

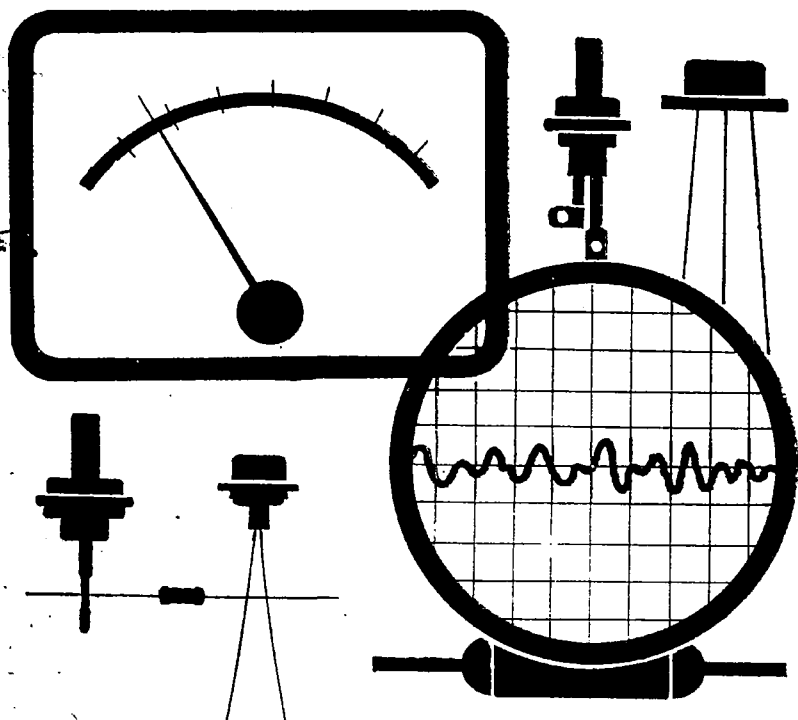
ПРОФТЕХОБРАЗОВАНИЕ



ПОЛУПРОВОДНИКИ

Г. И. ГРИН

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ИСПЫТАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ



43360

Г. И. ГРИН

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ИСПЫТАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

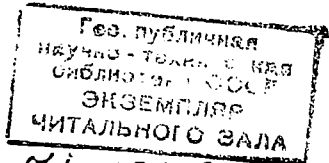
Издание второе,
переработанное и дополненное

Одобрено Ученым советом Государственного комитета
Совета Министров СССР по профессионально-техниче-
скому образованию в качестве учебного пособия
для профессионально-технических учебных заведений



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1974

6П2.15
Г85



74-13360

Д4

24206

Грин Г. И.

Г85

Измерение параметров и испытание полупроводниковых приборов. Учеб. пособие для профес.-техн. учеб. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Выш. школа», 1974.

224 с. с ил.

В книге изложены основные сведения о современных полупроводниковых приборах, о методике измерений их параметров и испытаний.

Приведены сведения об элементах измерительных устройств — резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности, импульсных схемах, а также понятия об электрических схемах.

Во втором издании учебного пособия описаны более современные методы испытаний полупроводниковых приборов, в нем устранены некоторые неточности описательного характера, ряд разделов изложен более четко и доходчиво для понимания учащихся.

Г $\frac{30407-602}{052(01)-74}$ 65-74

6П2.15

Глава I написана Шокальским А. А., глава IV — Дененбергом М. Л., главы V и VI — совместно Грином Г. И. и Шокальским А. А.

Со всеми предложениями и замечаниями просим обращаться по адресу: Москва, К-51, ул. Неглинная, 29/14, издательство «Высшая школа».

ВВЕДЕНИЕ

Развитие радиоэлектроники и создание современных электронно-вычислительных машин, разработка бортовой аппаратуры самолетов и ракет поставили ряд задач, решение которых средствами ламповой техники оказалось затруднительным или вообще невозможным. Все это дало толчок исследованиям в области полупроводниковых материалов и приборов.

Создание современных полупроводниковых приборов — результат многолетней работы ученых и инженеров разных стран мира.

В России начало исследований электрических свойств полупроводников относится к концу прошлого столетия. В 1888 году профессор Казанского университета В. А. Ульянин исследовал явление возникновения электродвижущей силы при освещении кристаллического селена. В конце прошлого и начале текущего столетия в России был выполнен ряд исследований физических и физико-химических свойств этого элемента. К этому периоду относится первая работа академика А. Ф. Иоффе и его сотрудников по изучению механизма фотопроводимости кристаллов кварца, серы, каменной соли.

Впервые полупроводниковый диод-детектор был использован А. С. Поповым в его радиотелеграфном приемнике в 1900 году.

Двадцатые и тридцатые годы характерны развитием теории твердого тела и квантовой механики, что позволило объяснить свойства элементарных частиц полупроводников и диэлектриков.

Особенно широкое применение полупроводниковые приборы получили за последние 15 лет. Важную роль для развития отечественной и мировой науки сыграли работы русских и советских ученых А. Ф. Иоффе, Д. Н. Насле-

дова, Б. М. Вула, А. В. Ржанова, В. Е. Лашкарева, А. В. Красилова, Я. А. Федотова, М. М. Самохвалова, В. А. Стружинского и многих других. В 40—60-х годах XX века были созданы полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы, стабилитроны, туннельные диоды, управляемые диоды и пр.), полностью заменяющие радиолампы.

Полупроводниковые приборы значительно превосходят электровакуумные по механической прочности, надежности и долговечности.

Испытания полупроводниковых приборов на механическую прочность и срок службы подтвердили их устойчивость к перегрузкам до 3000 g и безотказную работу до 100 тыс. ч, в то время как электровакуумные приборы с трудом выдерживают механические перегрузки 15—50 g и обеспечивают безотказную работу в течение лишь 1—5 тыс. ч.

Использование полупроводниковых приборов позволяет значительно повысить механическую прочность, надежность и долговечность радиоэлектронной аппаратуры.

В настоящее время освоено серийное производство полупроводниковых микросхем. При очень малых размерах микросхема может содержать большое количество элементов (полупроводниковых приборов, резисторов, конденсаторов).

Потребность в полупроводниковых приборах постоянно возрастает. В последние годы все отечественные электронно-вычислительные машины создаются с применением полупроводниковых приборов. Полупроводниковые приборы широко используются в современных электроизмерительных и регулирующих приборах, а также в радиоприемниках и телевизорах.

В связи с возрастающей потребностью в полупроводниковых приборах перед нашей электронной промышленностью стоят задачи постоянного увеличения выпуска полупроводниковых приборов и расширения их ассортимента. При этом необходимо повышать надежность приборов и обеспечивать стабильность их параметров и характеристик.

Измерения параметров полупроводниковых приборов выполняются на различных стадиях их производства и завершают группу технологических операций, характеризую их качество.

Операции измерения и испытания полупроводниковых приборов являются одними из основных в производственном процессе. На них занято около трети общего числа работников полупроводникового производства.

Современное измерительное и испытательное оборудование представляет собой сложные электронные устройства. Работа на таком оборудовании требует от измерителей и испытателей глубоких знаний и производственных навыков. Кроме того, они должны быть знакомы со всем комплексом технологических операций при производстве полупроводниковых приборов. Поэтому в настоящее время в полупроводниковой отрасли очень важное значение приобретает вопрос подготовки квалифицированных кадров измерителей и испытателей полупроводниковых приборов.

Настоящая книга является вторым, переработанным изданием учебного пособия для подготовки измерителей и испытателей полупроводниковых приборов.

Глава I

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОДЕТАЛЯХ

В состав многих электротехнических и радиотехнических изделий входит большое количество радиодеталей и узлов.

Радиодеталь — это изделие, предназначенное для широкого применения в радиотехнической, электронной и другой аппаратуре и изготовленное по ГОСТам или нормам. К радиодеталям относятся резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы, дроссели, полупроводниковые приборы и др.

Узел — это неразъемное или разъемное соединение группы деталей. Узлы, как правило, разрабатывают и изготавливают индивидуально для одного или нескольких сходных по назначению изделий.

§ 1. РЕЗИСТОРЫ

Резисторы широко применяются в электрических схемах управления, автоматики, сигнализации, в бытовой радиоаппаратуре и т. д. С помощью резисторов обеспечиваются соответствующие режимы работы электронных ламп, транзисторов и других элементов электрических схем.

По способу изготовления резисторы классифицируются на проволочные и непроволочные; по конструкции — на переменные и постоянные.

Резисторы характеризуются следующими основными параметрами: величиной сопротивления, мощностью рассеяния, стабильностью,

Мощностью рассеяния принято называть мощность, которая может длительно выделяться на данном резисто-

ре, не нагревая его выше допустимой температуры. Мощность рассеяния определяет нагрузочные способности резистора.

Стабильностью называют постоянство величины сопротивления резистора в диапазоне рабочих температур и во времени.

Постоянные непроволоочные резисторы. Существует много типов и конструкций непроволоочных резисторов. В контрольно-испытательной аппаратуре в основном применяются непроволоочные резисторы, токопроводящим элементом которых служат тонкие углеродистые или металлические пленки, нанесенные на изоляционные основания (обычно фарфоровые трубки). Такую конструкцию имеют резисторы ВС, УЛМ, МЛТ, УЛИ.

В обозначении типа резисторов указываются их конструктивные особенности, механические и другие свойства. Например: УЛМ — углеродистое, лакированное, механически прочное; УЛИ — углеродистое, лакированное, для измерительной аппаратуры.

Промышленностью выпускаются постоянные непроволоочные резисторы величиной от единиц ом до сотен мегом и мощностью рассеяния от долей ватта до десятков и сотен ватт.

Большинство типов резисторов делится по допустимому отклонению их действительной величины от указанной на маркировке на три класса: $\pm 5\%$; $\pm 10\%$; $\pm 20\%$.

Величина сопротивлений резисторов МЛТ, УЛМ и других зависит от температуры. Так, например, в диапазоне температур от $+25$ до -60°C величина сопротивления МЛТ изменяется на $\pm 1,2 \cdot 10^{-3}\%$ на 1°C .

Переменные непроволоочные резисторы. Применяются в качестве элементов регулирования и настройки. В аппаратуре в основном используются переменные непроволоочные резисторы СП и СПО. Токопроводящим элементом переменных резисторов является тонкий слой графита, нанесенный на гетинаксовое основание. Токопроводящим элементом резисторов СПО служит цилиндр, изготовленный из графита с наполнителем.

Величина сопротивления резистора зависит от угла поворота оси с подвижным контактом, скользящим по поверхности проводящего слоя. Различают переменные непроволоочные резисторы с линейной, логарифмической и показательной зависимостями величины сопротивления от угла поворота оси.

Обозначения резисторов расшифровываются так: СП — резистор непроволочный, переменный; СПО — резистор непроволочный, переменный, объемный. Различные типы непроволочных резисторов приведены на рис. 1.

Постоянные проволочные резисторы. Токопроводящим элементом проволочных резисторов является проволока из специальных сплавов с высоким удельным сопротивлением

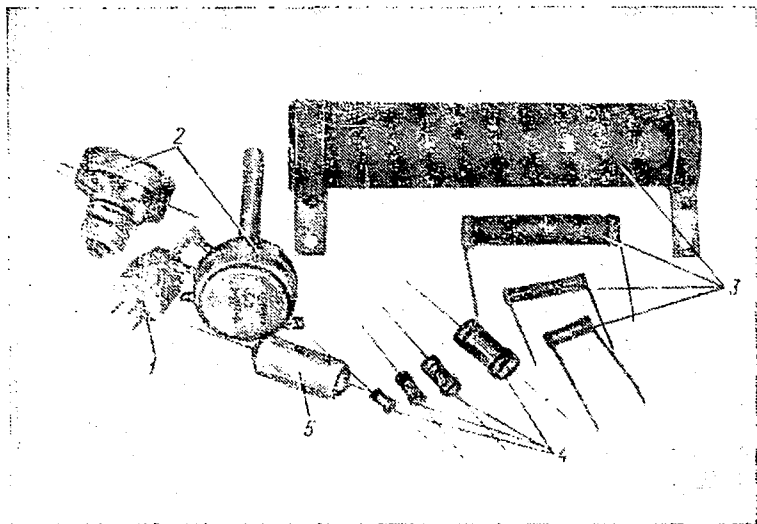


Рис. 1. Непроволочные резисторы:

1 и 2 — переменные резисторы СП-11 и СПО-0,5, 3 — постоянные резисторы ВС различной мощности, 4 — постоянные резисторы МЛТ различной мощности, 5 — пленочный высокоомный резистор МГП

тивлением (нихрома, манганина). Проволока наматывается на различные по форме основания из изолирующего материала и защищается стекломассой, эпоксидной смолой и другими изолирующими материалами.

К постоянным проволочным резисторам общего назначения относятся резисторы ПЭ, ПЭВ и ПЭВР (проволочное, эмалированное, влагостойкое, регулируемое).

В специальной аппаратуре, где к величине сопротивления резистора предъявляются повышенные требования точности и стабильности, применяют прецизионные (высокоточные) постоянные проволочные резисторы. Эти ре-

зисторы изготовляют из микропровода толщиной 30 мкм; они имеют стабильность 0,5—0,003%.

Переменные проволочные резисторы. Применяются в регулировочных цепях радио-и телевизионной аппаратуры, в цепях настройки измерительной аппаратуры, в устройствах автоматики и пр.

Переменный резистор представляет собой каркас из керамики, гетинакса или пластика, на который наматывается провод высокого удельного сопротивления. При-

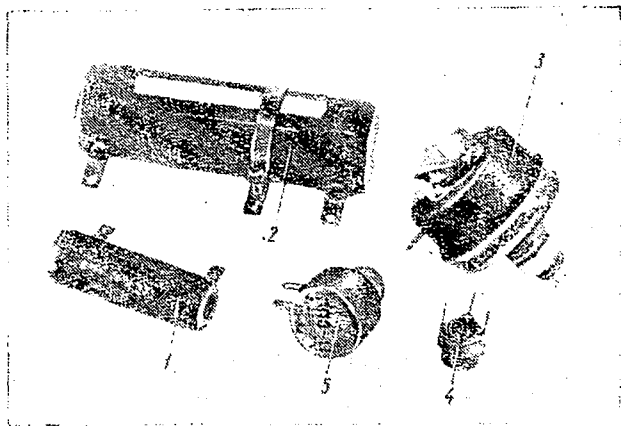


Рис. 2. Проволочные резисторы:

1 — постоянный резистор ПЭВ, 2 — регулируемый резистор ПЭВР, 3 и 5 — переменные резисторы РП-25, ППЗ, 4 — малогабаритный переменный резистор СП5-2

мерами резисторов общего назначения могут служить резисторы РП-25 (резистор проволочный переменный мощностью рассеяния 25 Вт) и ППЗ (проволочный переменный мощностью рассеяния 3 Вт). Различные типы проволочных резисторов приведены на рис. 2.

Одной из разновидностей проволочных переменных резисторов является реостат. Реостаты в основном применяются в лабораторных электротехнических и радиотехнических устройствах и установках. Сопротивление реостатов составляет от десятых долей ома до нескольких сотен ом и мощность рассеяния от десятков ватт до нескольких сотен киловатт. Конструктивно реостат представляет собой каркас, на который наматывается провод с высоким удельным сопротивлением (нихром, константан, манганин и др.). Начало и конец обмотки, а также

проводник от подвижного контакта выводятся на клеммы реостата.

Маркировку наносят на корпус резистора. При этом указывают товарный знак завода-изготовителя, тип резистора, мощность рассеяния, величину сопротивления, допустимое отклонение действительной величины сопротивления от номинальной, месяц и год выпуска. Например, ВРЗ-МЛТ 2 51 кОм 10% VII 68 означает: название завода-изготовителя, сопротивление МЛТ, мощность рассеяния 2 Вт, величина сопротивления 51 кОм, отклонение от номинала $\pm 10\%$, дата выпуска — июль 1968 года.

Состояние резисторов проверяют внешним осмотром. Корпус и выводы резисторов не должны иметь царапин, надломов и других повреждений токоведущих частей. Маркировка должна быть четкой.

Величину сопротивлений резисторов проверяют омметрами различных типов.

§ 2. КОНДЕНСАТОРЫ

Конденсаторы применяются в измерительных схемах для разделения переменной и постоянной составляющих напряжения, для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения, в резонансных контурах, в схемах автоколебательных генераторов, в формирующих цепях и пр.

По области применения различают конденсаторы контурные, разделительные, блокировочные, фильтровые; по виду диэлектрика — слюдяные, стеклянные, керамические, бумажные, электролитические; по конструктивному выполнению — трубчатые, дисковые, опрессованные, герметизированные и пр. Кроме того, конденсаторы делятся на конденсаторы постоянной и переменной емкости.

Независимо от вида конденсаторы характеризуются следующими параметрами: величиной емкости, рабочим напряжением, стабильностью.

Рабочим напряжением конденсатора называют такое напряжение на его выводах, при котором конденсатор может работать неограниченно долго. Напряжение, прикладываемое к выводам конденсатора, не должно превосходить его рабочего напряжения.

Конденсаторы постоянной емкости. Большинство типов конденсаторов постоянной емкости выпускается с допустимым отклонением величины емкости от номинала $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ (I, II и III классы). У некоторых

конденсаторов допустимое отклонение величины емкости от номинальной $\pm 50\%$.

С л ю д я н ы е конденсаторы имеют в качестве диэлектрика между обкладками слюду высшего сорта и конструктивно оформляются: в пластмассовом опрессованном корпусе — КСО, в герметизированном металлическом или керамическом корпусе — КСГ и СГМ.

Номинальная емкость конденсаторов КСО от 51 до 30 000 пФ, рабочее напряжение 250—2500 В. Конденсаторы КСГ имеют номинальную емкость от 470 пФ до 0,1 мкФ и рабочее напряжение до 1000 В.

Номинальная емкость конденсаторов СГМ от 100 до 10 000 пФ, рабочее напряжение — до 1 500 В. Слюдяные конденсаторы делятся на классы 0; I; II; III соответственно с допусками $\pm 2\%$; $\pm 5\%$; $\pm 10\%$; $\pm 20\%$.

С т е к л я н н ы е конденсаторы К-21 имеют диэлектрик из специального стекла и прямоугольную форму. Стеклняные конденсаторы конструктивно выполняются с выводами и без выводов. Они выпускаются с рабочим напряжением до 250 В и емкостью от 9,1 до 5600 пФ. Стеклняные конденсаторы обладают малыми утечками и применяются для работы в цепях постоянного, переменного и импульсного тока.

К е р а м и ч е с к и е конденсаторы изготавливаются на основе специальной конденсаторной керамики. Они имеют трубчатую и дисковую формы: КТК — конденсатор трубчатый керамический и КДК — конденсатор дисковый керамический. Обкладками конденсатора являются два слоя серебра, нанесенных методом вжигания на поверхности керамического основания (диска, трубки). Номинальная емкость конденсаторов КТК и КДК от 1 до 33000 пФ, рабочее напряжение — до 500 В.

Б у м а ж н ы е конденсаторы имеют в качестве диэлектрика специальную конденсаторную бумагу, а их обкладки выполнены из тонкой алюминиевой фольги. Наиболее широко распространены бумажные конденсаторы: КБГ-И и КБГ-МП — конденсаторы с бумажным диэлектриком герметические (различаются оформлением); БГМ — конденсатор бумажный герметизированный малогабаритный; БМ — конденсатор бумажный малогабаритный. Бумажные конденсаторы имеют цилиндрическую форму.

Номинальная емкость бумажных конденсаторов от 510 пФ до 0,25 мкФ, рабочее напряжение — до 600 В.

Разновидностью бумажных конденсаторов являются металло-бумажные конденсаторы, обкладки которых в отличие от обкладок бумажных конденсаторов выполнены в виде тонкой металлической пленки. Пленка в несколько сотых долей микрона (0,01—0,05 мкм) наносится на диэлектрик в вакуумной камере. Благодаря компактности металлических обкладок металло-бумажные конденсаторы имеют меньшие объем и массу на единицу емкости по сравнению с бумажными конденсаторами. В измерительной аппаратуре применяются конденсаторы: МБГО — конденсатор металло-бумажный герметизированный однослойный; МБМ — конденсатор металло-бумажный малогабаритный.

Номинальная емкость металло-бумажных конденсаторов 0,0051 — 30 мкФ, рабочее напряжение — до 1500 В.

Электролитические конденсаторы имеют цилиндрическую форму и диэлектрик в виде оксидной пленки, образованной на алюминиевой фольге, служащей анодной (плюсовой) обкладкой конденсатора, роль катодной обкладки играет электролит, соприкасающийся с оксидной пленкой. Оксидная пленка имеет толщину 0,01—1,5 мкм и обладает односторонней проводимостью, что позволяет использовать эти конденсаторы только в цепях постоянного или пульсирующего тока. Электролитические конденсаторы применяются в основном в сглаживающих и развязывающих фильтрах. В измерительной аппаратуре обычно используют конденсаторы: КЭ — конденсатор электролитический; ЭГЦ — конденсатор электролитический герметизированный цилиндрический; ЭМ — конденсатор электролитический малогабаритный, К-50 — конденсатор электролитический.

Номинальная емкость электролитических конденсаторов 0,5—4000 мкФ, рабочее напряжение — 6—500 В.

На рис. 3 приведены различные типы конденсаторов постоянной емкости.

Конденсаторы переменной емкости. Применяются для подстройки или перестройки резонансных контуров, изменения частоты колебаний автогенераторов и пр. Переменные и подстроечные (полупеременные) конденсаторы изготавливаются с воздушным диэлектриком (воздушным зазором) или твердым диэлектриком (керамикой, слюдой). Подстроечные конденсаторы КПК и переменные конденсаторы с воздушным диэлектриком показаны на рис. 4.

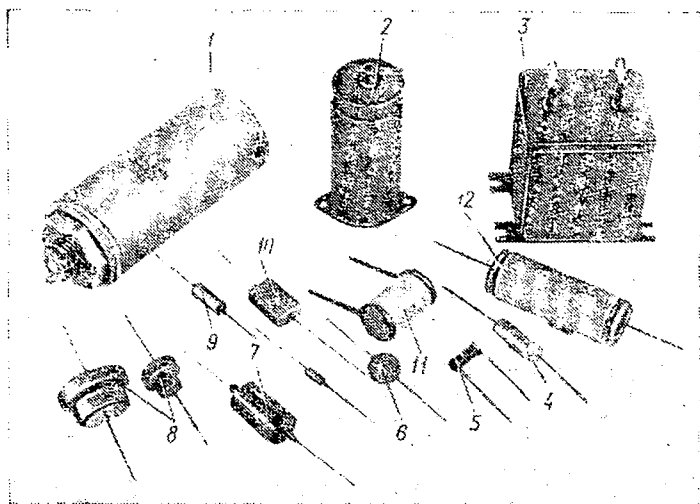


Рис. 3. Конденсаторы постоянной емкости:

1 и 2 — электролитические конденсаторы КЭ-2 и ЭГЦ К-50, 3, 4 и 12 — металло-бумажные конденсаторы МБГО и МБМ, 5 и 6 — керамические конденсаторы КТ и КД, 7, 9 и 11 — бумажные конденсаторы БГМ, КБГ-И и БМ, 8 — танталовые электролитические конденсаторы ЭТО-I и ЭТО-II, 10 — слюдяной конденсатор КСО

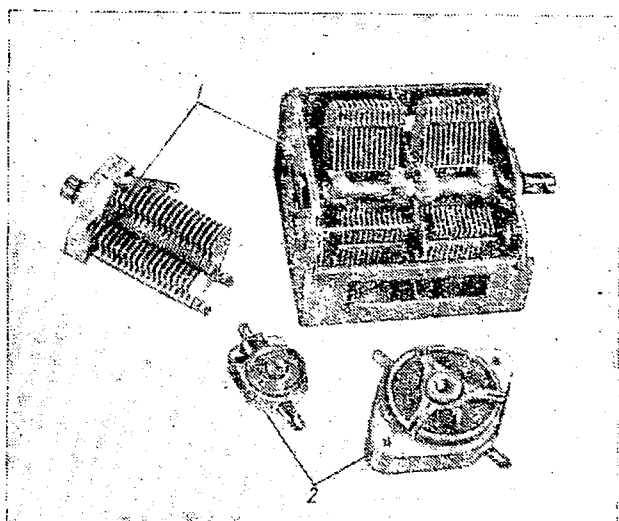


Рис. 4. Конденсаторы переменной емкости:

1 — переменный конденсатор с воздушным диэлектриком, 2 — полупеременные конденсаторы КПК-1, КПК-3

Маркировку наносят на корпус конденсатора, указывая товарный знак завода-изготовителя, тип конденсатора, величину емкости, рабочее напряжение, допустимое отклонение емкости от номинальной величины, месяц и год выпуска конденсатора. Например, МБМ 0,25 мкФ $\pm 20\%$ 500 В III 67 означает: конденсатор МБМ, допустимое отклонение емкости от номинальной величины $\pm 20\%$, рабочее напряжение 500 В, дата изготовления — март 1967 года.

Исключение составляют малогабаритные конденсаторы, на корпусе которых указывают только величину емкости. Иногда маркировку производят цветными метками.

Исправность конденсаторов проверяют внешним осмотром. Корпус и выводы конденсатора не должны иметь механических повреждений. Маркировка конденсаторов должна быть четко видна. Величину емкости проверяют различными типами измерителей емкости.

Проверка на отсутствие короткого замыкания внутри конденсатора может быть проведена с помощью омметра.

Подключать конденсатор к электрической цепи следует с учетом его рабочего напряжения. Если напряжение превышает рабочее, может произойти пробой конденсатора.

При работе с электролитическими конденсаторами необходимо соблюдать полярность включения; следует также помнить, что электролитические конденсаторы не могут работать в цепях переменного тока.

§ 3. КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

В аппаратуре катушки индуктивности применяются в контурах высокой и промежуточной частоты в качестве элементов связи, дросселей высокой частоты и пр. Большое разнообразие высокочастотных цепей аппаратуры и зависимость их параметров от конструкций катушек высокой частоты (ВЧ) требуют разработки и изготовления катушек ВЧ для каждого конкретного устройства. Это делает невозможным выпуск катушек ВЧ по ГОСТам и нормам как резисторов и конденсаторов.

Катушки ВЧ имеют однослойную или многослойную намотку. Многослойную намотку разделяют на простую и универсальную. Универсальная намотка сложна в изготовлении, но катушки с такой намоткой обладают ми-

нимальной собственной емкостью и повышенной механической прочностью обмоток. Однослойные высокочастотные катушки наматывают изолированным эмалированным проводом ПЭ или ПЭЛ, многослойные — изолированным эмалированным проводом в шелковой изоляции ПЭЛШО или ПЭШД.

На рис. 5 приведены высокочастотные катушки индуктивности с разными типами намоток.

Нежелательные связи, нарушающие нормальную работу высокочастотных катушек индуктивности, устраня-

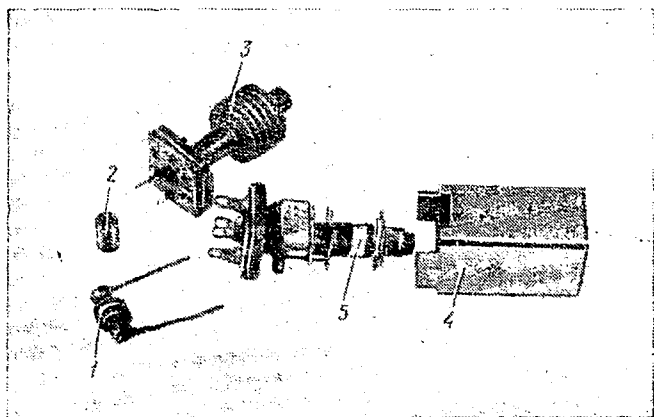


Рис. 5. Катушки индуктивности:

- 1 — дроссель высокой частоты с простой намоткой, 2 — подстроечный сердечник, 3 — катушка с универсальной намоткой, 4 — металлический экран, 5 — катушка с однослойной намоткой (без экрана)

ют экранированием (размещением катушки внутри замкнутого металлического экрана).

Для повышения индуктивности катушек высокой частоты без увеличения их размеров используют сердечники из материалов, называемых ферромагнетиками. Применение сердечников, кроме того, позволяет изменять индуктивность катушки, что необходимо при настройке аппаратуры.

Магнитные свойства материала определяются его относительной магнитной проницаемостью μ . Относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков в сотни и тысячи раз больше проницаемости вакуума, принятой за

единицу, а чем больше относительная магнитная проницаемость материала, тем больше индукция B в нем при одной и той же напряженности магнитного поля H :

$$B = \mu\mu_0 H,$$

где μ_0 — магнитная постоянная, характеризующая абсолютную магнитную проницаемость вакуума.

Из формулы видно, что с введением сердечника из ферромагнитного материала индуктивность катушки возрастает.

Следует отметить, что относительная магнитная проницаемость ферромагнитных материалов непостоянна: она зависит от величины намагничивающегося поля, температуры и явления гистерезиса, возникающего при перемагничивании ферромагнетика, когда он находится в переменном магнитном поле. Различные ферромагнитные материалы по-разному меняют свои свойства под воздействием переменного магнитного поля той или иной частоты. Поэтому при выборе ферромагнитного материала для сердечника катушки учитывают диапазон частот, в котором катушка будет работать.

§ 4. ТРАНСФОРМАТОРЫ И ДРОССЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Трансформаторы широко применяются в низкочастотной аппаратуре в качестве входных, разделительных и выходных согласующих элементов, в импульсных устройствах, в источниках питания и т. д. По области применения трансформаторы можно разделить на силовые, междукаскадные, выходные — для усилителей низкой частоты и импульсные.

Дроссели в основном предназначены для фильтров выпрямителей, заградительных элементов от импульсных и высокочастотных помех в цепях питания.

Трансформаторы и дроссели состоят из магнитопровода и катушки, на каркасе которой расположены обмотки. Трансформаторы и дроссели характеризуются коэффициентом трансформации (для трансформатора), величиной индуктивности и омическим сопротивлением обмоток, рабочим напряжением, электрической прочностью изоляции, собственной емкостью.

Рабочим напряжением называют напряжение на обмотках трансформатора, при котором он может работать неограниченно долго. Превышение рабочего напряжения

приводит к тому, что ток в обмотках становится больше номинального. Это вызывает перегрев обмоток, ухудшение изоляции проводов и, как следствие, межвитковое замыкание, что делает невозможной эксплуатацию трансформатора.

Электрической прочностью изоляции называют способность испытываемого изделия бесконечно долго выдерживать напряжение не разрушаясь. Электрическую прочность изоляции проверяют приложением испытательного напряжения между соседними изолированными друг от друга токоведущими цепями и между цепями и корпусом трансформатора.

Большинство дросселей и трансформаторов изготавливается по ГОСТам и нормальям. Эти трансформаторы и дроссели имеют достаточно широкую номенклатуру, что позволяет разрабатывать и изготавливать радиоэлектронную аппаратуру различного назначения.

§ 5. ГОСТЫ, КАТАЛОГИ И СПРАВОЧНИКИ

В настоящее время многие радиодетали (электровакуумные и полупроводниковые приборы, выключатели, провода, кабели, стрелочные приборы, реле, конденсаторы, резисторы и пр.) выпускаются в соответствии с Государственными общесоюзными стандартами (ГОСТами) и нормальями. Нормалью называют технический документ на изготовление, приемку и эксплуатацию изделий, применяемых в одной или нескольких отраслях промышленности. Например, все корпуса маломощных транзисторов нормализованы (применяется единая конструкция) и изготавливаются по нормальям. По ГОСТу такие изделия не изготавливают, так как они применимы только в электронной промышленности и используются лишь в производстве транзисторов. Применяемые в Советском Союзе ГОСТы сводятся в официальное издание — Указатель государственных стандартов, в котором указываются номер и краткое содержание ГОСТа.

В ГОСТе (или нормали) приведены все технические требования на изготовление, приемку и эксплуатацию изделия. Одинаковые изделия, выпускаемые разными предприятиями, должны иметь одни и те же технические характеристики. Это правило распространяется на все изделия, изготавливаемые в соответствии с ГОСТами.

Выпуск изделий по ГОСТу позволяет решать проблемы унификации и стандартизации в общесоюзном масштабе, что в свою очередь обеспечивает создание электронной аппаратуры на серийно выпускаемых элементах. Эта аппаратура более надежна, технологична и удобна в эксплуатации. Стоимость изготовления такой аппаратуры значительно ниже стоимости изготовления аналогичной аппаратуры на нестандартных элементах.

При разработке, наладке и эксплуатации аппаратуры вместо подробных технических данных на изделие, указываемых в ГОСТе, необходимы краткие технические характеристики: ток накала, ток сетки, ток коллектора (но не методы измерения величины тока накала при производстве электровакуумных ламп), габариты, данные о надежности и пр.

Издания, в которых содержатся краткие технические характеристики изделий, называют каталогами. Каталоги на отдельные элементы, детали и узлы объединяются в сводный каталог. К основным официальным сводным каталогам на изделия, применяемые в электронной промышленности, следует отнести: каталог радиоэлектронной аппаратуры (РЭА); каталог электротехнического оборудования (КЭО); каталог «Приборы и средства автоматизации». Официальным изданием являются также справочники Министерства электронной промышленности.

В эти издания специальной службой информации систематически вносятся сведения о новых серийно выпускаемых изделиях и исключаются сведения об изделиях, снятых с производства.

В каждом каталоге имеется сводный перечень входящих в него изделий. При отыскании сведений о каком-либо изделии находят его в перечне входящих изделий. В этом перечне для каждого узла и элемента указывается номер тома каталога и номер подкаталога, где они находятся. Некоторые каталоги разбивают на разделы, книги, серии. Например, для каталога КЭО серия 07 включает в себя аппараты низкого напряжения.

Нашей печатью выпускается много неофициальных справочников, например справочники по электровакуумным и полупроводниковым приборам, конденсаторам, резисторам и др. В них данные о выпускаемых элементах не обновляются и поэтому со временем теряют свою ценность. Сведения, приводимые в неофициальных справоч-

никах, при проектировании электрической аппаратуры могут быть использованы как дополнительный материал.

Контрольные вопросы

1. Какие параметры характеризуют резисторы?
2. Перечислите основные типы резисторов.
3. Перечислите основные типы конденсаторов.
4. Укажите, как маркируются резисторы и конденсаторы.
5. Укажите область применения трансформаторов и дросселей.
6. Что такое ГОСТ и нормаль на изделие?
7. Укажите роль ГОСТов и нормалей при проектировании и эксплуатации контрольно-измерительного оборудования.

ИЗМЕРЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**§ 6. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

Измерение — это сравнение измеряемой величины с некоторой другой величиной, условно принятой за единицу.

Для силы тока такой единицей является ампер, для напряжения — вольт, для сопротивления — ом и т. д. Существует несколько систем единиц (CGSM, CGSE, MKSA и пр.). С 1 января 1973 года введен новый ГОСТ — «Международная система единиц», сокращенно СИ.

Результат измерения выражают числом, показывающим отношение измеряемой величины к единице измерения. Сравнение измеряемой величины с единицей измерения производят с помощью измерительных приборов и мер. Последние градуируют и поверяют по образцовым мерам (образцовые катушки индуктивности, резисторы, конденсаторы) или по образцовым измерительным приборам.

Образцовые меры и измерительные приборы в свою очередь поверяют по эталонам, т. е. по образцовым мерам, выполненным с наивысшей точностью, которую обеспечивает современный уровень измерительной техники.

При измерении величины применяют различные методы измерений.

Прямыми методами считают такие методы, при которых измеряемая величина непосредственно сравнивается с величиной того же рода. Прямые методы делятся на методы непосредственной оценки и методы сравнения.

Метод непосредственной оценки заключается в непосредственном определении измеряемой величины по показанию измерительного прибора, проградуированного в значениях измеряемой величины. Например, измерение тока — амперметром, напряжения — вольтметром и т. д.

Метод сравнения заключается в сравнении измеряемой величины с мерой этой величины. Например, измерение емкости путем сравнения с эталонной емкостью.

Косвенными методами измерений являются такие методы, при которых измеряемая величина не из-

меряется непосредственно по прибору, а определяется через измеряемые величины. Например, таким методом можно измерить температуру с помощью термопары. При этом измеряется термо-э. д. с., а по ней с помощью специальных таблиц определяется искомая температура.

Наиболее прост и наименее трудоемок прямой метод измерения с непосредственной оценкой. Благодаря этим качествам этот метод наиболее распространен в промышленном производстве.

§ 7. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

По способу получения отсчета измерительные приборы можно разделить на приборы с непосредственным отсчетом, с управляемым отсчетом и самопишущие.

При непосредственном отсчете прибор дает показания на своем измерительном механизме или отсчетном устройстве без воздействия на его измерительный механизм или отсчетное устройство (амперметр, вольтметр, омметр и др.).

При управляемом отсчете показания прибора можно получить только при воздействии на его измерительный механизм или отсчетное устройство (измерительный мост и др.).

Самопишущий прибор отличается тем, что он записывает свои показания за заданный интервал времени или непрерывно на специальной ленте.

По методу отсчета измеряемой величины приборы делятся на показывающие и интегрирующие.

Показывающий прибор дает значение измеряемой величины конкретно для данного момента измерений (амперметр, вольтметр, омметр, ваттметр и т. д.).

Интегрирующий прибор дает суммарное значение измеряемой величины за определенный интеграл времени (счетчик электрической энергии).

При производстве полупроводниковых приборов преимущественно пользуются устройствами, объединяющими группу измерительных приборов, приспособлений, функционально связанных между собой измерительной схемой. Такое устройство принято называть измерительной установкой.

§ 8. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В измерительных и испытательных устройствах и установках, применяемых в полупроводниковом производстве, производятся измерения различных электрических величин: силы тока, напряжения, сопротивления, емкости и др.

В полупроводниковом производстве наиболее распространенными являются приборы, измеряющие силу тока и напряжение. С помощью измерительных схем по значению измеренного тока или напряжения или того и другого вместе получают значение других электрических величин, например сопротивления, емкости, добротности.

Для измерения силы тока применяют амперметры, миллиамперметры, реже микроамперметры. Для измерений на постоянном токе чаще всего применяют приборы магнитоэлектрической системы; на переменном токе — приборы детекторной и электромагнитной систем.

Измерение напряжений производят вольтметрами, реже милливольтметрами, а также приборами магнитоэлектрической, детекторной и электромагнитной систем.

Класс точности применяемых приборов достаточно высок: не ниже 2,5, а при некоторых измерениях — 0,2. Приборы могут быть щитовыми и настольными в зависимости от конструктивного решения той или иной измерительной установки. Для измерения в цепях с высоким сопротивлением на постоянном и переменном токе в широком диапазоне частот применяются ламповые (или катодные) вольтметры и милливольтметры. Ламповый вольтметр — это достаточно сложный электронный прибор, в котором происходит усиление электрического сигнала, пропорционального измеряемой величине, детектирование и регистрация с помощью микроамперметра, включенного в мостовую схему. Ламповый вольтметр обладает очень большим входным сопротивлением (порядка 10—20 МОм) и очень малой входной емкостью (несколько пикофард). Эти два качества позволяют применять их в высокоомных цепях и на больших частотах (до 1000 МГц).

Ламповые вольтметры имеют сравнительно большую погрешность — от 1 до 5%. С этим обстоятельством приходится считаться при разработке измерительной аппаратуры.

Для наблюдения вольт-амперных характеристик по-

лупроводниковых приборов, а также для измерения некоторых параметров, например времени включения и выключения, применяют электродные осциллографы.

На экране электронного осциллографа можно наблюдать (и сфотографировать с него) электрические процессы, происходящие в измеряемом полупроводниковом приборе.

Перемещение электронного луча, отображающего происходящие электрические процессы, совершается под воздействием на него двух электрических величин — напряжений. Одно из них производит отклонение луча по вертикали (по оси Y), другое — по горизонтали (по оси X). Так, для получения на экране осциллографа формы напряжения в исследуемой цепи надо подать это напряжение на клемму Y осциллографа, а перемещение луча по оси X задать как функцию времени, поскольку исследуемая величина (напряжение) изменяется во времени. Перемещение луча по оси X обеспечивается внутренней системой развертки осциллографа.

С помощью осциллографа можно не только наблюдать, но и измерять исследуемые величины. Для этого на экране имеются деления по обеим осям, а с помощью соответствующих переключателей можно задавать различную цену делений. Осциллографы, применяемые в полупроводниковом производстве, позволяют измерять напряжения от десятков милливольт до нескольких сотен вольт с частотой до нескольких мегагерц.

§ 9. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Технологический процесс производства полупроводниковых приборов требует различных климатических условий: высокой или низкой температуры, определенной влажности. Эти параметры необходимо контролировать или поддерживать постоянными с заданной степенью точности. В зависимости от конкретной технологической операции бывает необходимо измерять температуру твердого тела, воздуха или другой газовой среды, в том числе и агрессивной.

Для измерения температуры применяется большое количество различных терморегулирующих и терморегистрирующих приборов. При этом используются неэлектрические и электрические методы измерения.

Для измерения температуры неэлектрическими методами применяют термометры расширения. Самое широкое распространение в промышленности получили *жидкостно-стеклянные* термометры, отличающиеся простотой, надежностью и дешевизной.

Существуют две разновидности жидкостно-стеклянных термометров: с органическими жидкостями (спиртом, толуолом и т. д.) и ртутные. Первые применяются для измерения низких температур (до -200°C), вторые — для измерения температур от -25 до $+500^{\circ}\text{C}$.

По назначению термометры разделяются на лабораторные и технические. Лабораторные термометры при измерениях необходимо погружать в тело или объем, температуру которого надо измерить, полностью, а у технических — только резервуар с рабочей жидкостью.

Показания термометра определяют по нижней части мениска жидкости. К показаниям лабораторных термометров вводят поправки, которые указываются в поверочном свидетельстве на данный термометр.

Для удобства пользования нижняя часть термометра может быть прямой и изогнутой.

Существуют термометры, в которых установлены металлические контакты. Такие приборы называются *контактными термометрами* или *термосигнализаторами*. Их применяют в промышленной аппаратуре для сигнализации и регулирования температуры.

Контактные термометры бывают двух модификаций: с постоянно впаянными контактами и магнитной перестановкой контакта.

В приборах первой модификации контакты впаяны в капиллярную трубку и к ним припаяны два медных проводника (рис. 6, а). Замыкание контактов происходит в тот момент, когда ртутный столбик электрически соединяет контакты.

Контактный термометр второй модификации снабжен двумя шкалами — верхней и нижней (рис. 6, б). Верхняя шкала служит для установки контакта на заданное значение температуры, нижняя — для измерения температуры.

В качестве подвижного контакта 1 используется тонкая вольфрамовая проволока, расположенная внутри капиллярной трубки 3. Контакт перемещается при помощи передвигающейся по винту овальной гайки 2, заключенной в трубку 3 овального сечения. Вращение винта

производится постоянным магнитом 4, установленным в верхней части прибора. Неподвижный контакт 5 впаиван в трубку 3. Замыкание контактов 1 и 5 происходит при повышении столбика ртути, когда он соединит эти контакты друг с другом.

Жидкостно-стеклянные термометры выпускаются с различными пределами измерения и с разной длиной капиллярной трубки (следовательно, с разной ценой деления).

К термометрам расширения кроме жидкостных и ртутных относятся также манометрические. Эти термометры предназначены для дистанционного измерения и сигнализации температуры жидкостной или газовой среды. Действие их основано на свойстве газа (азота) или насыщенных паров жидкости, заключенных в замкнутый объем, изменять свое давление в зависимости от температуры. Таким замкнутым объемом являются термобаллон, капилляр и многовитковая трубчатая пружина, герметично соединенные друг с другом и заполненные газом или насыщенными парами под некоторым начальным давлением.

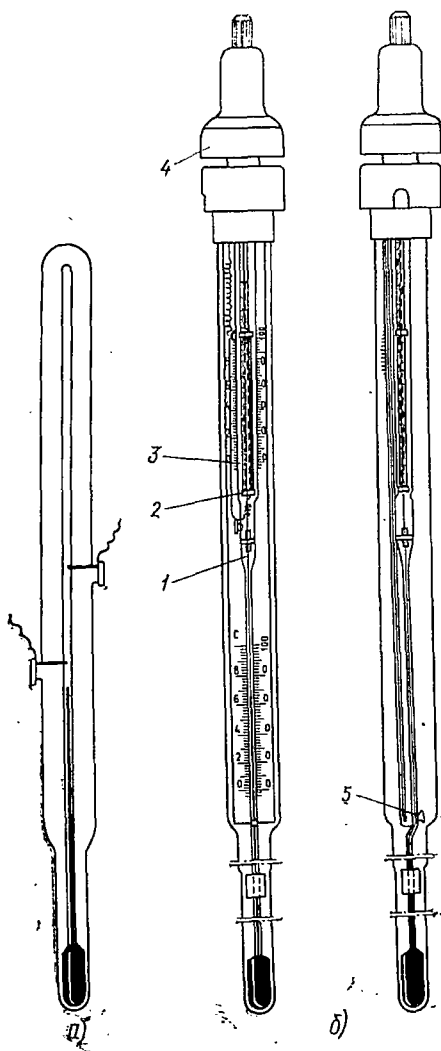


Рис. 6. Контактные термометры:

а — с постоянно впаянными контактами,
 б — с магнитной перестановкой контакта;
 1 — подвижный контакт, 2 — овальная гайка,
 3 — трубка, 4 — постоянный магнит,
 5 — неподвижный контакт

При нагревании термобаллона давление в замкнутом объеме повышается, в результате чего трубчатая пружина раскручивается и приводит в движение передаточный механизм стрелки прибора.

Манометрический термометр может быть и регулирующим. В этом случае он снабжается сигнальным устройством в виде подвижных контактов, которые могут быть установлены на любое деление шкалы. Таких контактов обычно два. Они независимы друг от друга. Пределы измерения — до 400° С.

§ 10. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Измерение температуры (как и других неэлектрических величин) можно производить электрическими методами. Для этого используют специальные преобразователи — *первичные* приборы. Эти приборы преобразуют неэлектрические параметры в электрические, которые затем измеряются с помощью электроизмерительных приборов, называемых *вторичными*.

Первичные приборы. К первичным приборам относятся термометры сопротивления и термопары.

Термометры сопротивления. Сопротивление проводника, как известно, зависит от температуры. При установившемся тепловом равновесии между проводником и окружающей средой температура проводника, а следовательно, и его сопротивление зависят как от силы тока в проводнике, так и от причин, влияющих на отдачу тепла в окружающую среду. К этим причинам кроме свойств самого проводника относятся температура окружающей среды, ее плотность и скорость движения.

Приборы, использующие зависимость сопротивления проводника от температуры, называют термометрами сопротивления. Они применяются для измерения температур до 500° С.

Термометры сопротивления изготавливаются из материалов с большим температурным коэффициентом сопротивления (медь, платина). Температурный коэффициент сопротивления меди $0,00428 \frac{1}{\text{град}}$.

Конструктивно термометр сопротивления выполняется в виде металлического цилиндра, штуцера для крепления термометра и алюминиевой головки. Внутри ци-

линдра помещен чувствительный элемент — тонкая медная или платиновая проволока очень большой длины (отношение диаметра к длине порядка 1 : 500).

Для измерения температуры термометром сопротивления применяют главным образом мостовые схемы. На рис. 7 показана схема моста, в одно из плеч которого включен термометр сопротивления R_T . Изменение величины этого сопротивления вызывает разбаланс моста, появление разности потенциалов между точками A и B и прохождение тока через рамки r измерительного прибора. Чем больше разбаланс, тем сильнее отклонится стрелка прибора.

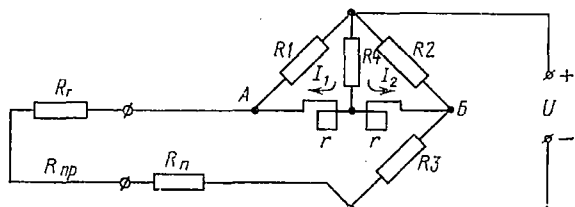


Рис. 7. Схема подключения термометра сопротивления к измерительному прибору (логометру):

R_T — термометр сопротивления, r — рамки логометра, R_1 , R_2 , R_3 , R_4 — резисторы, R_{np} — сопротивление проводов соединительной линии, R_n — сопротивление подгоночной катушки

Термопары. Для измерения температур до 1800°C в качестве преобразователей тепловой энергии в электрическую служат термопары. В этих приборах используется явление термоэлектрического эффекта, или эффекта Пельтье.

Теория термоэлектрического эффекта хорошо изучена и освещена в специальной литературе*. Здесь укажем только, что термопара образуется из двух проводников с разной проводимостью.

Термопара представляет собой два проводника A и B (на рис. 8 дано принятое условное обозначение термопары), спаянных в точке B . Если спай нагревать, то между точками Γ и Δ возникнет термоэлектродвижу-

* А. П. Гордов. Методы измерения температур в промышленности. М., Metallurgizdat, 1952.

шая сила (термо-э. д. с.), величина которой будет зависеть от разности температур между точкой *B* и точками *Г* и *Д* и иметь значения в пределах от нескольких милливольт до нескольких десятков милливольт.

Точку спая *B* принято называть рабочим концом термопары, а точки *Г* и *Д* — свободными концами.

При измерениях рабочий конец термопары погружают в тело или объем, температуру которого надо измерить, а свободные концы следует выдерживать при температуре 0°C , но практически температура свободных концов (температура окружающего воздуха) бывает выше нуля, поэтому в показания прибора вводят поправку.

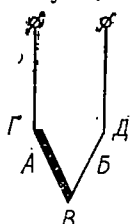


Рис. 8.

Термопара:

A и *B* — проводники из разнородных металлов, *B* — точка спая, *Г* и *Д* — свободные концы

Делается это следующим образом. С помощью специальной градуировочной таблицы находят термо-э. д. с., соответствующую температуре свободных концов для данного типа термопары. По той же таблице переводят показания прибора в термо-э. д. с., развиваемую термопарой. Полученные два значения складывают и по суммарной величине (опять с помощью таблицы) находят действительное значение температуры в точке измерения. Такой сравнительно сложный способ определения температур необходим потому, что зависимость э. д. с. от температуры нелинейна, т. е. рост э. д. с. непропорционален росту температуры.

Термопары изготовляют из следующих пар материалов: медь — константан (до 300°C), хромель — копель (до 600°C), железо — копель (до 800°C), хромель — алюминий (до 1300°C), платина — платинородий (до 1600°C).

Вторичные приборы. В измерительной технике полупроводникового производства в качестве вторичных приборов наиболее широко используются логометры, милливольтметры и автоматические потенциометры.

Логометры. Магнитоэлектрический логометр — это прибор, измеряющий отношение двух электрических величин: токов или напряжений, а не абсолютные значения величин. Принцип действия логометра основан на взаимодействии поля постоянного магнита и магнитных полей, вызванных токами, протекающими в двух рамках подвижной системы. Датчиком температуры для логометра является термометр сопротивления.

Схема логометра с термометром сопротивления ясна

из рис. 7. Две рамки прибора (сопротивления r) жестко связаны между собой. Положение рамок относительно поля постоянного магнита, а следовательно, и положение стрелки прибора определяются отношением токов I_1 и I_2 , протекающих через рамки. Отношение токов зависит от сопротивления термометра R_T и сопротивления проводов соединительной линии $R_{пр}$ и не зависит от напряжения V источника питания. Шкала прибора отградуирована в единицах температуры.

В схему входит подгоночная катушка с сопротивлением $R_{п}$, предназначенная для подгонки сопротивления внешней цепи до величины $R_{вн}$, указанной в паспорте прибора.

Логометры применяются для измерения температур от -100 до $+650^\circ\text{C}$. Кроме измерительных (показывающих) логометров существуют логометры регулирующие и регистрирующие (самопишущие).

Показывающий регулирующий логометр ЛР1-02 имеет двухпозиционное регулирующее устройство («меньше нормы» — «норма»). Прибор устроен так, что, когда стрелка доходит до устройства, задающего регулируемую температуру, она перекрывает луч света, падающий на фотосопротивление. В цепь последнего включена катушка электромагнитного реле. При снижении фототока реле отпадает и его контакты размыкаются, отключая исполнительное устройство (нагреватель, промежуточное реле и т. д.). С понижением температуры стрелка начинает возвращаться влево и открывает луч света, падающий на фотосопротивление. Реле снова срабатывает и включает исполнительное устройство.

Регулирующее устройство может быть трехпозиционным: «меньше нормы» — «норма» — «больше нормы». Конструкция регулирующего устройства может быть другой, например кулачковой с механически замыкаемыми контактами.

Регулирующий самопишущий логометр кроме измерительного механизма и регулирующего устройства имеет механизм передвижения бумажной ленты с постоянной скоростью. У этих приборов вместо стрелки установлено специальное перо. Конец пера постоянно смачивается чернилами и перемещается по диаграммной ленте, на которой вдоль направления движения нанесены деления с указанием единиц времени, а в поперечном направлении — значения температуры.

Милливольтметры. Они предназначены для совместной работы с термопарами для измерения, регулирования и записи температуры твердого тела, газовой среды и т. д.

Термопары развивают незначительные по абсолютной величине электродвижущие силы. Поэтому в качестве измерительного прибора применяют чувствительные милливольтметры магнитоэлектрической системы.

На рис. 9 дан внешний вид показывающего регулирующего милливольтметра МР-64—02.

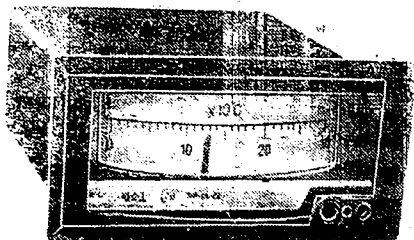


Рис. 9. Милливольтметр МР-64—02

Милливольтметры могут быть снабжены регистрирующим (самопишущим) и электронным регулирующим устройствами. Электронное регулирующее устройство состоит из управляющего контура — генератора высокой частоты, усилителя и электромагнитного реле.

На подвижной части милливольтметра укреплен металлический флажок — экран. При перемещении подвижной части экран входит в зазор между секциями катушки контура или выходит из него, изменяя индуктивность контура. Изменение индуктивности вызывает возникновение или прекращение генерации генератора и, следовательно, увеличение или уменьшение анодного тока на выходе усилителя, в цепь которого включено реле. Якорь реле притягивается или отпускается, замыкая или размыкая контакт.

Регулирующее устройство может быть двух- или трехпозиционным. Во втором случае имеются два управляющих контура, каждый из которых укреплен на своем указателе заданной температуры, двоянный генератор высокой частоты и три реле. Комбинация контактов реле выдает соответствующий выходной сигнал.

Милливольтметры применяются для измерения и регулирования температур от 0 до 1800° С.

Автоматические потенциометры. Они предназначены для промышленных измерений темпера-

туры с повышенной точностью и работают в комплекте с термопарами*.

В потенциометрах используется нулевой метод измерения. Сущность этого метода состоит в уравнивании измеряемой э. д. с. термопары с падением напряжения на сопротивлении, развиваемым посторонним источником тока.

Принципиальная схема потенциометра с термопарой показана на рис. 10. В цепь источника постоянного тока B включен реохорд

(калиброванное сопротивление) l . На концах реохорда (точки A и B) посредством реостата R_p поддерживается строго определенная разность потенциалов. Термопара $ТП$ присоединена так, что термо-э. д. с., развиваемая ею, направлена навстречу э. д. с. источника тока B . Если, смещая точку D скользящего контакта реохорда, подобрать на участке AD разность потенциалов, равную по величине термо-э. д. с., то измерительный механизм $ИМ$ придет в равновесие.

Прибор устроен таким образом, что при наличии несбалансированного напряжения в цепи термопары следящая система автоматически перемещает скользящий контакт вдоль реохорда до такого положения, при котором разность потенциалов между точками A и D будет точно соответствовать термо-э. д. с., развиваемой термопарой. Измерительный механизм $ИМ$ покажет отсутствие тока.

Следящая система приводится в действие электронным усилителем, который усиливает несбалансированное напряжение. Скользящий контакт через передаточный механизм связан со стрелкой либо с подвижной шкалой или же записывающим устройством потенциометра.

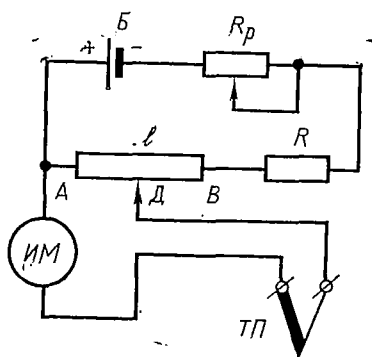


Рис. 10. Схема потенциометра с термопарой:

B — батарея питания, l — реохорд, R_p — переменный резистор

* Автоматические потенциометры могут работать и с радиационными пирометрами — приборами, измеряющими температуру твердых тел на основе использования тепловой радиации.

На рис. 11 дан внешний вид показывающего регулирующего самопишущего потенциометра ЭПР-09. В верхней части прибора расположена горизонтальная шкала, отградуированная в значениях температуры. Вдоль шкалы перемещается стрелка. Под стрелкой укреплено перо, которое движется вместе с ней, касаясь диаграммной ленты, перемещающейся в вертикальном направлении с постоянной скоростью. Класс точности прибора 0,5.

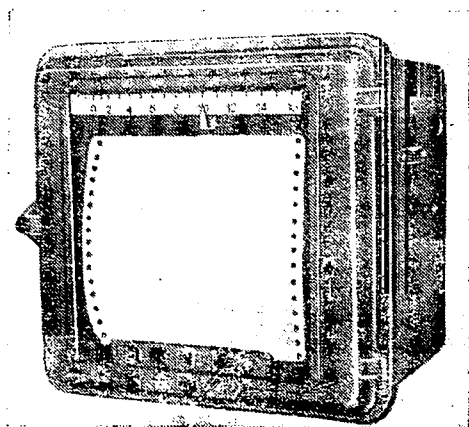


Рис. 11. Потенциометр ЭПР-09

Автоматические потенциометры могут регулировать и записывать температуру сразу в нескольких точках (3, 6, 12 и 24-точечные приборы). В этих случаях к прибору подключают столько термопар, сколько контролируется точек. Автоматическое устройство производит «опрос» каждой из точек в порядке очередности, а регулирующее устройство работает обычным образом.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы измерения температуры?
2. Назовите основные приборы для измерения температуры неэлектрическими методами.
3. Перечислите первичные электрические термоизмерительные приборы и объясните их устройство и принцип действия.
4. Какие приборы используются для измерения температуры в качестве вторичных? Объясните принцип их действия.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

§ 11. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Как элементы схем полупроводниковые приборы выполняют те же функции, что и электронные лампы, но имеют существенные преимущества, к числу которых относятся значительно меньшие габариты и масса, ничтожное потребление энергии, отсутствие накала и связанных с ним недостатков (время прогрева, фон переменного тока и др.), вибростойкость и, главное, большой срок службы и обусловленная им надежность. Благодаря этим преимуществам полупроводниковые приборы широко применяются в современной радиоэлектронике и автоматике. Так, например, на полупроводниковых приборах выпускается большинство современных счетно-решающих машин, многие приемо-передающие комплексы, системы телеметрии и телемеханики, системы управления приводом прокатных станов и др.

Полупроводниковые приборы изготавливаются из полупроводниковых материалов: германия, кремния, арсенида галлия, фосфида галлия, селена и др. Полупроводниковые материалы должны иметь правильную кристаллическую структуру и очень высокую чистоту (отсутствие примесей). Допустимое количество примесей не более 10^{12} атомов на 1 см^3 , т. е. не более 1 атома на 10^{10} атомов основного вещества (в 1 см^3 вещества 10^{22} атомов).

На рис. 12 дано плоскостное изображение идеально чистого (беспримесного) монокристалла полупроводникового материала. Как видно из рисунка, кристалл образован атомами с ковалентными связями. При неразорванных ковалентных связях кристалл полупроводника электрически нейтрален.

Разрыв ковалентных связей может произойти в результате сообщения электронам атома дополнительной энергии, например вследствие повышения температуры. При разрыве ковалентной связи образуются свободные электроны и пустые места у атомов, от которых оторвались электроны, — дырки. Дырка обладает свойствами положительно заряженной частицы. Заряд ее равен заряду электрона. При отсутствии внешнего электрического поля дырки совершают хаотическое движение в течение некоторого времени после своего появ-

ления, а затем рекомбинируют (заполняются) с одним из свободных электронов. Если есть внешнее электрическое поле, движение электронов и дырок становится направленным, при этом дырки и электроны движутся в противоположных направлениях. Направление потока электронов и дырок зависит от направления внешнего поля.

Из сказанного ранее следует, что полупроводникам одновременно присущи два вида проводимости. Проводимость, обусловленную движением электронов, приня-

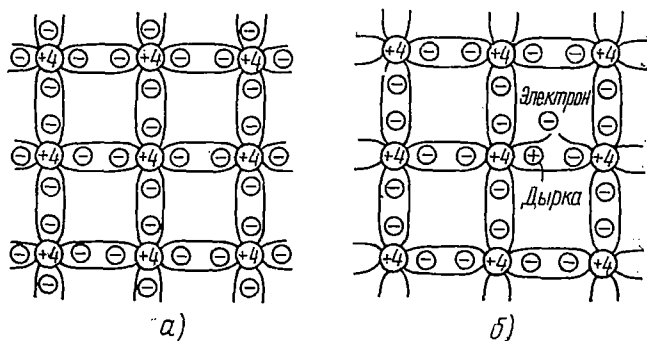


Рис. 12. Плоскостное изображение кристалла кремния или германия:
 а — ковалентные связи не нарушены, б — образование пары электрон — дырка

то называть *электронной* или проводимостью *n*-типа*, а проводимость, обусловленную движением дырок, — *дырочной* или проводимостью *p*-типа**. Электронная и дырочная проводимости, возникающие при разрыве ковалентных связей в беспримесном полупроводнике, называются *собственной проводимостью*.

Вводя в полупроводниковый материал очень малые примеси некоторых элементов, можно изменить проводимость этого материала. В качестве примесных используют атомы элементов III и V групп таблицы Менделеева.

Для получения проводимости *p*-типа в полупроводники вводят такие элементы III группы, как бор, индий, алюминий. На рис. 13, а приведены трехвалентный атом

* Первая буква латинского слова *negativus* — отрицательный.

** Первая буква латинского слова *positivus* — положительный.

индия и окружающие его четырехвалентные атомы германия. Поскольку атом индия не образует четвертой ковалентной связи с атомом германия, он превращается в неподвижный отрицательный ион, а на месте, где отсутствует ковалентная связь, образуется дырка. Полупроводники с такой структурой обладают избытком дырок и имеют дырочную проводимость. Элементы, создающие в полупроводнике дырочную проводимость, называются *акцепторами*.

Проводимость *n*-типа получают, вводя в полупроводник элементы группы V. К ним относятся сурьма,

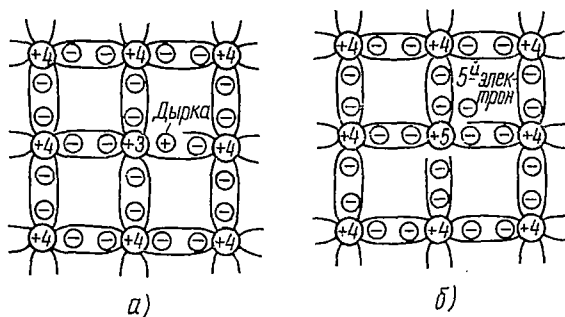


Рис. 13. Плоскостное изображение кристалла германия с примесями:
а — индия, б — сурьмы

мышьяк, фосфор. На рис. 13, б видно, что четыре атома сурьмы вступают в ковалентную связь с четырьмя электронами атомов германия, а пятый электрон остается свободным.

Полупроводники с такой структурой имеют избыток электронов и обладают электронной проводимостью. Элементы, создающие в полупроводнике электронную проводимость, называются *донорами*.

В полупроводниках *p*-типа основные носители (подвижные носители, создающие проводимость) — дырки, в полупроводниках *n*-типа основные носители — электроны.

Рассмотрим явления, происходящие в области соприкосновения двух полупроводников с различными видами проводимости. Такая область создается сплавлением пластин *p*-полупроводника и *n*-полупроводника или введением в чистый полупроводник с двух сторон соответственно донорных и акцепторных примесей.

Область соприкосновения полупроводников с разными видами проводимости называют *электронно-дырочным переходом* или *$p-n$ -переходом*. Так как в p -полупроводнике концентрация дырок выше, чем электронов, а в n -полупроводнике концентрация электронов выше, чем дырок, то из-за разности концентраций зарядов начнется движение — диффузия — электронов из n -полупроводника в p -полупроводник и дырок из p -полупроводника в n -полупроводник.

Дырки, диффундировавшие из p -полупроводника в n -полупроводник, рекомбинируют (теряют заряд, нейтрализуются) с его основными носителями — электронами и не вносят заметных изменений в структуру n -полупроводника. Однако из-за ухода дырок из p -области в последней уменьшается концентрация подвижных зарядов, или, как принято говорить, происходит обеднение ее основными носителями. В результате возрастает сопротивление p -области. Аналогичное явление происходит в n -области вследствие диффузии электронов в p -область. Сопротивление n -области возрастает.

В результате переходный слой, обедненный с обеих сторон основными носителями, становится слоем повышенного сопротивления. Кроме того, из-за ухода некоторого количества дырок из p -области в ней остается нескомпенсированное соответствующее количество неподвижных отрицательных ионов примеси. Аналогично в n -области оказывается некоторое количество нескомпенсированных положительных ионов примеси. В p -области образуется электрический слой с отрицательными зарядами, а в n -области — электрический слой с положительными зарядами. Между этими слоями образуется электрическое поле E_{p-n} , напряженность которого всегда направлена из n -области в p -область (рис. 14, а), называемое внутренним полем $p-n$ -перехода. Переходный слой принято называть *запорным слоем* для основных носителей. На неосновные носители поле $p-n$ -перехода оказывает ускоряющее действие.

Ширина запорного слоя не может увеличиваться безгранично, так как возникающая из-за диффузии разность потенциалов препятствует перемещению основных носителей в противоположные области. Разность потенциалов в свою очередь зависит от разности концентраций носителей в одной и другой областях. Ширина за-

порного слоя обычно находится в пределах от долей микрона до нескольких микрон.

Если к $p-n$ -переходу приложено внешнее электрическое поле $E_{вн}$ плюсом к n -области и минусом к p -области (рис. 14, б), то направление внешнего поля совпадает с направлением поля $p-n$ -перехода. Действие внешнего поля в этом случае приводит к дополнительному отсасыванию основных носителей. Дырки из p -области перемещаются к отрицательному полюсу источника внешнего напряжения, а электроны из n -области — к его поло-

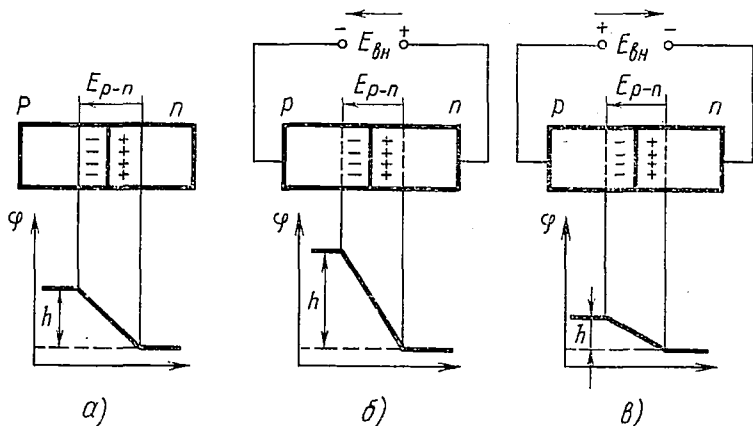


Рис. 14. Потенциальная диаграмма $p-n$ -перехода:

а — без внешнего электрического поля, б — с внешним электрическим полем, совпадающим по направлению с полем $p-n$ -перехода, в — с внешним электрическим полем, противоположным по направлению полю $p-n$ -перехода

жительному полюсу. Это приводит к увеличению размеров и величины заряда обедненного слоя каждой из областей.

В результате отталкивающее действие запирающего слоя на основные носители возрастает, потенциальный барьер увеличивается и ток основных носителей, протекающий через $p-n$ -переход, уменьшается. При соответствующем напряжении внешнего поля ток, протекающий через $p-n$ -переход, будет определяться только током неосновных носителей, который называется обратным.

