы. Многие специалисты полагают, что придет время, когда твердые схемы будут конкурировать по цене с изделиями, выполненными из обычных деталей.

Почти неограниченные возможности дальнейшей разработки делают принцип твердой схемы особенно привлекательным. Известны многие физические явления, которые могут найти применение в твердых схемах, поэтому исследования в области физики твердого тела продолжают с целью найти пути непосредственного применения новых физических явлений и технологических приемов в этой системе микроминиатюризации. Таким образом, использование известных и вновь открываемых физических явлений, развитие технологии, расширение функций схем и повышение надежности обеспечат, по-видимому, твердым схемам большое будущее.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Miller M. L., «The Design of Electronic Equipment using Sub-miniature Components», *Proc. IRE*, 130 (February 1950).
2. Shapiro G., «Sub-miniaturization Techniques for Low-frequency Receivers», NBS, USA (1954), Circular 545.
3. Shapiro G., «Transistor Amplifier Packaged in Steatite», *Electronics*, 272 (October 1956).
4. Cooperman J. I., Franklin P. J., «Circuit Techniques to Eliminate Large-volume Components», *Electronic Design*, 53 (18 March 1959).
5. Khouri A. S., «Packaged Electronic Circuits», *Elect. Mfg.*, 164 (October 1959).
6. Toombs P. A. B., «Printed Circuits Containing Resistors», *Brit. Comm. and Electronics*, 666 (September 1960).

## МИНИАТЮРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

7. Darnell P. S., «Miniaturized Components for Transistor Application» *Proc. Compts. Symp.*, Washington, USA (1952), 51.
8. Felch E. P., Legg V. E., Merrill F. G., «Magnetic Modulators», *Electronics*, 113 (February 1952).
9. Dummer G. W. A., «Components for Transistors», *Wireless World*, 196 (May 1953).
10. Wehe H. G., «Miniature Metallized Lacquer Film Capacitors», *Bell Lab. Record*, № 33, 441 (12 December 1955).
11. Van Allen R. L., «A Variable Frequency Magnetic Coupled Multivibrator», *AIEE Trans. on Communications and Electronics*, 356 (1955).
12. Wehe H. G., «Components for Transistor Circuits», *Elect. Mfg.*, 73 (March 1956).
13. Dummer G. W. A., *Radio and Electronic Components*, Vol. 1 — «Fixed Resistors», Pitman, 1956.
14. Dummer G. W. A., *Radio and Electronic Components*, Vol. 2 — «Variable Resistors», Pitman, 1956.
15. Dummer G. W. A., *Radio and Electronic Components*, Vol. 3 — «Fixed Capacitors», Pitman, 1956.
16. Stone H. A., Jr., «Component Development for Microminiaturization», *Proc. IRE Components Engrs. Convention*, USA (1957).
17. Stone H. A., Jr., «Microminiature Inductors», *Electronic Design*, 44 (1 July 1957).

18. Dummer G. W. A., Radio and Electronic Components, Vol. 4—«Variable Capacitors», Pitman, 1957.
19. Hamilton W. W., «Microminiaturization Methods (Relays)», Proc. IRE Components Engrs. Convention, 28 (1957).
20. Dummer G. W. A., «Components for Use with Transistor Techniques», *Brit. Commun. and Electron.*, 6, 422 (June 1957).
21. Straube G. F., «A Voltage Variable Capacitor», *Electronic Industries*, 17, 5, 6 (May—June 1958).
22. Doctor N. J., Davies E. M., «Microminiature Components», *Elect. Mfg.*, 94 (August 1958).
23. Dummer G. W. A., «Future Electronic Components», *Wireless World*, 591 (December 1958).
24. Dummer G. W. A., «Components for Use with Transistor Techniques», *Brit. Commun. and Electron.*, 422 (June 1959).
25. Hughes L. E. C., Electronic Engineer's Reference Book, 476, 1959.
26. Dummer G. W. A., Modern Electronic Components, Pitman, 1959, Ch. 23, 398.
27. Dummer G. W. A., Radio and Electronic Components. Vol. 5—«Wires and R. F. Cables», Pitman, 1960.
28. Catalogue: Miniature Electronic Components (Woking).
29. Catalogue: Fortiphone Ltd. (Lnd.).
30. Catalogue: Ardente Ltd. (Lnd.).
31. Dummer G. W. A., Robertson J. M., British Miniature Electronic Components and Assemblies Data Annuals, Pergamon Press, Oxford, 1961—1962.

#### МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИЯ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

32. Dummer G. W. A., «Electronic Components in Great Britain», Proc. Components Symp., Washington, D. C., 19 (May 1952).
33. Dummer G. W. A., «Problems Affecting the Design of Service Components and a Survey of Present and Future United Kingdom Developments», Proc. Inter. Symp. on Electron. Comps. at RRE (September 1957).
34. Brunetti, Cledo, «A New Venture into Microminiaturization», *Proc. IRE Comps. Conven.*, 3 (1957).  
«Circuits Micro-sized», Electronics Business Edition (27 June 1958).  
«Millions of Components per Cubic Foot», *Automatic Control*, USA (September 1958).  
Proc. of Symp. on Microminiaturization of Electronic Assemblies, Diamond Ordnance Fuze Laboratories, Washington, D. c. (30 September—1 October 1958)
35. Dummer G. W. A., «Future Electronic Components», *Wireless World* (December 1958).
36. Shergalis L. D., «Microelectronics—a New Concept in Packaging», *Electronic Design* (29 April 1959).
37. Keonjian E., «Microminiature electronic circuitry for space guidance», 1959 Wescon Convention Record, 6, 92 (18—21 August 1959).
38. Adcock W. A., «A Survey of the Future of Microcircuitry», Nat. Electron. Conf. (12—16 October 1959).
39. Langford R., «Three Approaches to Microminiaturization», *Electronics*, 49 (11 December 1959).

40. Dummer G. W. A., «Miniaturization and Microminiaturization», *Wireless World* (December 1959).
41. Dummer G. W. A., «British Approaches to Microminiaturization», *Electronics*, 71 (1 January 1960).
42. Granville J. W., «Microminiaturization in Electronics», *The New Scientist*, 1076 (28 April 1960).
43. Keonjian E., «Microminiaturizing a Space Vehicle Computer», *Electronics*, 95 (29 April 1960).
44. Dummer G. W. A., «Microminiaturization of Electronic Equipment», *Research*, 187 (May 1960).
45. Blak J. R., «Microelectronics and the Systems Design Engineer», Proc. Elect. Comps. Conf., Washington, USA, 36 (May 1960).
46. Franklin P. J., Horsey E. F., «Materials and Techniques for Microminiaturization (1)», *Elect. Mfg.*, 274 (May 1960).
47. Franklin P. J., Horsey E. F., «Materials and Techniques for Microminiaturization (2)», *Elect Mfg.*, 135 (June 1960).
48. Dummer G. W. A., «Microminiaturization, Reliable Components and Cooling Techniques», Part I, Radio and Electronic Components, Vol. I (October 1960), 610; Part II, Vol. I, № 13 (November 1960), p. 666.
49. Dummer G. W. A., «Microminiaturization of Airborne Electronic Equipment», *Flight*, 580 (7 October 1960).
50. Perugini M. M., Lindgren N., «Microminiaturization», *Electronics*, 77 (25 November 1960).
51. Suran J. J., «Circuit Considerations relating to microelectronics», *Proc. IRE*, 420 (February 1961).

## ПОЛУПРОВОДНИКИ

52. Shockley W., *Electrons and Holes in Semiconductors*, D. van Nostrand Co. Inc., N. Y., 1950.
53. Coblenz A., Owens H. L., *Transistors, Theory and Applications*. McGraw-Hill, N. Y., 1955.
54. Hunter L. P. (Ed.), *Handbook of Semiconductor Electronics*, McGraw-Hill, N. Y., 1956.
55. Shea R. F. (Ed.), *Principles of Transistor Circuits*, John Wiley and Sons Inc., N. Y., 1956. Chapman & Hall Ltd., Ltd., 1956.
56. Evans J., *Fundamental Principles of Transistors*, Heywood and Co. Ltd., Ltd., 1957.
57. Dunlap W. C., Jr., *An Introduction to Semiconductors*, John Wiley and Sons Inc., N. Y., 1957.
58. Smith R. A., *Semiconductors*, Cambridge University Press, Cambridge, 1959.
59. Cooke-Yarborough E. H., *An Introduction to Transistor Circuits*, Oliver & Boyd, Ltd., 1960.

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА И Т. Д.

60. Stuetzer O. M., «Junction Fieldistors», *Proc. IRE*, 1377 (November 1952).
61. Granville J. W., «A Method of Making Silicon Junction Diodes», *Brit. J. Appl. Phys.*, 6, 109 (March 1955).

62. Suran J. J. «Double Base Expands Diode Applications», *Electronics*, 198 (March 1955).
63. Gibson A. F., Granville J. W., Bardsley W., «A Germanium Point-contact Transistor to Operate at High Ambient Temperatures», *Brit. J. Appl. Phys.*, 6, 251 (July 1955).
64. Granville J. W., «A Junction Transistor with High Current Gain», *J. of. Electronics* (May 1956).
65. Gunn J. B., «The Avalanche Dependence of Electron Mobility in Germanium», *Proc. Phys. Soc.*, 781 (August 1956).
66. Statz H., Purcel R. A., Lanza C., «High Frequency Semiconductor Spacistor Tetrodes», *Proc. IRE*, 1475 (November 1957).
67. Dunlap W. C., Jr., *An Introduction to Semiconductors*, John Wiley and Sons Inc., N. Y., 1957. p. 362, 369.
68. Brown S. R., Sylvan T. P., «More Circuits Transistorized with the Silicon Unijunction Transistor», *Electronic Design*, 6, 1, 2, 30, 56 (8, 27 January 1958).
69. Philips J., Chang H. C., «Germanium Power Switching Devices», *IRE Trans. Electron Devices*, 13 (January 1958).
70. Halpern J., Rediker R. H., «Out-diffusion as a Technique for Production of Diodes and Transistors», *Proc. IRE*, 975 (June 1958).
71. Pakswers S., Wolski A., «The Transistor — An Alloyed Junction Trigger Transistor», *Semiconductor Products*, 21 (July — August 1958).
72. Memelink O. W., «The Depilistor — A Semiconductor Switching Device», *Philips Res. Rep.*, 485 (October 1958).
73. Von Munch W., «A Transistor with Thyatron Characteristics and Related Devices», *J. Brit. IRE*, 645 (November 1958).
74. Bridgers H. E., Scaff J. H., Shive J. N., Biondi F. J. (Eds.), *Transistor Technology*, Vol. 1—3, D. Van Nostrand Co. Inc., Princeton, N. J., 1958.
75. Mueller C. W., Hilibrand J., «The Thyristor — A New High-speed Switching Transistor», *Trans. IRE*, 2 (1958).
76. Warner R. M., Jackson W. H., Doucette E. I., Stone H. A., «A Semiconductor Current Limiter», *Proc. IRE*, 44 (January 1959).
77. Matz A. W., «A Review of Semiconductor Switching Devices and Design Requirements» (Contains 131 references), *ATE J.*, 15, № 1, 61 (January 1959).
78. Aldrich R. W., Holonyak N., «Two-terminal Asymmetrical and Symmetrical Silicon Negative Resistance Switches», *J. Appl. Phys.*, 30, 1819 (November 1959).
79. Nelson H., «Surface Immune Transistor Structure», *RCA Review*, № 2, 222 (1959).
80. *The Transistor Era — A guide to transistors and associated semiconductor devices*, Heywood & Co. Ltd., Lnd., 1959.
81. Shive J. N., *The Properties, Physics and Design of Semiconductor Devices*, D. Van Nostrand Co. Inc., Princeton, N. J., 1959.
82. Tetzner S., *The Technetron — A New Semiconductor Amplifier and Oscillator. Solid State Physics in Electronics and Telecommunications*, Part 2 (Eds. M. Desirant and J. L. Michiels), Acad. Press, Lnd., 1960, p. 1086.

83. Rediker R. H., McWhorter A. L., Low Temperature Semiconductor Computing Elements. Solid State Physics in Electronics and Telecommunications, Part 2 (Eds. M. Desirant and J. L. Michiels), Acad. Press, Lnd., 1960., p. 939.
84. Wajda E. S., Kippenham B. W., White W. H., «Epitaxial growth of Si», *IBM J. of Research and Development*, 288 (July 1960).
85. Baker W. E., Compton D. M. J., «Incorporation of As in vapour-grown Ge», *IBM J. of Research and Development*, 275 (July 1960).
86. O'Rourke M. J., Marinace J. C., «Electrical properties of vapour-grown Ge junctions», *IBM J. of Research and Development*, 265 (July 1960).
87. Marinace J. C., «Epitaxial vapour growth of Ge single crystals in a closed cycle process», *IBM J. of Research and Development*, 248 (July 1960).