Когда к $p-n$ -переходу приложено электрическое поле плюсом к p -области и минусом к n -области (рис. 14, в), то поле $p-n$ -перехода частично компенсируется и ток, протекающий через $p-n$ -переход, опреде-

ляется током основных носителей. Ток, образуемый основными носителями, называют прямым. Таким образом, сила и направление тока, текущего через $p-n$ -переход, зависят от величины и направления приложенного напряжения.

Описанные свойства $p-n$ -перехода положены в основу современных полупроводниковых приборов.

В настоящее время разработано большое количество полупроводниковых приборов различного назначения и мощности для различного диапазона частот.

Все полупроводниковые приборы делятся на четыре основные группы: диоды, транзисторы, тиристоры и оптроны. По методу создания $p-n$ -перехода приборы классифицируют на плоскостные и точечные (только диоды). По конструкции — на приборы нормального и специального (например, тропического) исполнения, корпусные и бескорпусные и пр. По мощности различают: диоды и тиристоры — маломощные (средний ток $I_{cp} < 0,3A$), средней мощности ($0,3 \leq I_{cp} \leq 10A$) и большой мощности ($I_{cp} > 10$); транзисторы — маломощные (с максимально допустимой мощностью, выделяемой на коллекторе, $P_k \leq 0,3$ Вт), средней мощности ($0,3 \leq P_k \leq 5$ Вт) и большой мощности ($P_k > 5$ Вт). Диоды, транзисторы и тиристоры классифицируются по назначению (схемы 1, 2, 3). Кроме того, транзисторы можно разделить на две группы, различающиеся по принципу действия и параметрам: биполярные и униполярные (полевые). Последние являются сравнительно новыми приборами, обладающими рядом преимуществ перед более распространенными биполярными транзисторами.

Оптроны в последнее время находят все большее применение. В оптронах передача сигнала реализуется не гальванической связью, как в обычных полупроводниковых приборах, а оптической. Источник сигнала (излучатель) и приемник (фотодиод, фоторезистор, фототиристор), как правило, совмещаются в одном корпусе и образуют прибор единой конструкции.

§ 12. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

В основу работы полупроводникового диода положены физические процессы, происходящие в $p-n$ -переходе. На рис. 15 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) диода, выражающие зависимость тока, проте-

Классификация диодов по назначению

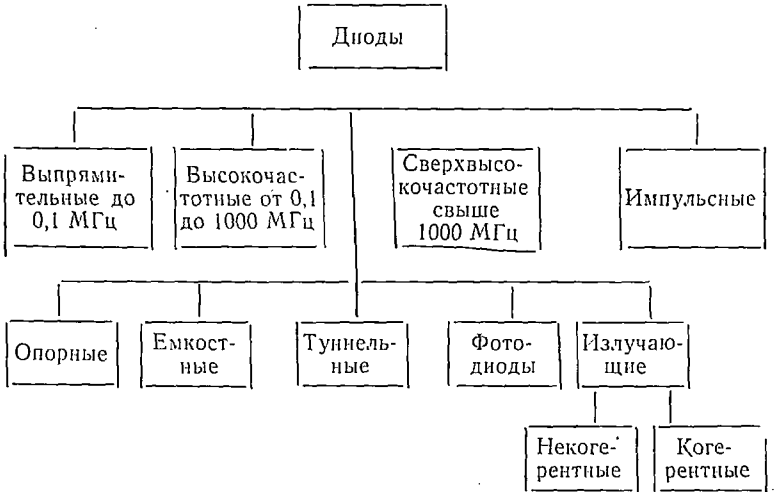


Схема 2

Классификация транзисторов по назначению

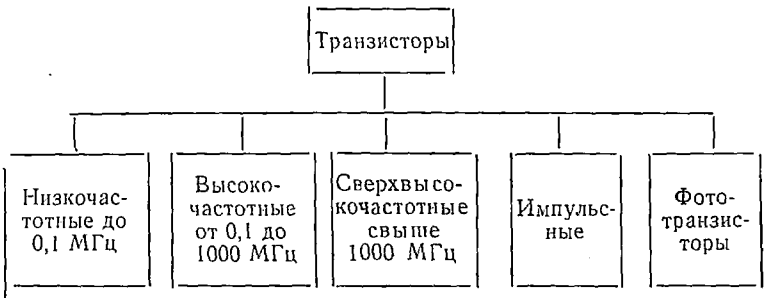


Схема 3

Классификация тиристоров по назначению



кающего через диод, от приложенного напряжения. Слева от оси ординат расположены так называемые обратные ветви характеристик. Они выражают зависимость тока через диод от напряжения, приложенного плюсом к n -области и минусом к p -области. В таком случае принято говорить, что диод включен в обратном направлении или к диоду приложено обратное напряжение $U_{обр}$.

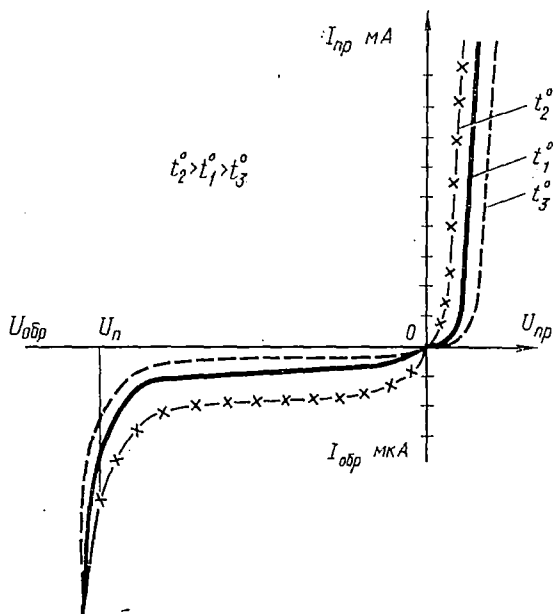


Рис. 15. Вольт-амперные характеристики диода для различных значений температуры окружающей среды

Ток через диод — обратный ток $I_{обр}$ — обусловлен только неосновными носителями. Величина его очень мала. Например, для широко распространенного диода средней мощности Д226 при обратном напряжении 400 В обратный ток составляет всего 0,3 мА.

При напряжении, большем U_n , наступает пробой $p-n$ -перехода, в результате чего переход разрушается, сопротивление его резко уменьшается и диод начинает проводить ток в обратном направлении, т. е. теряет свои выпрямительные свойства.

Справа от оси ординат расположены прямые ветви характеристик. Они соответствуют подаче на диод прямого напряжения или, как говорят, прямому включению диода. Как видно из характеристик, ток через диод резко возрастает: здесь он обусловлен основными носителями. Этот ток называется прямым током $I_{пр}$. Для того же диода Д226 сила прямого тока достигает нескольких сотен миллиампер. Напряжение $U_{пр}$ есть падение напряжения на диоде в прямом направлении. Оно обусловлено сопротивлением диода в прямом направлении. Величина его для диода Д226 лежит в пределах одного вольта. Зависимость тока $I_{пр}$ от напряжения $U_{пр}$ нелинейна, т. е. диод в прямом направлении представляет собой нелинейное сопротивление. В нижней части прямой ветви характеристики имеется порог, после которого ток резко возрастает. Напряжение, прикладываемое к диоду до получения порога, затрачивается на преодоление внутреннего электрического поля $p-n$ -перехода (пространственного заряда).

На рис. 15 приведены вольт-амперные характеристики диода при различной температуре. При повышении температуры увеличивается энергия носителей, освобождается большее число электронов и большее число дырок остается свободным, т. е. увеличиваются количество неосновных и основных носителей, а также обратный и прямой токи через $p-n$ -переход. Обратная ветвь характеристики располагается ниже, прямая ветвь смещается влево. Приведенные характеристики соответствуют выпрямительному, высокочастотному, сверхвысокочастотному и импульсному диодам.

Различные типы полупроводниковых диодов показаны на рис. 16.

На рис. 17 изображены конструкции плоскостного выпрямительного и точечного высокочастотного диодов. Диоды выполняются в виде цилиндрических конструкций, часто сложной формы.

Маркировка наносится на корпус диодов, а в случае его малых размеров — на плоские выводы. Маркировка выполняется в виде надписей. Исключение составляют высокочастотные диоды, имеющие очень маленький корпус и тонкие проволочные выводы. Они маркируются комбинацией цветowych меток. При маркировке указывают товарный знак завода-изготовителя, марку диода и дату выпуска.

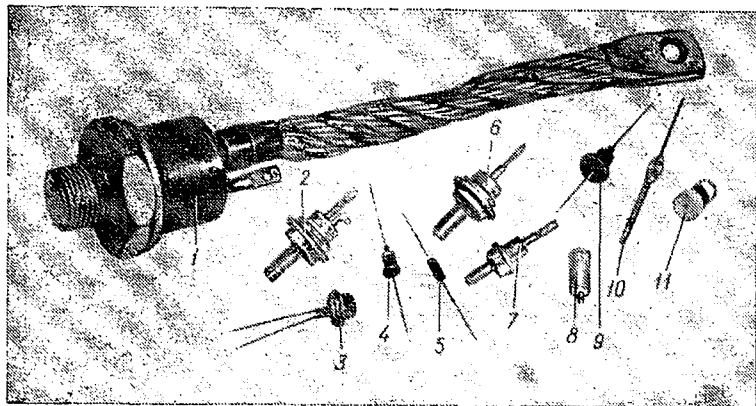


Рис. 16. Полупроводниковые диоды и тиристоры:

1, 2 и 3 — тиристоры большой, средней и малой мощности (ВКДУ, КУ201 и 2У101), 4 и 7 — опорные диоды малой и средней мощности (Д808 и Д816), 5 и 10 — высокочастотные диоды Д9 и Д2, 6 и 9 — выпрямительные диоды средней и малой мощности (Д242 и Д226), 8 — сверхвысокочастотный диод, 11 — лазерный диод

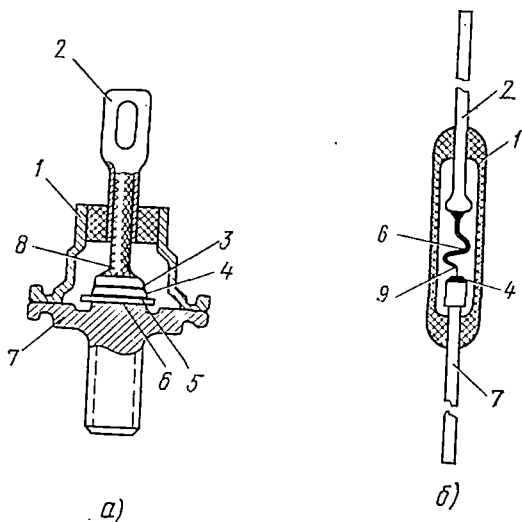


Рис. 17. Конструкции диодов:

а — плоскостного, б — точечного высокочастотного; 1 — корпус, 2 — жесткий вывод, 3 и 5 — припой, 4 — кристалл кремния с $p-n$ -переходом, 6 — вольфрамовый температурный компенсатор, 7 — кристаллодержатель, 8 — гибкий вывод, 9 — игла

Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного напряжения (рис. 18, а). Здесь используется свойство диода пропускать ток только в одном направлении. График тока через диод D и сопротивление нагрузки R_H приведен на рис. 18, б. Когда к диоду приложено прямое напряжение (на рисунке — положительный полупериод), форма тока повторяет форму приложенного переменного напряжения. В отрицательный полупериод ток равен нулю (обратным током здесь можно пренебречь). Выпрямительные диоды обычно работают на токах низкой частоты (50—2000 Гц). Для получения высокого коэффициента полезного действия выпрямителя прямое падение напряжения $U_{пр}$ на

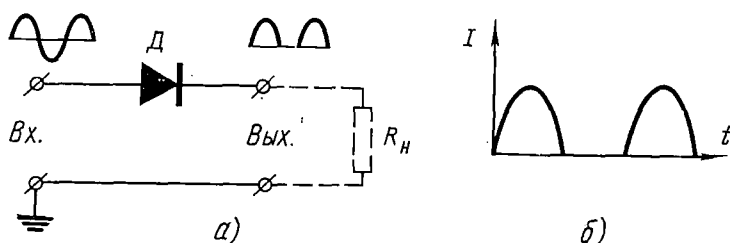


Рис. 18. Выпрямительный диод:
а — схема выпрямителя, б — форма тока через диод

диоде при протекании прямого тока должно быть минимальным. В зависимости от назначения выпрямительные диоды выпускаются на прямые токи от десятков миллиампер до десятков и сотен ампер и обратные напряжения от десятков до тысяч вольт.

В характеристику выпрямительных диодов входят следующие параметры:

величина выпрямленного тока $I_{выпр}$ или среднее за период значение прямого тока $I_{пр.ср}$;

среднее за период прямое падение напряжения $U_{пр.ср}$;

допустимое обратное напряжение $U_{обр}$;

максимальный обратный ток $I_{обр}$ при допустимом обратном напряжении.

Высокочастотные и сверхвысокочастотные диоды являются приборами универсального назначения. Они могут быть использованы для выпрямления токов в широком диапазоне частот (до несколь-

ких тысяч мегагерц), модуляции, детектирования и других преобразований электрических сигналов.

Высокочастотные и сверхвысокочастотные диоды, так же как и выпрямительные, характеризуются параметрами: $I_{пр.ср}$; $U_{пр.ср}$; $U_{обр}$; $I_{обр}$. Кроме того, свойства этих диодов определяются следующими параметрами: диапазоном рабочих частот Δf ; емкостью C_d ; добротностью Q_d .

Импульсные диоды предназначены для использования в качестве ключевых элементов, обеспечи-

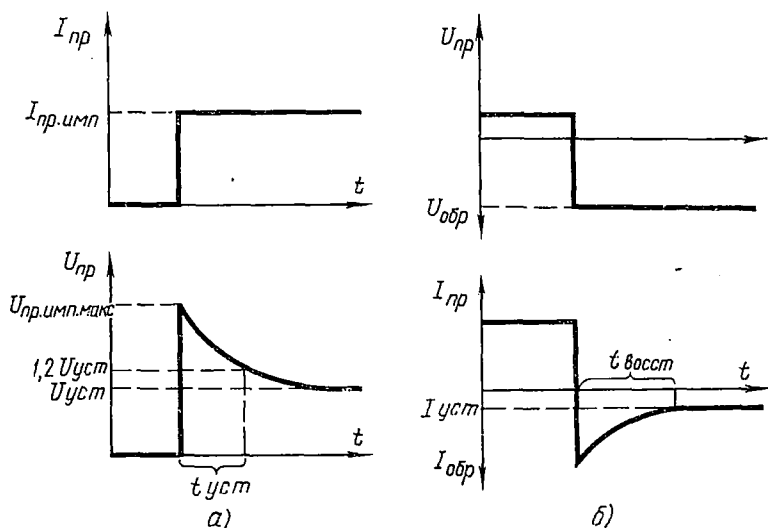


Рис. 19. Формы тока и напряжения в цепи импульсного диода: а — при включении в прямом направлении, б — при переключении

вающих очень быстрое протекание переходных процессов (десятые и сотые доли микросекунд) при сравнительно больших прямых токах (50 мА и более).

При коротких импульсах необходимо учитывать инерционность процессов включения и выключения диодов. На рис. 19 показаны зависимости тока и напряжения в цепи импульсного диода от времени при включении и переключении.

После включения прямого тока $I_{пр}$ (рис. 19, а) напряжение на диоде устанавливается не мгновенно. Интервал времени $t_{уст}$ от начала импульса прямого тока до момента, когда напряжение на сопротивлении нагрузки, включенной последовательно с диодом, упадет до

1, 2 установившейся величины, называется *временем установления прямого сопротивления диода*.

Отношение величины максимального импульсного прямого напряжения на диоде $U_{\text{пр.имп.макс}}$ к величине импульса прямого тока $I_{\text{пр.имп}}$ называется импульсным максимальным сопротивлением диода $R_{\text{имп.макс}}$.

Если на диод, через который протекал прямой ток, подать обратное напряжение так, чтобы запереть диод, то он запирается не мгновенно (рис. 19, б). В процессе протекания прямого тока в базе диода накапливается заряд. При подаче запирающего напряжения этот заряд рассасывается и вызывает протекание импульса тока, который может во много раз превышать установившуюся величину обратного тока. Отрезок времени от момента, когда ток через диод равен нулю, до момента, когда ток уменьшился до установившегося значения, называется *временем восстановления $t_{\text{восст}}$ обратного сопротивления диода*.

Опорные диоды (стабилитроны) имеют вольт-амперные характеристики, приведенные на рис. 20. Форма прямой ветви характеристики стабилитрона аналогична форме прямой ветви ВАХ выпрямительного диода (см. рис. 18), форма обратной ветви отличается от диодной тем, что начиная с некоторого значения обратного напряжения, называемого напряжением стабилизации $U_{\text{ст}}$, падение напряжения на стабилитроне изменяется незначительно. Рабочим участком характеристики стабилитрона является участок CD .

Конструкция кремниевых стабилитронов аналогична конструкции выпрямительных диодов. Стабилитроны широко применяются для стабилизации уровней напряжения или тока при изменении напряжения питающей сети и сопротивления нагрузки.

Стабилитроны применяются также для формирования прямоугольных импульсов, в схемах ограничения, схемах защиты измерительных приборов от перегрузок. На рис. 21, а приведена схема ограничителя импульсов, на рис. 21, б — схема защиты миллиамперметра от перегрузок.

Емкостный диод (варикап) — это полупроводниковый прибор, имеющий диодную вольт-амперную характеристику и переменную собственную емкость, изменяющуюся по заданному закону. Емкость варикапа зависит от приложенного обратного напряжения: с увели-

чением обратного напряжения емкость уменьшается. Величина емкости варикапа изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен пикофарад. Варикапы применяются в параметрических усилителях и в цепях перестройки резонансной частоты контуров, генераторов и других узлов радиотехнической аппаратуры.

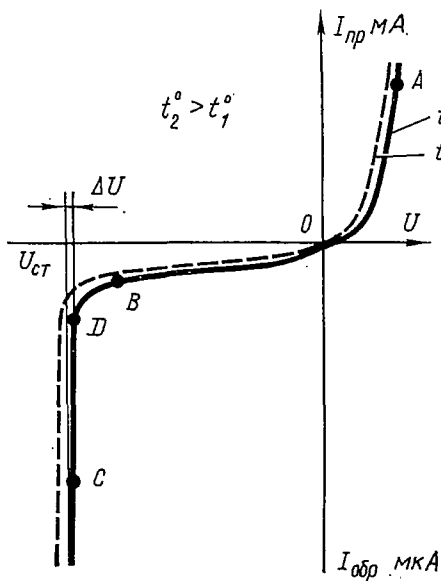
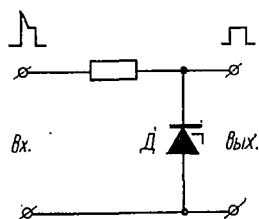
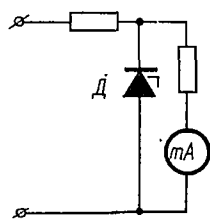


Рис. 20. Вольт-амперные характеристики опорного диода



а)



б)

Рис. 21. Схемы с применением опорных диодов:

а — ограничителя импульсов, б — защиты миллиамперметра от перегрузок

Туннельные диоды занимают особое место среди полупроводниковых диодов. В основу работы туннельного диода положен так называемый туннельный эффект, сущность которого состоит в явлении прохождения частиц (в нашем случае электронов) через потенциальный барьер (в нашем случае $p-n$ -переход) даже тогда, когда их кинетическая энергия меньше потенциальной энергии барьера. Это явление из области квантовой механики, с точки зрения классической физики оно необъяснимо.

Необходимыми условиями возникновения туннельного эффекта являются высокая напряженность электрического поля и очень малая толщина $p-n$ -перехода (примерно в сто раз меньшая, чем у обычных диодов). Для получения такого перехода исходный полупроводниковый материал должен иметь значительно большее количество примесей, чем у обычного диода (порядка $5 \cdot 10^{19}$ атомов на 1 см^3). Такие полупроводники принято называть вырожденными.

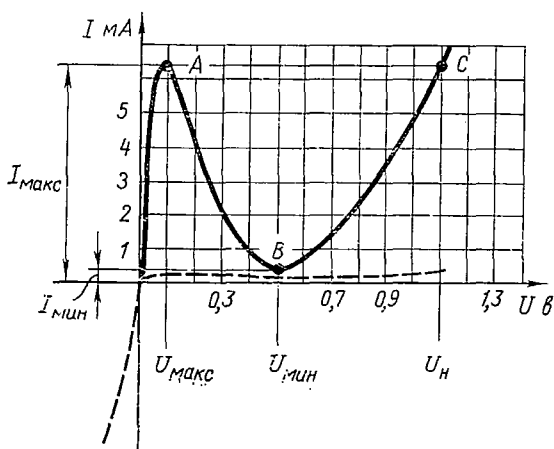


Рис. 22. Вольт-амперная характеристика туннельного диода

Вольт-амперная характеристика туннельного диода (рис. 22) имеет участок АВ отрицательного дифференциального сопротивления. Точка А определяет ток и напряжение максимума вольт-амперной характеристики диода ($I_{\text{макс}}$, $U_{\text{макс}}$), точка В — ток и напряжение минимума вольт-амперной характеристики диода ($I_{\text{мин}}$, $U_{\text{мин}}$). Точка С характеризует наибольшее напряжение $U_{\text{н}}$ на диоде при протекании тока, равного $I_{\text{макс}}$.

При соответствующей технологической обработке диода ток максимума $I_{\text{макс}}$ можно уменьшить до 100 мкА . Туннельные диоды с малым максимальным током называют обращенными.

У обращенных диодов обратная ветвь вольт-амперной характеристики используется для детектирования малых напряжений ($50\text{—}100 \text{ мВ}$). Вольт-амперная характери-

стика обращенного диода обозначена на рис. 22 пунктирной линией.

Очень важной особенностью туннельных диодов является их быстродействие и, следовательно, способность работать на высоких частотах. Время переключения туннельного диода порядка 10^{-9} с. Такое быстродействие, с точки зрения квантовой механики, объясняется тем, что туннельный переход электрона через потенциальный барьер происходит со скоростью, близкой к скорости света.

Туннельные диоды применяются в импульсной и вычислительной технике и устройствах автоматики в схемах генераторов синусоидальных и прямоугольных импульсов; в маломощных усилителях сверхвысокой частоты и др.

§ 13. ТРАНЗИСТОРЫ

Транзисторы представляют собой элементы с усиленными свойствами, основанными на использовании управляемости потока носителей в кристалле полупроводника.

Транзистор состоит из двух $p-n$ -переходов, образованных тремя полупроводниковыми областями. Крайние области имеют одинаковый тип проводимости.

Различают транзисторы с чередованием двух типов проводимостей: $p-n-p$ и $n-p-n$ (рис. 23). Физические процессы, протекающие в транзисторах с проводимостями

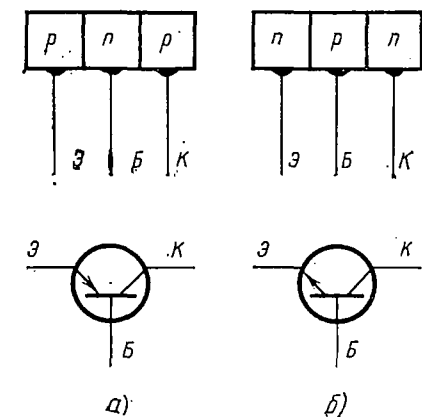


Рис. 23. Условные обозначения транзисторов с проводимостями:

а — $p-n-p$, б — $n-p-n$

$p-n-p$ и $n-p-n$, аналогичны.

Область транзистора, испускающую (эмиттирующую) носители тока, называют эмиттером (Э); область, собирающую носители тока, — коллектором (К); среднюю область транзистора называют базой (Б). Переход эмиттер — база называется эмиттерным, а переход ба-

за — коллектор — коллекторным. В условных обозначениях транзисторов стрелкой указывается направление тока эмиттера. Различные типы современных транзисторов представлены на рис. 24.

Потенциальная диаграмма равновесного состояния $p-n$ -перехода транзистора, при котором на его электроды не подано напряжение от внешних источников питания, приведена на рис. 25, а. Как и в случае одиночного $p-n$ -перехода, переходы эмиттер — база и база — коллектор имеют потенциальный барьер, препятствующий

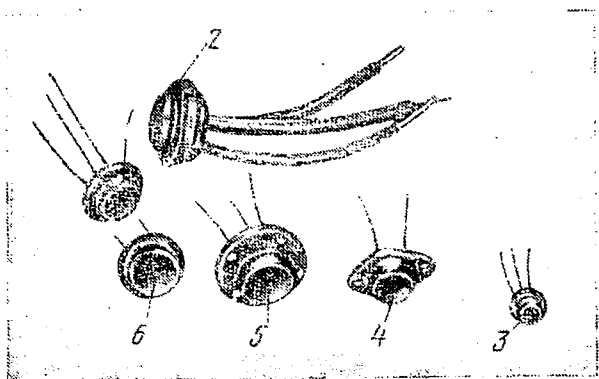


Рис. 24. Транзисторы:

1 — высокочастотный транзистор средней мощности П602, 2 — низкочастотный транзистор большой мощности П210, 3 — маломощный высокочастотный транзистор МП416, 4, 5 и 6 — низкочастотные транзисторы средней мощности П201, П46 и П216

щий протеканию основных носителей в соседнюю область.

При подаче напряжения прямой полярности E_1 на переход эмиттер — база он открывается, потенциал внутреннего поля левого перехода уменьшается (рис. 25, б) и из области p (эмиттера) в область n (базу) начинается движение дырок. Благодаря очень малой толщине области базы основные носители, имеющие значительную кинетическую энергию, успевают диффундировать в зону коллекторной области.

Внешнее электрическое поле E_2 приложено к коллекторному переходу в таком направлении, что заставляет оказавшиеся в нем дырки переместиться далее в коллек-

торную p -область, затем дырки рекомбинируют в ней с электронами, поступающими от отрицательного полюса батареи, создавая через нее ток.

Соотношения между токами в цепях транзистора. Прохождение токов в транзисторе рассмотрим на примере транзистора $p-n-p$.

Как было сказано выше, большая часть дырок из базы переходит в коллектор. В цепи коллектора возникает ток I_K (см. рис. 25, б). Если бы все дырки, инжектируемые (испускаемые) эмиттером, достигали коллектора,

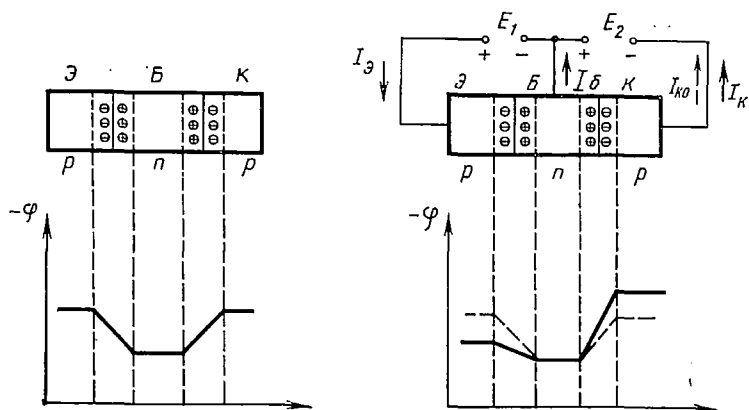


Рис. 25. Потенциальная диаграмма $p-n$ -перехода транзистора:

а — без источника питания, б — с источником питания

ток в цепи базы отсутствовал. Однако, диффундируя через область базы, часть дырок рекомбинирует с электронами (основными носителями в базе) и образует ток базы $I_б$. Таким образом, ток эмиттера $I_э$, образованный потоком дырок, инжектируемых эмиттерным переходом, распределяется в транзисторе между коллектором и базой:

$$I_э = I_б + I_K. \quad (1)$$

Для выражения соотношения токов в транзисторе вводится понятие статического коэффициента усиления по току, или коэффициента передачи тока, представляющего собой отношение изменения тока коллектора ΔI_K к вызвавшему его измене-

нию тока эмиттера $\Delta I_{\text{э}}$ при постоянном напряжении на коллекторном переходе:

$$\alpha = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}} \text{ при } U_{\text{к.б}} = \text{const.} \quad (2)$$

Обычно α лежит в пределах 0,95—0,99.

При закрытом эмиттерном переходе или при отключенном эмиттерном электроде через коллекторный переход протекает коллекторный ток $I_{\text{к.о}}$, называемый *обратным* (или нулевым) током коллектора. Величина обрат-

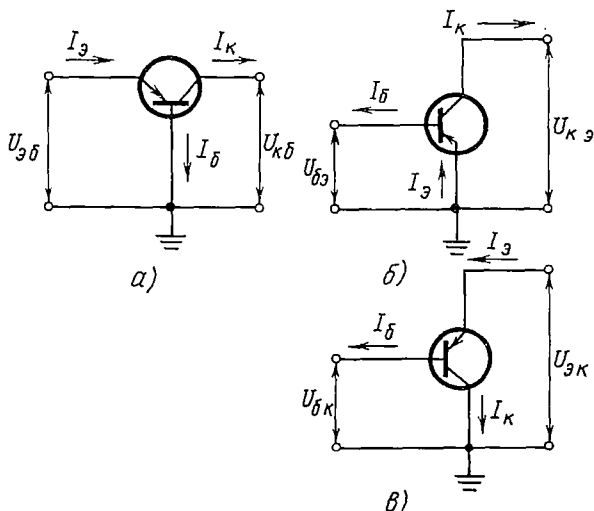


Рис. 26. Схемы включения транзисторов:
 а — с общей базой, б — с общим эмиттером, в — с общим коллектором

ного тока коллектора зависит от концентрации неосновных носителей.

Полный ток коллектора при открытом эмиттерном переходе с учетом $I_{\text{к.о}}$:

$$I_{\text{к}} = I_{\text{к.о}} + \alpha I_{\text{э}}$$

Схемы включения транзисторов. Транзистор может быть включен тремя различными способами: с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором. Схемы включения приведены на рис. 26 (на каждой схеме слева — входное напряжение, справа — выходное).

Схема с общей базой дает наиболее стабильное усиление по мощности, мало зависящее от изменений параметров транзистора и их разброса от экземпляра к экземпляру. Усиление по току меньше единицы, усиление по напряжению больше единицы. Выходное напряжение находится в фазе с входным напряжением. Ввиду очень большой разницы между входным и выходным сопротивлениями отдельные каскады для получения усиления нужно соединять трансформаторной связью.

Схема с общим эмиттером дает большое усиление по мощности и применяется чаще всего, несмотря на меньшую стабильность этого усиления по сравнению со схемой с общей базой. Усиление по току намного больше единицы, усиление по напряжению приблизительно такое же, как и у схемы включения с общей базой. Выходное напряжение смещено по фазе на 180° относительно входного. Величины входного и выходного сопротивлений схемы таковы, что позволяют легко согласовывать каскад с каскадом.

Схема с общим коллектором имеет примерно такую же стабильность усиления по току, как и схема с общим эмиттером. Усиление по напряжению близко к единице, выходное напряжение находится в фазе с входным. Схема с общим коллектором применяется в случаях, когда требуется большое выходное сопротивление.

Вольт-амперные характеристики транзистора. Зависимость между параметрами транзистора, так же как и диода, выражается вольт-амперными характеристиками. Вольт-амперные характеристики транзисторов, как и электровакуумных ламп, нелинейны, поэтому их параметры во многом зависят от выбора рабочей точки. Состояние транзистора определяется четырьмя переменными. Следовательно, для полного описания состояния транзистора необходимо иметь два семейства статических характеристик, содержащих зависимость трех величин. Удобно в качестве независимых переменных принять напряжение. Это позволяет пользоваться для расчетов терминологией и методикой, применяемыми для схем с электровакуумными лампами. Как правило, в справочниках приводятся вольт-амперные характеристики транзисторов, включенных по схемам с общей базой и общим эмиттером.

Так, например, для схемы с общим эмиттером характеристики определяются выражениями:

$$I_b = f(U_{б.э}) \text{ при } U_{к.э} = \text{const};$$

$$I_k = f(U_{к.э}) \text{ при } I_b = \text{const},$$

где $U_{б.э}$ — напряжение между базой и эмиттером;
 $U_{к.э}$ — напряжение между коллектором и эмиттером.

Первая характеристика называется входной, вторая — выходной.

Семейство вольт-амперных характеристик транзистора типа П16 приведено на рис. 27. Как видно из рис. 27, а, входная характеристика при $U_{к.э} = 0$ представляет собой обычную прямую ветвь характеристики

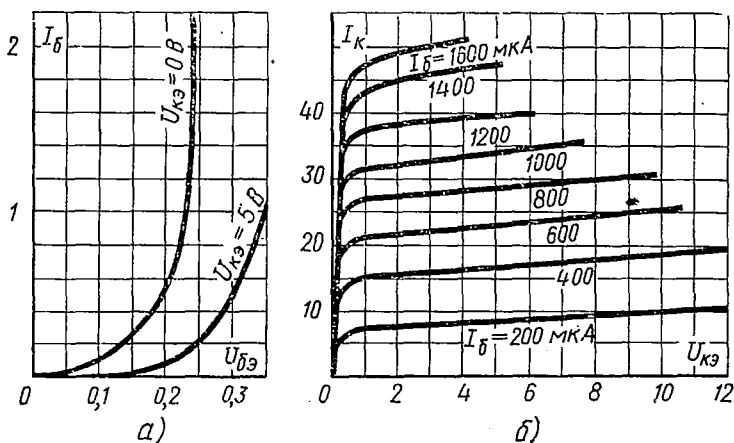


Рис. 27. Вольт-амперные характеристики транзисторов:
 а — входные, б — выходные

диода: при $U_{б.э} = 0$ ток $I_b = 0$. При $U_{к.э} > 0$ характеристика сдвигается вправо, и чем больше это неравенство, тем правее будет характеристика, т. е. при неизменном значении $U_{б.э}$ ток базы I_b будет уменьшаться. Под действием электрического поля коллекторного перехода, вызванного напряжением $U_{к.э}$, заряды, диффундирующие из базы в коллектор, приобретают большее ускорение. Следовательно, вероятность их рекомбинации в базе уменьшается и ток базы тоже уменьшается.