## МИКРОМОДУЛИ

88. Army Signal Corps Programme for Micromodules, USASRDL (January 1958).
89. The Micro-module Program and The Micro-module Concept, Radio Corporation of America, Purchasing, Building 8—9, Camden, N. J., 1958.
90. Kublin V. J., Danko S. F., «Micro-modules-Components and Materials Requirements», Proc. Second National Conference on Production Techniques, N. Y. (4—6 June 1958).
91. Rogers A. W., «The micromodule design concept in electronics», *Electrical Manufacturing*, 62, 46 (July 1958).
92. «Micro-module Production Program», Radio Corporation of America, Camden, N. J., Second Quarterly Rep., Contract Da. 36-039sc-75968 (1 July—1 October, 1958).
93. «Micro-module Production Program», Radio Corporation of America, Camden, N. J., Third Quart. Rep. Contract Da. 36—039sc—75968 (1 October 1958 to 1 January 1959).
94. Ross I. J., «Role of semiconductors in the army micromodules», *Electronic Design*, 7, 46 (February 1959).
95. Jacobs P. G., «Micromodule Design Progress», *Elect. Mfg.*, (March 1959).
96. Danko S. F., Doxey W. L., McNaul J. P., «The Micromodule — A Logical Approach», *Proc. IRE* (May 1959).
97. Kublin V. J., «Progress in the army micromodule programme», *Electronic Design*, 7, 68 (May 1959).
98. Knoll J. W., Dordick H. S., «Micromodule structural design», Proc. 1959 Electronic Components Conference, 172 (May 1959).
99. McNaul J. P., «Electronic components for space instrumentation», *IRE Trans. of Military Electronics*, MIL-4, № 2—3, 308 (April 1960).

## МИКРОСХЕМЫ

100. Schwartz F. A., Van Wagner E. M., «Printed Circuits Via Xerography», *IRE Conv. Rec. Part 6*, 102 (1956).
101. Williams J. C., Herrmann D. B., «Surface Resistivity of Nonporous Ceramic and Organic Insulating Materials at High Humidity with Observations of Associated Silver Migration», *IRE Trans. on Reliability and Quality Control*, RQC-6, 11 (February 1956).

102. Alderson R. H., Ashworth F., «Vacuum-deposited Films of Nickel-Chromium Alloy», *Brit. J. Appl. Phys.*, 8, № 5, 205 (May 1957).
103. Hoeckelman R. F. et al., «Micronic Capacitor (Evaporated Silicon Monoxide)», WADC Tech. Rep. № 57—22, ASTIA Document AD 131059 (August 1957).
104. Stern R. H., «Transistor Stimulated Reactances», *Electronic Design*, 6, 24 (5 March 1958).
105. Chen W. K. W., Estey E., «Super-thin Bonded Insulating Films», *Elect. Mfg.*, 84 (August 1958).
106. Stinchfield J. M., Meyer O. L., «The Stability of Semiconductors in Microelectronic Assemblies», Symp. on Microminiaturization of Electronic Assemblies, Washington, 117 (30 September—1 October, 1958).
107. Bullis H. L., Isler W. E., «The Application of Vacuum Evaporation Techniques to Microminiaturization», Symp. on Microminiaturization of Electronic Assemblies, Washington, 31—43 (1958).
108. Manfield H. G., «The Uses of Thin Films in Microminiaturization of Electronic Equipment», Proc. Symp. on Microminiaturization of Electronic Assemblies, 18—30 (1958).
109. Holland L., Vacuum Deposition of Thin Films, Chapman & Hall, Ltd., 1958.
110. Prugh T. A., Nall J. R., Doctor N. J., «The DOFL Microelectronics Program», *Proc. IRE*, 47, № 5, 882 (May 1959).
111. Stone H. A., «Theory and Use of Field Effect Tetrodes», *Electronics* (15 May 1959).
112. Berry R. W., Sloan D. J., «Tantalum Printed Capacitors», *Proc. IRE*, 47, 1070 (June 1959).
113. Hager K. O., «Network Design of Microcircuits», *Electronics*, 36, 44 (4 September 1959).
114. McLean D. A., «Microminiaturization with Refractory Metals», *IRE Wescon Conv. Rec.*, 3, Part 6, 87 (1959).
115. Moore D. W., «Evaporated Films and Digital Computers», *IRE Wescon Conv. Rec.* 3, Part 4, 32 (1959).
116. Steele E., Warren W. B., Gudmunsen R. A., «Microelectronics—A Circuit System Employing Microminiature Components», Proc. Winter General Meeting of AIEE, N. Y., 5 February 1960.
117. Barnes C. R., Geesner C. R., «Silicon Nitride Thin Film Dielectric», *J. Electrochem. Soc.*, 107, № 2, 98 (February 1960).
118. Burki J. W., Richardson J. E., «Fabrication of microcircuits applicable to data processing equipment», 1960, *IRE International Convention Record*, 6, 3 (21—24 March 1960).
119. Granger F. J., Jr., Smith J. G., «Microcircuitry—a practical technology for reliable microminiaturization», 1960, *IRE International Convention Record*, 6, 167 (21—24 March 1960).
120. Kinsella J. J., Schwartz F. A., «2D Etch-formed RC Circuits», Proc. Electron. Comps. Conf., Washington, 29 (May 1960).
121. Kahn M., «Ceramic-based Microcircuits—A Heterogeneous Approach to Miniaturization», Proc. Electron. Comps. Conf., Washington (May 1960).
122. Queen G. N., Bohrer J. J., «Preparation and Evaluation of Thin Film Circuit Functions», Proc. Electron. Comps. Conf., Washington, 39 (May 1960).



123. Selvin G. J., «The Sylvania Microminiature Module», Proc. Electron. Compts. Conf., Washington, 46 (May 1960).
124. Clarke F. K., «A New Type of Microminiature Hermetically Sealed Transistor Enclosure», Proc. Electron. Compts. Conf., Washington, 74 (May 1960).
125. Grand S., Kraus A., «High Quality Ultra-thin Film Capacitors», Proc. Electron. Compts. Conf., Washington, 19 (May 1960).
126. Smith A., «Rejection Filters with Distributed R and C», Proc. Electron. Compts. Conf., Washington, 23 (10—12 May 1960).
127. Bohrer J. J., «Thin Film Circuit Techniques», *IRE Trans. on Compt. Parts.*, 37 (June 1960).
128. Bender B. G. et al., «The Hughes Type I microelectronic circuit concept», *IRE Wescon. Conv. Record*, 3, 136 (23—26 August 1960).
129. Shoulders K. R., «Research in microelectronics using electron-beam activated machining techniques», Stanford Research Institute Project 2863, Report (September 1960). Available as publication number PB. 171027 (& 3.50) from Office of Technical Services.
130. Carroll W. N., Jenny F. F., «Microminiaturization utilizing thin film technology», NEREM, Boston (15 November 1960).
131. Moore D. W., «Keeping Ahead in practical microcircuits», *Electronics*, 72 (3 February 1961).
132. Black J. R., «Design and Fabrication of a microelectronic amplifier», *IRE Wescon Convention Record*, 3, 114 (1960).
133. Siddall G., «Vacuum Deposition of Dielectric Films for Capacitors», *Vacuum*, 9, № 5/6, 274.
134. Microcircuitry Booklet published by Varo Manufacturing Co. Inc., 2201 Walnut Street, Garland, Texas.

## ТВЕРДЫЕ СХЕМЫ

135. Dummer G. W. A., «Electronic Components in Great Britain», Proc. Symp. on Prog. in Quality Electronic Components, Washington, D. C., 15 (5—7 May 1952).
136. Von Hippel A. R., «Molecular Engineering», *The Technology Rev.*, 240 (March 1956).
137. «Solid Circuits», *Wireless World*, 516 (November 1957).
138. Herold E. W., «Future Circuit Aspects of Solid State Phenomena», *Proc. IRE* (November 1957).
139. Christensen H., «Electrical Contact with Thermo-compression Bonds», *Bell Lab. Rec.*, 36, № 4, 127 (April 1958).
140. Wallmark J. T., Marcus S. M., «Semiconductor Devices for Microminiaturization», *Electronics*, 35 (26 June 1959).
141. Kilby J. S., «Semiconductor Solid Circuits», *Electronics* (7 August 1959).
142. Noble H. V., Larsen R. D., «USAF Investigates Basic Microelectronics», *Aviation Week*, 71, 77 (17 August 1959).
143. Fresh D. L., «Solid State Materials—Theory and Application», *Motorola Eng. Bull.*, 7, № 3 (1959).
144. Hammerslag J. G., «Circuit Design Using Silicon Capacitors», *Electronics*, 48 (18 September 1959).

145. Hammerslag J. G., «Taking Advantage of the Voltage Sensitivity of the Silicon Capacitor», *Elect. Mfg.*, 172 (September 1959).
146. Gärtner W. W. G., «Integrated circuitry, microminiaturization and molecular electronics», *Semiconductor Products*, 2, № 12 (December 1959).
147. Wallmark J. T., «Design considerations for integrated electronic devices», *Proc. IRE*, 48, 293—300 (March 1960).
148. Heavner W. S., «Tomorrow's technology — functional electronic blocks», *IRE International Convention Record*, 6, 149 (21—24 March 1960).
149. Lin H. C., «Multivibrator Functional Electronic Blocks», *Proc. NAECON*, Dayton, Ohio, 38—45 (May 1960).
150. Hutcheson J. A., «Molecular electronics today—1960», *Proc. NAECON* (National Aeronautical Conference), Dayton, Ohio (May 1960), 142—144. «The design, programming and sociological implications of microelectronics», Western Joint Computer Conf. San Francisco (5 May 1960).
151. Lathrop J. W., Lee R. E., Phipps C. H., Semiconductor Networks for Micro-electronics, *Electronics*, 69 (13 May 1960).
152. Javitz A. E., «Introduction to Molecular Engineering», *Elect. Mfg.* (May 1960).
153. Glendinning W. B., «Silicon Integrated circuits», *IRE Trans. on Military Electronics*, MIL-4, № 4, 459 (October 1960).
154. Lesk I. A. et al., «A categorization of the solid-state device aspects of microsystems electronics», *Proc. IRE*, 1833 (November 1960).
155. Allegretti J. E., Shombert D. J., «Laminar Junction Layers—New Concept in Microcircuits», *Electronics*, 55 (2 December 1960).

## **П Р И Л О Ж Е Н И Е**



## О МИНИАТЮРИЗАЦИИ <sup>1)</sup>

*Гильберт <sup>2)</sup>*

Еще не так давно понятие «американская промышленность» ассоциировалось с большими размерами. В последнее время, однако, это представление стало не совсем точным: во многих отраслях американской промышленности специалисты все чаще мыслят категориями «миниатюрности», разрабатывая детали и готовые изделия все меньших размеров, по эффективности и надежности не уступающие, если не превосходящие обычные образцы. Успехи в предпринятой в широких масштабах разработке миниатюрных деталей и готовых изделий для промышленных и военных нужд открыли перед миниатюризацией сравнительно новую и динамичную область применения. Использование миниатюрных деталей обеспечило США запуск в космос искусственных спутников Земли. Миниатюризация позволяет выпускать для нужд науки, промышленности и обороны более эффективные и экономичные электронно-вычислительные машины, способные выполнять самые разнообразные операции. Миниатюризация поможет медицине в разработке более совершенных хирургических и диагностических инструментов. С появлением транзисторных радиоприемников, миниатюрных фотоаппаратов, малогабаритных магнитофонов и других приборов началось использование миниатюрных изделий в сфере широкого потребления. Уже имеются в продаже первые образцы портативного телевизора. Большой интерес и растущий спрос на миниатюрные изделия предоставляют изготовителям широкие возможности во всех областях промышленности. Бурное развитие этой новой отрасли науки как в Соединенных Штатах, так и во всем мире позволяет компетентным специалистам говорить о «второй промышленной революции».

История миниатюризации в радиоэлектронике начинается лишь с 1948 г., когда она становится предметом научных исследований и когда был создан транзистор, заменивший громоздкую, быстро нагревающуюся, хрупкую электронную лампу. Однако искусство изгото-

<sup>1)</sup> Gilbert H. D., Miniaturization, ed. H. D. Gilbert, Reinhold Publishing Corporation, N. Y., Chapman and Hall, Ltd., London, 1961, p. 1—12 (сокращенный перевод).

<sup>2)</sup> Президент компании Miniature Precision Bearing Inc., Keen, New Hampshire.

товления миниатюрных изделий привлекало людей уже многие столетия. Мастера Востока и Запада создавали произведения столь малых размеров, что их детали можно рассмотреть только при увеличении. Сохранились портреты, написанные кистями из одного соболиного волоса. Широко известны построенные умельцами модели кораблей с пушками размером 2—3 см, способными стрелять. Часовщики еще в XIII в. изготавливали миниатюрные часы. Крошечные шарикоподшипники, не больше часовых камней, явились в конечном счете важнейшей деталью известного бомбоприцела «Норден», разработанного в годы второй мировой войны. За последние 12 лет миниатюризация развивалась настолько быстро, что понимание самого термина непрерывно менялось в соответствии с новейшими достижениями техники. Разные фирмы в зависимости от отрасли промышленности вкладывают в термины «субминиатюризация», «микроминиатюризация» и «ультраминиатюризация» различный смысл. Однако общий термин «миниатюризация» охватывает все степени уменьшения размеров, обозначаемые этими новыми словами.

### МИНИАТЮРИЗАЦИЯ И ОБОРОНА

Своим быстрым развитием на современном этапе миниатюризация, несомненно, в первую очередь обязана мероприятиям в области национальной обороны. Было подсчитано, что 50—80% миниатюрных изделий всех отраслей промышленности прямо или косвенно идут на нужды обороны. Начальник научно-исследовательского отдела Военного министерства США недавно заявил: «Уменьшение габаритов, веса и потребляемой мощности играет все большую роль при разработке новых систем оружия и аппаратуры... Каждый фунт веса снаряда, сэкономленный благодаря миниатюризации, означает большую дальность действия, более экономное использование топлива, а в некоторых случаях и большую полезную нагрузку, а в сухопутных войсках и морской пехоте, где основная масса боевого оружия и оборудования переносится людьми, существенное уменьшение веса (порядка 10 раз) имело бы особенно важное значение». Типовая переносная радиостанция, находившаяся на вооружении американской армии в период второй мировой войны, весила около 18 кг. Теперь такая радиостанция весит 6,8 кг, а к 1965 г., как полагают, вес ее не будет превышать 2,3 кг. Другие цифры еще более красноречивы. Так, несколько лет назад американская армия пользовалась многоканальной радиостанцией весом 545 кг, позволяющей передавать одновременно несколько сообщений. Предполагается, что в 1965 г. радиостанция такого типа будет весить около 1,5 кг. Электронное оборудование эсминца образца 1930 г. состояло из 350 деталей. Современный эсминец имеет около 350 тысяч радиодеталей. Это дополни-

тельное оборудование можно было разместить только при уменьшении его габаритов.

В военной области миниатюризация наиболее широко применяется в строительстве реактивных снарядов, где уменьшение веса аппаратуры снаряда на 1 кг позволяет сэкономить 100 кг топлива. Искусственный спутник «Пионер V», выведенный на орбиту около Солнца летом 1960 г., был запущен с помощью баллистического реактивного снаряда «Тор-Эйбл» с тягой 75 000 кг. Спутник, изготовленный из алюминия, весил всего 43 кг, включая небольшую тормозную ракету и аппаратуру весом 4,18 кг. Еще более сложные задачи приходится решать при конструировании реактивных снарядов тактического назначения, полезная нагрузка которых представляет собой взрывчатые вещества. Помимо механизмов управления, они должны быть оборудованы навигационной и радиоаппаратурой.

### МИНИАТЮРИЗАЦИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Развитие миниатюризации, вызванное потребностями национальной обороны, привело к широкому использованию этой новой отрасли техники для мирных целей. Условием совершенствования электронно-вычислительных машин является широкое использование миниатюрных элементов. Полагают, что путем миниатюризации магнитных накопителей информации, возможно, удастся создать малогабаритные вычислительные машины, обладающие колоссальной емкостью запоминающих устройств. Недавно одна из фирм, выпускающих электронно-вычислительные машины, писала в своем рекламном объявлении: «Быстрый прогресс миниатюризации электронных деталей дает основания полагать, что можно уменьшить габариты вычислительной машины настолько, что она будет умещаться в портфеле».

Миниатюрные размеры электронных элементов потребовали изыскания новых методов монтажа. Практически пришлось отказаться от использования громоздких металлических шасси, длинных выводов и старых методов пайки. Проводники и сопротивления наносятся теперь на подложку фотолитографским способом. Металлопленочные элементы выполняются методом вакуумного осаждения из паровой фазы.

Одним из следствий миниатюризации в электронике является тенденция к новым, более эффективным и дешевым методам обслуживания оборудования. Поскольку оборудование становится все более сложным, можно ожидать, что возрастающий интерес будет проявляться к дублирующим сменным блокам, содержащим большое число деталей. С внедрением таких блоков отпадет необходимость в под-

готовке и обучении высокооплачиваемого обслуживающего персонала.

Есть основания полагать, что дальнейший прогресс в автоматизации производства увеличит спрос на миниатюрные детали. Чтобы механизмы управления и контроля не стали больше самих машин, необходимо широкое развитие миниатюризации их компонентов. Механизмы управления будут включать как пневматическое и гидравлическое, так и электронное оборудование.

Важно подчеркнуть, что, хотя миниатюризация наиболее широкое и эффективное применение нашла в электронике, она играет также важную роль в механике и электротехнике. Миниатюрные шарикоподшипники, например, по размерам не превышающие пунктуационную точку, используются в гироскопах, автопилотах, электрокардиографах, анеометрах, сельсинах, сервомеханизмах и высокоскоростных бормашинах.

### **МИНИАТЮРИЗАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ ШИРОКОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ**

В области производства предметов широкого потребления благодаря миниатюризации открываются новые обширные рынки сбыта. Появились слуховые аппараты, портативные транзисторные приемники, звукозаписывающие и воспроизводящие устройства высокой чувствительности; уже давно ведется работа по созданию действительно портативных телевизоров.

Многим знакомы миниатюрные двигатели постоянного тока, вмонтированные в механические игрушки. Фирма General Electric разработала 150-ваттную лампочку размерами  $57 \times 13$  мм, которая со временем будет пользоваться большим спросом. В продаже имеются слуховые аппараты размером не больше ногтя, которые можно вставлять в ухо или устанавливать в дужке очков. Существуют магнитофоны не больше спичечной коробки. Созданы транзисторные диктофоны с питанием от батареи, уместающиеся в портфеле. Вполне возможно, что эти аппараты найдут столь же большой спрос, как пишущие машинки.

Более полное использование миниатюрных аппаратов в сфере широкого потребления до сих пор сдерживается себестоимостью изделий, которая возрастает обычно обратно пропорционально размерам. Однако учитывая быстрое накопление опыта в производстве миниатюрных изделий, можно смело предсказать, что уже в недалеком будущем миниатюризация завоюет прочные позиции и в сфере широкого потребления.

### **МИНИАТЮРИЗАЦИЯ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ**

В области научных исследований, в частности в медицине, миниатюризация открывает большие перспективы. Можно представить



себе, например, телевизионную камеру с питанием от крошечных батарей, размеры которой столь малы, что она может заглатываться пациентом и передавать картину состояния желудка.

Такая телевизионная камера еще не создана, однако имеются другие виды приборов, сконструированные для подобных же целей. С большой изобретательностью выполнен, например, прибор для получения проб тканей желудочно-кишечного тракта без хирургического вмешательства. Инструмент представляет собой вводимую через рот в желудок или кишечник длинную трубку, имеющую на конце механический инструмент для среза пробы ткани. Еще более поразительным является создание заглатываемой капсулы, предназначенной для отбора проб содержимого внутренних органов. Приведенный в действие теплотой, которая вырабатывается возбуждаемой извне катушкой, механизм, заключенный в капсуле, берет пробы жидкости внутри организма.

Мы располагаем в настоящее время также крошечными радиопиллюлями, содержащими датчики и частотно-модулированные передатчики и имеющими форму капсул, которые проглатываются пациентом и передают информацию о состоянии кишечного тракта; выпускаются также передатчики, прикрепляемые к зубам для изучения их скрипа во сне; датчики-зонды, предназначенные для регистрации пульса, кровяного давления, дыхания и температуры космонавтов.

В будущем хирург еще больше сможет полагаться на миниатюрные инструменты. Уже имеется электронный катетер, который вводится через вену руки в сердце и дает возможность хирургу непосредственно прослушивать шумы сердечных клапанов. Хирургам, оперирующим на сердце, с успехом удастся закреплять на сердце миниатюрные электронные приборы, обеспечивающие его правильное биение, когда естественный синхронизирующий механизм действует с перебоями. Вскоре, вероятно, станет возможным обеспечить людям, страдающим сердечными заболеваниями, постоянное наблюдение за сердцем. Главным в этой системе будет миниатюрный (не больше рисового зерна) микрофон. Всякое отклонение от нормы в работе сердца автоматически вызовет радиосигнал, передаваемый с помощью аппарата размером не больше пачки сигарет. Этот сигнал фиксируется либо самим больным, либо сестрой или врачом, которые смогут принять необходимые меры.

Широко известна бормашина, снабженная в качестве привода воздушной турбиной и делающая 250 000 оборотов в минуту. Эта машина работает много быстрее, чем старые механические образцы, и не вызывает столь острых болевых ощущений. Такая бормашина не могла бы работать без миниатюрных шарикоподшипников. Подобные же подшипники используются в геологоразведочной аппаратуре, благодаря которой нефтяные компании при поисках новых

месторождений нефти экономят ежегодно сотни миллионов долларов. Для измерения земного магнетизма используется бортовой самолетный магнетометр, в конструкции которого также находят применение большое количество миниатюрных подшипников. Этот новый перспективный метод исследований позволяет в течение нескольких часов выполнять работу, для которой раньше требовались месяцы.

### МИНИАТЮРИЗАЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО

Очевидно, как в научной, промышленной и военной областях, так и в области производства предметов широкого потребления миниатюризация сделала лишь первые шаги на пути своего быстрого развития. Однако здесь есть свои трудности. Организация, намеревающаяся заняться производством миниатюрных изделий, может столкнуться с множеством вопросов, с которыми не пришлось бы иметь дела при производстве изделий обычных размеров. Прежде чем принять окончательное решение, будущий изготовитель миниатюрных изделий должен хорошо познакомиться со всем кругом вопросов, с которыми ему придется столкнуться, начиная с такой, казалось бы, несложной проблемы, как обучение кадров, и кончая таким серьезным вопросом, как строительство совершенно нового завода, на котором не допускаются вибрация и колебания температуры воздуха и где должна поддерживаться абсолютная чистота.

Опытный организатор производства, решивший заняться изготовлением миниатюрных изделий, сначала будет поражен объемом капиталовложений, требующихся для приобретения промышленного оборудования и деталей. Значительная часть оборудования является уникальной, в связи с чем нередко приходится покупать механизмы специальной конструкции по повышенной цене, на условиях растянутых сроков поставки и ввода в эксплуатацию. В некоторых случаях ему, возможно, придется самому изготовить значительную часть необходимого производственного оборудования, и, поскольку может случиться так, что поставщики отдельных деталей и механизмов не смогут удовлетворить требования в отношении размеров, веса, режимов работы и прецизионности, он вынужден будет своими силами изготовить детали конструкций, которые другие предприниматели обычно покупают готовыми. Поэтому капиталовложения в пересчете на одного рабочего могут оказаться необычайно высокими.

Даже стоимость сырья для производства миниатюрных изделий может оказаться более высокой, чем стоимость обычного сырья. Так, например, миниатюрные гироскопы должны удовлетворять жестким условиям работы в ракетных системах. Материалы, идущие на изготовление таких гироскопов, должны быть, очевидно, наивысшего качества. Миниатюрные шариковые подшипники выполняются из специальной вакуумированной стали, которая свободна от при-

месей, много чище обычной стали и отличается однородностью. В производстве миниатюрных шарикоподшипников из потребляемых ежегодно 30 т нержавеющей и хромистой стали, а также бериллиево-медных сплавов 24 т идут в стружку и другие виды отходов.

### ВАЖНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ

При производстве миниатюрных изделий необходимо принимать во внимание, что методы разработки и технология производства движутся вперед чрезвычайно быстро. Для успешной конкуренции с предприятиями, использующими современную технологию, особую важность приобретает разработка широких программ научно-исследовательских работ, осуществление которых потребует привлечения опытных металлургов, инженеров-механиков, физиков, математиков и специалистов других отраслей науки и техники, с тем чтобы решать вопросы не только сегодняшнего дня, но и находить решение проблем, которые могут встретиться в будущем.