На рис. 27, б приведено семейство выходных характеристик для различных значений тока базы. Как видно из рисунка, для всех характеристик нулевому значению $U_{к.э}$ соответствует нулевое значение тока коллектора I_k . При отсутствии поля коллекторного перехода все но-

сители зарядов рекомбинируют в базе и ток через коллекторный переход не протекает. С увеличением напряжения на коллекторе ток коллектора сначала резко увеличивается, а затем остается практически постоянным и определяется в основном величиной тока базы:

$$I_K = \beta I_B \text{ при } U_{K,Э} = \text{const},$$

где $U_{K,Э}$ — напряжение между эмиттером и коллектором, а β — статический коэффициент усиления по току для схемы с общим эмиттером. Коэффициент β значительно больше единицы и может быть вычислен через коэффициент α из следующей приближенной формулы:

$$\beta \approx \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Из семейства характеристик видно, что с увеличением тока базы характеристики располагаются выше, т. е. одному и тому же значению $U_{K,Э}$ при большем токе базы соответствует больший ток коллектора. Ток базы тем больше, чем больше напряжение между базой и эмиттером $U_{Б,Э}$ (см. рис. 27, а), а увеличение напряжения $U_{Б,Э}$ вызывает увеличение тока носителей через эмиттерный переход и, следовательно, через коллекторный переход.

Следует отметить, что на рис. 27, б приращения тока базы взяты одинаковыми (200 мкА), а расстояния между кривыми тока коллектора в направлении оси ординат неодинаковы. Это указывает на то, что в соответствии с выражениями (1) и (2) величина коэффициента передачи тока α изменяется с изменением тока эмиттера.

§ 14. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Полевые транзисторы отличаются от обычных (биполярных) транзисторов принципом действия и электрическими параметрами.

Принцип действия полевого транзистора основан на изменении проводимости тонкого слоя полупроводника (так называемого канала) под действием электрического поля, перпендикулярного направлению тока.

Схематично полевой транзистор изображен на рис. 28, а. На рис. 28, б дано его условное обозначение. Полевой транзистор представляет собой тонкую пластинку полупроводника с проводимостью p -типа, с двух

противоположных сторон которой созданы области с проводимостью n -типа, образующие в материале полупроводника два $p-n$ -перехода. Обе области с проводимостью n -типа электрически соединены между собой. Один из выводов области p -типа проводимости назван *истоком*, другой — *стоком*, а область проводимости n -типа называется *затвором*.

При включении между истоком и стоком внешнего источника электрического напряжения U в полярности, указанной на рисунке, по каналу между двумя $p-n$ -переходами потечет ток, величина которого будет определяться приложенным напряжением и проводимостью

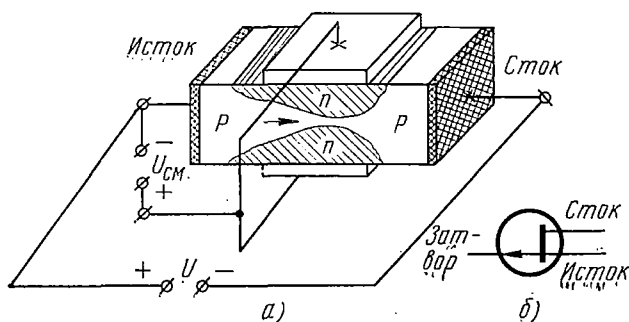


Рис. 28. Полевой транзистор:

а — схематическое изображение, *б* — условное обозначение

исходного материала полупроводника. Если на затвор транзистора подать внешнее напряжение U_{CM} в полярности, смещающей $p-n$ -переходы в обратном направлении, то ширина $p-n$ -переходов возрастет в глубь канала. Это приведет к уменьшению ширины канала, возрастанию его сопротивления и, следовательно, к снижению тока в цепи исток — сток на рис. 28.

При увеличении напряжения U_{CM} ток в цепи стока будет уменьшаться и при некотором значении $U_{CM} = U_0$ станет равным нулю. Напряжение U_0 принято называть напряжением отсечки.

При увеличении напряжения U между истоком и стоком увеличивается ток через канал, возрастает падение напряжения в нем, расширяются $p-n$ -переходы, сужается канал и возрастает его сопротивление. В резуль-

гате рост тока сначала замедляется, а затем практически прекращается.

Таким образом, при неизменном напряжении на стоке можно управлять током в цепи стока, изменяя напряжение на затворе. И при постоянном напряжении на затворе можно управлять током в цепи стока, изменяя напряжение на стоке.

Изменяя напряжение на затворе и на стоке полевого транзистора, можно снять семейство стоковых характеристик, подобно представленному на рис. 29, и напоминающие характеристики вакуумных радиоламп — пентодов.

Эти характеристики показывают зависимость тока

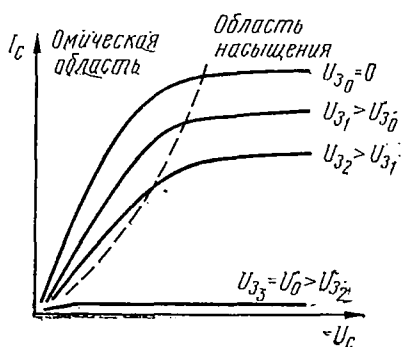


Рис. 29. Семейство стоковых характеристик полевого транзистора

стока I_c от напряжения на стоке U_c при различных значениях напряжения на затворе U_z . Как видно из рисунка, чем больше значение U_z , тем ниже располагается характеристика, а при некотором значении $U_z = U_{z3} = U_0$ ток стока практически равен нулю. Область, в которой ток стока сильно зависит от напряжения на стоке (на рис. 29 слева от пунктирной

линии), называется омической областью, а область, в которой ток стока почти не зависит от напряжения (справа от пунктирной линии), называется областью насыщения.

Полевой транзистор может быть с каналом n -типа проводимости. При этом пластина изготавливается из полупроводника n -типа проводимости, а боковые примеси создают проводимость p -типа. Полярность включения внешних источников напряжения должна быть обратной.

В полевых транзисторах в переносе тока в канале участвуют носители заряда лишь одного знака (дырки в транзисторах с каналом n -типа), поэтому полевые транзисторы называют еще униполярными (в отличие от обычных, биполярных транзисторов).

Очень важной отличительной особенностью полевого транзистора является его высокое (несколько МОм) входное сопротивление при включении транзистора по схеме с общим истоком. Это объясняется тем, что переход затвора смещен в обратном направлении (в отличие от биполярных транзисторов, где базовый переход смещен в прямом направлении).

Кроме описанных выше видов полевых транзисторов существуют еще полевые транзисторы с изолированным затвором. На поверхности между истоком и стоком расположен очень тонкий слой диэлектрика, на который нанесен металлический электрод. Ток стока этих транзисторов возрастает с увеличением напряжения на затворе. Кроме того, одна из двух разновидностей транзисторов с изолированным затвором позволяет управлять током стока в ту или другую сторону в зависимости от полярности напряжения, приложенного к затвору.

Входное сопротивление транзисторов с изолированным затвором еще выше, чем у транзисторов с $p-n$ -переходом, и достигает значения 50—100 МОм.

Высокое входное сопротивление позволяет применять полевые транзисторы в тех случаях, где применение обычных транзисторов затруднено.

Другим важным свойством полевых транзисторов является низкий уровень собственных шумов. Это связано с отсутствием токов рекомбинации, присущим обычным транзисторам.

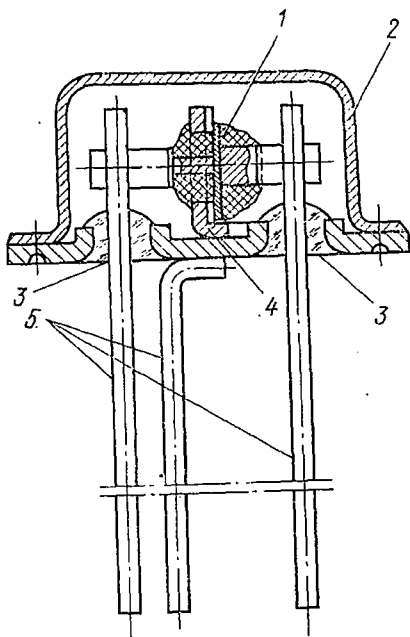


Рис. 30. Конструкция малоомощного плоскостного транзистора:

1 — кристалл германия с $p-n$ -переходом, 2 — корпус, 3 — изолятор, 4 — кристаллодержатель, 5 — выводы

Благодаря указанным свойствам полевые транзисторы в последние годы находят широкое применение в высококачественной звукозаписывающей аппаратуре, измерительной и вычислительной технике (в логических схемах и схемах генераторов импульсов), а также в аппаратуре сверхвысоких частот (в схемах усилителей).

Конструкции транзисторов. Конструктивно транзисторы различаются в зависимости от мощности и метода образования $p-n$ -перехода. Обычно транзистор выполняется в круглом металлическом загерметизированном баллоне, на одной из сторон которого имеются электрические выводы от электродов (см. рис. 24). Конструкция маломощного плоскостного транзистора показана на рис. 30.

Маркировка наносится на корпус транзистора и содержит товарный знак завода-изготовителя, марку транзистора, месяц и год его выпуска.

§ 15. ТИРИСТОРЫ

Тиристором называют полупроводниковый прибор, в основе которого лежит четырехслойная $p-n$ -структура ($p-n-p-n$ или $n-p-n-p$) и характеристика

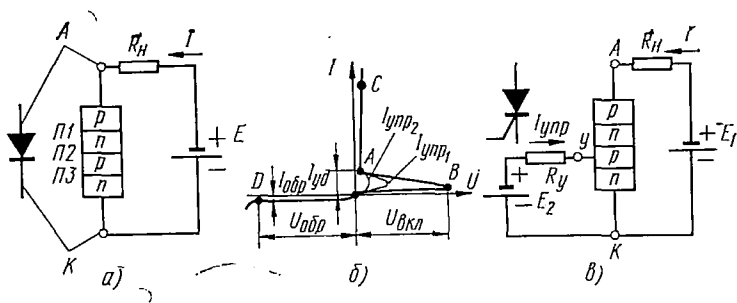


Рис. 31. Тиристор:

a — схема включения неуправляемого тиристора, *б* — вольт-амперная характеристика, *в* — схема включения управляемого тиристора

которого имеет участок отрицательного дифференциального сопротивления.

Тиристор состоит из трех последовательно расположенных $p-n$ -переходов (рис. 31, *a*). При указанной на рисунке полярности внешнего источника напряжения E

переходы $P1$ и $P3$ смещены в прямом направлении, а переход $P2$ — в обратном. Отсюда следует, что тиристор можно представлять в виде двух эквивалентных транзисторов: один — $p-n-p$ -типа с эмиттерным переходом $P1$ и коллекторным $P2$, другой — $n-p-n$ -типа с эмиттерным переходом $P3$ и коллекторным $P2$. Полный ток через общий коллекторный переход $P2$ будет обусловлен токами первого и второго эмиттеров, а также током утечки коллекторного перехода.

Вольт-амперная характеристика тиристора приведена на рис. 31, б. При малых значениях напряжения через прибор протекает небольшой обратный ток запертого второго перехода. На этом участке характеристики дифференциальное сопротивление прибора велико. По мере увеличения напряжения возрастают ток утечки второго перехода и токи эмиттеров. Вблизи точки B наблюдается резкое увеличение тока диода при небольшом увеличении напряжения. На этом участке возникает лавинное размножение носителей в коллекторном переходе. Точка B является точкой перегиба характеристики. Соответствующее ей значение напряжения называют напряжением включения ($U_{вкл}$).

В точке B состояние тиристора неустойчиво. Падение напряжения на нем резко снижается и доходит до точки A . На участке BA тиристор имеет отрицательное дифференциальное сопротивление. При дальнейшем увеличении напряжения источника E (см. рис. 31, а) напряжение на тиристоре почти не увеличивается, а ток в цепи резко возрастает и определяется в основном сопротивлением нагрузки R_n (участок AC характеристики). Максимально допустимому току через тиристор $I_{пр, макс}$ соответствует остаточное напряжение $U_{ост}$ (точка C характеристики). Для выключения тиристора необходимо снизить ток через него до значения, меньшего тока удержания $I_{уд}$.

Обратная ветвь характеристики тиристора не отличается от обратной ветви диодной характеристики.

Перевести тиристор в проводящее состояние можно, подключив к одной из его внутренних областей источник тока в прямой полярности. На рис. 31, в показано включение источника управляющего тока к базовой области p второго эквивалентного транзистора. Управляя током базы этого транзистора, можно снизить и менять величину напряжения включения, как показано на рис. 31, б.

Ток, вызывающий переключение тиристора, называют током управления $I_{упр}$.

Для тиристорov введены понятия: анод, катод и управляющий электрод. Соответствующие им области в структуре обозначены на рис. 31, а, в. Существует разновидность тиристорov, имеющих управляющий электрод от n -области.

Тиристор без управляющего электрода называют диодистором, а тиристор с управляющим электродом назван управляемым тиристором.

Выключение управляемого тиристора происходит при отсутствии тока управления и снижении основного тока ниже значения $I_{уд}$.

Одной из разновидностей тиристора является двунаправленный тиристор или симистор. Симистор (симметричный тиристор) имеет обратную ветвь вольт-амперной характеристики, симметричную прямой. В зависимости от полярности приложенного напряжения симистор проводит ток в ту или иную сторону. Форма характеристики и условное обозначение симистора приведены в табл. 1. Симисторы, так же как и тиристоры, бывают неуправляемые и управляемые. Управляется симистор аналогично тиристору, а характеристика «спрямляется» аналогично характеристике тиристора (участок OA на рис. 31, б). Благодаря симметрии характеристики симистор применяется для управления в цепях переменного тока.





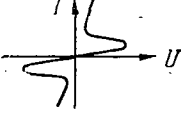






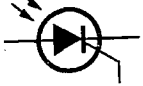
К группе тиристорov относится запираемый тиристор или тиристор, управляемый в обоих направлениях (т. е. открываемый и запираемый).

Запирание производится подачей на управляющий электрод импульса отрицательной полярности по отношению к катоду. При этом как бы искусственно вызывается увеличение тока удержания до значения, большего тока нагрузки (в отличие от выключения управляемых тиристорov снижением тока нагрузки до значения $I_{уд}$ на рис. 31).

Неуправляемые тиристоры принято называть диодными, а управляемые — триодными.

Тиристоры в последние годы нашли очень широкое применение в промышленности. Они используются в силовых электрических цепях в качестве управляемых выпрямительных элементов, инверторов, бесконтактных коммутаторов. В импульсной и вычислительной технике

Вольт-амперные характеристики и условные обозначения
различных видов тиристоров

Вид тиристора	Форма ВАХ	Условные обозначения
Динистор		
Управляемый тиристор		
Симистор		
Управляемый симистор		
Запираемый тиристор		
Управляемый фототиристор		

тиристоры применяются в схемах генераторов, формирователей импульсов, делителей частоты и т. д.

Тиристоры различных типов были показаны на рис. 16.

§ 16. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Фотоэлектронные полупроводниковые приборы являются наиболее перспективными преобразователями светового сигнала в электрический. Эти приборы, обладая достоинствами полупроводниковых приборов (небольшие габариты и масса, высокая надежность, низкие питающие напряжения, малое потребление энергии), имеют более высокую чувствительность по сравнению с электровакуумными фотоэлементами.

Фоторезисторы. Фоторезистор представляет собой полупроводниковую пластинку или пленку, сопротивление которой изменяется под действием падающего светового потока (внутренний фотоэффект). В качестве светочувствительного элемента обычно используют полупроводники, обладающие электронной проводимостью. Под действием светового потока электроны приобретают некоторую дополнительную энергию. В полупроводнике увеличивается концентрация основных носителей и, следовательно, возрастает его проводимость. Исходными материалами для фоторезисторов являются сульфид кадмия, селенид кадмия и сульфид свинца. Если к неосвещенному фоторезистору приложено постоянное напряжение, то в цепи появится ток, называемый темновым током I_T . Если напряжение приложено к освещенному фоторезистору, то протекающий через него ток будет иметь другое значение. Этот ток назван световым током I_c . Разность между световым и темновым токами называют фототоком:

$$I_{\phi} = I_c - I_T.$$

Для фоторезисторов введено понятие интегральной чувствительности. Этот параметр характеризует степень изменения сопротивления фоторезистора от изменения воздействующего на него светового потока.

Интегральная чувствительность фоторезисторов достигает величины 1 А/лм.

Другим важным параметром фоторезистора является пороговая чувствительность. Пороговой чув-

ствительностью называют минимальный уровень светового сигнала, который, будучи преобразован в электрический, может быть уверенно выделен на фоне собственных электрических шумов фоторезистора.

Время срабатывания фоторезистора составляет 10^{-4} — 10^{-5} с, что несколько выше, чем у других фотоэлектронных приборов, но срок службы их значительно больше.

Фоторезисторы применяются в качестве датчиков перемещения, скорости движения, для счета изделий и др., если это возможно по условиям их быстродействия.

Фотодиоды. Фотодиод представляет собой полупроводниковый диод, обратный ток которого зависит от освещенности $p-n$ -перехода. Обратный ток фотодиода практически не зависит от величины приложенного обратного напряжения. При освещении запирающего слоя фотодиода обратный ток возрастает пропорционально освещенности вследствие увеличения числа неосновных носителей, которые, достигая $p-n$ -перехода, увлекаются его полем. Чем сильнее световой поток, воздействующий на кристалл, тем больше возникает неравновесных носителей, тем больше неосновных носителей захватывается полем $p-n$ -перехода и тем больше обратный ток фотодиода.

Для фотодиода также существует понятие интегральной чувствительности. Величина ее постоянна и выражается как отношение фототока к световому потоку:

$$K_{\Phi} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi}.$$

Интегральная чувствительность фотодиодов высока. Она имеет порядок нескольких десятков мА/лм. Это дает возможность использовать фотодиоды в цепях с малыми сопротивлениями нагрузки.

Фотодиоды применяются в тех же случаях, что и фоторезисторы. Кроме того, фотодиоды используются в качестве измерительных датчиков для преобразования оптических величин (освещенности, температуры пламени и пр.) в электрические, которые измеряются с помощью электроизмерительных приборов.

Конструкция фотодиода представлена на рис. 32. Прибор выполнен так, что его $p-n$ -переход одной стороной обращен к стеклянному окну, через которое посту-

пает свет, и защищен от воздействия света с других сторон.

Фототранзисторы. Фототранзистор представляет собой биполярный транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером при нулевом токе базы, коллекторный ток которого зависит от освещенности эмиттерного перехода. Как для любого биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, коллекторный ток будет выражаться зависимостью

$$I'_{к.о} = I_{к.о} \frac{\alpha}{1 - \alpha},$$

где $I'_{к.о}$ — обратный ток коллекторного перехода; α — коэффициент переноса тока транзистора.

Таким образом, темновой ток коллектора фототранзистора значительно больше, чем темновой ток фотодиода. А интегральная чувствительность будет определяться интегральной чувствительностью коллекторного перехода и коэффициентом усиления по току. Интегральная чувствительность фототранзисторов 0,25—0,5 А/лм.

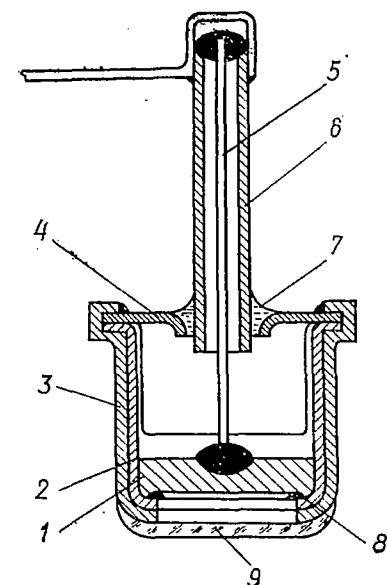


Рис. 32. Конструкция фотодиода:

1 — кристалл германия с $p-n$ -переходом, 2 — кристаллодержатель, 3 — металлический корпус, 4 — кольцо, 5 — вывод, 6 — металлическая трубка, 7 — стеклянный изолятор, 8 — оловянное кольцо, 9 — стеклянное окно

Применяются фототранзисторы в тех же случаях, что и фотодиоды. Конструктивно выполняются аналогично фотодиодам.

Фототиристоры. Они во многом схожи с обычными тиристорами. Основное отличие заключается в том, что фототиристор можно перевести в открытое состояние не только обычным способом, но и с помощью света, падающего на его катодную область. Вследствие высокой чувствительности $p-n-p-n$ -структуры фототиристоры

могут переключать значительные мощности в основной цепи при воздействии ничтожной энергии светового потока, падающего на структуру.

Фототиристоры бывают диодными (без управляющего электрода) и триодными (с управляющим электродом). Триодный тиристор может управляться не только световым потоком, но и подачей тока через управляющий электрод.

Вольт-амперная характеристика и условное обозначение фототиристора приведены в табл. 1.

Фототиристоры в последние годы находят наибольшее применение в оптоэлектронных приборах, где они используются в качестве управляемых приемников света от источников света — излучающих диодов.

§ 17. ИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ

Излучающие диоды предназначены для преобразования электрических сигналов в световые. Излучающие диоды делятся на две основные группы: светодиоды и лазерные диоды. Лазерные диоды являются когерентными* излучателями, а светодиоды — некогерентными излучателями.

Светодиоды. Светодиод представляет собой излучающий $p-n$ -переход, свечение которого вызывается рекомбинацией носителей тока (электронов и дырок) в нем при подаче на переход внешнего напряжения в прямом направлении. Ток, протекающий через диод и вызывающий излучение, называют током возбуждения $I_{\text{в}}$. Обычно ток возбуждения, равный $I_{\text{в}} = 10 - 30$ мА, вызывается напряжением 2—5 В.

Преобразование электрических импульсов в световые происходит за ничтожно малое время, составляющее десятые доли микросекунды. Поэтому светодиод рассматривается как безынерционный преобразователь электрических сигналов в световые.

Светодиоды создаются на основе материалов, представляющих собой соединения третьей и пятой групп периодической системы элементов и в первую очередь фосфида и арсенида галлия. Фосфидо-галлиевые светодиоды являются излучателями видимого света. Причем

* Когерентность — постоянное во времени соотношение между фазами световых волн, излучаемых одним источником.

в зависимости от соотношения примесей в граничных областях $p-n$ -перехода излучение может быть красного или зеленого света. Арсенидо-галлиевые светодиоды являются приборами инфракрасного излучения. В настоящее время освоен также выпуск светодиодов из карбида кремния — излучателей желтого света.

Светодиоды имеют вольт-амперную характеристику, аналогичную характеристике выпрямительных диодов.

Свойства светодиодов характеризуются яркостью и мощностью излучения. На рис. 33 представлены типичные зависимости яркости B и мощности излучения P от прямого тока через диод.

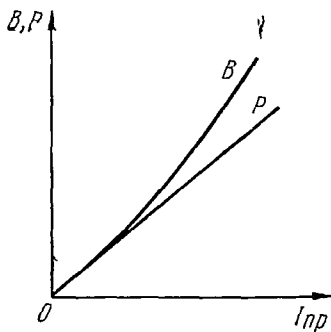


Рис. 33. Типичные зависимости яркости и мощности излучения от прямого тока через светодиод

Светодиоды находят применение в качестве модуляторов световых волн (источником световых волн обычно служит мощный лазер с тонко сфокусированным лучом); в качестве индикаторов состояния или положения электронных устройств. Применение светодиодов позволяет создавать световые вычислительные устройства, быстродействие которых в 10—100 раз выше, чем у существующих электронно-вычислительных машин. Наиболее

перспективным является применение светодиодов в качестве составного элемента оптоэлектронных приборов, которые в последние годы осваиваются промышленностью. На основе светодиодов создаются световые матрицы. На плоской поверхности размещается определенное количество светодиодов, при высвечивании которых в определенной комбинации возникает изображение того или иного цифрового, буквенного или другого знака. Необходимая световая комбинация создается с помощью диодного дешифратора, преобразующего входные сигналы, поступающие в двоичном коде.

Световые матрицы находят все большее применение в вычислительной технике, авиации, телеметрии и других областях, где требуются быстродействующие малогабаритные цифровые и другие символические индикаторы с малым потреблением энергии.

Лазерные диоды. Полупроводниковый лазерный диод представляет собой кристаллик арсенида галлия размером $0,4 \times 0,4 \times 0,1$ мм с $p-n$ -переходом, который имеет обычную диодную вольт-амперную характеристику. Источником возбуждения электронов лазерного диода является электрический ток, протекающий через $p-n$ -переход. При определенном значении тока, идущего через $p-n$ -переход, диод начинает когерентное излучение высокой интенсивности. Ток, при котором диод начинает излучать, называют током накачки. Основными преимуществами полупроводниковых генераторов когерентного излучения перед рубиновыми и газовыми являются их малые размеры, масса и больший коэффициент полезного действия.

Полупроводниковый лазер работает при интенсивном охлаждении. Для этого лазер помещают в сосуд Дьюара, который заполняют жидким азотом. Величина тока накачки лазера на арсениде галлия 10—200 А. Длительность импульсов тока накачки 0,1—1 мкс. Полупроводниковый лазер вырабатывает световые волны длиной 8430 Å и шириной спектра излучения 30—50 Å (1 Å — ангстрем равен 10^{-7} мм). Лазерные диоды применяют в системах оптической связи, в световых высотомерах, дальномерах и пр.

§ 18. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

В оптоэлектронных приборах реализуется передача электрического сигнала не гальванической связью, как в обычных полупроводниковых приборах, а оптической. Носителями сигнала здесь являются не заряженные электроны, а электрически нейтральные фотоны. Оптическая связь в электронных цепях позволяет осуществить полную электрическую развязку входных и выходных цепей, что дает возможность легко согласовать высоковольтные цепи с низковольтными, высокоомные с низкоомными, высокочастотные с низкочастотными. Кроме того, наличие оптического связующего звена увеличивает помехоустойчивость функциональных электронных цепей.

Фотоны не взаимодействуют между собой в световом потоке, не смешиваются и не рассеиваются. Фотоны не обуславливают появление взаимно мешающих электрических и магнитных полей, являющихся причиной различных паразитных связей в электрических цепях и ог-

раничивающих плотность электронного потока. Эти два обстоятельства позволяют значительно повысить плотность информации в устройствах с применением оптронов. Применение оптронов позволяет передавать сигналы длительностью до 10^{-8} с, что также обуславливает увеличение плотности информации.

Здесь будут рассмотрены только оптроны с так называемой внутренней оптической связью. Схема такого оптрона представлена на рис. 34, а. Слева на схеме — источник света ИС, справа — фотоприемник ФП. Между ними отсутствует электрическая связь. Преобразование входного электрического сигнала ($U_{вх}$; $i_{вх}$) в электриче-

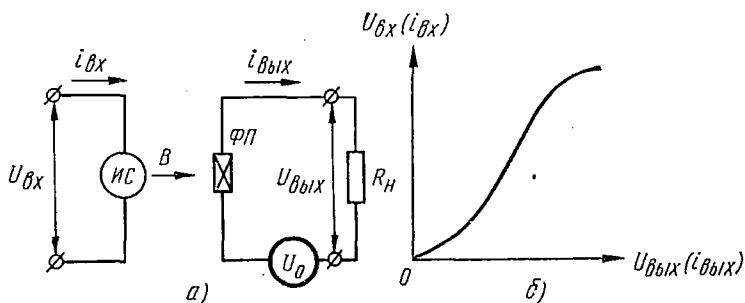


Рис. 34. Оptron с внутренней оптической связью:
а — схема, б — передаточная характеристика

ский выходной сигнал ($U_{вых}$, $i_{вых}$) осуществляется через оптический сигнал. Всякое изменение параметра входного сигнала вызывает изменение мощности излучения светового источника. Это в свою очередь приводит к изменению выходных параметров. Передаточная характеристика оптрона с прямой оптической связью представлена на рис. 34, б. Источник и фотоприемник, образующие оптронную пару, должны обладать свойствами, обеспечивающими их совместимость в работе. В частности, их световые диапазоны должны совпадать хотя бы частично.

Принципиально можно использовать любые источники света, мощность излучения которых может управляться в широких пределах в зависимости от протекающего через них тока, от приложенного напряжения. Применяются накаливаемые, газоразрядные и люминесцентные источники света. Но наибольшее распространение в качестве источников света получили светодиоды.

В качестве фотоприемников в настоящее время наибольшее распространение получили фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры.

Резисторный оптрон является наиболее простым и дешевым. Он применяется в тех случаях, когда не требуется высокое быстродействие схемы. Резисторный оптрон обладает высоким выходным сопротивлением (определяемым сопротивлением фоторезистора). Соответственно диодный, транзисторный и тиристорный оптроны имеют выходные параметры, определяемые параметрами фотодиодов, фототранзисторов и фототиристоров. Входные параметры оптронов в каждом из перечисленных случаев определяются выбранным источником света оптоэлектронной пары. Конструктивно элементы оптрона в случае обычного (не интегрального) исполнения заключаются в один загерметизированный непрозрачный корпус, имеющий электрические выводы для подключения к входным и выходным электрическим цепям. Оптроны такой конструкции по размерам чуть больше транзисторов соответствующей мощности (см. рис. 24).

§ 19. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

На современном этапе развития науки и техники все возрастающие требования к миниатюризации изделий электронной техники привели к созданию интегральных полупроводниковых схем.

Интегральная схема представляет собой функциональный блок или часть его, все компоненты которого (диоды, транзисторы, резисторы, конденсаторы) изготовлены внутри или на наружной поверхности общей пластины кремния. Соединения между компонентами в пределах пластины осуществляются посредством металлизированных проводников, наносимых на пластину напылением с помощью маски. Каждый из компонентов неотделим от схемы; механически он представляет с ней единое целое. Такую схему принято еще называть *монолитной* интегральной схемой в отличие от *гибридной* интегральной схемы, в которой отдельные компоненты крепятся на непроводящей подложке и соединяются между собой либо проволочными перемычками, либо металлизированными проводниками. Компоненты гибридной схемы могут представлять собой отдельные негерметизированные (бескорпусные) дискретные элементы: тран-

зисторы, диоды, резисторы, конденсаторы, а также отдельные элементы, выполненные по монолитной схеме.

Пластина интегральной схемы заключается в герметичный корпус, в котором имеются выводы в виде электрических проводников. Количество выводов определяется количеством входов и выходов схемы, а также количеством цепей, к которым необходима подача питания от внешних источников.

Интегральные схемы применяются там, где требуется микроминиатюризация в сочетании с высокой надежностью оборудования: в авиации, космической технике, малогабаритных вычислительных машинах, миниатюрной бытовой радиоаппаратуре.

§ 20. КОНСТРУКЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Основой любого полупроводникового прибора, как известно, является кусочек полупроводникового материала (именуемый кристаллом) с образованными на нем $p-n$ -переходами. Для исключения воздействия окружающей среды и условий эксплуатации (температура, влажность, удары и т. д.) прибор помещается в металлический герметичный корпус, в котором через изоляторы делаются электрические выводы в виде металлических проводников (см. рис. 17, 30, 32). Обычно корпус соединен своей внутренней поверхностью с одним из электродов прибора (например, с базой или коллектором).

Если прибор предназначен для работы с теплоотводящими радиаторами (например, транзисторы П210, П213—217), то наружная поверхность их основания делается шлифованной, а сам прибор снабжается крепежным приспособлением, обеспечивающим надежное прилегание поверхности прибора к поверхности радиатора.

В последнее время некоторые полупроводниковые приборы малой мощности изготавливают в пластмассовом корпусе. Технология производства таких приборов более проста и экономична.

Некоторые типы приборов изготавливаются в бескорпусном варианте. При этом кристалл прибора погружается в жидкую компаундную массу, которая затем застывает и образует прочное покрытие. Такую конструкцию имеют, например, светодиоды, предназначенные для создания световых матриц.

Существуют полупроводниковые приборы специального исполнения, например тропического. Тропический прибор имеет ту же конструкцию, что и обычный, только корпус его покрыт специальным лаком, устойчивым против воздействия плесневых грибков в условиях повышенной влажности.

В настоящее время конструкции многих типов приборов создаются с учетом рекомендаций Международной электротехнической комиссии (МЭК). Цель этих рекомендаций — унификация конструкций однотипных приборов, выпускаемых различными странами, для обеспечения их механической взаимозаменяемости. Принятие рекомендаций МЭК обеспечивает отечественной электронной промышленности хороший сбыт приборов на мировом рынке, так как гарантирует конструкторам механическую взаимозаменяемость с приборами, получаемыми от других стран.

Контрольные вопросы

1. Какие приборы называются полупроводниковыми?
2. Что такое проводимость полупроводникового материала? Укажите типы проводимости.
3. Что представляет собой электронно-дырочный переход?
4. Как классифицируются полупроводниковые приборы?
5. Какой прибор называется полупроводниковым диодом? Начертите типовые вольт-амперные характеристики диода.
6. Какой прибор называется транзистором?
7. Каково назначение фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов и фототиристоров?
8. Каково назначение светодиодов и лазерных диодов?
9. Что такое оптрон и каково его назначение?

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

§ 21. ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ПРОЦЕССУ

Технологический процесс изготовления полупроводниковых приборов должен обеспечивать получение заданных свойств приборов разных типов. В связи с этим к нему предъявляется ряд серьезных требований.

В первую очередь — это необходимость обеспечения заданных электрических свойств. Известно, например, что для выпрямительных диодов нужно, чтобы сопротивление в прямом направлении и значение обратного тока были минимальны, а обратное напряжение — максимально. Этим же свойством должен обладать коллекторный переход транзистора. Эмиттерный же переход в транзисторах должен обеспечивать большой коэффициент инжекции, причем высокое его значение должно сохраняться при возможно больших значениях тока.

Другим требованием является необходимость обеспечения заданной геометрии перехода. Так, для диодов большой мощности желательно получение плоского перехода, расположенного параллельно поверхности кристалла на минимальном расстоянии от низкоомной части кристалла. В маломощном транзисторе должно выполняться требование параллельности коллекторного и эмиттерного переходов, причем расстояние между ними должно быть минимальным.

Технологический процесс должен обеспечивать достаточную механическую прочность приборов во всем диапазоне рабочих температур, а также в условиях резких колебаний окружающей температуры.

При создании полупроводниковых приборов важно, чтобы полученные электрические свойства переходов, а также достигнутая механическая прочность приборов сохранялись во времени. Это свойство приборов — отсутствие так называемой деградации — должно гарантироваться применяемым технологическим процессом.

Создание приборов предусматривает изготовление прочных выводов от электродов. Серьезность этого требования настолько велика, что низкое качество выводов приводит к отказу от выбранного варианта технологии, очень удачного во всех других отношениях.

Следует учитывать еще два неперемных требования к технологическому процессу: воспроизводимость и управляемость процессом. Воспроизводимость процесса при достаточно высоком проценте выхода годных приборов позволяет повторять получаемые параметры прибора при сохранении параметров технологического процесса. Управляемость процессом обеспечивает возможность направленного получения различных групп каждого типа приборов посредством регулирования параметров технологического процесса.

Для выполнения всех указанных требований разработано большое число технологических методов создания полупроводниковых структур, из которых рассмотрим основные, наиболее часто применяемые методы: выращивание из расплава, сплавление, диффузия, эпитаксиальное осаждение, точечно-контактный, электрохимический.

Обычно на практике любой метод получения переходов представляет собой разновидность какого-либо из этих основных методов или сводится к их комбинации.

В заключение необходимо отметить, что в основном на качество, параметры прибора, выход годных приборов влияют три главных этапа в общей технологической цепи производства полупроводникового прибора: создание $p-n$ -перехода, изготовление омических контактов и присоединение выводов. В дальнейшем эти три этапа будут рассмотрены более подробно.

§ 22. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ $p-n$ -ПЕРЕХОДОВ

Метод выращивания из расплава. Этот метод позволяет получать высоковольтные $p-n$ -переходы непосредственно в слитке. Способ состоит в том, что из расплавленного слитка полупроводника в атмосфере инертного газа вытягивают специальной вращающейся затравкой новый слиток, в котором образуется $p-n$ -переход.

Образование $p-n$ -перехода происходит следующим образом. Из расплавленного слитка с проводимостью p -типа и высоким удельным сопротивлением вытягивают монокристалл*. Затем в расплав вводят такое количество легирующей примеси, дающей проводимость n -типа,

* Монокристалл — это твердое вещество с упорядоченной структурой и металлической решеткой, характерной для данного вещества. Расположение атомов или молекул в монокристалле по всему объему строго закономерно.

чтобы проводимость растущего монокристалла изменила знак и стала возможно большей. Известно, что скорость перемешивания в расплаве значительно выше скорости выращивания, так что изменение проводимости происходит в кристалле очень резко.

Метод выращивания из расплава $p-n$ -переходов не нашел широкого применения из-за больших технологических трудностей. Необходимы очень чистый исходный кремний, сошлифовка части кремния с проводимостью p -типа для доведения толщины оставшейся части до 200—400 мкм, что достаточно сложно из-за кривизны $p-n$ -перехода, получаемого в процессе вытягивания (рис. 35).

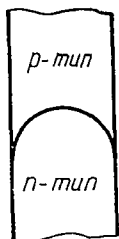


Рис. 35. Форма $p-n$ -перехода при выращивании структуры вытягиванием из расплава

Поочередно меняя в расплаве примеси донорные на акцепторные, можно вырастить кристалл, содержащий большое число чередующихся областей n - и p -типа. Однако получение однородного распределения примеси в выращиваемом слитке настолько сложно, что более одного-двух переходов получить не удалось, т. е. таким способом более одной диодной или транзисторной структуры не получают.

Таким образом, применение метода выращивания из расплава приводит к большому расходу кремния, т. е. к низкой экономичности процесса.

Следует заметить, что параметры приборов с переходами, изготовленными выращиванием из расплава, обычно уступают параметрам таких же приборов, изготовленных другими методами, кроме приборов с большими обратными напряжениями. Для таких приборов метод выращивания из расплава позволил получить наилучшие результаты.

Сплавной метод. $P-n$ -переход по описываемому методу получается сплавлением, т. е. образованием жидкого раствора при нагреве двух твердых материалов, находящихся в контакте друг с другом, с последующей рекристаллизацией. Обычно это делается следующим образом. На пластину I кремния n -типа (рис. 36) кладется заготовка $З$ из электродного материала*, являю-

* Электродным материалом называют материал, в результате сплавления с которым образуются $p-n$ -переход и электрод полупроводникового прибора.

щегося акцептором (или донором, если используется кремниевая заготовка p -типа). Затем пластина кремния с заготовкой нагревается в вакууме или в заданной газовой атмосфере, при этом происходит смачивание поверхности пластин электродным материалом и растворение в нем некоторого количества кремния. В качестве электродного материала могут быть использованы алюминий, бор, галлий, индий, являющиеся для кремния акцепторами.

После выдержки при заданной температуре производится охлаждение, во время которого из расплава выделяется так называемый рекристаллизованный кремний 2, содержащий атомы акцептора. Рекристаллизованный кремний будет иметь дырочную проводимость. Таким образом, получают контакт электронного и дырочного полупроводников, или $p-n$ -переход.

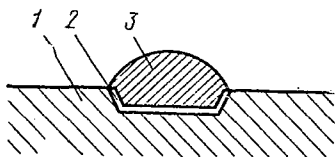


Рис. 36. Образование $p-n$ -перехода методом сплавления:
1 — пластина кремния n -типа, 2 — рекристаллизованный кремний, 3 — электродный материал

Остывшая электродная заготовка приобретает форму, конфигурация которой определяется поверхностным натяжением и силой тяжести, а в случае применения специальных кассет — их конструкцией.

В качестве электродного материала часто используют слой металла, например алюминия, нанесенного на поверхность кремния в вакууме.

Метод диффузии. Данный метод основан на способности атомов одного вещества проникать (диффундировать) в другое. Если концентрация атомов примеси на поверхности полупроводника (рис. 37) равна C_1 , а на глубине Δx от поверхности — C_2 , причем $C_1 > C_2$, то в результате разности концентраций атомы примеси будут проникать в глубь полупроводника. Скорость диффузии зависит от температуры и типа примеси.

Выбрав соответствующий примесный элемент, с помощью диффузии можно изменить тип проводимости исходного материала.

Поверхность, где концентрация продиффундировавших примесных атомов, например акцепторов, равняется концентрации атомов, легирующих исходный полу-

проводник (в данном случае доноров), является электронно-дырочным переходом.

В зависимости от способа введения акцепторных и донорных примесей в полупроводник различают три вида диффузии:

- диффузия из паровой фазы;
- диффузия из поверхностного слоя;
- диффузия из твердой фазы.

Диффузия из паровой фазы может осуществляться в двух вариантах: в замкнутом объеме и в вакууме при

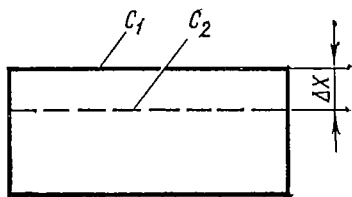


Рис. 37. Распределение концентраций при диффузии

непрерывной откачке. В первом варианте пластины полупроводника и некоторое количество примеси помещают в кварцевую ампулу, которая откачивается до давления 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст. Затем ампулу помещают в печь и выдерживают ее при высокой температуре определенное время. Вследствие

перехода примесного элемента в газовое состояние (паровую фазу) в объеме вскоре установится определенное давление паров примесного элемента. Молекулы пара будут адсорбироваться на всех поверхностях, в том числе и на поверхности пластины, и, если температура достаточно велика, диффундировать в глубь полупроводника.

Во втором варианте диффузия примеси осуществляется в испаряющийся с постоянной скоростью (при установленных температуре свыше 1200°C и вакууме) кремний. Этот вариант диффузии используется для получения диффузионных слоев, распределение примеси в которых не зависит от времени диффузии. Способ диффузии в испаряющийся кремний позволяет получить слои с высокой степенью воспроизводимости даже при не очень точном контроле температуры, а также обеспечивает создание очень чистых поверхностей кремния.

Диффузия из поверхностного слоя осуществляется из слоя примеси, предварительно нанесенного на поверхность полупроводника, при высокой температуре. Считается, что при этом примесь переходит в жидкую фазу, которая вступает во взаимодействие с полупроводником. Такой метод используют для диффузии, например алю-

миния, индия, галлия, которые наносят на пластину полупроводника путем испарения их в вакууме.

Диффузия из твердой фазы — это диффузия из твердого раствора примеси в одной области полупроводника в примыкающую к ней другую область этого же полупроводника (свободную от примеси данного типа).

Диффузионный метод имеет следующие преимущества перед сплавным методом:

возможность управления разностью концентраций примеси в соответствии с требуемым пробивным напряжением (на материале с одним и тем же удельным сопротивлением можно получить различные пробивные напряжения);

исключение возникновения дефектов структуры в области образования $p-n$ -перехода;

возможность получения $p-n$ -перехода на большой глубине от поверхности; это позволяет при значительной толщине пластины полупроводника получить базовый слой толщиной менее 100 мкм;

относительная простота контролирования и хорошая воспроизводимость результатов, так как процесс достаточно длителен.

Основные недостатки метода:

сложность проведения процесса из-за сравнительно высокой температуры и возможности изменения удельного сопротивления кремния, а в германии — даже и типа проводимости;

сложность создания омических контактов.

Точечно-контактный метод. Этот метод применяется при изготовлении точечных полупроводниковых приборов.

К предварительно полированному и протравленному кристаллу германия с проводимостью n -типа подводят и закрепляют в определенной точке заостренный бронзовый электрод, покрытый индием. Затем производят специальную электрообработку контакта металла с кристаллом, так называемую электроформовку. Для этого через контакт пропускают короткий импульс тока (длительностью 0,08—0,1 с) довольно большой величины (2—3 А).

Поскольку контакт точечный, то в нем получается большая плотность тока; место контакта разогревается до температуры, превосходящей температуру плавления материала электрода. Индий с электрода легко диффун-

дирует в глубь германия, образуя область германия с проводимостью p -типа, поскольку индий в германии является акцептором (рис. 38). На границе этой области и исходного германия образуется $p-n$ -переход.

Основными преимуществами точечно-контактного метода являются простота технологического оборудования и, как следствие, низкая стоимость полупроводниковых приборов, изготовленных этим методом.

Недостатки метода:

низкая механическая прочность $p-n$ -перехода; сильное влияние на параметры приборов состояния поверхности кристалла и контактируемой иглы, а также сила давления иглы на кристалл;

значительная нестабильность электрических параметров;

значительный разброс параметров.

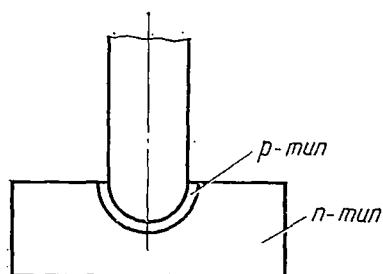


Рис. 38. Образование $p-n$ -перехода точечно-контактным методом

Точечно-контактный метод сейчас применяется при производстве некоторых типов маломощных диодов, например Д9, Д10, Д101, Д107 и др.

Метод эпитаксиального выращивания. Так называют метод изготовления полупроводниковых структур осаждением эпитаксиальных слоев на подложку из полупроводникового материала. Слово «эпитаксиальный» образовано из двух греческих слов, означающих «над» и «располагать». Для образования $p-n$ -перехода тип проводимости осаждаемой пленки должен быть противоположен типу проводимости подложки. Если осаждается пленка кремния, то атомы свободного кремния и легирующих примесей, попадая на монокристаллическую подложку, перемещаются по поверхности до тех пор, пока не займут правильное положение в кристаллической решетке; отдельные узлы решетки в эпитаксиальной пленке оказываются занятыми атомами примеси. Осажденная пленка считается эпитаксиальной, если оси ее кристаллической решетки являются продолжением осей решетки подложки. Эпитаксиальный процесс хорошо поддается управлению и контролю. Осажденные пленки

отличаются совершенством кристаллической структуры и дают возможность контроля толщины ее и удельного сопротивления.

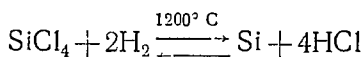
При эпитаксиальной технологии можно изготавливать приборы с очень тонкой базой, что является необходимым условием для получения высокочастотных транзисторов, быстродействующих импульсных и переключающих диодов.

Применение эпитаксиальных пленок в какой-то мере позволит решить главное противоречие в создании мощных высоковольтных приборов. Так, например, для обеспечения прохождения большого тока через полупроводниковый прибор необходимо применять низкоомный полупроводниковый материал, а для обеспечения высоких пробивных напряжений — высокоомный полупроводниковый материал. Эпитаксиальная технология позволяет создавать двухслойные структуры на подложке из полупроводникового материала с малым удельным сопротивлением. Так, для диодной структуры падение напряжения в прямом направлении определяется низкоомной подложкой, а пробивное напряжение — высокоомной эпитаксиальной пленкой. Возможно также создание двухслойного коллектора, состоящего из материала с малым удельным сопротивлением и пленки с высоким удельным сопротивлением.

Основной сложностью в эпитаксиальной технологии является получение эпитаксиальной пленки, выдерживающей большие токовые нагрузки. Решение этой проблемы позволит создавать высокочастотные импульсные полупроводниковые приборы с большими пробивными напряжениями.

В настоящее время применяется технология осаждения пленок из газообразной и жидкой фаз.

Наиболее широко используется один из видов газовой эпитаксии — хлоридный. В основе этого способа, приводящего к осаждению атомов кремния на подложку, лежит реакция восстановления тетрахлорида кремния водородом



Для введения в растущую эпитаксиальную пленку примеси производят разложение фосфорного водорода.

Схема установки для выращивания пленки описываемым методом приведена на рис. 39.

В кварцевую трубу 4, нагреваемую индуктором 3, устанавливается лодочка с расположенными в ней кремниевыми подложками. Испарители 2 и 5, содержащие тетрахлорид кремния и фосфорный водород, вначале охлаждаются жидким азотом для снижения давления паров. Перед началом процесса система продувается азотом путем открывания соответствующих вентилей 1 для

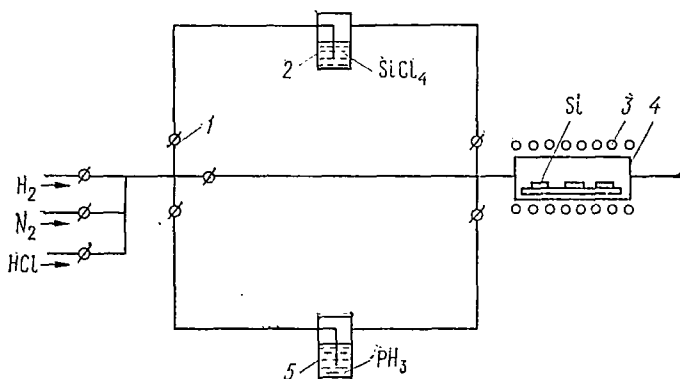


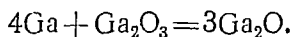
Рис. 39. Схема установки для выращивания эпитаксиальной пленки хлоридным методом

очистки объема от воздуха. После нагрева подложки до 1200°C водород захватывает пары подогретых тетрахлорида кремния и фосфорного водорода и переносит их в кварцевую трубу. В течение часа происходит наращивание эпитаксиальной пленки толщиной около 25 мкм.

В последнее время для осаждения эпитаксиальных слоев находит применение метод термического испарения в вакууме. Этот метод обеспечивает чистоту рабочего пространства, высокую скорость напыления, а значит, уменьшение диффузии примесей из подложек в пленку, возможность поочередного напыления отдельных элементов прибора, например эмиттера и базы. Вместе с тем метод достаточно сложен, требуется аппаратура с глубоким вакуумом, пленки имеют много структурных дефектов, трудно получить пленки малого сопротивления.

Кроме того, начал широко применяться метод получения эпитаксиальных слоев жидкофазным методом. В качестве подложки по этому методу чаще всего используют фосфид галлия, арсенид галлия, соединение арсенид галлия — арсенид алюминия. Методом жидкостной эпитаксии изготавливаются полупроводниковые когерентные и некогерентные излучающие диоды.

Рассмотрим применяющийся в настоящее время метод жидкостной эпитаксии на фосфиде галлия для выращивания $p-n$ -структур с красным свечением. Известно, что красное излучение обусловлено одновременным присутствием цинка и кислорода в p -типе. Источником кислорода является смесь галлия и трехокси галлия. При нагревании металлический галлий восстанавливает трехокись галлия до субокиси:



Процесс осуществляется следующим образом. В ампулу закладываются монокристаллические пластины фосфида галлия n -типа, галлий, трехокись галлия, цинк. Затем ампула откачивается до разряжения около $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., отпаивается, устанавливается в печь и нагревается до температуры 950°C . В объеме ампулы создается давление паров субокиси галлия, полученной по приведенной выше реакции. При температуре 950°C жидкий галлий растворяет слой фосфида галлия. Полученный жидкий раствор легируется цинком и кислородом. Эпитаксиальное наращивание осуществляется в результате охлаждения всей системы со скоростью $2-3^\circ\text{C}$ в минуту. Описанный процесс может быть проведен в любой электропечи, обеспечивающей поддержание температуры с достаточной точностью и монотонное снижение температуры с заданной скоростью.

§ 23. ПОЛУЧЕНИЕ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

От каждой активной области $p-n$ -перехода (эмиттера, коллектора, базы, управляющего электрода) должен быть сделан электрический вывод, соединяющий ее с внешними выводами прибора.

Если вывод нужно присоединить к металлическому электроду, образовавшемуся на поверхности полупроводника в результате предшествующего процесса создания

p — n -перехода, присоединение производят пайкой или другим способом соединения металлов.

При диффузионной технологии, технологии вытягивания из расплава и некоторых других видах технологии на поверхности полупроводника не образуется слоя металла. В этом случае приходится производить дополнительную операцию по созданию омического (невыпрямляющего) контакта. Название «омический» означает, что такой контакт подчиняется закону Ома, т. е. сопротивление его — величина постоянная (а вольт-амперная характеристика линейна). Название «невыпрямляющий» означает, что контакт не обладает выпрямляющим свойством, т. е. проводит ток в обоих направлениях.

Величина сопротивления омического контакта должна быть как можно меньшей, чтобы не вызывать излишних потерь мощности и снижения эффективности полупроводникового прибора.

Омический контакт не должен быть способен к инжекции (испусканию) неосновных носителей, так как это может существенно ухудшить работу прибора. Если, например, инжектируемые неосновные носители достигнут p — n -перехода, это приведет к заметному увеличению обратного тока прибора. Омический контакт должен обладать достаточной механической прочностью и хорошей теплопроводностью.

На практике контакты не в полной мере обладают всеми этими качествами, да и не всегда в этом есть необходимость. Нужно только, чтобы отклонение от этих качеств не влияло существенно на работу прибора. Например, в маломощных приборах контакт должен обладать линейностью только до определенной величины тока. Следует учитывать, что для различных типов приборов методы получения контактов различны, но во всех случаях основной частью электрического контакта с электродом любого прибора является контакт металл — полупроводник.

Для создания контакта металл — полупроводник используются следующие методы: сплавление, электролитическое или химическое осаждение металла из раствора, напыление металла в вакууме, термокомпрессионная сварка, простой механический контакт под давлением (прижимной контакт).

Основным методом является сплавление. В случае

осаждения пленок последние почти всегда подвергаются вжиганию, иными словами, вплавлению.

Термокомпрессионный метод состоит в том, что к предварительно нагретому до температуры $200\text{—}300^\circ\text{C}$ кристаллу прижимается нагретой иглой проволочка из золота, алюминия или серебра толщиной $20\text{—}100$ мкм с давлением $400\text{—}700$ кг/см². Проволочка расплющится, и после выдержки в течение нескольких секунд между ней и кремнием произойдет образование прочного контакта с хорошими электрическими свойствами.

Применяемые при этом усилия недостаточны для того, чтобы повредить поверхность кремния. При таком способе не применяются сплавление, вжигание пленок, а поэтому заметного нарушения кристаллической решетки кремния не происходит. Это позволяет использовать термокомпрессию для создания контактов с тонкими диффузионными слоями.

Недостатком термокомпрессионного метода являются очень высокие требования к чистоте поверхности и необходимость поддержания температуры с точностью 10°C .

§ 24. ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

В связи с бурным развитием в настоящее время радиоэлектроники к полупроводниковой технике были предъявлены серьезные требования, касающиеся как увеличения объема производства полупроводниковых приборов, так и улучшения их параметров и повышения надежности. А это в свою очередь тесно связано с разработкой и усовершенствованием технологических приемов изготовления приборов, применением прогрессивных методов создания полупроводниковых структур.

Наиболее перспективными в последнее время являются планарно-эпитаксиальная и планарно-диффузионная технологии, строящиеся на сочетании такого технологического приема, как фотолитография, с передовыми методами создания $p-n$ -переходов: эпитаксией или диффузией.

Прежде чем перейти к описанию планарной технологии, рассмотрим широко применяемую в полупроводниковой технике обработку пластин методом фотолитографии.

Обработка пластин методом фотолитографии. Современная технология производства некоторых типов полупроводниковых приборов требует создания отдельных $p-n$ -переходов на общей пластине полупроводника. Кроме того, для производства транзисторов и управляемых диодов требуется получение многослойных структур. Эти задачи решаются вытравливанием части полупроводникового материала по желаемому геометрическому профилю, для чего используют метод фотолитографии. С помощью фотолитографической обработки можно производить металлизацию полупроводниковой пластины по любой, заранее заданной конфигурации, а также осуществлять локальную (местную) диффузию примесей или эпитаксию.

Все операции, выполняемые с помощью фотолитографического метода, осуществляются с высокой точностью и хорошей воспроизводимостью (повторяемостью от образца к образцу). Фотолитографическая обработка в последние годы находит самое широкое применение на отечественных предприятиях.

На рис. 40 показана часть пластины 1 полупроводникового материала после травления зоны 2. Если пластину разрезать на кристаллы по линиям 4, то внутри каждого образовавшегося кристалла получим рабочую зону 3 с заранее образованными коллекторным 5 и эмиттерным 6 $p-n$ -переходами, а также контактами эмиттера и базы. Электрические параметры каждого $p-n$ -перехода можно измерять прямо на пластине, так как еще до разрезки кристаллы изолированы друг от друга зонами травления.

Сущность метода фотолитографии состоит в следующем. Пластины полупроводника, предварительно защищенную окисной пленкой, покрывают жидкой светочувствительной эмульсией (фоторезистом). После высыхания эмульсии образуется плотная, прочная пленка. Затем производят экспонирование (засвечивание) образовавшейся пленки через специальный шаблон, позволяющий получить только белые и черные тона. Засвеченные участки светочувствительной пленки приобретают свойство нерастворимости в характерных для нее растворителях. Свойство растворимости затемненных участков сохраняется. Экспонированную пленку (вместе с пластиной) проявляют. При проявлении участки, не подвергшиеся воздействию света, растворяются, обна-

жая поверхность пластины. После проявления оставшуюся часть пленки закрепляют (задубливают) в специальном растворе. Для повышения кислотоустойчивости пленку выдерживают некоторое время при высокой температуре. При этом происходит реакция полимеризации. Обработанные таким образом пластины готовы для

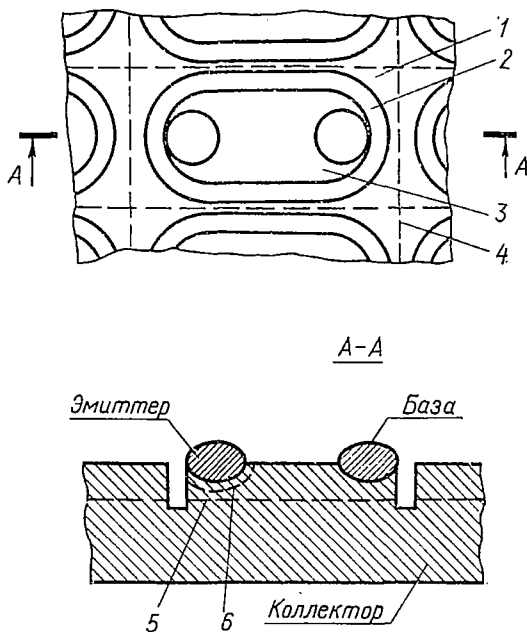


Рис. 40. Часть пластины с $p-n$ -переходом после обработки методом фотолитографии:

1 — пластина, 2 — зона травления, 3 — рабочая зона, 4 — линия реза, 5 — коллекторный $p-n$ -переход, 6 — эмиттерный $p-n$ -переход

проведения основных технологических операций — травления и металлизации. В процессе травления вытравливается только та часть полупроводниковой пластины, которая не защищена пленкой фоторезиста. Задавая время травления, получают нужную глубину зоны травления 2. После окончания процесса травления пленку с поверхности пластины удаляют специальным растворителем.

Все описываемые далее виды технологий осуществляются с помощью фотолитографии.

Планарная технология. Этот метод создания полупроводниковых приборов получил такое название потому, что диодный и транзисторный переходы структур, изготовленных данным методом, а также омические контакты выводятся на одну плоскость полупроводниковой пластины. Заготовленную пластину подвергают термообработке в атмосфере кислорода. При этом на пластине образуется слой непроводящей оксидной пленки (двуокиси кремния SiO_2) толщиной 1—1,5 мкм. Затем с помощью фотолитографии и последующего селективного травления в плавиковой кислоте удаляют оксидную пленку. После этой операции получают ряд участков, не защищенных оксидной пленкой, и диффузионным или эпитаксиальным методами образуют на незащищенной поверхности базовый $p-n$ -переход. Эмиттерную область создают аналогично с помощью фотолитографии.

Основным достоинством планарной технологии является то, что области базы и эмиттера в местах выхода их из объема кремния покрыты толстым слоем оксидной пленки. Защитная оксидная пленка существенно ослабляет воздействие окружающей среды. Это позволяет создавать приборы со стабильными во времени электрическими параметрами и малым разбросом их. Планарная технология обеспечивает также минимальные утечки тока в структуре, поэтому планарные транзисторы имеют высокие коэффициенты усиления по току.

Планарные структуры изготавливают на общей пластине исходного материала, припаивают к ним эмиттерные и базовые выводы, после чего пластину разрезают и кристаллы монтируют в корпусах общезвестными способами. Последнее обстоятельство значительно облегчает технологический процесс.

В сочетании с лучшими методами создания полупроводниковых структур описанный технологический прием позволяет получать приборы высокого качества. Так, в настоящее время все большее применение находит планарно-эпитаксиальная технология.

Меза-технология. Как правило, полупроводниковые структуры с $p-n$ -переходом (называемые кристаллом) имеют правильную геометрическую форму: параллелепипеда, куба, цилиндра; $p-n$ -переходы располагаются в них параллельно одной из плоскостей. Размер $p-n$ -перехода равен размеру основания структуры. Применение меза-технологии позволяет получить структуру

(рис. 41) с малым размером $p-n$ -перехода без изменения размера основания структуры. Такую структуру принято называть меза-структурой («меза» по-испански — плато, стол). Ее получают вытравливанием части полупроводникового материала с $p-n$ -переходом.

Переход небольшого размера имеет малую собственную емкость, что позволяет создавать высокочастотные приборы. Растянутый по толщине в местах выхода на поверхность (линия $a-b$ на рис. 41) $p-n$ -переход позволяет получить приборы с большим обратным напряжением (высоковольтные).

Что касается излучающих диодов, то для них переход небольшого размера позволяет получить большую плотность токов и соответственно большую яркость излучения.

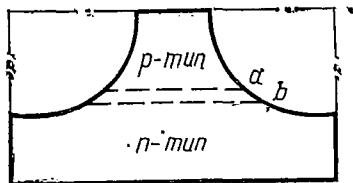


Рис. 41. Схема получения меза-структуры

§ 25. МЕТОДЫ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ВЫВОДОВ

Операция присоединения выводов служит для соединения кристаллов с внешними выводами кристаллодержателей. В связи с этим к качеству присоединения выводов предъявляются весьма высокие требования:

соединение должно иметь минимальное омическое сопротивление;

технологические режимы присоединения не должны повреждать детали прибора;

прочность соединения не должна быть ниже прочности соединяемых деталей;

возможность соединения разнообразных сочетаний материалов;

после проведения операции соединения не должно оставаться материалов, вызывающих коррозию.

В производстве полупроводниковых приборов обычно применяются следующие методы присоединения выводов: термокомпрессия, сварка давлением с косвенным импульсным нагревом, ультразвуковая сварка, контактная точечная сварка.

Термокомпрессия. Этот метод соединения материалов изложен ранее. Следует учитывать, что в этом случае не образуется эвтектика (твердый раствор) из соединяе-

мых материалов, а происходит диффузия свариваемых материалов.

Один из соединяемых материалов должен обладать пластичностью во избежание разрушения соединения из-за остаточных механических напряжений. Температура нагрева свариваемых материалов примерно соответствует температуре отпуска или отжига более пластичного материала.

Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом. При соединении материалов этим методом инструмент кратковременно (0,05—0,1 с) нагревается проходящим по нему током и в месте контакта создается высокая температура. Это позволяет производить приварку выводов из относительно малопластичных материалов. Режимы сварки подбираются с учетом свариваемых материалов. Так, при приварке алюминиевого вывода к алюминиевой пленке, нанесенной на кристалл, температура в зоне контакта должна быть около 400° С, удельные давления составляют 4—8 кГ/мм². Инструмент обычно изготавливается из жаропрочных сталей или из твердых сплавов.

Ультразвуковая сварка. Этот метод обеспечивает соединение металлов в твердом состоянии за счет возбуждения в свариваемых деталях упругих колебаний ультразвуковой частоты при одновременном создании определенного удельного давления. Энергия вибрации при ультразвуковых колебаниях создает в свариваемых деталях напряжения растяжения, сжатия и среза, происходит пластическая деформация в зоне соприкосновения, ультразвуком разгоняются из зоны сварки поверхностные окислы. В результате всех процессов происходит соединение свариваемых материалов. При ультразвуковой сварке температура нагрева в зоне контакта не превышает 30—50% от температуры плавления свариваемых материалов, что позволяет использовать этот метод для соединения чувствительных к нагреву материалов. Недостатком этого метода сварки является то, что один из свариваемых материалов не должен превышать по толщине 3 мм вследствие малой мощности ультразвуковых преобразователей. Кроме того, один из соединяемых материалов должен обладать достаточной пластичностью.

Контактная точечная сварка. Осуществляется за счет нагрева металла в местах наибольшего сопротивления

при прохождении электрического тока и одновременного сжатия соединяемых деталей.

После ознакомления с основными технологическими методами создания $p-n$ -перехода, омических контактов, присоединения выводов перейдем к рассмотрению технологической схемы полупроводникового производства в целом.

§ 26. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Технологический цикл изготовления полупроводниковых приборов — это сложный процесс, включающий в себя большое число операций. Необходимость каждой из операций и их последовательность зависят от конкретного типа прибора и принятой технологии.

На схемах 4 и 5 указаны только основные технологические операции. Рассмотрим кратко назначение некоторых из этих операций.

Ориентация и наклейка слитка. Кремний и германий, предназначенные для производства полупроводниковых приборов, поступают на завод-изготовитель этих приборов в виде слитков диаметром 20—50 мм и длиной 70—140 мм. Кристаллы в слитке расположены по определенному закону так, что их кристаллографические оси (плоскости) имеют одно направление. При ориентации определяют направление кристаллографических осей и отмечают отклонение плоскости торца слитка от требуемой кристаллографической плоскости. Значительные отклонения могут привести к ухудшению параметров приборов. Ориентация слитка необходима для лучшего воспроизведения параметров.

Ориентированный слиток наклеивают на специальное приспособление для резки. Это позволяет резать слиток на пластины с заданным расположением требуемой кристаллографической плоскости относительно плоскости пластины.

Резка слитка на пластины. Наклеенный слиток режут на пластины заданной толщины (0,15—1,0 мм). Пластины являются заготовками для кристаллов* с $p-n$ -переходами.

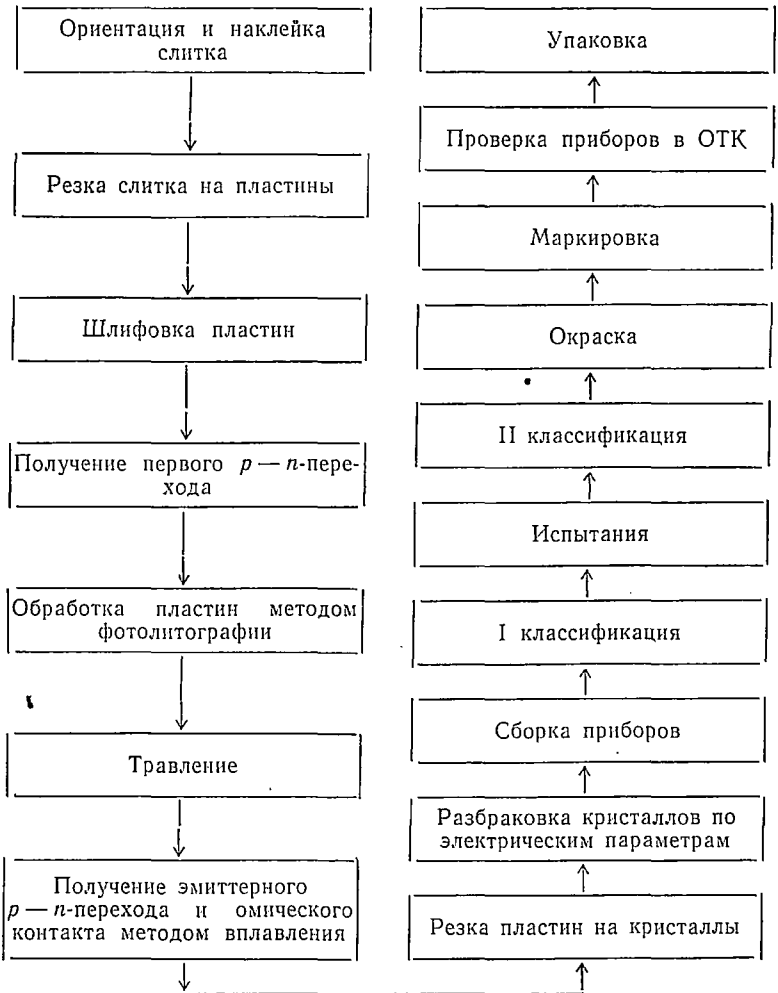
* В этом случае под кристаллом принято понимать пластину с $p-n$ -переходом заданных формы и размеров. Применяется также термин «структура».

Технологическая схема изготовления планарно-эпитаксиальных светодиодов



Шлифовка пластин. Эта операция необходима для того, чтобы довести толщину пластины до заданной величины, одинаковой по всей ее поверхности. Кроме того, при шлифовке устраняют грубые механические пов-

Технологическая схема изготовления диффузионно-сплавных высокочастотных транзисторов



реждения поверхности пластин, возникающие при резке слитка.