Но даже опытные физики, математики и другие специалисты вначале обычно бывают мало знакомы со специальными проблемами миниатюризации. Практически все фирмы США, выпускающие миниатюрную продукцию, должны сами готовить специалистов. Нередко фирмы организуют собственные школы миниатюризации: ученые и техники делят свое рабочее время между производством и учебой. Даже рабочие должны пройти тщательное обучение. В большинстве случаев принимаемые работники должны проходить целый ряд испытаний физической ловкости, зрения, а иногда и физиологических склонностей, определяющих пригодность к такого рода работе.

### ВАЖНОСТЬ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА

Малые размеры в сочетании со все возрастающими требованиями к надежности устройств ставят все более трудные проблемы. Д-р Чарльз С. Дрейпер, директор лаборатории приборов при Мас-сачусетском технологическом институте, отмечал недавно перед Американской ассоциацией содействия развитию науки: «Для инерциальных систем за предел неточности может быть принята 1 миля (1,6 км); допускаемая величина ухода соответствует в этом случае 1' дуги за час. Добиться этого можно при условии, что девиация центра масс не будет превышать 0,00254 мк».

Раньше такие допуски были невозможны, а сегодня они уже превзойдены. Чтобы гарантировать соответствие всех компонентов жестким требованиям заказчиков, контроль качества должен стать важной частью производственного процесса.

Постоянное испытание всех изделий требует, однако, больших расходов. Например, из каждых 100 транзисторов, используемых

фирмой «Локхид» в небольшом (4,1 кг) управляемом снаряде и телевизионном спутнике, только 7—10 транзисторов выдерживают испытания, остальные бракуются. Стоимость же проверки и технического контроля составляет в среднем 20% стоимости производства, а в некоторых случаях достигает 30%.

При изготовлении миниатюрных шариковых подшипников на предприятии фирмы М.Р.В. окончательная сборка проводится в особо отведенном для этой цели помещении. Воздух здесь фильтруется, чтобы снизить загрязненность до 0,8 мк на 1 см. Женщины-работницы, одетые в специальные халаты и шапочки из нейлоновой ткани без ворса, заходят в рабочее помещение через воздушную камеру с двойными дверями. Поддерживаемое в помещении избыточное давление воздуха предотвращает попадание пыли через оконные проемы. В атмосфере чистого воздуха при постоянной температуре 20—21 °С и освещенности 19 лк готовые подшипники промывают, собирают, затем снова промывают. После этого производят измерения и испытания на соответствие техническим условиям, затем опять промывают, смазывают и упаковывают либо в герметичные ампулы, либо наподобие таблеток между двумя полосками пластика. Работницы производят сборку в перчатках для предотвращения возможности коррозии в результате попадания на изделие пота. Большинство технологических приемов, включая методику испытаний, а также оборудование, смазочные масла, упаковочные ампулы и упаковку из пластика, разрабатывалось в течение длительного времени и потребовало от фирмы значительных затрат.

Изготовители миниатюрных изделий могут, казалось бы, рассчитывать на то, что эти предосторожности предотвратят жалобы заказчиков; однако нередко приходится обучать и заказчиков обращению с миниатюрными деталями. Многие фирмы организуют недельные курсы по лучшему ознакомлению своих заказчиков с прецизионными миниатюрными изделиями.

### НОВЕЙШИЕ НАПРАВЛЕНИЯ В МИНИАТЮРИЗАЦИИ

В результате успешной миниатюризации деталей стал возможным значительный прогресс в разработке электронных вычислительных машин. Массачусетский технологический институт совместно с фирмой Francis Associates усовершенствовали сложную цифровую вычислительную машину, содержащую логический и накопительный блоки, синхронизирующие схемы и схемы вход/выход и занимающую объем всего 3400 см<sup>3</sup>, в то время как аналогичная машина, выполненная с использованием печатного монтажа, занимает объем 10 530 см<sup>3</sup>.

Оригинальное решение ряда проблем молекулярной электроники, найденное фирмой Westinghouse в сотрудничестве с BBC, позволи-

ло изготовить многие другие миниатюрные электронные устройства — усилитель на твердом теле, мультивибратор и хронированный усилитель.

В 1958 г. было выпущено три изделия широкого потребления: новая миниатюрная лампа-вспышка, портативные телевизор и магнитофон. В последующие годы появились электронные наручные часы, микродвигатель размером 0,26 см<sup>3</sup>, новые конструкции вычислительных машин, батарея размером с аспиринovou таблетку, миниатюрная 150-ваттная электрическая лампа, миниатюрный фонограф, слуховой аппарат размером с ноготь, двухдиапазонный ручной радиоприемник и новые миниатюрные радиоприемники на полупроводниках.

В области медицины ученые фирмы General Electric уже работают над проблемой замены больных органов человеческого организма миниатюрными электронными эквивалентами.

В недалеком будущем станет, вероятно, возможным устанавливать миниатюрные телевизионные камеры в больничных палатах, что позволит одной медицинской сестре одновременно следить с центрального поста за состоянием многих пациентов.

# **ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОМИНИАТЮРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ <sup>1)</sup>**

*Хармон <sup>2)</sup>, Макдермот <sup>2)</sup>*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Проблемы, встречающиеся при изготовлении микроминиатюрных электронных устройств, являются по своему характеру универсальными, однако они различаются по обширности, так как зависят от сложности изготавливаемого изделия. Руководитель разработки должен тщательно ознакомиться с проблемами, связанными с производством микроминиатюрных изделий, и проявлять гибкость при решении различных вопросов.

Многие специальные проблемы, которые, казалось, были полностью решены в процессе разработки, могут снова возникнуть в процессе изготовления. Разрешение этих проблем может потребовать дополнительной конструкторской работы над производственной линией и вызвать в результате задержки, связанные с большими расходами.

Весьма важным моментом, предшествующим процессу изготовления изделия, является тщательный анализ каждого этапа операции сборки. Такой анализ обычно позволяет сократить число производственных операций и помогает выбрать оборудование, которое может быть использовано более чем для одной производственной операции.

Поскольку сборочные операции весьма утомительны и требуют от рабочего большого нервного напряжения, следует особо рассмотреть вопрос о психологическом воздействии производственных операций и физическом отдыхе рабочего. Правильное решение этого вопроса будет содействовать повышению производительности труда и качества изделий.

## **ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ**

Хорошая вентиляция и соответствующее освещение являются двумя важными факторами, с которыми надо считаться при подготов-

<sup>1)</sup> Harmon E., McDermott B., Miniaturization, ed. H. D. Gilbert, Reinhold Publishing Corporation N. Y., Chapman and Hall, Ltd., London, 1961, p. 202—208 (сокращенный перевод).

<sup>2)</sup> American Bosch Arma Corporation, Garden City, N. Y.

ке производственного помещения. Интенсивность освещения в сборочном цехе должна определяться физическими размерами деталей, плотностью монтажа и установленными допусками. Интенсивность освещения следует испытать в рабочих условиях, и, если будет отмечено, что рабочим-сборщикам приходится хоть в малой степени напрягать зрение, необходимо обеспечить дополнительное освещение. Обычно для освещения сборочного цеха рекомендуется использовать отраженный свет люминесцентных ламп (смесь желтого света с голубым). Освещение является, возможно, одним из важнейших факторов, влияющих на объем производства готовых изделий.

Отсутствие контроля влажности и недостаточная чистота производственного помещения вредно сказывались при изготовлении даже обычных прецизионных изделий. Многие предприятия учли это и используют чистые или даже стерильно чистые помещения. Микроминиатюрные элементы обычно не требуют стерильных условий, но, конечно, чистота в помещениях устраняет многие трудности, возникающие в связи с загрязнением и повышенной влажностью. Эти факторы могут вызвать плохое сцепление пленок с подложкой, разброс электрических параметров элементов или узлов, малую надежность электрических соединений и потребовать дополнительного времени на сборку.

Некоторые особо чувствительные элементы требуют дополнительных инженерных решений в планировке помещения для сборки. Технология изготовления и сборки микроминиатюрных изделий включает ряд операций: шлифование, обработку режущим инструментом, нанесение покрытия и т. д., каждая из которых для обеспечения максимума надежности должна быть выделена из сборочного помещения.

### **ОБРАБОТКА СЫРЬЯ**

Исключительно важно осуществлять контроль за качеством сырья, используемого для изготовления микроэлементов. Вследствие весьма жестких требований, предъявляемых к размерам микросхем, электрические параметры элемента зависят от малых количеств материалов, используемых для изготовления схемных элементов. Поэтому незначительные колебания в составе этих материалов изменяют электрические характеристики элементов и увеличивают производственный брак. Чтобы обеспечить высокое качество и долговечность электрических деталей, следы примесей и количество загрязнений, попавших в сырье в процессе производства и обработки, необходимо тщательно контролировать.

## СОЕДИНЕНИЯ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ И УЗЛАМИ

Соединение между компонентами является главным моментом, препятствующим всеобщему признанию методов микроминиатюризации. Большое количество соединений между функциональными элементами или другими частями узла должно осуществляться по крайней мере полуавтоматическим методом. Действительно, стандартные соединения пайкой могут быть применимы в решении проблемы при условии, что будут внесены некоторые изменения в составы припоев и тщательно пересмотрены методы теплоотвода. Чрезмерный нагрев, обычно имеющий место при таких операциях, в некоторых случаях нарушает функциональные особенности элементов и проводников.

Тонкие пленки сами по себе представляют в этом отношении проблему, поскольку они легко разрушаются под влиянием неравномерного нагрева. В настоящее время мы располагаем лишь несколькими способами, которые можно применять для соединения тонкопленочных элементов с обычными монтажными проводниками. До тех пор пока число этих способов не будет расширено, применение элементов этого типа будет тормозиться.

Необходимо также продолжать исследования обычных способов сварки, сварки ультразвуком и электронным лучом, термокомпрессионного соединения, соединения с помощью токопроводящих термореактивных пластиков и других методов соединения элементов или проводников. В целом, однако, эти методы не позволяют в настоящее время производить без трудоемких переделок замену элементов или выделять отдельные цепи.



## МИНИАТЮРИЗАЦИЯ — НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ <sup>1)</sup>

*Мандель <sup>2)</sup>*

В настоящее время крупнейшими потребителями миниатюрных изделий являются авиационная и ракетная отрасли промышленности. Большой сбыт эти изделия находят также среди предприятий, выпускающих электронно-вычислительные машины, автоматику, приборы, медицинское оборудование и телефонные аппараты. Помимо этого, имеется обширный рынок, базирующийся на все возрастающем спросе населения на малогабаритные и портативные изделия, собранные из миниатюрных деталей. Первое место здесь занимает малогабаритный радиоприемник на транзисторах, затем не столь малый по размерам, но все же портативный телевизор, обладающий благодаря использованию миниатюрных деталей меньшим весом и компактностью.

Влияние миниатюризации ощущается все шире и глубже. Миниатюризация побуждает к поискам новых, более эффективных и экономичных способов обслуживания и эксплуатации оборудования. Поскольку сложность новой аппаратуры постоянно возрастает, обслуживание ее становится весьма сложной задачей, решить которую можно, применяя принцип сменных блоков, т. е. определение неисправных блоков по легко распознаваемым признакам и замена их дублирующими. Неисправные блоки ремонтируют на месте, либо отсылают в центральные ремонтные мастерские, либо выбрасывают. В военном производстве США тяготеют к последнему варианту, считая, что выбросить неисправный блок обойдется дешевле, чем ремонтировать его. В настоящее время допускается выбрасывание в случае неисправности блоков, стоимость которых не превышает 300 долл., однако некоторые военные считают, что даже эта непомерно большая цифра слишком низка и ее следует увеличить до 1000 долл.

Самое широкое применение миниатюризация нашла в радиоэлектронике, однако вопросами миниатюризации как механических, так

---

<sup>1)</sup> Mandell M., Miniaturization, ed. H. D. Hilbert, Reinhold Publishing Corporation, N. Y., Chapman and Hall, Ltd, London, 1961, p. 270—281 (сокращенный перевод).

<sup>2)</sup> Редактор журнала «Современная промышленность» (Dunst Review and Modern Industry New York).

и электрических деталей занимаются все отрасли промышленности. Например, фирма Clippard Instrument Laboratory, Inc. недавно начала выпуск миниатюрных пневматических цилиндров, клапанов, трубопроводов, патрубков и деталей к ним, что позволяет создать автоматическое оборудование малых размеров.

Несмотря на то что размеры некоторых экспериментальных телефонных аппаратов уменьшены практически до минимума, немалые возможности для миниатюризации кроются в разработке дополнительных устройств, расширяющих функции обычных телефонных аппаратов, например устройств для внутренней связи, автоматической пожарной и сторожевой сигнализации, воспроизведения предварительно записанных фраз наподобие «Буду дома в 4 часа».

Помимо вычислительных машин и других устройств для обработки данных, представляющих широкие возможности для миниатюризации, большие перспективы для использования малогабаритных устройств открываются и в других областях деловой сферы.