Получение $p-n$ -перехода. При этой операции пластины полупроводникового материала подвергаются специальной обработке, в результате которой создается $p-n$ -переход — основа будущего прибора.

Обработка пластин методом фотолитографии. Эта операция производится для создания отдельных $p-n$ -переходов на общей пластине, а также многослойных структур путем вытравливания части полупроводникового материала.

Получение омического контакта. Омические, или невыпрямляющие, контакты служат для присоединений выводов к кристаллу с $p-n$ -переходом. Контакты не должны иметь вентильных свойств, т. е. должны проводить ток в обоих направлениях. Кроме того, контакты должны иметь очень малое сопротивление.

Резка пластин на кристаллы. При этой операции из пластин получают кристаллы заданной формы и размеров. Кристаллы бывают круглой и квадратной формы. Диаметр круга и сторона квадрата в зависимости от типа прибора имеют размер от долей миллиметра до двух десятков миллиметров.

Травление пластин и кристаллов производится для очистки их поверхностей и боковых граней от примесей и окислов путем снятия тонкого слоя материала. Кроме того, назначение этой операции — вытравить часть полупроводникового материала после фотолитографии при производстве некоторых типов приборов.

После механической и химической обработки в случае необходимости можно производить промывку и сушку пластин и кристаллов, а также отбраковку их по внешнему виду.

Защита $p-n$ -перехода кристаллов. Боковые грани кристаллов с открытым $p-n$ -переходом защищают тонкой пленкой эмали или лака для предохранения их от воздействия окружающей среды. Эта операция обеспечивает стабильность параметров $p-n$ -перехода во времени.

Разбраковка кристаллов по электрическим параметрам. При данной операции измеряют основные электрические параметры кристаллов, определяющие качество приборов, для которых эти кристаллы предназначены. Негодные кристаллы отбраковывают. Оценка годности производится по заранее заданным величинам. Годные кристаллы поступают на следующие операции.

Сборка приборов состоит из целого комплекса технологических операций, в результате которых осуществляется конструктивное оформление прибора. Сюда входят такие операции, как припайка выводов к кристал-

лам, припайка кристаллов к кристаллодержателям (изготовление так называемой сборки или заготовки), защита сборок лаком или вазелином, разбраковка сборок по электрическим параметрам и другие операции в зависимости от конкретной серии* изготавливаемых приборов. Процесс сборки заканчивается герметизацией приборов. Герметизация производится в зависимости от серии прибора сваркой (для металлического корпуса прибора) или запайкой (для стеклянного корпуса). Возможны и другие способы герметизации.

Назначение герметизации — защита $p-n$ -перехода от механических повреждений и от воздействия окружающей среды, в которой прибор будет эксплуатироваться.

Классификация приборов. Определяют принадлежность приборов к конкретному типу внутри одной серии измерением их параметров.

Испытания приборов. Испытания включают в себя целый комплекс операций, проводимых с целью определения качества изготовленных приборов. Одни виды испытаний проводятся для всей партии** приборов, другие — только для части приборов.

Подробно процессы измерений и испытаний рассматриваются в гл. VI и VIII.

Маркировка. На корпус прибора наносят условное обозначение, соответствующее его типу, месяц и год выпуска, а также товарный знак завода-изготовителя.

Проверка приборов в ОТК. Проверка осуществляется по специальной программе с целью определения соответствия изготовленных приборов нормам технических условий (ТУ). При проверке производятся механические и климатические испытания приборов.

Упаковка приборов. Приборы со штампом ОТК упаковывают в тару, удобную для отправки потребителям.

* Серией называют группу приборов различных типов, имеющих одинаковое конструктивное исполнение, например транзисторы МП39, МП39А, МП39Б.

** Для того чтобы легче было следить за технологическим процессом, приборы разделены на партии; партия сопровождается маршрутным листом, в котором делается отметка о каждой проведенной операции.

Пластины получают резкой слитка полупроводникового материала, а кристаллы — резкой пластины. В зависимости от принятой технологии кристаллы получают после образования $p-n$ -перехода на пластине или $p-n$ -переход создают уже на кристалле. Кристаллы шлифуют, затем травят, промывают, высушивают и защищают $p-n$ -переход. После этого кристаллы поступают на операцию сборки приборов.

Существуют следующие способы резки пластин на кристаллы (теми же способами режут и слитки на пластины): алмазным диском; полотнами; проволокой; ультразвуком; алмазным резцом; химическим травлением.

Наиболее качественными и распространенными являются способы резки ультразвуком и алмазным резцом.

Ультразвуковая резка производится на специальных станках с возвратно-поступательным движением реза в вертикальной плоскости с ультразвуковой частотой и очень малой амплитудой. Под резец поступает абразивная суспензия. Частицы абразива под воздействием колебаний реза (концентратора) как бы выдалбливают кристалл из пластины. Одновременно вырезается несколько десятков кристаллов по всей поверхности пластины.

Резка алмазным резцом выполняется на высокоточных координатных станках. Такой способ применяется для получения кристаллов из пластины после обработки ее методом фотолитографии. Резка производится с помощью специального оптического устройства, обеспечивающего точную ориентацию реза по площади слитка. Это необходимо потому, что в центре каждого кристалла должен быть образованный ранее $p-n$ -переход. Такой способ резки применяют при производстве транзисторов и переключающих диодов.

После резки слитка полупроводникового материала на пластины обязательной технологической операцией является шлифовка пластин. Шлифовка необходима для создания плоскопараллельных сторон, удаления неровностей, образованных при резке, и получения заданной толщины пластины.

Шлифовка производится с помощью абразивной суспензии (величина зерна абразивного порошка 5—10 мкм) на специальном станке и заключается в следу-

ющем. На стеклянный шлифовальный круг 5 (рис. 42) наливают суспензию 4. На суспензию кладут пластины 3, а поверх них — форму 2 с грузом 1.

При вращении шлифовального круга или формы с пластинами абразивная суспензия взаимодействует и с полупроводником, и со стеклом. Зерна абразива при этом одним из своих ребер увязают в стекле как в материале более вязком, а другим воздействуют на поверхность полупроводниковой пластины, разрушая ее. Таким образом происходит постепенное выравнивание поверхности пластины.

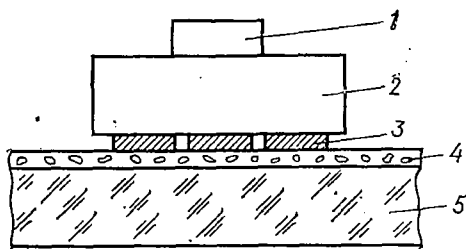


Рис. 42. Простейшая схема шлифовки пластин:

1 — груз, 2 — специальная форма, 3 — шлифуемые пластины, 4 — суспензия, 5 — шлифовальный круг

Защита поверхности $p-n$ -перехода от воздействия окружающей среды необходима для обеспечения стабильности параметров прибора.

Существует много способов защиты. Основные из них следующие:

- покрытие лаком;
- окисление — создание на поверхности кремния двуокси кремния;
- силанирование — создание кремнийорганической полимерной пленки;
- защита легкоплавкими стеклами — «впаивание» стекла в кристалл;
- гидрофобизация — обработка в жидкостях или парах, придающих кристаллу гидрофобные (водоотталкивающие) свойства.

Процесс сборки входит в общий технологический процесс и объединяет в себе ряд операций. Рассмотрим его на примере светодиодов из фосфида галлия. Конструкция прибора приведена на рис. 43. Технологический процесс изготовления приборов этого типа и порядок технологических операций примерно одинаковы для всех светодиодов.

Сборка производится на поточно-механизированной конвейерной линии.

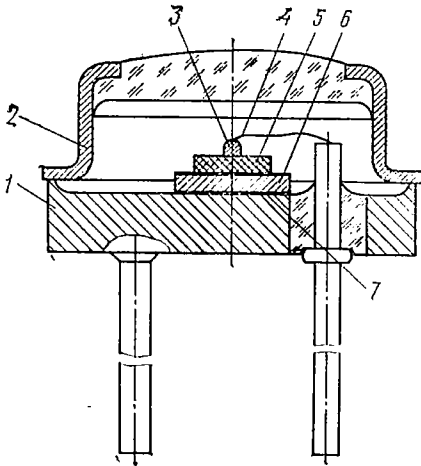


Рис. 43. Конструкция светодиода из фосфида галлия:

1 — кристаллодержатель, 2 — крышка, 3 — верхний электрод, 4 — вывод, 5 — кристалл, 6 — нижний омический контакт, 7 — припойная прокладка

Операции сборки выполняются на монтажных столах. Перемещение собираемого прибора от одного рабочего места к другому производится с помощью непрерывной транспортной ленты, движущейся вдоль столов.

На сборочный конвейер поступает кристалл 5 с $p-n$ -переходом, изготовленным по эпитаксиальной технологии, и омическими контактами, выполненными планарно-диффузионными методами. Далее сборка диода производится принципиально по общеприня-

той схеме производства диодов.

Контроль кристаллов. Кристаллы с $p-n$ -структурой и омическими контактами поступают на рабочее место, где с помощью специального стенда производится разбраковка кристаллов по свечению и прямому падению напряжения. Специальным приспособлением (штеккером) с вакуумной «присоской» вынимают кристалл из кассеты и кладут на измерительную площадку. При пропускании тока через кристалл последний начинает светиться, а по измерительному прибору контролируется прямое падение напряжения. Визуально, методом сравнения с

эталонным светодиодом отбраковываются несветящиеся и слабосветящиеся кристаллы. По показаниям вольтметра отбраковываются кристаллы с высоким падением напряжения.

Сборка кассет для припайки кристалла к кристаллодержателю. Для проведения этой операции на рабочем месте поступают кристаллодержатели 1, припойные прокладки 7 и специальные кассеты, состоящие из двух частей: основания и крышки с грузиками.

Припойные прокладки и кристаллы закладываются в ячейки основания, а сверху устанавливается крышка с грузиками, которые прижимают кристаллы к припойным прокладкам и кристаллодержателям. Кристаллодержатели имеют в центре углубления, по которым центрируются кристаллы.

Припайка кристалла к кристаллодержателю. Собранная кассета поступает в конвейерную водородную печь. Для этого ее устанавливают в приемной части печи на металлическую конвейерную ленту, перемещающуюся в печи со скоростью около 80 мм/мин. Температура в печи 350° С. Под действием высокой температуры припойные прокладки расплавляются. На выходе из печи припой застывает и кристалл прочно прикрепляется к кристаллодержателю (*n*-стороной).

Приварка вывода. Приварка вывода 4 осуществляется на специальных установках микросварки. В качестве вывода используется золотая проволока диаметром 50 мкм. С помощью манипулятора золотая проволока подводится к верхнему омическому контакту, прижимается к нему специальным инструментом — иглой, которая, кратковременно разогреваясь, приплавляет проволоку к кристаллу.

Таким же образом второй конец золотой проволоки приваривается к внешнему выводу кристаллодержателя. Полуфабрикат на этой стадии технологического процесса сборки называется «арматурой собранной», или заготовкой.

Контроль заготовки. Эта операция осуществляется аналогично операции «контроль кристаллов» на том же стенде.

Герметизация. Операция герметизации состоит в приварке крышки 2 прибора к кристаллодержателю методом точечной электросварки. Для этого обычно используются типовые сварочные машины. Заготовку устанавливают

ют в нижний электрод машины. Затем на кристаллодержатель кладут крышку прибора, предварительно сцентрировав ее по кристаллодержателю специальной центрирующей втулкой. В зону сварки непрерывно подается сухой очищенный инертный газ (аргон). При нажатии на педаль сварочной машины верхний электрод опускается и происходит сварка крышки с кристаллодержателем.

Антикоррозийная защита. Собранный прибор далее направляется на операцию антикоррозийной защиты корпуса, которая состоит в нанесении гальваническим методом покрытия сплавом олово — висмут.

§ 29. СБОРКА ДИФФУЗИОННО-СПЛАВНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Процесс сборки рассмотрим на примере германиевых высокочастотных транзисторов малой мощности. Конструкция транзисторов приведена на рис. 44.

Сборка производится на комплекте технологического оборудования, образующем поточную линию.

На линию сборки из вспомогательных цехов предприятия на соответствующие рабочие места поступают: кристаллы с $p-n$ -переходами, базовые и эмиттерные выводы, кристаллодержатели, основания и крышки корпусов.

Припайка кристалла к кристаллодержателю. В шкафдр пайки поступают предварительно проверенный по вольт-амперной характеристике кристалл *12* и луженый кристаллодержатель *1*. Кристалл имеет форму прямоугольника со сторонами длиной около 1 мм. Сам $p-n$ -переход будущего прибора расположен в середине кристалла (см. рис. 40). На его поверхности имеются два контакта (в виде точек) — от базы и эмиттера.

Кристаллодержатель укладывают в металлическую кассету, на него кладут припойную прокладку *13* и сверху — кристалл *12*. Все это закрепляют и устанавливают на транспортерную ленту печи, в которой производится пайка.

Пайка эмиттерного и базового выводов. Кристаллодержатель с кристаллом кладут длинной стороной на специальный нагреватель. Затем к контактам базы и эмиттера подводят поочередно отрезки золоченой проволоки с оловянным шариком на конце. После расплавления олова нагреватель отключают. При застывании олова

образуются надежные контакты (9 и 11) выводов базы и эмиттера.

Приварка вывода к кристаллодержателю. Основание транзистора 7 в сборе с внешними выводами закрепляют в приспособлении электросварочной установки. Затем присоединяют кристаллодержатель и производят сварку обычным способом.

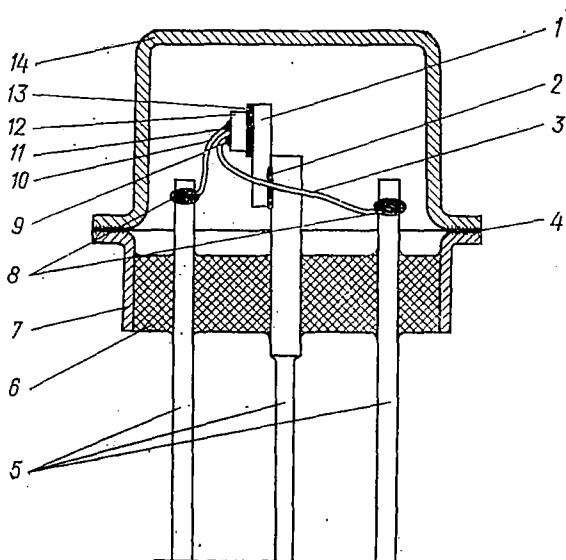


Рис. 44. Конструкция высокочастотного транзистора малой мощности:

1 — кристаллодержатель, 2 и 8 — места сварки, 3 — вывод эмиттера, 4 — сварной шов, 5 — внешние выводы, 6 — изолятор, 7 — основание, 9 — контакт эмиттера, 10 — вывод базы, 11 — контакт базы, 12 — кристалл, 13 — припойная прокладка, 14 — крышка корпуса

Приварка внутренних выводов к внешним. Эта операция выполняется аналогично предыдущей.

Травление заготовки. Заготовку протравливают в смеси кислот для удаления всех загрязнений, появившихся при сварочных операциях. После травления заготовки промывают и сушат.

Первая защита. Кристалл защищают от внешних воздействий специальным лаком. Места сварки покрывают клеем БФ-4.

После защиты заготовку сушат в специальной камере при температуре $80-100^{\circ}\text{C}$ в течение двух часов.

Вторая защита. Вторая защита заключается в покрытии всей заготовки вазелинообразной массой.

Измерение максимальной частоты генерации. Эта операция позволяет подвести предварительный итог качеству сборки транзистора. Заготовку вставляют в измерительное приспособление, подключенное к измерительному устройству. Заготовки транзисторов, у которых граничная частота генерации меньше заданной, отбраковывают. Годные заготовки поступают на следующую технологическую операцию.

Герметизация. Этой операцией завершается процесс сборки транзисторов. Приварка крышки корпуса к основанию производится на электросварочном станке аналогично той же операции для светодиодов.

Антикоррозийная защита. Эта операция производится аналогично той же операции для светодиодов или окраской корпуса.

Контрольные вопросы

1. Какие основные технологические операции по изготовлению полупроводниковых приборов вы знаете?
2. Назовите и опишите методы создания $p-n$ -переходов.
3. Каковы назначение и сущность метода фотолитографии?
4. Назовите и опишите передовые технологические приемы изготовления полупроводниковых структур.
5. Что такое омический контакт и каково его назначение?
6. Назовите методы изготовления омических контактов.
7. Какое оборудование для механической обработки полупроводниковых материалов применяется при изготовлении пластин и кристаллов?
8. Каковы основные технологические операции сборки полупроводниковых приборов?

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ И ИХ МОНТАЖ**§ 30. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ЕДИНОЙ СИСТЕМЕ
КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ**

В этом параграфе рассмотрены основные положения единой системы конструкторской документации ЕСКД применительно к составлению электрических схем.

ЕСКД позволяет в общесоюзном масштабе составлять техническую документацию на изделия по единым правилам. Эти единые правила составлены с таким расчетом, чтобы объем технической документации был достаточным для понимания принципов работы схем, методов изготовления, монтажа и наладки изделия.

В ЕСКД используются единые условные обозначения элементов схем (табл. 2). Единые условные обозначения и единые правила составления технической документации позволяют тратить минимальное время на понимание принципов работы методов наладки и эксплуатации изделия.

В комплект технической документации на изделие согласно требованиям ЕСКД входят:









- технические условия (ТУ);
- техническое описание (ТО);
- инструкция по эксплуатации (ИЭ);
- формуляр (ФО);
- паспорт (ПС);
- ведомость ЗИП;
- схемы структурные (Э1)*;
- схемы функциональные (Э2);
- схемы принципиальные (Э3);
- схемы соединений (монтажные) (Э4);
- схемы подключений (Э5);
- схемы общие (Э6);
- схемы расположения (Э7);

В ТУ, ТО ИЭ, ФО, ПС приводятся основные технические данные, техническое описание работы механизмов и принципиальной схемы, технические условия на приемку и эксплуатацию изделия.

* В скобках указаны условные обозначения различных схем, принятые в ЕСКД. Индекс «Э» означает, что схема электрическая.

Основные условные обозначения для принципиальных электрических схем

№ п.п.	Наименование	Обозначение
1	Контакт выключателя, переключателя: замыкающий размыкающий переключающий	
2	Контакт электрического реле: замыкающий размыкающий переключающий	
3	Контакт неэлектрического реле (датчика, путевого выключателя, конечного выключателя)	
4	Резисторы	
5	Конденсаторы	
6	Источники питания	
7	Катушка индуктивности, трансформатор	

№ п.п.	Наименование	Обозначение
8	Лампа электронная (триод)	
9	Транзистор типа $p-n-p$	
10	Диод	
11	Стабилитрон (опорный диод)	
12	Переключающий диод	
13	Туннельный диод	
14	Фотодиод	
15	Лазерный диод	

В структурных схемах приводят основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи. Структурные схемы используются при проектировании изделий и их эксплуатации. Примером структурной схемы может служить рис. 49.

Функциональная схема является документом, полностью или частично определяющим принципы работы изделия (или его функциональных частей — для сложного изделия), характер и последовательность любых происходящих в нем процессов, а также роль отдельных

элементов и групп элементов в осуществлении этих процессов. На схеме изображают электрические, механические и другие элементы и показывают их функциональные связи. Схема используется при регулировке, контроле и эксплуатации изделия. Для разъяснения процессов, происходящих в функциональных узлах или блоках изделия, может быть составлено несколько функциональных схем. На функциональных схемах элементы и группы элементов показывают в виде треугольников, квадратов и прямоугольников. Иногда отдельные элементы изображают в виде условных графических обозначений, принятых для всех видов схем. Возле каждого элемента, показанного на схеме, а также внутри квадрата или прямоугольника проставляют наименование или позиционное обозначение элемента в соответствии с его принципиальной схемой. При необходимости на схеме помещают диаграммы и таблицы, определяющие последовательность процессов во времени, а также указывают в характерных точках величины и формы напряжений и токов, математические зависимости и т. д.

Принципиальная схема определяет полный состав элементов и связей между ними и, как правило, дает детальное представление о принципе работы изделия. Принципиальная схема служит для разработки конструкции и эксплуатации изделия. На ней изображают в виде условных графических обозначений все электрические элементы и электрические связи между ними, а также разъемы, зажимы и другие элементы, которыми заканчиваются входные и выходные линии схемы. Условные графические обозначения элементов на схеме располагают с учетом удобства ее чтения, а также с учетом необходимости изображения электрических связей между элементами (кратчайшими линиями при минимальном числе пересечений). Каждому электрическому элементу, изображенному на схеме, присваивается буквенно-цифровое позиционное обозначение и порядковый номер. Порядковые номера элементам присваивают, начиная с единицы, в пределах группы элементов, которые имеют одинаковое буквенное позиционное обозначение, например: для ламп — Л1, Л2, Л3 и т. д.; для конденсаторов — С1, С2, С3 и т. д. Последовательность присвоения порядковых номеров должна соответствовать последовательности расположения элементов на схеме. Считают, как правило, сверху вниз и слева направо.

На принципиальной электрической схеме выпрямителя, изображенной на рис. 45, указаны входные и выходные зажимы, а также условные и буквенные обозначения всех элементов. Форма и значение питающего напряжения, размеры условных обозначений даны по ЕСКД.

Схема соединений (монтажная) показывает соединение составных частей изделия, определяет провода, жгуты, кабели, которыми осуществляется соединение, а также места их присоединения. Составляется схема соединений на базе уже разработанной конструкции блока (узла). Обозначение элементов на ней должно соответствовать принципиальной схеме. Все соединитель-

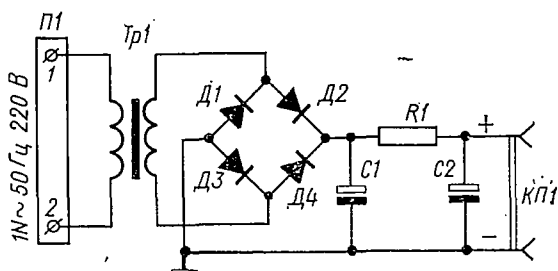


Рис. 45. Пример принципиальной электрической схемы

ные провода, расшивочные панели, разъемы, зажимы соединительных плат нумеруют и соединяют друг с другом согласно принципиальной схеме.

На схеме соединения указывают данные о монтируемых проводах и кабелях, направление их прокладки, а также все особенности монтажа блока (узла). Пример схемы соединений приведен на рис. 46.

Схема подключения показывает подключения внешних связей. Схематическими подключениями пользуются для осуществления подключений изделий при их эксплуатации.

Общая схема определяет составные части комплекса и соединения их между собой на месте эксплуатации. Общими схемами пользуются при ознакомлении с комплексами, а также при их контроле и эксплуатации.

Схемы расположения определяют относительное расположение составных частей изделий, проводов, жгутов, кабелей и пр.

Все элементы, которым на принципиальной схеме присвоены позиционные обозначения, записываются в перечень элементов. Перечень элементов оформляют в виде таблицы, заполняемой сверху вниз. Обычно пере-

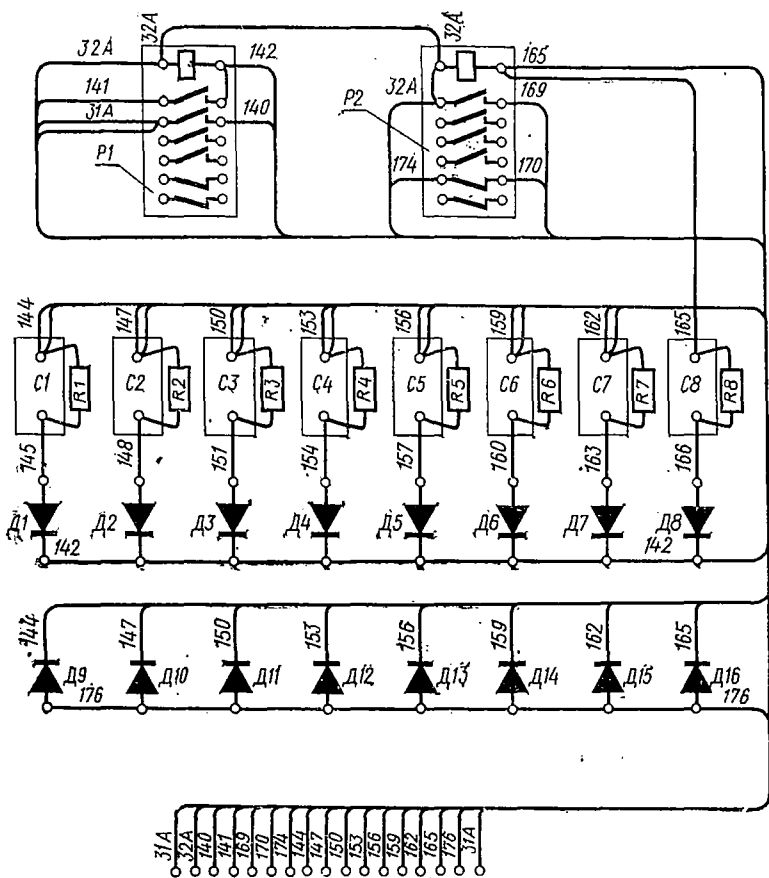


Рис. 46. Пример схемы соединений

чень элементов приводится на принципиальной схеме в правом верхнем углу. При большом количестве электрических элементов в изделии перечень элементов выполняют в виде самостоятельного документа. Пример перечня элементов приведен на рис. 47. В графе «Поз. обозначение» перечня указывают позиционное обозначение эле-

мента на принципиальной электрической схеме. В графе «Наименование» указывают наименование элемента в соответствии с документом, на основании которого этот элемент применен (ГОСТ, нормаль, ТУ, чертеж). При необходимости указания технических данных элемента, не содержащихся в его наименовании, эти данные приводятся в графе «Примечание». Графа «Зона» заполняется в тех случаях, когда схема разделена на зоны с целью облегчения отыскания элемента.

Зона	Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
8	R1	Резистор МЛТ-2 150 Ом ± 10% ГОСТ 7113-66	1	
	C1, C2	Конденсатор ЭГЦ-а $\frac{20}{50}$ м ОЖО.464.001ТУ	2	
	Д1-Д4	Диод полупроводниковый ОЖО.321.041	4	Без радиатора
	Тр1	Трансформатор ТПБ-50 ГОСТ 1495-45	1	220/36 В
	П1	Плата соединительная		
		НБТЗ.656.000Сл	1	600 В; 6 А
	КП1	Приспособление контактное		
		МКМЗ.605.013	1	
8	20	110	10	
		185		

Рис. 47. Пример перечня элементов

§ 31. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Измерительные устройства по назначению разделяют на межоперационные и классификационные. Межоперационные измерительные устройства обеспечивают контроль электрических параметров элементов и качества сборки полупроводникового прибора в процессе его изготовления. Классификационные измерительные устройства обеспечивают контроль электрических параметров готовых, герметизированных полупроводниковых приборов с отнесением их к соответствующему типу. Как правило, классификационные измерительные устройства производят контроль электрических параметров в трех тепловых режимах: при нормальной, повышенной и пониженной температурах.

Различают неавтоматизированные, автоматизированные, или полуавтоматические, и автоматические измери-

тельные устройства. Неавтоматизированные измерительные устройства используются в лабораторных условиях при разработке и исследовании полупроводниковых приборов, когда исследователю необходимо знать конкретные значения измеряемых параметров. Структурная схема неавтоматизированного измерительного устройства приведена на рис. 48. Неавтоматизированное измерительное устройство состоит из блоков БЗР, ИП, БИП, БП. Блок ИП — измерительная позиция. В этом блоке происходит механическое фиксирование измеряемого прибора и подсоединение к нему электрических контактов. Блок задания режима измерения БЗР обеспечивает режим измерения, например при измерении значений

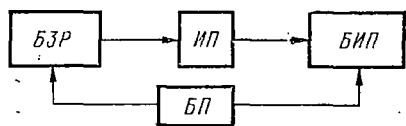


Рис. 48. Структурная схема измерительных устройств

тока и напряжения управления тиристора подачу на анод измеряемого прибора импульсов напряжения с заданными значениями переднего и заднего фронтов и амплитуды, заданного значения то-

ка через открытый прибор, а также плавно изменяющегося в заданных пределах значения тока через управляющий электрод тиристора. Блок измерения параметров БИП фиксирует включение измеряемого тиристора, отключает анодное напряжение и измеряет значения тока и напряжения управления.

При необходимости для питания вспомогательных цепей элементов и узлов управления измерительным устройством в его состав может входить блок питания БП.

При измерении ряда полупроводниковых изделий (транзисторов, тиристоров, интегральных схем и пр.) приходится последовательно контролировать до 10 и более электрических параметров.

Поэтому в настоящее время в полупроводниковой отрасли начали внедрять универсальные контрольно-измерительные комплексы с применением специализированных ЭВМ. Такой комплекс позволяет, например, измерять статические параметры любых типов биполярных транзисторов или в несколько другой модификации — статические параметры любых дискретных интегральных схем. Возможность измерять статические параметры тех

или иных видов полупроводниковых приборов обеспечивается не изменением электрических схем и конструкций измерителей, а всего лишь вводом в ЭВМ другой программы. Структурная схема такого измерительного комплекса приведена на рис. 49.

В состав измерительного комплекса входят специализированная ЭВМ, универсальный тестер УТ, рабочие места контроля электрических параметров полупроводниковых приборов РМ. ЭВМ комплекса по введенным в нее программам управляет универсальными тестерами. К одной ЭВМ может быть подключено несколько тестеров, а к каждому тестеру до 5—10 рабочих мест — постов конт-

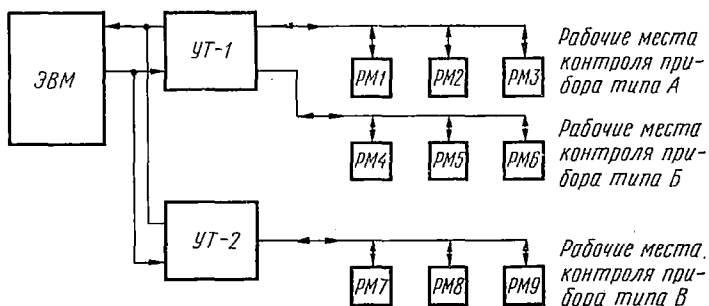


Рис. 49. Структурная схема универсального измерительного комплекса

роля электрических параметров полупроводниковых приборов. Каждое рабочее место измерительного комплекса имеет свой шифр и соответствующим образом запрограммировано в ЭВМ. Рассмотрим работу измерительного комплекса при ручной загрузке и сортировке измеренных приборов по знаковым табло рабочего места.

После подключения измеряемого полупроводникового прибора к контактному устройству рабочего места оператор нажимает кнопку «Готов к измерению». Этот сигнал по каналам связи поступает в ЭВМ, где определяется, с какого рабочего места послан сигнал и какой тип прибора на этом рабочем месте должен измеряться. В зависимости от типа прибора по команде ЭВМ универсальный тестер устанавливает режим измерения первого параметра и производит измерение значения параметра, результат измерения по каналам связи вводится в ЭВМ. Затем

аналогично производится измерение всех остальных параметров полупроводникового прибора. Информация, полученная от УТ о результатах измерения за очень короткое время (300—500 мкс), обрабатывается ЭВМ, затем выдаются управляющие команды на знаковые табло рабочего места. После этого ЭВМ и УТ начинают обслуживать следующее рабочее место. Оператор-измеритель по показаниям знаковых табло соответствующим образом сортирует измеряемые полупроводниковые приборы.

Вышеописанный измерительный комплекс может работать и в комплекте с автоматическими сортировщиками и устройствами контроля параметров полупроводниковых приборов и их элементов на пластинах.

§ 32. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Источники питания обеспечивают электропитанием блоки измерительных устройств. Как правило, питание измерительных устройств осуществляется от сети переменного тока через силовой трансформатор с соответствующими стабилизирующими и выпрямительными элементами. Только в особых случаях применяются сухие батареи и нормальные элементы.

Далее будет рассмотрен сетевой источник питания. Такой источник питания состоит из трансформатора, выпрямителя и сглаживающего фильтра.

Многие измерительные устройства требуют, чтобы при изменении сетевого напряжения и нагрузки питающие их напряжение или ток оставались неизменными, поэтому возникает необходимость стабилизации последних. В качестве стабилизирующих элементов могут быть использованы газонаполненные или кремниевые стабилитроны.

Выпрямители. В качестве выпрямительных элементов обычно служат электронные лампы, германиевые и кремниевые полупроводниковые диоды. На рис. 50 приведены основные схемы выпрямителей, используемых в измерительной аппаратуре.

Схема однополупериодного выпрямителя (рис. 50, а) наиболее проста и применяется в устройствах, где допускается повышенная пульсация, а потребляемая нагрузкой мощность не превышает 5—8 Вт.

На рис. 50, б, в показаны схемы двухполупериодного выпрямителя, в которых через нагрузку протекает вы-

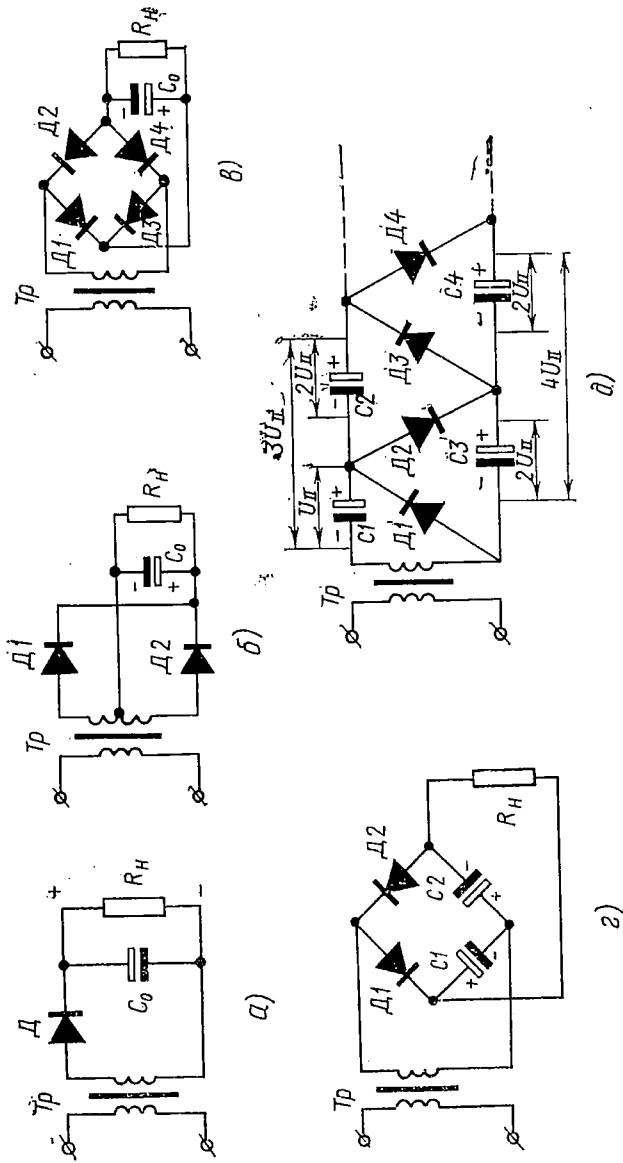


Рис. 50. Схема однофазных выпрямителей:

а — однополупериодная, б и в — двухполупериодные, г — удвоения напряжения, д — умножения напряжения, $C_1 - C_4$ — конденсаторы, R_H — сопротивление нагрузки, C_0 — конденсатор фильтра

прямленный ток в оба полупериода переменного напряжения.

Выпрямители, построенные по схемам удвоения и умножения напряжения (рис. 50, *г*, *д*), имеют низковольтные детали (диоды, конденсаторы) и большие напряжения на выходе. Такие выпрямители применяют при значениях выпрямленного тока не более 3—50 мА.

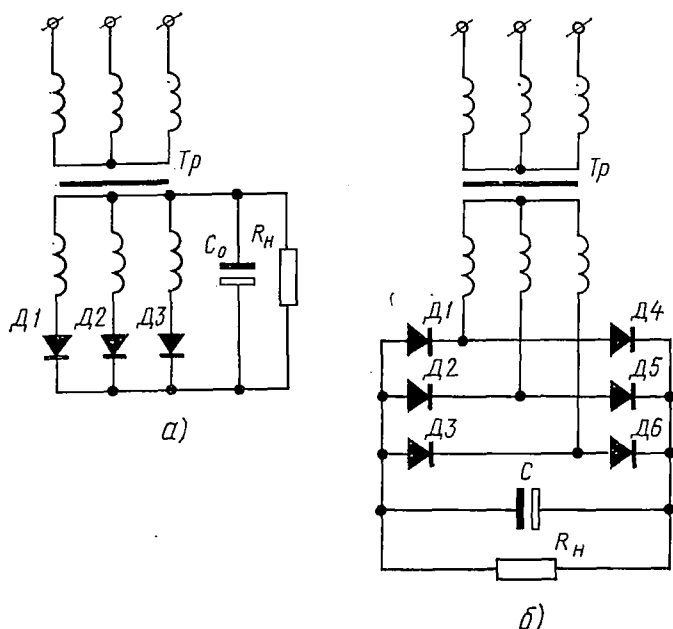


Рис. 51. Схемы трехфазных выпрямителей:
а — однополупериодная, *б* — мостовая

При больших токах нагрузки используют многофазные выпрямители (рис. 51). Схемы многофазных выпрямителей обеспечивают минимальный коэффициент пульсации. Конденсатор C_0 устанавливается на выходе выпрямителя для уменьшения пульсаций выходного напряжения.

Рассмотрим работу однофазного мостового выпрямителя, наиболее часто применяемого в измерительной аппаратуре (см. рис. 50, *в*). Схема состоит из диодов $D1$, $D2$, $D3$, $D4$ и конденсатора C_0 .

В первый полупериод t_1 синусоидального напряжения (рис. 52, $a - \delta$) ток проходит через вторичную обмотку трансформатора Tp , диод $D1$, через нагрузку R_H и конденсатор C_0 и далее через диод $D4$.

Во второй полупериод t_2 ток проходит по вторичной обмотке трансформатора, диоду $D3$, сопротивлению нагрузки R_H , конденсатору C_0 и диоду $D2$. За оба полупериода ток через нагрузку не меняет своего направления.

В начальный момент t_0 напряжение на конденсаторе C_0 равно $e_{\text{мин}}$. После момента t_0 напряжение e_1 стано-

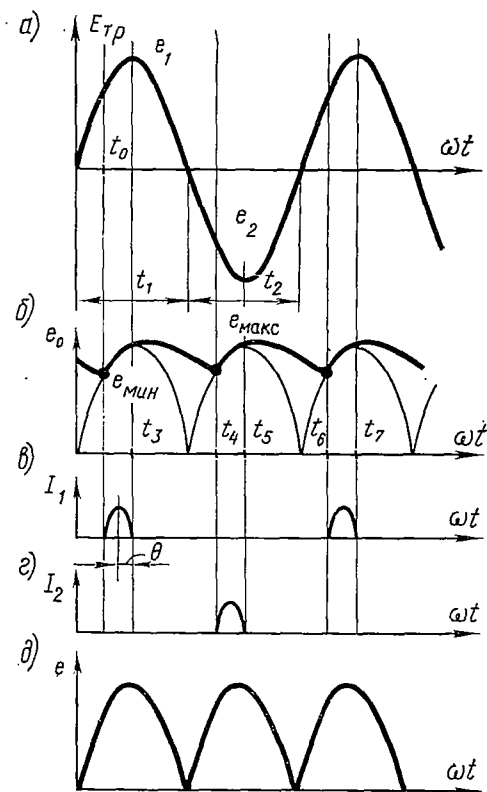


Рис. 52. Формы выпрямленного тока и напряжения для мостовой схемы выпрямителя:

a — напряжение на обмотке трансформатора,
 b — напряжение на выходе выпрямителя,
 c — ток через диоды, d — напряжение на нагрузке без конденсатора C_0

вится больше, чем e_0 , вентили $D1$ и $D4$ начинают проводить, конденсатор C_0 заряжается. В момент t_3 напряжение e_1 станет равным напряжению $e_{\text{макс}}$, диоды $D1$ и $D4$ не проводят и конденсатор C_0 начнет разряжаться. В момент t_4 , когда напряжение на конденсаторе C_0 равно $e_{\text{мин}}$, конденсатор опять будет заряжаться через диоды $D2$ и $D4$ до момента t_5 , когда напряжение второй фазы станет равным $e_{\text{макс}}$. Из сказанного видно, что ток через вентили $D1$ и $D4$ протекает только в течение части обоих полупериодов синусоидального напряжения. Эта часть полупериодов называется углом отсечки и обозначается через 2θ . На рис. 52, *д* приведена форма выпрямленного напряжения при отсутствии конденсатора C_0 . Из сравнения рис. 52, *б* и *д* видно, что наличие конденсатора значительно снижает пульсацию выпрямленного напряжения, при этом возрастает и среднее значение напряжения.

Сглаживающие фильтры. Напряжение на выходе выпрямителя не является строго постоянным, его принято называть пульсирующим. Такое пульсирующее напряжение можно представить как сумму двух напряжений: постоянного и переменного. Отношение амплитуды переменной составляющей к величине постоянной составляющей называют коэффициентом пульсации:

$$p = \frac{U_{\sim}}{E_0} 100\%,$$

где U_{\sim} — амплитуда переменной составляющей напряжения; E_0 — постоянная составляющая напряжения.

Наличие переменной составляющей вызывает появление ее на выходе согласующих устройств, нарушает работу измерительной и логической частей аппаратуры.

Для уменьшения коэффициента пульсации между выпрямителем и питаемым устройством включают сглаживающий фильтр. Сглаживающий фильтр состоит из реактивных элементов, сопротивление которых постоянно и переменному току различно. В качестве таких элементов могут быть использованы дроссели низкой частоты, конденсаторы большой емкости, а также электровакуумные лампы и транзисторы, включенные по специальной схеме.

Принцип действия фильтра разберем на примере Г-образного фильтра, показанного на рис. 53, *а*. Фильтр состоит из резистора R и конденсатора C .

Г-образный фильтр является делителем напряжения для переменной составляющей входного напряжения и состоит из последовательно соединенных сопротивлений: активного R и реактивного X_c , равного

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC},$$

где f — частота пульсации выпрямленного напряжения; C — емкость конденсатора в схеме рис. 53, а.

Величины переменных составляющих тока через делитель и выходного напряжения $U_{\sim\text{вых}}$ соответственно равны:

$$I_{\sim} = \frac{U_{\sim}}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}; \quad U_{\sim\text{вых}} = \frac{U_{\sim} X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}. \quad (3)$$

Согласно выражениям (3) при увеличении сопротивления резистора R напряжение переменной составляющей на выходе фильтра уменьшается. То же происходит при уменьшении сопротивления X_c , т. е. при увеличении емкости конденсатора C .

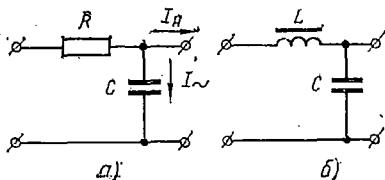


Рис. 53. Схемы фильтров низкой частоты

Сглаживающий фильтр характеризуется коэффициентом сглаживания k_c , показывающим, во сколько раз коэффициент пульсации на входе фильтра больше, чем на его выходе:

$$k_c = \frac{p_0}{p},$$

где p_0 — коэффициент пульсации на входе фильтра; p — коэффициент пульсации на выходе фильтра.

Часто сопротивление в фильтрах заменяют дросселем. Это вызвано тем, что обмотка дросселя обладает низким сопротивлением (несколько ом) для тока постоянной составляющей и сравнительно высоким (десятки и сотни ом) для тока переменной составляющей. Схема фильтра с дросселем показана на рис. 53, б.

Стабилизаторы напряжения. В настоящее время в стабилизирующих устройствах в основном применяются полупроводниковые стабилизаторы.

На рис. 54 приведена схема стабилизатора напряжения на опорном диоде. Схема состоит из трансформатора Tp , мостового двухполупериодного выпрямителя, двух Г-образных фильтров и кремниевого стабилитрона $D5$. Схема работает следующим образом. Напряжение, приложенное к стабилитрону, выводит его на рабочий участок вольт-амперной характеристики с малым дифференциальным сопротивлением

$$R_d = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}},$$

где $\Delta U_{ст}$ — приращение напряжения на стабилитроне; $\Delta I_{ст}$ — изменение величины тока через стабилитрон.

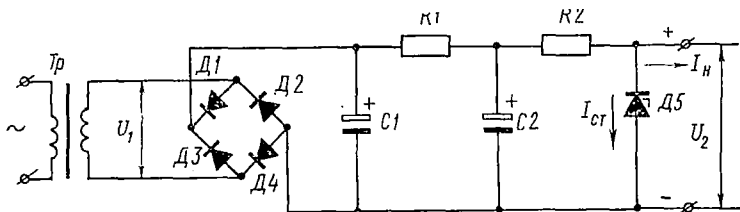


Рис. 54. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Таким образом, при малом значении R_d довольно значительные изменения тока через стабилитрон вызывают небольшие изменения напряжения на нем. Это свойство стабилитронов использовано в схеме стабилизатора.

При увеличении сетевого напряжения напряжение на стабилитроне $D5$ (т. е. на выходе стабилизатора) возрастает незначительно из-за сравнительно большого увеличения тока через стабилитрон. Значительный прирост тока через стабилитрон вызывает увеличение падения напряжения на резисторах $R1$ и $R2$, обеспечивая малое изменение напряжения на стабилитроне. Обратная картина наблюдается при уменьшении сетевого напряжения.

С увеличением нагрузки ток через стабилитрон возрастает, с уменьшением — уменьшается, а напряжение на выходе стабилизатора изменяется незначительно.

Таким образом, напряжение на выходе изменяется незначительно при больших изменениях сетевого напряжения и сопротивления нагрузки.

В случаях, когда необходимы большие токи нагрузки и большая стабильность выходного напряжения, применяются сложные схемы стабилизаторов на транзисторах.

Усилители переменного тока. Они могут быть ламповыми или транзисторными. Принцип их работы рассмотрим на примере однокаскадного транзисторного усилителя, схема которого приведена на рис. 55, а. Схема каскада состоит из транзистора T , входного и выходного конденсаторов $C1$ и $C2$, резисторов $R1$, $R2$, $R3$, обеспечивающих температурную стабилизацию положения рабочей точки транзистора, сопротивления коллекторной нагрузки R_K и конденсатора $C3$, закорачивающего переменную составляющую тока в эмиттерной цепи. Входной управляющий сигнал * подается через конденсатор $C1$ в базовую цепь усилительного каскада.

На рис. 55, б приведены зависимость тока базы I_B от напряжения на базе $U_{б,э}$ и зависимость тока коллектора I_K от напряжения на коллекторе U_K . Зная эти зависимости, можно по величине входного сигнала определить величину выходного сигнала. Для этого необходимо построить нагрузочную прямую и выбрать на ней рабочую точку. Рабочая точка транзистора определяет ток транзистора и напряжение на нем (при отсутствии управляющего сигнала $U_{вх}$). Зная напряжение питания усилительного каскада E_K и величину сопротивления нагрузки R_K , можно построить нагрузочную прямую AB , отложив по оси напряжений значение E_K , а по оси токов — значение

$$I_{к. макс} = \frac{E_K}{R_K + R_э}$$

Допустим, нагрузочная прямая пересекает в рабочей точке выходную характеристику транзистора с током базы 300 мкА, т. е. для вывода транзистора в эту рабочую точку необходимо подать в базу ток 0,3 мА. На входной характеристике это будет соответствовать точке с величиной тока базы 0,3 мА и напряжением $U_{б,э} = 0,6$ В. Предположим, что на вход транзистора будет подаваться синусоидальный сигнал с амплитудой напряжения $U_{вх,а} = 15$ В. Это вызовет изменение базового тока от 0,3 до 0,6 мА, в результате чего ток коллектора увеличится с 8 до 13,5 мА и напряжение уменьшится с 15 до 6 В. Сле-

* Входной сигнал есть напряжение между зажимом «Вх.» и «Землей». Выходной сигнал есть напряжение между зажимом «Вых.» и «Землей».

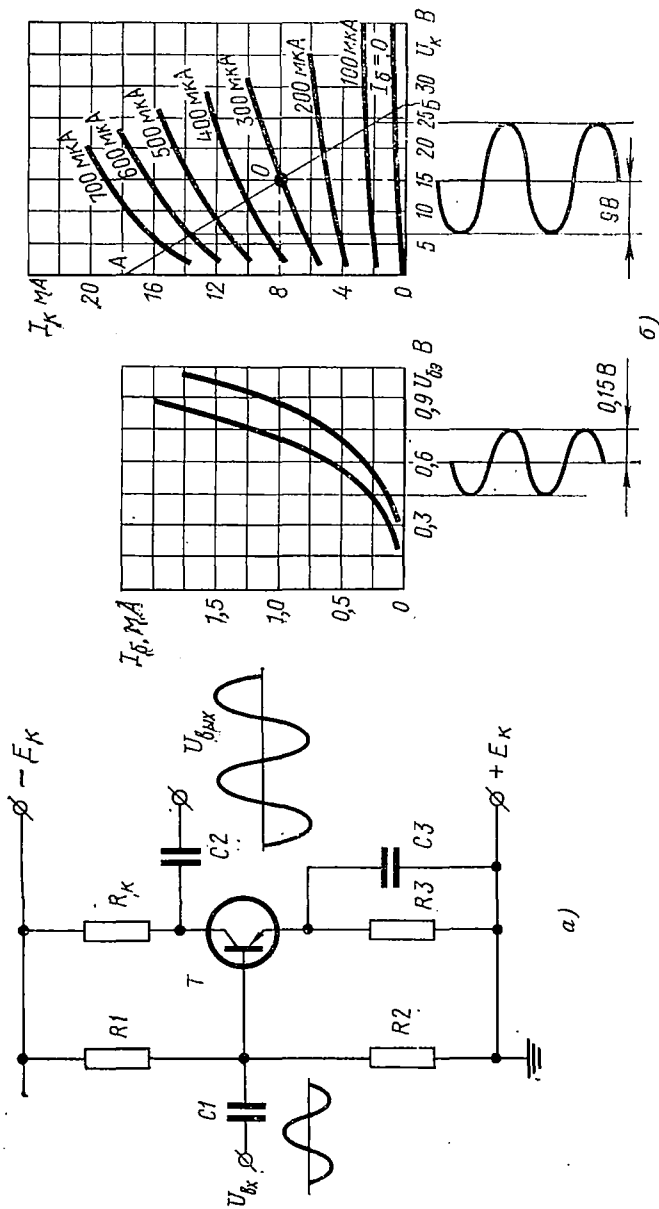


Рис. 55. Усилитель переменного тока:

а — схема однокаскадного усилителя, б — входные и выходные характеристики транзистора

довательно, приращение входного напряжения на 0,15 В дает увеличение выходного напряжения на 9 В, т. е. каскад усиливает входной сигнал. Коэффициент усиления — 60.

Современные многокаскадные усилители переменного тока способны усиливать сигналы от долей микровольта и имеют большие коэффициенты усиления (10^6 — 10^{12}).

Усилители постоянного тока. Их разделяют на усилители с непосредственными связями и усилители с преобразованием напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока. Усилители с непосредственными связями отличаются значительной нестабильностью нуля (дрейфом нуля), вследствие чего их применяют в основ-

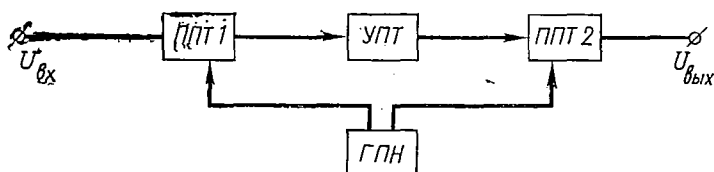


Рис. 56. Структурная схема усилителя постоянного тока с модуляцией и демодуляцией

ном в устройствах, которые допускают частую калибровку нуля и работают в узком диапазоне рабочих температур.

Усилители с преобразованием имеют весьма малый дрейф нуля и могут значительное время работать без калибровки (до нескольких лет). В автоматических измерительных устройствах, как правило, применяют усилители с преобразованием.

Преобразование сигнала постоянного тока в сигнал переменного тока осуществляется механическими (контактными) и бесконтактными преобразователями. Структурная схема усилителя постоянного тока с преобразованием показана на рис. 56. Входной сигнал постоянного тока преобразуется входным преобразователем ППТ1 в сигнал переменного тока и усиливается усилителем переменного тока УПТ. С выхода усилителя УПТ сигнал поступает на выходной преобразователь ППТ2, который преобразует сигнал переменного тока в сигнал постоянного тока. Преобразователями ППТ1 и ППТ2 управляет генератор преобразующего напряжения ГПН.

Электронные импульсные схемы широко применяются в современных измерительных устройствах. К таким импульсным схемам относятся мультивибраторы, триггеры, задержки, генераторы импульсов тока, различные синхронизаторы и др.

В настоящее время подавляющее большинство импульсных схем измерительного оборудования выполняется полностью на полупроводниковых приборах. Ниже приведены принципиальные схемы и описание ряда импульсных устройств широкого и специального применения, используемых в измерительной аппаратуре.

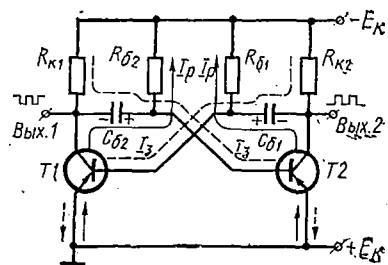


Рис. 57. Мультивибратор:
 I_p — ток разряда, $I_з$ — ток заряда

Мультивибратор. Для генерирования напряжения прямоугольной формы и получения резких перепадов напряжений в измерительной аппаратуре широко используются генераторы релаксационных колебаний (мультивибраторы, блокинг-генераторы).

Мультивибратор является генератором прямоугольных импульсов. Схема мультивибратора представляет собой двухкаскадный усилитель на сопротивлениях, выход которого связан с его входом.

В симметричном мультивибраторе (рис. 57) $R_{б1} = R_{б2}$, $R_{к1} = R_{к2}$, и $C_{б1} = C_{б2}$.

При подаче на схему напряжения питания E_k через транзисторы $T1$ и $T2$ начнут протекать коллекторные токи I_k .

Напряжения на коллекторах транзисторов равно

$$U_{к1} = U_{к2} = E_k - I_k R_k.$$

Однако равенство коллекторных токов не может быть продолжительным. В результате флуктуаций* сразу же

* Флуктуация — временное, случайное отклонение от равномерного распределения электронов в газе, жидкости или твердом теле, возникающее в результате теплового движения.

ток одного транзистора, например T_2 , увеличится. При увеличении тока I_{K2} увеличится и падение напряжения на резисторе R_{K2} , а следовательно, уменьшится напряжение U_{K2} на коллекторе транзистора T_2 . Тогда конденсатор C_{61} начнет разряжаться по цепи

$$C_{61} \rightarrow R_{61} \rightarrow E_K \rightarrow T_2 \rightarrow C_{61}.$$

В результате этого на базе транзистора T_1 появится положительный потенциал относительно его эмиттера, что вызовет уменьшение коллекторного тока транзистора. Уменьшение же тока приведет к уменьшению падения напряжения на резисторе R_{K1} и увеличению напряжения на коллекторе транзистора T_1 . Возрастание напряжения на коллекторе транзистора T_1 вызовет дополнительный заряд конденсатора C_{62} по цепи

$$C_{62} \rightarrow R_{K1} \rightarrow E_K \rightarrow T_2 \rightarrow C_{62}.$$

Ток заряда будет создавать положительное падение напряжения на переходе эмиттер — база транзистора T_2 , что приведет к возрастанию тока коллектора этого транзистора. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока ток транзистора T_1 не упадет до нуля, а ток транзистора T_2 не достигнет наибольшего значения.

Запирание транзистора T_1 и отпирание транзистора T_2 происходят лавинообразно, т. е. происходит опрокидывание схемы скачком.

В запертом состоянии транзистор T_1 будет находиться до тех пор, пока на его базе поддерживается отрицательный потенциал выше напряжения запирания транзистора, вызванный током разряда конденсатора C_{61} по цепи

$$C_{61} \rightarrow R_{61} \rightarrow E_K \rightarrow T_2 \rightarrow C_{61}.$$

В таком состоянии схемы напряжение на *Вых. 1* почти равно напряжению питания E_K , а на *Вых. 2* — почти равно нулю (падению напряжения на транзисторе T_2).

По мере разряда конденсатора C_{61} падение напряжения на резисторе R_{61} из-за уменьшения разрядного тока по абсолютному значению будет уменьшаться. Когда оно достигнет значения напряжения отпирания, транзистор T_1 начнет открываться. К этому времени конденсатор C_{62} успеет полностью зарядиться до напряжения E_K . Как только через транзистор T_1 потечет коллекторный ток, он будет создавать на резисторе R_{K1} некоторое падение на-

пряжения. Поэтому конденсатор $C_{б2}$ начнет разряжаться через транзистор $T1$ и резистор $R_{б2}$. Ток разряда будет создавать на резисторе $R_{б2}$ некоторое падение напряжения, положительное по отношению к базе транзистора $T2$. В результате начнется закрывание транзистора $T2$.

Процесс будет продолжаться до полного открывания транзистора $T1$ и закрывания транзистора $T2$. При этом напряжение на *Вых. 1* станет почти равным нулю, а на *Вых. 2* — равным напряжению питания E_K . Затем цикл заряда и разряда повторяется в описанной последовательности. На схеме показаны формы напряжений на выходах мультивибратора. Время, за которое мультивибратор переходит из одного состояния в другое, измеряется долями микросекунды. Аналогично работают и ламповые мультивибраторы.

Амплитуда импульсов на коллекторах транзисторов близка к напряжению питания E_K . Длительность импульса определяется из выражения

$$t_1 = t_2 = 0,7 R_6 C_6, \quad (4)$$

где t_1 и t_2 — длительность импульсов.

Как видно из выражения (4), частоту колебаний мультивибратора можно регулировать, изменяя значения сопротивлений $R_{б1}$ и $R_{б2}$ и емкостей конденсаторов $C_{б1}$ и $C_{б2}$.

Триггер. Триггером называют электронную схему, имеющую два устойчивых состояния равновесия. Триггер характеризуется тем, что при воздействии на его вход внешнего напряжения он переходит из одного устойчивого состояния равновесия в другое, а затем при следующем воздействии возвращается в исходное состояние. Переход из одного состояния в другое происходит скачкообразно, благодаря чему форма выходного напряжения близка к прямоугольной.

На рис. 58 приведена схема симметричного триггера на транзисторах. Симметричный триггер может работать в режиме отдельных входов и в режиме со счетным (одним) входом. В первом случае запуск триггера осуществляется положительными импульсами $U_{зап}$, подаваемыми на базы транзисторов через входные конденсаторы $C1$ и $C2$. Во втором случае необходимо оба входа соединить, как показано на рис. 58 пунктиром, а импульсы положительной полярности подавать в одну общую точку.

В симметричном триггере $R_{K1} = R_{K2}$; $R_{B1} = R_{B2}$; $C_{B1} = C_{B2}$; $R1 = R2$; $R3 = R4$; $C1 = C2$.

В первый момент после подачи питающего напряжения в триггере может установиться симметричный режим, который сам по себе неустойчив. Вследствие асимметрии токов, вызванной случайными отклонениями, напряжение на коллекторе одного транзистора (например, $T2$) уменьшится и снизит потенциал базы транзистора $T1$ по отношению к его эмиттеру, что вызовет увеличение напряжения на коллекторе транзистора $T1$. Это в свою оче-

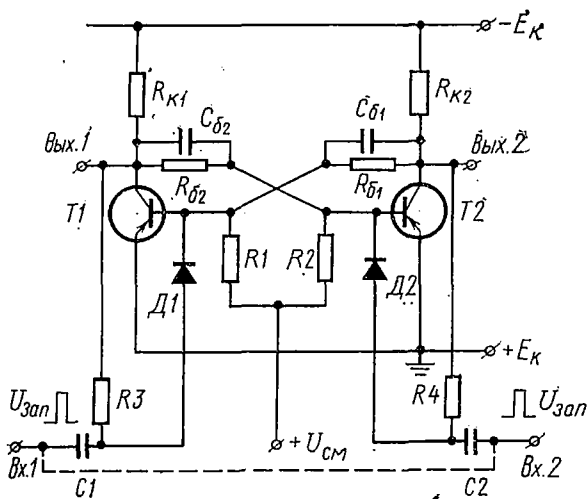


Рис. 58. Триггер

редь приведет к еще большему увеличению потенциала базы транзистора $T2$ и уменьшению напряжения на его коллекторе. Такой процесс будет развиваться лавинообразно до тех пор, пока транзистор $T1$ не закроется, а транзистор $T2$ не откроется, т. е. пока триггер не придет к одному из устойчивых состояний. Устойчивое состояние может продолжаться неограниченно долго, так как потенциал базы закрытого транзистора определяется соотношением плеч делителя $R1 - R_{B1}$ и не изменяется с течением времени. Для перевода триггера в другое устойчивое состояние равновесия необходимо подать на базу транзистора $T2$ запирающий импульс. Запирающий положительный импульс закрывает транзистор $T2$, потенциал

коллектора которого начинает уменьшаться. Возникает ток базы транзистора $T1$. Транзистор $T1$ начинает открываться, потенциал его коллектора повышается, ускоряя закрывание транзистора $T2$. Этот процесс продолжается до момента полного закрывания транзистора $T2$ и открывания транзистора $T1$. Положительное напряжение смещения $U_{см}$ служит для надежного закрывания транзисторов.

Триггеры широко применяются в схемах счетчиков импульсов, в различных коммутационных устройствах, в качестве элемента «памяти» и пр.

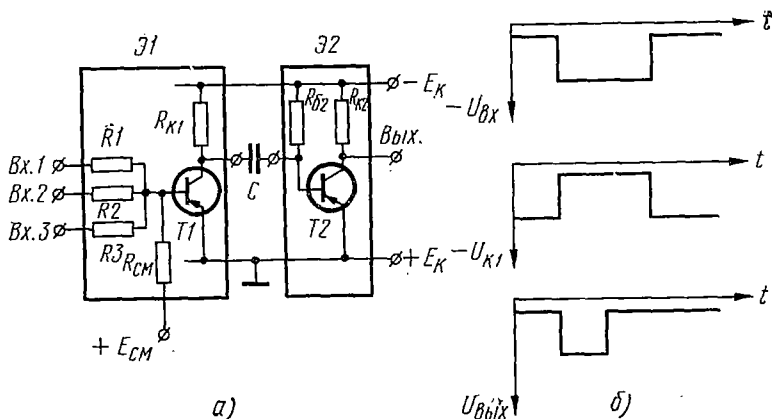


Рис. 59. Формирователь импульсов:
а — принципиальная схема, б — эюры напряжений

Принцип работы триггера на лампах по существу не отличается от принципа работы транзисторного триггера и потому здесь не рассматривается.

Формирователь импульсов. Существуют различные схемы формирователей импульсов в зависимости от их назначения, условий работы и т. д. Одна из возможных схем приведена на рис. 59, а. Эта схема выполняет функцию ограничения длительности выходного сигнала. На рис. 59, б приведены эюры напряжений, поясняющие его работу.

В исходном состоянии схемы транзистор $T1$ элемента $\mathcal{E}1$ закрыт положительным смещением $+E_{см}$, подаваемым на его базу. Транзистор $T2$ элемента $\mathcal{E}2$ открыт отрицательным смещением на базе, подаваемым через резистор $R_{б2}$. Выходной сигнал $U_{вых}$ близок к нулю (см.

рис. 59, б); величина его равна только падению напряжения на открытом транзисторе $T2$. Конденсатор C заряжается почти до напряжения питания на цепи: левая обкладка конденсатора C — $R_{к1}$ — минус источника питания — плюс источника питания — базовый переход транзистора $T2$ — правая обкладка конденсатора. Левая обкладка становится заряженной отрицательно, правая — положительно.

При подаче на любой из входов элемента $\mathcal{E}1$ отрицательного сигнала транзистор $T1$ резко открывается. Левая обкладка конденсатора C соединяется с отрицательным полюсом источника (через открытый транзистор $T1$). Все напряжение заряженного конденсатора скачком прикладывается к базе транзистора $T2$. Транзистор $T2$ резко открывается. На выходе элемента $\mathcal{E}2$ появляется большой отрицательный сигнал ($U_{\text{вых}}$ на рис. 59, б). Начинается разряд конденсатора C по цепи

$$C \rightarrow R_{62} \rightarrow E_{к} \rightarrow T1 \rightarrow C.$$

При снижении напряжения конденсатора до некоторой величины транзистор $T2$ вновь открывается и выходной сигнал опять снижается почти до нуля. Таким образом, независимо от длительности входного сигнала длительность выходного сигнала ограничена. Она зависит от времени разряда конденсатора C и приблизительно определяется по формуле

$$\tau_{\text{вых}} \approx 0,7CR_{62}. \quad (5)$$

§ 35. СРАВНИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Сравнивающие устройства являются основным узлом любого автоматического измерительного прибора. Они служат для сравнения измеряемой величины, например напряжения U_x , с эталонной, например опорным напряжением $U_{\text{оп}}$. Опорное напряжение подается от эталонного источника. Иногда эталонное напряжение соответствующей формы вырабатывается специальным генератором и подается на вход чувствительного элемента для сравнения с измеряемым напряжением. Сравнивающее устройство характеризуется следующими основными показателями: чувствительностью, быстродействием, входным сопротивлением, стабильностью работы во времени и при изменении окружающих условий (температуры, пи-

тающих напряжений и пр.) надежностью, помехозащищенностью. Структурная схема сравнивающего устройства приведена на рис. 60, а. Чувствительный элемент сравнивающего устройства производит сравнение измеряемого и опорного напряжений. Сигнал результата сравнения усиливается усилителем и подается на управляющий элемент, предназначенный для управления узлами измерительной схемы. В некоторых сравнивающих

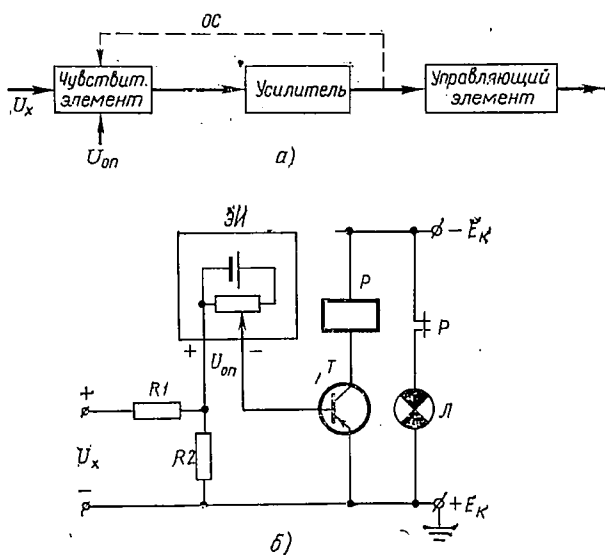


Рис. 60. Сравнивающее устройство:
а — структурная схема, б — принципиальная схема

устройствах для увеличения чувствительности и линейности применяют обратную связь *OC*.

Простейшим сравнивающим устройством является стрелочный прибор. В таком приборе сравниваются момент вращения, развиваемый рамкой прибора при прохождении по ней измеряемого тока, и тормозной момент от возвратной пружины.

В сравнивающих устройствах могут применяться электромагнитные реле (в электромагнитных реле, как и в стрелочном приборе, сравниваются усилие, развиваемое подвижной частью магнитной системы реле при прохождении по ней измеряемого тока, и усилие пружины возврата).

На рис. 60, б приведена схема сравнивающего устройства для контроля величины напряжения. Если контролируемое напряжение U_x значительно меньше опорного напряжения $U_{оп}$ эталонного источника ЭИ, то транзистор T открыт отрицательным напряжением на его базе. При этом якорь реле P притянут, так как через катушку реле протекает ток открытого транзистора. Нормально закрытый контакт реле в цепи сигнальной лампы L разомкнут, лампа погашена. При определенном значении напряжения U_x отрицательный потенциал базы снижается настолько, что коллекторный ток падает до величины, меньшей величины тока удержания якоря реле P . Якорь отпадает, и включается сигнальная лампа L .

Такую схему можно применить для проверки прямого падения напряжения диодов. При значении прямого падения (в данном случае U_x) больше заданной величины будет срабатывать сигнал «Брак» (лампа L). По потенциометру эталонного источника можно настраивать схему на заданное значение прямого падения напряжения.