Портативный магнитофон становится реальным спутником путешествующих бизнесменов. Даже некоторые пассажирские самолеты оборудованы миниатюрными магнитофонами для развлечения пассажиров.

Широкое поле деятельности открывается в деле миниатюризации элементов запоминающих устройств. Эта проблема наиболее успешно решается посредством магнитной записи. Можно надеяться, что в будущем будут разработаны элементы памяти колоссальной емкости, хотя и далеко уступающие емкости мозга человека.

Автомобильная промышленность также является потребителем миниатюрных приборов управления. Многие инженеры считают, что высокие скорости, развиваемые автомобилями на автострадах, потребуют в будущем сложных систем электронного управления, которые будут, несомненно, выполняться в миниатюрной форме. Фирма R. C. A. уже демонстрировала прототип такой системы, разработанной совместно с фирмой General Motors. Система включает устройство звукового предупреждения, сигнал которого передается по радио автомашинам. Такая система поддерживает заданную скорость, замедляет движение машины, когда появляется препятствие, и останавливает в случае опасности.

Коммерческие авиалинии нередко пользуются преимуществами улучшения качества оборудования связи, навигации, контроля посадки и радиолокационного оборудования, разработанного для военных целей. Быстро увеличивающиеся размеры, количество и скорости самолетов вызывают необходимость усовершенствования систем регулирования полетов, разработанных специально для гражданской авиации. Такое оборудование, как это очевидно, увеличит вес само-

лета и, таким образом, будет помехой до тех пор, пока оно не будет миниатюризовано до предельных размеров. Инженеры-электронщики, которые в настоящее время в состоянии изготовить радиоприемник размером с ручные часы, когда-нибудь сконструируют и телевизор таких же размеров. Таких устройств еще нет, но можно предполагать, что они быстро найдут широкое применение. Управление нью-йоркской городской полиции снабдило полицейские патрули Центрального парка радиопередатчиками, чтобы охватить наблюдением обширную зону. И, возможно, наступит день, когда каждый патрульный будет снабжен миниатюрным приемопередатчиком, скрытым в фуражке.

Эти передатчики могут быть использованы при охране заводов, складов, универсальных магазинов и пирсов. Портовые власти в Нью-Йорке снабдили некоторых портовых караульных портативными приемопередатчиками.

Охрана имущества открывает новые возможности применения автоматического миниатюрного оборудования обнаружения. Например, в случае, когда предполагается возможность кражи, автоматический передатчик может быть установлен внутри упаковки ценных товаров. Как только такой предмет будет сдвинут с места, передатчик начнет бесшумно работать, как маяк, указывая полиции место, где скрыты украденные товары.

Вскоре миниатюризация превратит чемодан врача в настоящую диагностическую лабораторию. Электрокардиограф уже уменьшен до размеров портативного устройства, но его можно уменьшить до размеров папиросной коробки, что сделает его еще более удобным для использования.

Медицинская практика в больницах представляет еще одну широкую область для применения миниатюрного оборудования.

Недостаток в медицинских сестрах поставил перед необходимостью разработать средства, позволяющие медсестре этажа наблюдать из дежурной комнаты за состоянием многих пациентов. Например, можно подключать электронные термометры для измерения температуры к индикаторам-сигнализаторам в дежурной комнате. При значительном изменении температуры пациента будет подан тревожный сигнал. Частоту пульса также можно наблюдать непосредственно из дежурной комнаты. Миниатюрные телевизионные камеры позволяют медицинской сестре наблюдать за каждым больным.

Миниатюрное оборудование с успехом может использоваться и в операционных. При операциях на сердце применяются электронные катетеры. Микроминиатюрный микрофон, вмонтированный в катетер, который вводится в сердце через вену в руке, помогает хирургу прослушивать биение сердца непосредственно. Хирургия располагает также миниатюрными электронными устройствами для поддержания сердечного ритма.

Миниатюрное оборудование будет играть большую роль в области протезирования. Медицинские эксперты предвидят день, когда миниатюрное оборудование сможет заменить дефектный голосовой аппарат.

Такие «встроенные» в организм миниатюрные протезы будут иметь собственные источники питания в виде батарей, безвредных для здоровья пациента.

В связи с ускоренным ростом механизации и автоматизации появляются более широкие возможности для миниатюризации производства. При массовом производстве одной из важных задач является централизованное управление производственными процессами. На металлообрабатывающих заводах, где основу производства составляют операции по обработке отдельных деталей, необходимо осуществить централизованное наблюдение за всеми процессами. Обе эти задачи требуют создания различных миниатюрных датчиков и передающих линий.

Промышленность начинает делать только первые шаги в этой области. Карманные радиоприемники и портативные телевизоры представляют собой наиболее простые случаи микроминиатюрных устройств. Микроминиатюризация раскрывает потенциальные возможности для изготовления индивидуальных портативных радиотелефонов, вычислительных устройств, контролирующих температуру, приготовление пищи, освещение, составляющих счета за газ и электричество, а также диагностических устройств, помогающих лечащему врачу составить историю болезни пациента.

Массовому производству миниатюрных деталей свойственны свои специфические особенности. Чтобы иметь представление о специальных требованиях по управлению таким производством, ознакомимся с одним из многих заводов, работающих в этой области и производящих миниатюрные шарикоподшипники.

Первая проблема, которая возникает сразу же, — это проблема сырья. Поскольку готовая продукция, изготавливаемая за день, свободно умещается в шляпе, сырья требуется немного, но нужно найти поставщиков, которые согласятся производить специальные стали и другие материалы не тоннами, а килограммами.

Каждый понедельник за несколько часов до начала рабочей недели станки пускаются в работу, так как требуется много времени для их настройки на точный режим (такой прогрев станков характеризует все сложные производственные линии, изготавливающие даже стандартные детали). С момента запуска станки работают без перерыва до субботнего вечера (завод работает в три смены).

Завод полностью обеспечен установками кондиционирования воздуха, и на нем постоянно поддерживается абсолютная чистота;

готовые подшипники собираются под микроскопом в специальных герметизированных помещениях, температура и влажность в которых постоянны. Специально очищенный воздух нагнетается под небольшим давлением таким образом, что, когда воздухонепроницаемые двери открываются, чистый воздух, выходя наружу, не допускает попадания внутрь загрязненного воздуха. Курение запрещено, все рабочие носят пылеотталкивающую одежду и головные уборы. В этом же помещении подшипники заключают в герметические пыленепроницаемые пластмассовые контейнеры.

На заводе практически имеют место все производственные трудности, связанные с миниатюризацией:

1. Много времени уходит на наладку плавного хода поточной линии, значительно больше, чем на наладку линии, производящей обычные детали.

2. Дорогостоящее кондиционирование воздуха обычно обязательно, хотя не все помещения завода должны отвечать столь строгим условиям, как помещения окончательной сборки шарикоподшипников.

3. Поставщики деталей не всегда в состоянии удовлетворить требования, предъявляемые к размеру, весу, рабочим характеристикам, точности и срокам поставки миниатюрных изделий. Поэтому иногда приходится изготавливать некоторые детали своими силами.

4. Стоимость наблюдения и контроля за качеством очень высока и в среднем составляет 20% производственных затрат, но зачастую доходит и до 30%. Для тщательного и непрерывного контроля качества деталей необходимы всевозможные микроскопы, точные манометры, оптические компараторы и местные (заводские) телевизионные системы с увеличителями, применяемые на всех стадиях производства.

5. Линии, производящие миниатюрную аппаратуру, очень трудно полностью автоматизировать, и необходимый рабочий персонал должен тщательно отбираться и подготавливаться. На предприятии фирмы будущие операторы проходят три психологических испытания, помимо тщательного исследования зрения, проверка которого проводится раз в три месяца. Опытные инструментальщики должны проходить переподготовку для работы с чрезвычайно точными и тонкими инструментами и зажимами.

6. Практически каждая фирма должна готовить собственные кадры инженеров и контролеров-специалистов по миниатюризации. Некоторые фирмы организуют школы по подготовке специалистов. «Студенты» часть рабочего времени проводят на заводе, а часть на занятиях.

7. Заказчики нередко нуждаются в специальной тренировке или инструктаже по эксплуатации миниатюрных деталей.

## БОЛЬШИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИИ <sup>1)</sup>

*Фейнман <sup>2)</sup>*

Рассмотрим проблему изготовления и управления деталями весьма малых размеров. В этой области до сих пор сделано очень мало, но может быть достигнуто очень много. Обычно говорят о миниатюризации, об ее прогрессивном развитии в наши дни. Говорят об электрических двигателях размером не больше ногтя на мизинце, об устройстве, с помощью которого на булавочной головке можно записать «Отче наш». Но это ничто по сравнению с тем вопросом, на котором я сейчас собираюсь остановиться. В 2000 году люди будут задавать вопрос, почему до 1960 года никто не начал серьезно изучать это направление.

Можем ли мы записать все 24 тома Британской энциклопедии на булавочной головке?

Посмотрим, что для этого потребуется. Диаметр булавочной головки равен 1,6 мм. Если увеличить его в 25 000 раз, то площадь булавочной головки будет равна общей площади страниц Британской энциклопедии. Поэтому все, что нужно сделать — это уменьшить размер энциклопедии в 25 000 раз. Возможно ли это. Разрешающая способность глаза составляет около 0,2 мм, т. е. приблизительно равна диаметру одной из маленьких точек на полутонковой репродукции в энциклопедии. Если уменьшить такую точку в 25 000 раз, ее диаметр составит 80 Å или 32 атома в обычном металле. Другими словами, площадь такой точки все еще будет содержать около 1000 атомов. Отсюда следует, что размеры точки можно варьировать в соответствии с требованиями фототипии, так что вопрос о том, достаточно ли места на булавочной головке для Британской энциклопедии, решается в положительном смысле.

Более того, миниатюризованную таким путем энциклопедию можно будет читать. Представим себе, что энциклопедия написана выпуклыми металлическими буквами, размер которых равен 1/25 000 их обычного размера. Как нам их прочесть?

---

<sup>1)</sup> Feynman R. P., Miniaturization, ed. H. D. Gilbert, Reinhold Publishing Corporation, N. Y., Chapman and Hall, Ltd, London, 1961, p. 282—296 (сокращённый перевод).

<sup>2)</sup> Заведующий кафедрой теоретической физики Калифорнийского Технологического института.

Для чтения можно было бы воспользоваться существующей в настоящее время техникой (к тому времени, когда будет осуществлена такая запись, очевидно, будет найден лучший способ чтения, но я пока остановлюсь на способе, возможном в настоящее время). С этой целью можно оттиснуть металлическую форму в пластическом материале, затем осторожно снять этот пластиковый слепок, нанести на него методом вакуумного осаждения тонкую пленку двуокиси кремния, затем под некоторым углом по отношению к кремневой пленке напылить слой золота, так чтобы четко выступили все мельчайшие буквы, удалить с помощью растворителя пластик с пленки двуокиси кремния и рассматривать ее в проходящем свете под электронным микроскопом!

Совершенно очевидно, что при существующей технике для нас не составило бы труда прочесть на булавочной головке текст, написанный уменьшенными в 25 000 раз выпуклыми буквами. Несложно получить и копии, для этого потребовалось бы лишь снова оттиснуть металлический текст в пластике.

Следующий вопрос — как осуществить такую запись. В настоящее время мы не располагаем стандартной техникой подобного рода. Но позвольте мне заверить, что это не так сложно, как кажется на первый взгляд. Поменяв местами линзы в электронном микроскопе, мы можем вместо увеличения изображения получить его уменьшение. Источник ионов, посылаемый через линзы микроскопа в обратном направлении, может быть сфокусирован в точку малых размеров. С помощью этой точки мы можем записывать строку за строкой подобно тому, как происходит запись в телевизионной трубке, регулируя при этом количество осаждаемого материала по мере развертки луча по строке.

Этот метод может оказаться очень медленным из-за ограничений, обусловленных пространственным зарядом. Однако возможны и более быстрые методы. Например, сначала мы можем создать с помощью какого-либо фотохимического процесса экран с отверстиями в виде букв. Затем позади отверстий мы зажигаем дугу и пропускаем через отверстия ионы металла; после этого мы снова можем использовать нашу систему линз и создать уменьшенное ионное изображение, причем проникающие ионы обеспечат осаждение металла на булавочную головку.

Рассмотрим также другой, более простой способ, хотя я не уверен в том, что он окажется пригодным.

Пропустим луч света через оптический микроскоп в обратном направлении, фокусируя его на миниатюрный фотоэлектрический экран. При этом с освещенного участка будут вылетать электроны, которые мы сфокусируем с помощью линз электронного микроскопа и заставим ударяться о металлическую поверхность. Может ли этот луч при длительном воздействии оставить след на поверхности

металла — я не знаю. Если он окажется неэффективным для металлической поверхности, то, вероятно, удастся подобрать какой-либо другой материал покрытия булавочной головки, в котором бомбардировка электронами оставляет распознаваемый след.

В этих устройствах мы не сталкиваемся с проблемой интенсивности, как при увеличении, где необходимое исходное число электронов должно распределяться на все больший и больший экран. Здесь мы имеем дело с прямо противоположной проблемой. Свет, исходящий от страницы текста, концентрируется на очень малой площади, поэтому интенсивность его очень высока; немногочисленные электроны, испускаемые с фотоэлектрического экрана, также фокусируются на очень малой площади, следовательно, и здесь мы опять имеем большую интенсивность. Просто непонятно, почему это до сих пор не было сделано!

Итак, мы можем уместить Британскую энциклопедию на булавочной головке. А как будет обстоять дело со всей совокупностью книг в мире? Библиотека Конгресса содержит около 9 млн. томов, в библиотеке Британского музея — 5 млн. томов, во Французской национальной библиотеке — 5 млн. Несомненно, что здесь возможны повторения, поэтому примем, что всего в мире имеется около 24 млн. книг, представляющих интерес.

Что произойдет, если такое количество книг напечатать в рассматриваемом нами масштабе? Сколько это займет места? Для этого потребуется площадь, приблизительно равная миллиону булавочных головок, поскольку вместо 24 томов энциклопедии у нас будет 24 млн. томов. Миллион булавочных головок может быть размещен в квадрате, каждая сторона которого содержит тысячу булавок, что займет площадь около  $2,5 \text{ м}^2$ . Иначе говоря, используемый нами для копирования слепок («реплика») из двуокиси кремния с пластиковой подложкой толщиной в бумажный лист со всей этой информацией займет площадь, равную площади 35 страниц энциклопедии. Вся информация, запечатленная человечеством в книгах, оказалась представленной в виде небольшой брошюры, которую вы держите на ладони, и притом не в закодированной форме, а в виде непосредственного воспроизведения исходных рисунков, чертежей и прочего в уменьшенном масштабе без потери разрешения.

Что сказала бы библиотечка Калифорнийского технологического института, которой приходится бегать из одного здания в другое, если бы я сообщил ей, что через 10 лет все 120 000 томов библиотеки института, заполняющие все залы книгохранилища от пола до потолка, все набитые до отказа ящики с картотекой, склады, заваленные старыми изданиями, — все это можно будет разместить на одной-единственной библиотечной карточке. Если вдруг сгорит библиотека, например, Бразильского университета, мы сможем послать им копии всех книг нашей библиотеки, изготовив их за



несколько часов с исходной матрицы и отправив по почте в конверте, ни размером, ни весом не отличающемся от любого другого почтового конверта авиапочты.

Выше я показал, что существуют практические возможности уменьшения габаритов. Теперь я хочу показать, что это действительно *большие* возможности. Я не намерен сейчас разбирать вопрос о том, как все это осуществить, а укажу лишь на принципиальные возможности, которые имеются в соответствии с физическими законами. Я не открываю антигравитации, которая в один прекрасный день станет возможной только в том случае, если законы физики окажутся не такими, какими они нам представляются. Я буду здесь говорить лишь о том, что может быть выполнено в предположении, что законы физики действительно таковы, как мы о них думаем, и чего мы не делаем лишь потому, что еще не дошли до этого.

### МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИЯ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

Предположим, что вместо попытки воспроизведения рисунков и всей прочей информации в ее настоящем виде мы записываем выраженную буквами информацию в виде кода, состоящего из точек и тире или чего-либо подобного. Каждая буква содержит шесть или семь двоичных единиц («бит») информации, поэтому нам понадобится всего шесть — семь точек или тире для каждой буквы. Далее, вместо того чтобы осуществлять запись, как предполагалось выше, на поверхности булавочной головки, мы теперь используем и внутреннюю часть материала.

Изобразим точку в виде крупинцы одного металла, следующее за нею тире — в виде крупинцы другого металла и т. д. Предположим для осторожности, что для записи единицы информации требуется небольшой кубик из  $5 \times 5 \times 5 = 125$  атомов. Таким образом, мы будем считать, что нам требуется на каждый «бит» информации иметь 100 с лишним атомов в качестве гарантии, что информация не будет потеряна в процессе диффузии или каком-либо другом процессе.

Оценив количество букв в энциклопедии, я условно принял, что каждый из моих 24 млн. томов равен по объему тому энциклопедии, и вычислил общее количество единиц информации ( $10^{16}$ ). Допустим, что на каждую единицу информации приходится 100 атомов. Тогда получается, что информация, старательно накопленная человечеством во всех в мире книгах, может быть записана таким способом в кубе материала с ребром 0,12 мм, т. е. в мельчайшей пылинке, еще различимой невооруженным глазом. Следовательно, действительно существуют *большие* возможности миниатюризации. И не говорите мне о микропленке!

То обстоятельство, что огромное количество информации может быть заключено в исключительно малое пространство, конечно, хорошо известно биологам; оно раскрывает тайну того, каким образом в крошечной клетке может храниться вся информация об организации сложнейшего существа — такого, скажем, как человек. Вся эта информация — о том, что у нас будут карие глаза, что мы вообще будем способны к мышлению, что в эмбриональной стадии наша челюстная кость сначала будет иметь сбоку небольшое отверстие, через которое впоследствии прорастет нерв, — вся эта информация содержится на крошечном участке клетки в виде вытянутых в длину молекул ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты), в которых на одну двоичную единицу информации в клетке приходится около 50 атомов.

### Усовершенствование электронного микроскопа

Если текст записан в виде кода, в котором на каждую единицу информации приходится  $5 \times 5 \times 5$  атомов, возникает вопрос, как прочитать такую запись? Электронный микроскоп недостаточно хорош для этой цели; его максимальная разрешающая способность составляет лишь около 10 Å. Я попытаюсь доказать, что электронный микроскоп должен быть улучшен примерно в 100 раз. Это не является невозможным и не противоречит законам дифракции электронов. Длина волны электрона в таком микроскопе составит лишь  $1/20$  Å, и, следовательно, должны быть различимы отдельные атомы. Но есть ли необходимость отчетливо видеть отдельные атомы?

У нас есть друзья в других областях науки, например в биологии. Мы, физики, часто говорим им: «Знаете, почему вы так медленно продвигаетесь вперед?» (На самом деле я не знаю другой области, где бы наблюдался такой быстрый прогресс, как в биологии.) «Вы должны больше опираться на математику, как это делаем мы». Они могли бы ответить нам, но они достаточно скромны, поэтому я отвечу за них: «Вы могли бы способствовать более быстрому развитию биологии улучшением качества электронного микроскопа в 100 раз».

Каковы главные фундаментальные проблемы современной биологии? Их можно свести к следующим вопросам. Какова последовательность оснований в ДНК? Что происходит при мутации? Какова связь между порядком оснований в ДНК и порядком аминокислот в белке? Какова структура РНК (рибонуклеиновой кислоты); имеет ли она одинарную или двойную цепь; какова связь между порядками оснований в ДНК и РНК? Какова структура микросом? Каким образом происходит синтез белка? Куда девается РНК? Где находится белок? Куда входят аминокислоты? Какова роль хлорофилла в фотохимическом синтезе; какова его структура? Какова

при этом роль каротиноидов? Какова система превращения света в химическую энергию?

На многие из этих фундаментальных вопросов современной биологии легко дать ответ, если посмотреть на эти вещи: «Надо посмотреть! Тогда вы увидите порядок оснований в цепи, увидите строение микросомы. К сожалению, современный микроскоп очень несовершенен. Но стоит повысить увеличение микроскопа в 100 раз и многие проблемы биологии значительно упростятся». Я, конечно, несколько преувеличиваю, но биологи, безусловно, будут очень благодарны, и во всяком случае они предпочтут такое усовершенствование критическим высказываниям о том, что им следует больше опираться на математику.

Теория химических процессов в настоящее время опирается на выводы теоретической физики. В этом смысле физика образует фундамент химии. Но в химии также существует и анализ. Если вам приходится иметь дело с неизвестным веществом и вам нужно узнать, что это такое, вы должны прибегнуть к длительному и сложному процессу химического анализа. В наши дни подвергнуть анализу можно почти все, так что я несколько опоздал со своей идеей. Но если бы физики захотели, они могли бы совершить подкоп под химиков в вопросе химического анализа. Анализировать любое сложное химическое вещество чрезвычайно просто: для этого требуется лишь взглянуть на это вещество и посмотреть, как в нем расположены атомы. Единственное затруднение состоит в том, что электронный микроскоп в сто раз слабее, чем нужно. (Позднее я поставлю вопрос: могут ли физики сделать что-нибудь для решения третьей проблемы химии — проблемы синтеза? Имеются ли физические пути синтеза-рования химических веществ?)

Причина недостаточно высокого качества существующего электронного микроскопа заключается в том, что  $f$  его линз составляет лишь 1 : 1000 (иначе говоря, численная апертура его недостаточно велика). И мне хорошо известно, что существуют теоремы, доказывающие невозможность получения намного большего значения  $f$  при аксиально-симметричной системе электростатических линз и что поэтому разрешающая способность современного электронного микроскопа достигла своего теоретического максимума. Но в каждой теореме имеются свои допущения. Почему поле обязательно должно быть аксиально-симметричным и электростатическим? Разве нельзя создать пульсирующие электронные пучки в полях, движущихся вместе с электронами? Должно ли поле быть обязательно симметричным? Пусть мой следующий вопрос прозвучит как вызов: нет ли путей повышения силы электронного микроскопа?

### Удивительная биологическая система

Биологический пример микроскопической записи информации заставил меня глубже продумать наши возможности. Биология— это не просто запись информации; это также и какое-то ее использование. Биологическая система может быть чрезвычайно малой. Многие клетки ничтожны по размерам но очень активны; они вырабатывают различные вещества, движутся, делают всякие чудеса— и все в миниатюрных масштабах. Они также хранят информацию. Представим себе, что мы тоже можем создать некую микроминиатюрную деталь, которая будет делать все, что мы захотим, т. е. что мы сможем изготовить объект, который будет действовать на том же «уровне».

Создание миниатюрных устройств может быть и экономически целесообразно. Здесь уместно вспомнить о некоторых проблемах, связанных с вычислительными машинами. В этих устройствах возникает проблема хранения невероятно большого количества информации. Упомянутый выше способ записи, при котором вся информация представлена в виде определенного распределения частиц металла, соответствует постоянной «памяти». Значительно больший интерес с точки зрения применения в вычислительных устройствах представлял бы способ, позволяющий записывать информацию, стирать ее и вновь записывать. (Это естественно вытекает из стремления избежать расточительства в расходовании материала, на котором произведена запись. Но если мы сумеем записывать информацию на очень малом пространстве, проблема потеряет свое значение. После прочтения мы просто могли бы выбрасывать использованный материал, так как стоимость его была бы незначительна.)

### Миниатюризация вычислительных устройств

Я не знаю как практически миниатюризировать их, но твердо знаю, что современные вычислительные машины очень громоздки. Они занимают целые залы. Почему их нельзя сделать миниатюрными, изготовив из микроминиатюрных проводов и элементов, — я подчеркиваю слово *микроминиатюрный*. Например, диаметр провода должен быть порядка 10—100 атомов, а размеры схемы — порядка несколько тысяч ангстрем. Каждый, кто анализировал логическую теорию вычислительных машин, неизбежно приходит к выводу, что машины эти открыли бы чрезвычайно интересные возможности, если бы удалось повысить их сложность на несколько порядков. Если число элементов в них было бы в миллион раз больше, электронные машины были бы способны делать умозаключения и у них появилось бы достаточно времени для отыскания наилучшего способа того или иного вычисления. На основе собственного опыта

они могли бы выбирать метод анализа, более совершенный, нежели тот, который мы им предложим. И во многих других отношениях они обнаружили бы новые качества.

Взглянув на ваше лицо, я сразу распознаю, что уже видел вас когда-то раньше. Однако нет еще машины, которая с такой же быстротой могла бы по фотографии определить, хотя бы просто, что это — человек, и еще менее — что это именно тот человек, которого вы ей уже показывали раньше, если только это не та же самая фотография. Я узнаю это лицо в любом случае: когда оно изменилось, когда я подступил к нему ближе или отошел дальше от него, при другом освещении и т. д. Небольшая вычислительная машина, находящаяся в моем мозгу, легко может выполнить это, сконструированные же нами машины к этому неспособны. Число элементов, содержащихся в моей черепной коробке, значительно больше числа элементов наших «чудесных» вычислительных устройств. Но наши вычислительные машины слишком громоздки. Элементы в моей черепной коробке имеют микроскопические размеры. Я же хочу создать сверхмикроскопические элементы.

Если бы мы захотели создать вычислительное устройство, обладающее всеми упомянутыми выше замечательными свойствами, оно по своим размерам было бы, пожалуй, не меньше здания Пентагона. Это во многих отношениях неприемлемо. Во-первых, потребуются слишком много материала. Для транзисторов, которые пришлось бы упаковать в эту громадину, не хватит всех мировых запасов германия. Мы столкнулись бы также с проблемой теплопередачи и потребления энергии. Для обслуживания этой машины понадобился бы штат не меньше штата администрации по развитию водного, энергетического и сельского хозяйства крупной реки. Еще большая практическая трудность вызвана тем, что устройство было бы ограничено определенной скоростью. Из-за больших размеров устройства требуется некоторое конечное время для передачи информации с одного места устройства в другое, так как информация не может передаваться со скоростью, превышающей скорость света. Следовательно, при дальнейшем ускорении счетно-решающих устройств и при их усложнении мы должны все больше и больше уменьшать их габариты. Для этого у нас есть большие возможности. Я не могу найти в физических законах ничего, что препятствовало бы значительному уменьшению элементов счетно-решающих устройств по сравнению с их нынешними размерами.

Как осуществить такое устройство? Какие технологические процессы могут быть использованы? Одна из возможностей связана с упоминавшимся способом записи путем напыления атомов в определенном порядке. Она состоит в вакуумном осаждении слоя материала, последующем осаждении на нем изоляционного слоя затем опять осаждении проводника в новом положении, за которым снова

следует изолятор, и т. д. Таким образом вы повторяете процесс осаждения до тех пор, пока не получится блок из материала, содержащий все необходимые элементы — катушки, конденсаторы, транзисторы и т. п. — исключительно малые по размеру.

Но здесь хотелось бы рассмотреть и некоторые другие возможности. Почему бы не изготовить эти миниатюрные вычислительные устройства примерно таким же путем, как мы создаем большие вычислительные машины? Почему мы не можем сверлить отверстия, резать, паять, штамповать и формовать детали различной конфигурации, но все это в бесконечно малом масштабе? Каковы те пределы, до которых мы можем уменьшать детали, чтобы их все еще можно было отформовать. Как часто, когда вам приходится возиться с чем-то очень миниатюрным, например чинить ручные часы вашей жены, вы говорите себе: «Если бы только можно было научить муравья делать все это!»

Вот вне как раз и хотелось бы предложить заставить муравья обучить этому делу еще меньшую букашку. Каковы возможности маленьких, но все же подвижных механизмов?

Даже если их не удастся практически использовать, изготовить их было бы, несомненно, любопытно.

### СВЕРХМИНИАТЮРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Возьмем любой механизм, например автомобиль, и посмотрим какие проблемы возникают при изготовлении такого механизма, если он крошечных размеров. Предположим, что в данной конструкции автомобиля требуется определенная точность, скажем, порядка 0,01 мм. Если цилиндр или другие детали по своей форме не удовлетворяют указанной точности, механизм не будет работать достаточно хорошо. Если я сделаю вещь слишком маленькой, то мне придется считаться с размером атомов: я не могу сделать круг из «шаров», если круг должен быть очень малым. Итак, если считать допустимой неточность в 0,01 мм, то окажется, что я смогу уменьшить размеры автомобиля примерно в 4000 раз, так что длина его будет 1 мм. Очевидно, если вы измените конструкцию автомобиля с таким расчетом, чтобы он работал при гораздо больших допусках, что отнюдь не невозможно, то это позволит изготовить гораздо более миниатюрное устройство.

Интересно рассмотреть, какие проблемы могут возникать в таких маленьких механизмах. Во-первых, если детали подвергать одному и тому же давлению, то усилие будет уменьшаться с уменьшением площади, поэтому вес и инерция будут иметь сравнительно небольшое значение. Другими словами, прочность материала соответственно во много раз возрастает. Например, натяжение и расширение махового колеса под влиянием центробежной силы будут

возрастать в той же пропорции только в том случае, если скорость вращения будет увеличена в том же отношении, в каком мы уменьшим его размеры. С другой стороны, используемые нами металлы имеют зернистую структуру, что представляет известные затруднения, когда вступаешь в область малых размеров, так как материал оказывается неоднородным. Пластмасса, стекло и материалы сходного аморфного строения гораздо более однородны и поэтому следовало бы делать механизмы из таких материалов.

Существуют также проблемы, связанные с электрической частью системы — с медными проводами и магнитными элементами. Магнитные свойства при очень малом масштабе будут отличаться от свойств при больших масштабах, и это составляет главную проблему. Может оказаться, что большой магнит, состоящий из миллионов областей спонтанного намагничивания — «доменов», в маленьком масштабе будет содержать всего один-единственный домен. Электрическая аппаратура не может быть просто уменьшена, она должна быть переконструирована. Но я не вижу причины, почему бы нельзя было изменить ее конструкцию, сделав ее вновь пригодной для работы.

Проблема смазки также имеет несколько интересных аспектов. С уменьшением масштабов (и при максимально возможном увеличении скорости) эффективная вязкость масла пропорционально возрастает. Если мы не столь сильно увеличим скорость и заменим масло керосином или какой-либо другой жидкостью, то проблема уже не будет казаться такой безнадежной. Но в действительности возможно, что нам вообще не нужно будет производить смазку! Мы располагаем большой дополнительной силой. Пусть подшипники работают сухими: они не нагреваются, так как тепло в таких маленьких устройствах отдается чрезвычайно быстро.

Быстрая потеря тепла исключает возможность вспышки бензина, что делает невозможным создание двигателя внутреннего сгорания. Можно использовать другие химические реакции, при которых выделение энергии происходит при низких температурах. Но наиболее удобным для таких маленьких механизмов будет, очевидно, подача электрической энергии от внешнего источника.

Где можно будет практически применять такие механизмы? Кто знает? Конечно, если изготовить такой крошечный автомобильчик, то ездить на нем смогут только букашки, но я не думаю, что наша христианская забота о ближнем простирается так далеко. Но выше мы указывали на возможность изготовления маленьких элементов для вычислительных устройств на полностью автоматизированных заводах, оснащенных токарными и другими станками миниатюрных габаритов. Маленький токарный станок, конечно, не должен быть точным подобием большого токарного станка. Я предоставляю Вашему воображению возможность усовершенствования кон-

струкции таким образом, чтобы полностью воспользоваться преимуществами устройств в малом масштабе и создания управления полностью автоматизированными процессами по возможности более простого.

Альберт Хибс предложил очень интересную область применения таких сравнительно маленьких механизмов, по его словам (хотя это довольно дерзкая идея) она может представить интерес для хирургии, если только вам удастся «проглотить» самого «хирурга». Можно поместить механического «хирурга» в кровеносный сосуд, чтобы он с кровотоком проник в сердце и «осмотрел» его. (Конечно, добытая им информация должна быть как-то выведена наружу). «Хирург» определяет, какой клапан поврежден, берет малюсенький нож и производит нужную операцию. В тело могут быть также постоянно вживлены другие миниатюрные механизмы, чтобы помочь какому-либо неправильно функционирующему органу.

Возникает вопрос: Как изготовить такой крошечный механизм? Я предоставляю ответить на него читателю. Тем не менее мне хотелось бы внести одно необычное предложение.

Известно, что на атомных установках есть материалы и машины, к которым нельзя непосредственно прикасаться руками, так как они радиоактивны. Для отвинчивания гаек и установки болтов, а также для выполнения другой подобной работы имеется набор специальных механических «рук»; оперируя рычагами в одном месте, вы можете управлять «руками», находящимися в другом месте, и, повертывая их в определенном положении, довольно хорошо манипулировать деталями.

Большинство таких приспособлений устроено очень просто: от органов управления непосредственно к «рукам» идет специальный кабель, напоминающий шнур с нитями, за которые дергают марионеток. Но, конечно, для этих целей используются и сервомоторы, так что связь между деталями осуществляется электрическим, а не механическим путем. При повороте рычагов происходит поворот ротора сервомотора, которые изменяет электрические токи в приводах, что вызывает вращения вала электродвигателя на другом конце.

И вот я хочу создать очень похожую систему управления ведомого устройства ведущим механизмом, действующую при помощи электричества. Но мне хотелось бы, чтобы ведомые механизмы были изготовлены особенно тщательно современными слесарями-универсалами и были бы в четыре раза меньше механических «рук», которыми обычно пользуются в атомной технике. Таким образом, у нас есть схема для изготовления деталей, которые будут в четыре раза меньше обычных. Маленькие сервомоторы с маленькими «руками» манипулируют маленькими гайками и болтами и просверливают маленькие отверстия; их размеры уменьшены в четыре раза. Итак, мы из-



готовляем токарный станок в четыре раза меньше обычного и вчетверо уменьшенные инструменты и изготавливаем на нем новый комплект «рук», но уже уменьшенный еще в 4 раза. Размер инструментов составляет теперь 1/16-ую. Затем мы соединяем, возможно, через трансформаторы систему большого масштаба с сервомоторами размером в 1/16-ую. После этого мы можем привести в действие «руки» размером в 1/16-ую.

Из изложенного принцип предложения должен быть ясен. Это довольно сложная программа, но она выполнима. Возможно, мне возражат, что все это можно выполнить успешнее за один этап, а не последовательно за четыре этапа. И, конечно, все должно быть сконструировано чрезвычайно тщательно, причем вовсе нет необходимости просто копировать человеческую руку. Внимательно продумав задачу, вы, вероятно, предложите гораздо более совершенную систему.

При работе с пантографом даже сейчас мы за один этап можем получить коэффициент уменьшения, гораздо больший четырех. Однако мы не можем непосредственно работать с пантографом, который изготавливал бы меньший пантограф, а тот в свою очередь создавал бы еще более маленький пантограф, ввиду имеющихся люфтов в сочленениях и неточности конструкции. Конец пантографа будет колебаться с несколько большей неравномерностью, чем та, с которой вы двигаете руками. При последовательном уменьшении получилось бы, что пантограф «третьего порядка» дрожал бы настолько интенсивно, что не смог бы сделать ничего разумного.

Следовательно, на каждом этапе необходимо повышать точность аппаратуры. Если, например, изготовив с помощью пантографа маленький токарный станок, мы обнаружим, что его ходовой винт сделан неточно — с большей погрешностью, чем винт большого размера, мы можем «притирать» ходовой винт к гайкам, отвинчивая и завинчивая их обычным способом, до тех пор, пока ходовой винт не станет столь же точным по размерам, как и первоначальные ходовые винты в исходном масштабе.

Плоские поверхности можно получить путем притирки неплоских поверхностей по три — тремя парами — и тогда плоскости будут более плоскими, чем первоначальные. Таким образом, повышение точности правильными операциями в малом масштабе не является невозможным.

Следовательно, при создании такой системы необходимо повышать точность аппаратуры на каждом этапе, доводя ее на этом этапе до совершенства.

Это возможно при изготовлении точных ходовых винтов, блоков Джонсона и других материалов, которые мы используем при точной машинной обработке в более крупном масштабе. На каждой ступени

мы должны останавливаться и изготавливать все необходимое оборудование для перехода к следующей ступени. Это очень длительная и трудная программа. Возможно, вам удастся найти более совершенный и быстрый способ уменьшения размеров. Однако в конце такого многоэтапного процесса мы сможем получить крошечный станочек, который будет в 4000 раз меньше обычного токарного станка. Но мы мечтаем о создании сложнейшего вычислительного устройства с помощью таких миниатюрных токарных станков.

Изготовив свой первый комплект рабочих «рук» в четверть масштаба, я приступаю к изготовлению десяти таких комплектов. Сделав десять комплектов «рук», я соединяю их с механизмами первоначального размера так, чтобы они выполняли ту же работу и за то же время. Когда я затем делаю новые устройства в четверть уже уменьшенного масштаба, я снова изготавливаю по 10 комплектов на каждое устройство, так что в результате я имею 100 «рук» в 1/16-ую размера.

Где же разместить мой миллион токарных станков? Ничего страшного, их объем будет намного меньше объема даже одного токарного станка обычного размера. Если я сделаю, например, 1 млрд. маленьких токарных станков размером в 1/4000 обычного токарного станка каждый, то это даст возможность сэкономить пространство и огромное количество материалов, так как для изготовления 1 млрд. маленьких токарных станков потребуется только 2% материала, необходимого для изготовления одного обычного токарного станка.

Итак, вы видите, что стоимость материала невелика. Я намерен построить миллиард крошечных заводов, копии друг друга, которые будут одновременно работать — сверлить отверстия, штамповать детали и т. п.

По мере уменьшения габаритов возникает много интересных проблем. Детали не просто пропорционально уменьшаются в размерах. Появляется опасность, что материалы будут склеиваться друг с другом под влиянием молекулярного притяжения. Это будет выглядеть примерно так: изготовив деталь, мы свинчиваем гайку с болта, но она не падает, так как вес ее ничтожен; ее даже трудно будет снять с болта. Это напоминает старую киношутку о человеке с руками, вымазанными патокой, который старается отделаться от стакана воды. Возникает целый ряд проблем такого рода, и мы должны быть заранее готовы к их разрешению.

### ПЕРЕГРУППИРОВКА АТОМОВ

Теперь меня не пугает и рассмотрение последнего вопроса: не сможем ли мы в конечном счете в отдаленном будущем произвольно группировать сами *атомы* по своему желанию? Что произой-

вошло бы, если бы мы смогли располагать атомы друг подле друга так, как нам захочется (разумеется, в пределах возможного, ибо их нельзя, например, расположить так, чтобы их соединение было химически неустойчивым)?

До настоящего времени нам приходилось рыться в земле, чтобы найти минералы. Мы нагревали их и производили с ними различные манипуляции, надеясь получить чистое вещество с определенным количеством примесей, и т. д. Но нам всегда при этом приходится удовлетворяться тем взаимным расположением атомов, которое дает нам природа. В природе не существует веществ, в которых атомы были бы расположены, скажем, «в шахматном порядке» или атомы примеси отстояли друг от друга на расстоянии  $1000 \text{ \AA}$  и т. д.

Какую пользу мы могли бы извлечь, если имели бы структуры с точно заданным расположением слоев? Каковы будут свойства материалов, если мы действительно расположим атомы так, как нам хотелось бы? Чрезвычайно интересно было бы исследовать этот вопрос теоретически. Я не могу точно предсказать, что произойдет, но едва ли можно сомневаться в том, что если мы сумеем *управлять* расположением элементов вещества, мы получим в свое распоряжение огромное разнообразие свойств, которыми может обладать вещество, что значительно расширит наши возможности в создании различных устройств.

Возьмем для примера кусочек материала, в котором мы помещаем маленькие катушки и конденсаторы (или их кристаллические эквиваленты) размером в  $1000$  или  $10\,000 \text{ \AA}$ , расположенные один подле другого на большой площади с маленькими антеннами, выходящими с другого конца — целый набор контуров.

Можно ли будет, скажем, заставить группу таких антенн испускать световые волны подобно тому, как радиоволны излучаются сложной антенной при передаче радиопрограмм в Европу? Тот же вопрос касается возможности посылки направленного пучка света очень большой интенсивности в определенном направлении (даже если такой пучок света и не представит большого интереса с технической или экономической точки зрения).

Я думал над некоторыми проблемами, связанными с созданием сверхминиатюрных электрических схем, и пришел к выводу, что серьезным препятствием окажется проблема сопротивления. Собственная частота цепи, изготовленной в миниатюре, должна увеличиться, так как длина волны уменьшается пропорционально уменьшению масштаба. Глубина же проникновения поля (скин-эффект) уменьшится как корень квадратный из масштабного коэффициента, так что проблема сопротивления будет вызывать возрастающие

трудности. Возможно, эти трудности удастся преодолеть путем использования явления сверхпроводимости, если частота не является слишком высокой, или какими-либо другими специальными приемами.

### АТОМЫ В МАЛОМ МИРЕ

Вступив в мир чрезвычайно малых размеров, где нам придется иметь дело с цепями, состоящими, скажем, из 7 атомов, мы столкнемся с массой новых обстоятельств, которые представят совершенно новые возможности для конструирования. Атомы в таком малом мире ведут себя совершенно иначе, чем в макром мире, подчиняясь законам квантовой механики. Поэтому при манипулировании с атомами в малом мире нам приходится иметь дело с другими законами и мы можем ожидать, что встретим совсем иные вещи.

При изготовлении нужных устройств мы можем идти различными путями. Мы можем использовать не только цепи, но и некоторые системы с квантовыми энергетическими уровнями, использовать взаимодействие квантовых спинов и т. д.

Следующим моментом, на который хотелось бы обратить внимание, является то обстоятельство, что если мы пойдем в направлении микроминиатюризации достаточно далеко, то все наши устройства можно будет изготавливать в массовом производстве так, что каждое из них будет абсолютной копией другого. Две большие машины мы не можем сделать такими, чтобы их размеры были совершенно одинаковыми. Но если высота вашего механизма составляет всего 100 атомов, то уже при точности в 0,5% вы можете быть уверены, что другой механизм будет точно того же размера, т. е. высотой в те же 100 атомов!

На атомном уровне мы встречаемся с новыми типами сил, новыми возможностями и новыми видами эффектов. Проблемы производства и воспроизводства материалов будут совершенно иными. Я уже говорил, в какое восхищение меня приводят биологические явления, в которых химические силы при многократном использовании приводят к самым невероятным эффектам (одним из которых является сам автор!).

Законы физики, насколько я их понимаю, не противоречат возможности последовательного изменения вещей атом за атомом. Это не попытка игнорировать все законы; в принципе это все осуществимо и не было осуществлено на практике лишь потому, что мы сами слишком большие.

В конечном итоге мы научимся осуществлять химический синтез. Придет к нам химик и скажет: «Послушайте, мне нужна молекула с таким-то и таким расположением атомов. Сделай-

те мне такую молекулу». До сих пор химик совершает таинственные обряды, когда хочет получить определенную молекулу. Он видит, что в нее входит такой-то цикл, и вот он смешивает то и это, взбалтывает и мудрит над своей пробиркой, пока в конце этого мучительного процесса не добьется того синтеза, к которому стремится. Но к тому времени, когда я смогу заставить мои устройства работать, т. е. когда химический синтез можно будет осуществлять с помощью физики, химик успеет докопаться, как производить синтез всего на свете, так что моя работа окажется для него практически бесполезной.

Но представляет интерес уже то, что в принципе физик (я так думаю) сможет синтезировать любое химическое вещество, которое ему напишет химик. Дайте только команду, и физик синтезирует его. Как? Разместите атомы так, как указывает химик, и вы получите искомое вещество. Огромную помощь в разрешении проблем химии и биологии принесет развившаяся у нас способность видеть то, что мы делаем, и изготавливать вещи на атомном уровне, а развития у нас этой способности, как мне кажется, нельзя избежать.

Однако вы, возможно, спросите: «Кто должен делать это и зачем это делать? Ну, что ж! Я указал уже на некоторые экономические соображения, но знаю, что истинной причиной, которая заставит вас заниматься такими вещами, будет простая забава. Так делайте это ради забавы!

Пусть различные лаборатории соревнуются между собой. Одна лаборатория пусть изготовит крошечный электродвигатель и пошлет его в другую лабораторию, а та вернет его обратно, предварительно снабдив его неким устройством, которое умещается внутри вала первого двигателя.

Ради развлечения и чтобы заинтересовать этим делом детей, я бы предложил тем, кто связан со средними школами, подумать об организации соревнования между школами. В конце концов мы в этой области начинаем делать лишь первые шаги, и даже дети могут писать мельче, чем все, что когда-либо было написано до сих пор. Они могли бы соревноваться между школами. Школьники Лос-Анжелоса, например, могли бы послать чикагским школьникам булавку, на которой было бы выгравировано: «Что Вы на это скажете?», а получив булавку обратно, они в точке от вопросительного знака прочли бы: «ничего особенного!»

Но, может быть, такие бескорыстные побуждения вас не вдохновляют, и заинтересовать вас могут только экономические соображения. Тогда я тоже смог бы что-то предложить, хотя в настоящий момент я еще не подготовился к этому. Я предлагаю премию в 1000 долл. первому, кто сможет записать информацию, содержащуюся на одной странице книги, на площади в 25 000 раз

меньше в линейном масштабе таким образом, чтобы ее можно было прочесть с помощью электронного микроскопа.

Я собираюсь предложить еще одну премию в 1000 долл. первому, кто сделает действующую модель электрического двигателя — вращающийся электромотор, которым можно было бы управлять извне и который, не считая подводящих проводов, занимал бы объем  $0,3 \text{ мм}^3$ .

Я не думаю, чтобы такие премии заставили долго ждать претендентов<sup>1)</sup>.

---

<sup>1)</sup> Примечание редактора английского издания: Вторая из упомянуты премий действительно была присуждена д-ром Фейнманом 28 ноября 1960 г Вильяму Мак-Леману, который построил электрический мотор размером пылинку. Первая премия еще не присуждена.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к русскому изданию . . . . .	5
Предисловие авторов. <i>Перевод М. М. Кручинской</i> . . . . .	19
Глава 1. Транзистор и его принцип действия. <i>Перевод М. М. Кручинской</i> . . . . .	21
Глава 2. Типы транзисторов и диодов и их изготовление. <i>Перевод М. М. Кручинской</i> . . . . .	53
Глава 3. Миниатюрные компоненты для схем на транзисторах. <i>Перевод М. М. Кручинской и А. В. Чусова</i> . . . . .	96
Глава 4. Технология изготовления печатного монтажа и схем с заливкой. <i>Перевод А. В. Чусова</i> . . . . .	165
Глава 5. Миниатюризация электронного оборудования. <i>Перевод А. В. Чусова</i> . . . . .	193
Глава 6. Микроминиатюризация: микросхемы или плоские конструкции. <i>Перевод А. В. Чусова и Е. М. Жарова</i> . . . . .	216
Глава 7. Микромодульный способ микроминиатюризации. <i>Перевод Е. М. Жарова</i> . . . . .	277
Глава 8. Твердые схемы или трехмерный метод микроминиатюризации. <i>Перевод Е. М. Жарова</i> . . . . .	301
Литература . . . . .	345

## Приложение

Гильберт. О миниатюризации. <i>Перевод Е. М. Жарова</i> . . . . .	355
Хармон, Макдермот. Проблемы производства микроминиатюрного электронного оборудования. <i>Перевод Е. М. Жарова</i> . . . . .	364
Мандель. Миниатюризация—новое направление в промышленности. <i>Перевод Е. М. Жарова</i> . . . . .	367
Фейнман. Большие возможности микроминиатюризации. <i>Перевод М. М. Кручинской</i> . . . . .	372

**Миниатюризация и микроминиатюризация  
радиоэлектронной аппаратуры**

Редактор Н. А. Данилов

Художник К. П. Сиротов

Художественный редактор Н. А. Фильчагина

Технический редактор В. П. Сизова

Корректор К. Л. Водяницкая

---

Сдано в производство 7/VIII 1964 г.

Подписано к печати 1/II 1965 г.

Бумага 60×90<sup>1/16</sup>, бум. л. 12,25, печ. л. 24,5.

Уч.-изд. л. 22,62. Изд. № 20/1853.

Цена 1 р. 73 к. Зак. 648.

Издательство «МИР»,

Москва, 1-й Рижский пер., 2

---

Московская типография № 4 Главполиграфпрома

Государственного комитета

Совета Министров СССР по печати

Б. Переяславская, 46



## **ВЫШЛИ В СВЕТ**

**СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТЕННЫ.** Перевод с английского, изд-во «Мир», 20 изд. л., в переплете 1 р. 60 к.

Книга содержит работы крупных американских специалистов, опубликованные в технической литературе за последние годы, и знакомит читателя с основными теоретическими предпосылками, принципами конструирования и характеристиками сверхширокополосных антенн различных типов, методами их инженерного расчета, а также с их практическим применением. В частности, эти антенны могут найти широкое применение в области телевизионной техники.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся теорией и практическим использованием антенных устройств, а также может быть полезной для преподавателей, аспирантов и студентов.

## ВЫШЛИ В СВЕТ

СИТИДЗЕ Ю., САТО Х. **ФЕРРИТЫ**. Токио, 1961, перевод с японского, изд-во «Мир», 22 изд. л., цена в переплете 1 р. 74 к.

Книга представляет собой монографический обзор по физике ферритов и основным областям их применения. Освещаются вопросы магнитного гистерезиса, различные зависимости для релаксации при намагничивании и энергии анизотропии. Рассматриваются явления, сопровождающие высокочастотное намагничивание ферритов. Обсуждается природа магнитного резонанса и его применение. Исследуются диэлектрические свойства ферромагнитных материалов. Описываются методы изготовления ферритов в Японии, в частности, для накопителей информации и коммутирующих элементов, для техники сверхвысоких частот, магнитной звуко- и видеозаписи, а также для различных магнитометрических приборов.

Книга рассчитана на широкие круги специалистов и конструкторов в области радиоэлектроники, связи, счетно-решающей техники, а также на аспирантов и студентов.