§ 36. ПОНЯТИЕ О ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

Электрические схемы полуавтоматических и автоматических измерительных устройств обеспечивают работу исполнительных механизмов, процесс сравнения измеряемого параметра с эталонным значением, а также логическое взаимодействие отдельных блоков и механизмов. Электрические схемы блоков в свою очередь состоят из отдельных элементов, выполняющих простые логические операции. Логические операции в простых устройствах производятся контактными элементами — электромагнитными реле. В более сложных конструкциях логические операции обеспечиваются бесконтактными элементами — транзисторными и магнитными или сочетанием бесконтактных и контактных элементов, как, например, в схеме сравнивающего устройства на рис. 60.

Использование в измерительных устройствах бесконтактных переключающих элементов вместо контактных позволяет повысить надежность работы устройств, поскольку отсутствуют подвижные части, срок службы не зависит от числа произведенных операций и возрастает устойчивость против влияния окружающей среды. Бесконтактные элементы, используемые в устройствах автоматики и измерения, принято называть логическими эле-

ментами, так как каждый из них выполняет определенную логическую функцию (операцию): «ИЛИ», «И», «НЕ», «ПАМЯТЬ», «ЗАДЕРЖКА» и др.

Действие любой электрической цепи может быть сведено к двум состояниям, если каждый из составляющих ее элементов имеет релейное действие. Эти состояния условно принято обозначать нулем (0) и единицей (1). Для контактных логических элементов сигнал «1» есть замкнутое состояние цепи питания реле y (рис. 61), а сигнал «0» — разомкнутое состояние цепи питания реле y .

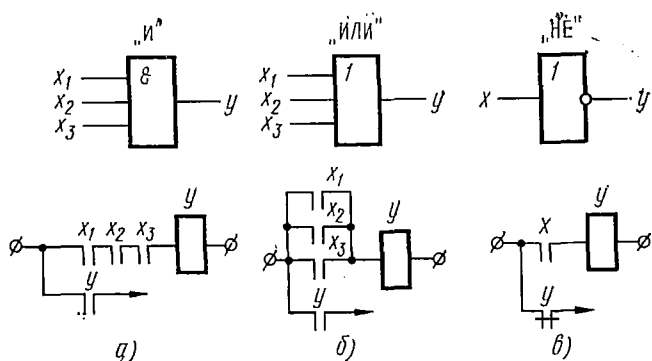


Рис. 61. Условные обозначения основных логических элементов и их релейные аналоги

Для бесконтактных элементов единичными принято считать сигналы, значение которых по абсолютной величине отлично от нуля (например, +10В или -10В), а нулевым — сигналы, значение которых по абсолютной величине значительно меньше соответствующего единичного сигнала. Для каждой серии бесконтактных логических элементов в паспорте указывается уровень сигналов, соответствующих их единичному и нулевому состояниям.

На рис 61 и 62 даны условные обозначения элементов, выполняющих различные логические функции. Для схем «И», «ИЛИ», «НЕ» на рис. 61 приведены контактные аналоги.

Для составления и анализа схем на логических элементах, как правило, используют три основные логические схемы — «И», «ИЛИ», «НЕ», соответственно выпол-

няющие логические операции умножения, сложения и отрицания.

Операция умножения («И») реализуется схемой, приведенной на рис. 61, а. Схема имеет n входов (на рис. показана схема с тремя входами) и один выход.

Алгебраически операция умножения выражается так:

$$x_1 \times x_2 \times x_3 = y,$$

где y — выходной сигнал; x_1, x_2, x_3 — сигналы на входах.

Приняв значения входных сигналов равными «1» или «0», будем иметь, например, $1 \times 1 \times 1 = 1$; $1 \times 1 \times 0 = 0$, т. е. для схемы «И» выходной сигнал «1» возможен только при всех входных сигналах, равных «1».

Операция сложения («ИЛИ») реализуется схемой, приведенной на рис. 61, б. Схема имеет n входов и один выход. Алгебраически операция сложения выражается формулой

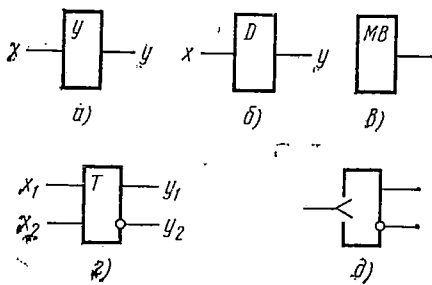


Рис. 62. Условные обозначения вспомогательных логических элементов: а — усилитель, б — задержка, в — мультивибратор, г — триггер, д — триггер со счетным входом

$$x_1 + x_2 + x_3 = y.$$

Давая входным сигналам значения «1» или «0», будем иметь: $1 + 1 + 1 = 1$, $1 + 0 + 0 = 1$, $0 + 0 + 0 = 0$ и т. д., т. е. для схемы «ИЛИ» выходной сигнал «1» возможен при наличии хотя бы одного входного сигнала «1».

Операция отрицания «НЕ» реализуется схемой, приведенной на рис. 61, в. Схема имеет вход и один выход. При наличии на входе сигнала «1» выходной сигнал есть «0». И наоборот, при входном сигнале «0», выходной сигнал «1».

Алгебраически операция «НЕ» записывается как

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

Перейдя к принятой системе, получим

$$\bar{1} = 0 \text{ и } \bar{0} = 1.$$

На рис. 62 приведены условные обозначения логических элементов, выполняющих функции:

«УСИЛЕНИЕ»;

«ЗАДЕРЖКА»;

мультивибратор;

триггер;

триггер со счетным входом.

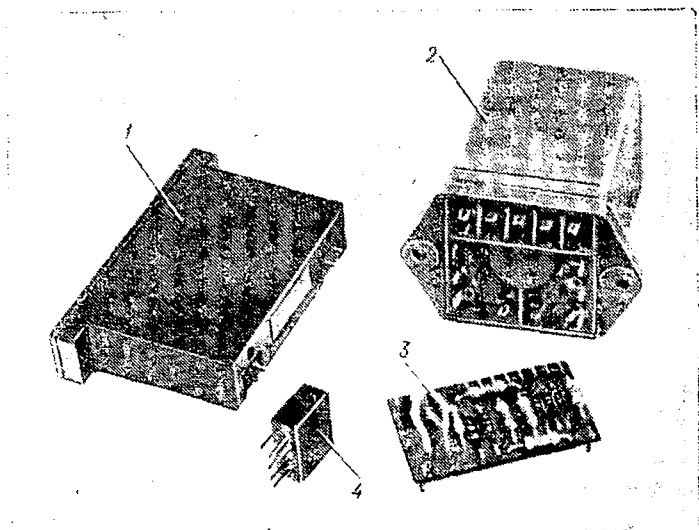


Рис. 63. Бесконтактные логические элементы:

1, 3 и 4 — полупроводниковые серий ЭТ, «МИР» и М-2К, 2 — магнитный
серии ЭЛМ

Логическая операция «УСИЛЕНИЕ» обеспечивает получение на выходе сигнала большей мощности, чем на входе.

Операции «ЗАДЕРЖКА» при подаче на вход сигнала «1» обеспечивают появление (пропадание) сигнала «1» на выходе схемы с задержкой на время t . Величина задержки зависит от элементов схемы и может изменяться при регулировке.

Примером схемы на транзисторных логических элементах может служить схема формирователя импульсов (см. рис. 59). Элемент Э1 выполняет логическую операцию «ИЛИ — НЕ». При подаче на любой из трех его

входов сигнала «1» (-10 В) получим на его выходе сигнал «0» ($U_{к1}$ на рис. 59, б). (Напомним, что для схемы с общим эмиттером сигнал на коллекторе транзистора находится в противофазе с сигналом на базе.) Элемент Э2 выполняет логическую операцию «НЕ» (инвертор).

Аппаратура, выполненная на бесконтактных элементах, обладает высоким быстродействием и долговечностью. Завод-изготовитель гарантирует для бесконтактных логических элементов один отказ на 40 тыс. ч непрерывной работы независимо от числа переключений (для реле один отказ на 1 млн. срабатываний).

В настоящее время отечественная электронная промышленность осваивает выпуск нескольких серий малогабаритных логических элементов (микромодулей). Малые размеры микромодулей позволяют сократить размеры аппаратуры в 100—200 раз и потребление энергии в 10—50 раз. По надежности, помехоустойчивости и другим техническим данным микромодули превосходят обычные логические элементы. На рис. 63 представлены конструкции некоторых типов логических элементов.

§ 37. КОНСТРУКЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ВИДЫ ЭЛЕКТРОМОНТАЖА

Ко всем измерительным устройствам предъявляются следующие требования: точность и стабильность проводимых измерений; простота настройки и обслуживания; высокая помехоустойчивость; надежность в эксплуатации; технологичность в изготовлении; возможность применения в цеховых условиях при массовом изготовлении полупроводниковых приборов.

Выполнение этих требований во многом зависит от электрической схемы и конструкции устройства. По конструктивному оформлению измерительная аппаратура подразделяется на одноблочную, блочно-модульную и многоблочную.

Одноблочные конструкции часто применяют при измерении одного-двух параметров полупроводниковых приборов, когда электрическая схема сравнительно несложна и объем ее невелик. В одноблочной конструкции все элементы электрической схемы расположены на общем шасси.

Блочнo-модульнoе конструкции применяют при большом объеме функциональной части аппаратуры. При

этом функциональную часть (бесконтактные логические элементы) выполняют в виде отдельных модулей и вместе с другими деталями устанавливают на общей плате. С остальными элементами схемы устройства плату соединяют при помощи разъема или пайки. Блочно-модульная конструкция обеспечивает технологичность аппаратуры при ее изготовлении. На рис. 64 показана плата блочно-модульной конструкции, соединяемая с остальной частью схемы разъемом.

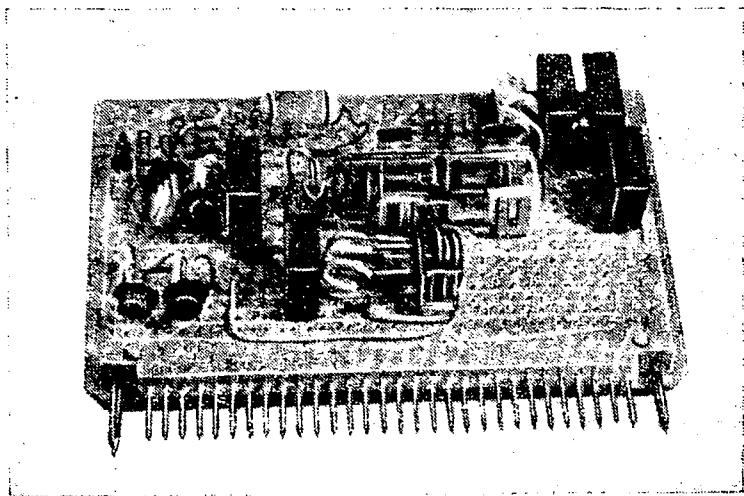


Рис. 64. Плата блочно-модульной конструкции

Многоблочная конструкция применяется в случаях, когда измерительная схема устройства имеет большой объем. Эта конструкция оформляется в виде отдельных блоков, выполняющих функции согласно принципиальной схеме. Блоки соединены друг с другом жгутами из гибкого провода. Многоблочная конструкция позволяет быстро обнаружить неисправный блок и заменить его. В зависимости от требований блоки измерительной аппаратуры конструктивно могут быть выполнены: с обычным жгутовым монтажом и распайкой навесных деталей на панелях и лепестках; с применением печатного монтажа; с применением микросхем (пленочных и твердых).

При мелкосерийном производстве, когда аппаратура изготавливается в одном-двух экземплярах, используют конструкции со жгутовым монтажом.

Конструкции с печатным монтажом применяют при крупносерийном производстве, когда затраты на разработку печатных плат окупаются.

При требованиях повышенной надежности, малых габаритов и массы аппаратуры применяют конструкции с пленочными и твердыми схемами.

Электрический монтаж блоков выполняется строго по схеме соединений в соответствии с предъявленными техническими требованиями на монтаж изделия.

Контрольные вопросы

1. Какими документами руководствуются при составлении технической документации?
2. Что входит в комплект технической документации на изделие?
3. Как составляется перечень элементов схемы?
4. Каково назначение выпрямителей?
5. Начертите основные схемы выпрямителей.
6. С какой целью применяются фильтры в измерительной аппаратуре?
7. Опишите работу параметрического стабилизатора.
8. Нарисуйте схему однокаскадного усилителя переменного тока.
9. С какой целью в усилителях постоянного тока применяется преобразование входного сигнала?
10. Объясните работу мультивибратора.
11. Как определяется длительность импульса мультивибратора?
12. Что такое триггер?

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

§ 38. НАЗНАЧЕНИЕ И СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЙ

По назначению измерения электрических параметров полупроводниковых приборов можно разделить на три группы:

- межоперационные измерения;
- классификационные измерения;
- измерения при испытаниях.

Измерения, отнесенные к третьей группе, будут рассмотрены подробно в гл. VII.

Межоперационные измерения проводятся с целью поддержания стабильного выхода годных приборов и приборов определенного типа.

Межоперационные измерения следует проводить после тех технологических операций, в результате которых может быть изменено значение того или иного параметра прибора. Например, измерения проводят после механической обработки $p-n$ -перехода (резки, травления), после температурного воздействия на $p-n$ -переход (припайки кристалла к держателю — см. гл. IV).

Если в результате очередного межоперационного измерения выявляется заготовка прибора, параметр которой по нормам технических условий не соответствует ни одному типу приборов данной серии, такой прибор отбраковывают. Тем самым исключаются бесполезные затраты времени и материалов на изготовление заведомо негодного прибора. Кроме того, контролируя процент выхода годных заготовок после очередного межоперационного измерения, можно делать заключение о правильности технологического процесса.

Классификационным измерениям подвергаются готовые приборы. При этом измеряют только основные — классификационные — параметры. Значения параметров, полученные при классификационных измерениях, сравнивают с контрольными значениями этих параметров для каждого типа приборов данной серии (конструкции). Контрольные значения, как правило, имеют запас против значений, указанных в паспорте прибора. В зависимости

от типа приборов и категории заказчика запас может быть до 50%. Это делается для повышения эксплуатационной надежности выпускаемых приборов.

По результатам сравнений устанавливаются, какому типу приборов соответствуют значения измеренных параметров, и, следовательно, определяют тип прибора.

При современном производстве полупроводниковых приборов применяют ручной и автоматический способы измерений, а также сочетание обоих способов.

В настоящей главе рассматривается методика измерений основных параметров современных полупроводниковых приборов. Параметры, измеряемые при промышленном производстве приборов, даны в табл. 3. Методика измерений некоторых параметров ряда полупроводниковых приборов излагается кратко, так как эти измерения сложны и проводятся квалифицированным инженерно-техническим персоналом.

Кроме того, не рассматриваются измерения, выполняемые в соответствии с технологией до начала изготовления непосредственно полупроводникового прибора (например, измерение поверхностного сопротивления пластин), поскольку они не входят в содержание данной книги. Методика этих измерений освещена в соответствующей литературе.

Большая зависимость параметров приборов от температуры предъявляет определенные требования к способам измерений.

Отсчет измеряемых параметров во избежание нагрева прибора следует производить сразу же после включения напряжений или токов или через указанное время (обычно несколько секунд). Причем сначала надо измерять обратные токи, а затем остальные параметры.

При измерительных операциях, режим которых может вызвать нагрев измеряемого прибора, обеспечивается отвод тепла от корпуса прибора.

Обычно используются следующие способы отвода тепла:

поглощение тепла массивным корпусом аппаратуры, в которой производятся измерения;

теплообмен с окружающим воздухом при помощи специальных радиаторов;

охлаждение с помощью специальных жидких или газообразных теплоносителей (масел, жидкого азота и т. д.).

Параметры полупроводниковых приборов, измеряемые при промышленном производстве

Классы приборов	Разновидности приборов	Изменяемые параметры
Диоды	Выпрямительные	$U_{пр}; U_{обр. макс}$
	Высокочастотные и сверхвысокочастотные	$U_{пр}; U_{обр. макс}; \Delta f; C; Q$
	Импульсные	$U_{пр}; U_{обр. макс}; R_{имп. макс}; t_{восст}$
	Опорные	$U_{пр}; U_{обр. макс}; U_{ст}; R_d$
	Варикапы	$C_{ном}; U_{см}; Q$
	Туннельные	$I_{макс}; C; U_{макс}$
	Светодиоды	$B; U_F$
	Лазерные	$P_{II}; \lambda; P_{II} = f(\lambda)$
	Фотодиоды	$I_t; I_c$
Тиристоры	Динисторы и симисторы	$U_{пр. макс}; U_{обр. макс}; U_{пер}; I_{пер}; I_{выкл}; U_{ост}; I_{ут}$
	Управляемые тиристоры	$U_{пр. макс}; U_{обр. макс}; U_{пер}; I_{пер}; I_{выкл}; U_{ост}; I_{ут}; I_{упр}; U_{упр}; t_{вкл}; t_{выкл}$
	Управляемые симисторы	$U_{пр. макс}; U_{обр. макс}; U_{пер}; I_{пер}; I_{выкл}; U_{ост}; I_{ут}; t_{вкл}; t_{выкл}; I_{пом. упр}; U_{пом. упр}$

Классы приборов	Разновидности приборов	Измеряемые параметры
Тиристоры	Запираемые тиристоры	$U_{\text{пр. макс}}; U_{\text{обр. макс}}; U_{\text{пер}}; I_{\text{пер}}; I_{\text{выкл}}; U_{\text{ост}}; I_{\text{ут.}}; I_{\text{зап}}; U_{\text{зап}}; I_{\text{ном. зап}}; U_{\text{ном. зап}}; t_{\text{вкл}}; t_{\text{выкл}}$
	Фототиристоры	$P_{\text{у}}; U_{\text{пер}}; I_{\text{пер}}; I_{\text{выкл}}; U_{\text{ост}}$
Транзисторы	Биполярные	$I_{\text{к0}}; I_{\text{э0}}; h_{22}; f_{\alpha}; B ; f_{\text{макс}}; K_{\text{ш}}; S_{\text{ст}}; U_{\text{кн}}; U_{\text{бн}}; r'_{\text{б}}; C_{\text{к}}; C_{\text{к}}$
	Полевые	$h_{22}; C_{\text{вх}}; C_{\text{прох}}; C_{\text{вых}}; U_{\text{0}}; U_{\text{пор}}; S; I_{\text{ст}}; K_{\text{ш}}$
	Фототранзисторы	$I_{\text{т}}; I_{\text{с}}$
Оптроны	Резисторные	$R_{\text{т}}; R_{\text{с}}; U_{\text{вх}}; t_{\text{вкл}}; t_{\text{выкл}}$
	Тиристорные	$I_{\text{вх}}; U_{\text{вх}}; I_{\text{ут. пр}}; I_{\text{ут. обр}}; U_{\text{ост}}; I_{\text{выкл}}; I_{\text{ном}}$

§ 39. ИЗМЕРЕНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

Выпрямительные диоды классифицируются по следующим параметрам:

максимальному обратному напряжению $U_{\text{обр. макс}}$ при заданном значении обратного тока $I_{\text{обр. макс}}$; величине выпрямленного тока $I_{\text{выпр}}$.

Важным параметром является диапазон рабочих частот диода (иногда дается максимальная частота $f_{\text{макс}}$). Если частота переменного напряжения, приложенного к диоду, превышает $f_{\text{макс}}$, потери в диоде резко возрастают и он разогревается.

Диоды по результатам классификационных измерений параметров подразделяют по типам внутри одной серии.

По современной технологии производства выпрямительных диодов производят как межоперационные изме-

рения, так и классификационные. Причем в обоих случаях могут контролироваться одни и те же параметры. В первом случае измеряют кристалл с $p-n$ -переходом и заготовку, во втором — готовый диод.

Проверка формы ВАХ $p-n$ -перехода по осциллографу. Кристалл с $p-n$ -переходом при помощи специального измерительного штеккера включают в цепь переменного тока и по осциллографу наблюдают его вольт-амперную характеристику. Штеккер для измерения плоскостных высоковольтных $p-n$ -переходов показан на рис. 65. Таким штеккером пользуются при некоторых измерительных операциях, когда кристалл еще не закреплен на арматуре.

В пластмассовом корпусе 1 помещен металлический штюк 2, свободно перемещающийся вдоль продольной оси. Штюк жестко связан с кнопкой 3, через верхнее отверстие которой вводится гибкий проводник 4, припаянный к штюку. Другой конец проводника присоединен к измерительной схеме. На корпус накручена пластмассовая крышка 6, в которой имеется канал. Крышка навинчивается на корпус 1 так, чтобы воздушный канал крышки совпал с каналом корпуса. В верхней части крышки в торец с каналом укреплен штюцер 5. В нормальном состоянии штюк 2 удерживается пружиной 8 в верхнем положении. Внутренняя полость корпуса через канал 7 и продольные пазы в нижней части штюка связана с отверстием наконечника 9. Штюцер 5 посредством гибкого резинового шланга соединя-

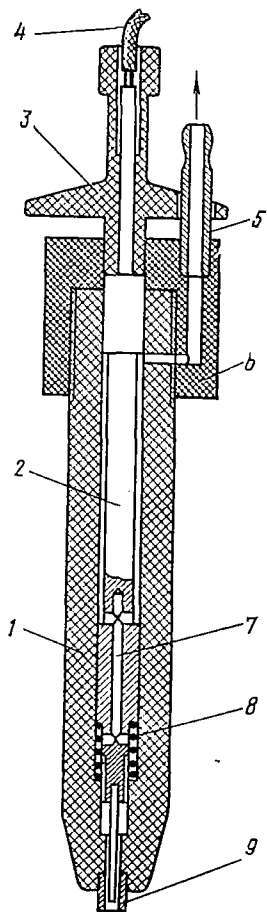


Рис. 65. Штеккер для измерения высоковольтных $p-n$ -переходов:

1 — корпус, 2 — штюк,
3 — кнопка, 4 — проводник,
5 — штюцер, 6 — крышка, 7 — канал, 8 — пружина, 9 — наконечник

ется с откачной станцией, поэтому в корпусе создается разрежение воздуха.

Для проведения измерений прикасаются наконечником 9 к верхней плоскости измеряемого кристалла. При этом кристалл под действием разности давлений снизу и сверху плотно прижимается к наконечнику. В таком положении кристалл переносят на измерительную площадку и прижимают к ее поверхности, в результате чего создается контакт нижней поверхности кристалла с площад-

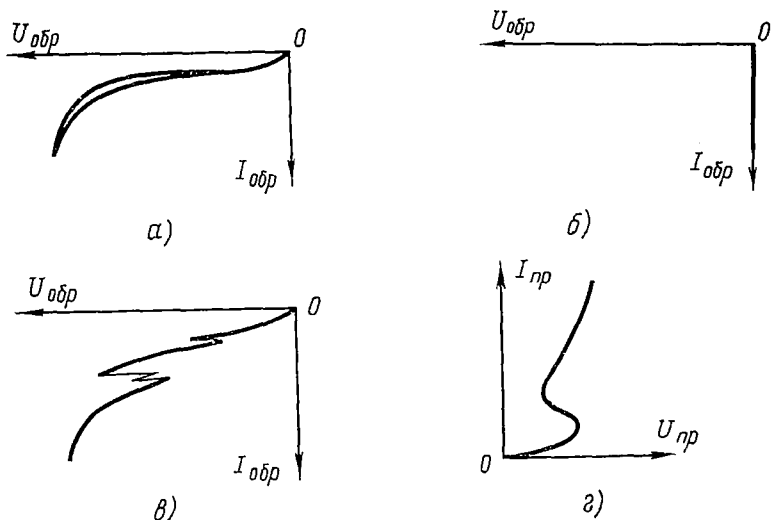


Рис. 66. Примеры искажений вольт-амперных характеристик диодов:

а, б, в — искажения обратной ветви, г — искажения прямой ветви

кой, к которой присоединен проводник от измерительной схемы. Для образования замкнутой измерительной цепи через $p-n$ -переход нажимают кнопку 3. При этом шток опускается вниз и создается надежный контакт между его нижним концом и верхней поверхностью кристалла.

Проверка ВАХ $p-n$ -перехода по осциллографу дает возможность быстро отбраковать кристаллы, имеющие значение обратного тока больше определенной величины (как иногда говорят, короткое замыкание по обратной ветви), и кристаллы с искаженной формой ВАХ.

На рис. 66 показаны вольт-амперные характеристики, имеющие искажения обратной и прямой ветвей. Искаже-

ния, приведенные на рис. 66, а, вызваны наличием влаги в кристалле. Кристаллы, форма ВАХ которых показана на рис. 66, б, имеют короткое замыкание (к. з.) по обратной ветви. На рис. 66, г показана форма прямой ветви ВАХ $p-n$ -перехода, который в результате нарушения технологии приобрел свойство переключения. Могут быть и другие виды искажений ВАХ $p-n$ -переходов.

Схема для проверки вольт-амперной характеристики $p-n$ -переходов представлена на рис. 67. Испытуемый кристалл ИК включен в цепь вторичной обмотки понижающего трансформатора Tr и работает в качестве однополупериодного выпрямителя. Во избежание поверхностного пробоя незащищенного кристалла и разрушений

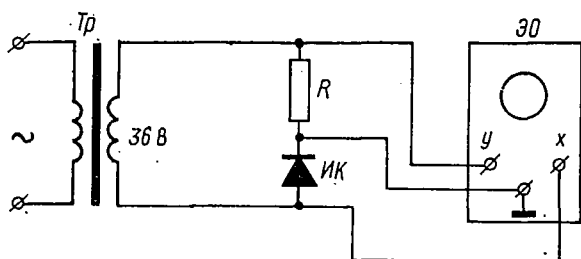


Рис. 67. Схема для наблюдения ВАХ $p-n$ -перехода:

Tr — понижающий трансформатор, ИК — измеряемый кристалл, ЭО — электронный осциллограф

его поверхности в местах контактов измерения проводятся соответственно при низком напряжении и малом токе. Это условие остается в силе и при других измерениях $p-n$ -перехода.

Ток, протекающий через $p-n$ -переход, образует на резисторе R падение напряжения, величина которого в каждый момент времени по закону Ома пропорциональна силе тока. Это напряжение через зажим y подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа ЭО. Напряжение, приложенное к $p-n$ -переходу, через зажим x подается на горизонтально отклоняющие пластины. Поступающие на входы осциллографа напряжения вызывают отклонение электронного луча по закону зависимости тока через $p-n$ -переход от напряжения, приложенного к переходу.

Измерение классификационных параметров. Классификационные параметры выпрямительных диодов изме-

ряются как на постоянном, так и на переменном токе. В первом случае режим измерений называется *статическим*, во втором — *динамическим*. Выбор режима измерения определяется в каждом отдельном случае конкретными условиями производства и наличием технических средств. Необходимость применения того или иного режима в основном диктуется следующими соображениями:

1. В статическом режиме можно мерить параметры обратной ветви ВАХ $p-n$ -перехода без измерения параметров прямой ветви. Это важно в том случае, когда на $p-n$ -переходе недопустимо рассеивать большую мощность (подробно об этом будет сказано ниже).

2. Статический режим является более жестким по обратному току, так как последний не меняется по величине и действует непрерывно во все время измерения. Это позволяет выявить дефекты в защите $p-n$ -перехода.

3. В динамическом режиме можно измерить среднее значение выпрямленного тока, что позволяет оценить качество диода как выпрямителя.

4. В динамическом режиме диод подвергается совместному воздействию прямого и обратного напряжения. Это дает возможность наиболее объективно измерить параметры диода.

Статический режим. Измерениям могут подвергаться и кристалл с $p-n$ -переходом, и готовый диод.

Схема для измерения параметров обратной ветви ВАХ диодов представлена на рис. 68. От стабилизированного источника постоянного тока I на измеряемый диод ($p-n$ -переход) ID подается напряжение в непроводящем направлении. При измерениях задаются значением обратного тока по миллиамперметру mA , а обратное напряжение на приборе измеряют вольтметром V . Так как источник тока I стабилизированный, то независимо от величины обратного сопротивления измеряемого диода величина обратного тока одинакова для всех диодов.

При межоперационных измерениях $p-n$ -переход, у которого значение $U_{обр}$ ниже установленной нормы, бракуется. При классификационных измерениях по значению обратного напряжения измеряемый диод относят к тому или иному типу в соответствии с техническими условиями.

Прямая ветвь ВАХ в статическом режиме не измеряется, так как для выпрямительных диодов важно значение выпрямленного прямого тока.

Динамический режим. Измеряемый диод работает в качестве однополупериодного выпрямителя переменного тока. При измерениях в динамическом режиме величина прямого тока задается по среднему значению выпрямленного тока, а величина обратного напряжения — по амплитудному значению переменного напряжения, подводимого к диоду. Измеряемые величины $U_{пр}$ и $I_{обр}$ характеризуются их средним значением. Среднее значение прямого тока задается по амперметру магнитоэлектрической системы, по которому непосредственно производится отсчет. При этом измеряется ток, протекающий через измеряемый диод в те полупериоды, когда напряжение приложено к диоду в прямом направлении. Обратный ток, протекающий по амперметру в отрицательные полупериоды, не вызовет сколько-нибудь заметных изменений в показаниях амперметра, так как его величина в тысячи раз меньше величины прямого тока.

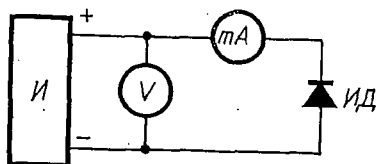


Рис. 68. Схема для измерения параметров обратной ветви ВАХ диодов:

И — стабилизированный источник постоянного тока, *V* — вольтметр постоянного тока, *mA* — миллиамперметр постоянного тока, *ИД* — измеряемый диод

Измеряемые величины $U_{пр}$ и $I_{обр}$ характеризуются их средним значением. Среднее значение прямого тока задается по амперметру магнитоэлектрической системы, по которому непосредственно производится отсчет. При этом измеряется ток, протекающий через измеряемый диод в те полупериоды, когда напряжение приложено к диоду в прямом направлении. Обратный ток, протекающий по амперметру в отрицательные полупериоды, не вызовет сколько-нибудь заметных изменений в показаниях амперметра, так как его величина в тысячи раз меньше величины прямого тока.

Амплитудное значение обратного напряжения, подводимого к диоду, можно контролировать измерением этого напряжения обычным вольтметром магнитоэлектрической системы, показывающим действующее значение напряжения. Амплитудное значение напряжения определяют по формуле

$$U_A = \sqrt{2} U_{эф}, \quad (6)$$

где U_A — амплитудное значение напряжения; $U_{эф}$ — эффективное значение напряжения.

Следует отметить, что формула справедлива для напряжения строго синусоидальной формы. Таким образом, имея источник переменного синусоидального напряжения, можно контролировать амплитудное значение обратного напряжения непосредственно по вольтметру, если шкала последнего будет отградуирована в амплитудных значениях.

Схема установки для измерения динамических параметров диода представлена на рис. 69. Питание схемы

осуществляется через разделительный трансформатор Tr . Трансформатор нужен, во-первых, для получения на схеме заданной величины напряжения, а во-вторых, он защищает схему от помех, поступающих из сети. В зависимости от конкретных условий трансформатор может быть как понижающим, так и повышающим. Диод $D2$ включен в цепь так, что пропускает прямой ток измеряемого диода и не пропускает его обратного тока, а диод $D3$, наоборот,

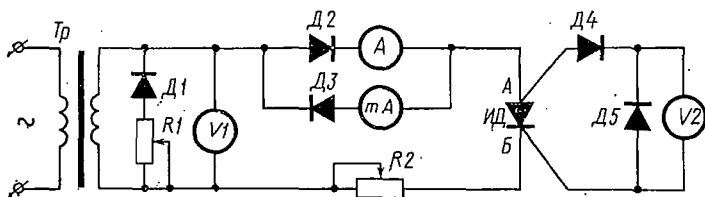


Рис. 69. Схема для измерения динамических параметров диодов

пропускает обратный ток измеряемого диода. Соответственно прямой ток измеряется амперметром A , а обратный — миллиамперметром mA .

Амплитудное значение обратного напряжения контролируется вольтметром $V1$. При обратной полуволне напряжения фактически все напряжение прикладывается к измеряемому диоду, так как сопротивление остальных элементов схемы ничтожно мало по сравнению с обратным сопротивлением $p-n$ -перехода.

Прямое падение напряжения на диоде измеряется вольтметром $V2$. Обратное напряжение на измеряемом диоде не вызывает отклонения стрелки вольтметра, так как через диод $D4$ проходит ток только в положительные полупериоды напряжения. Диод $D4$ необходимо выбирать с минимальным обратным током, поскольку его обратный ток, суммируясь с обратным током диода $ИД$, вносит погрешность в измеряемую величину $I_{обр}$. Калибровку вольтметра $V2$ следует производить совместно с подобранным диодом $D4$. Реостат $R1$ вместе с диодом $D1$ служит для создания симметричной нагрузки на трансформатор, что необходимо для сохранения правильной формы синусоидального напряжения. Эта цепочка проводит ток в обратный полупериод напряжения, т. е. тогда, когда через измеряемый диод проходит обратный ток (величина которого очень мала).

Для измерения прямого падения напряжения с помощью реостата $R2$ устанавливают требуемую величину прямого тока, а по вольтметру $V2$ измеряют падение напряжения.

Назначение диода $D5$ — защита вольтметра $V2$ от перегрузки, так как при обратной полуволне напряжения источника питания величина напряжения, приложенного к испытываемому диоду в точках A и B , во много раз больше предела измерения вольтметра (напомним, что им измеряется прямое падение напряжения). Из курса средней школы известно, что в последовательной цепи напряжение распределяется пропорционально сопротивлениям участков цепи. Если диод $D5$ отсутствует, величину напряжения между точками A и B можно выразить формулой

$$U_{\text{обр}} = I_{\text{изм}} R_{\text{д}} + I_{\text{изм}} R_{\text{V}}, \quad (7)$$

где $I_{\text{изм}}$ — измерительный ток, протекающий через диод $D4$ в обратном направлении и вольтметр $V2$; $R_{\text{д}}$ — обратное сопротивление диода; R_{V} — внутреннее сопротивление вольтметра.

В формуле (7) $I_{\text{изм}} R_{\text{д}} = U_{\text{д}}$ есть падение напряжения (по закону Ома) на диоде $D4$, а $I_{\text{изм}} R_{\text{V}} = U_{\text{V}}$ есть падение напряжения на вольтметре $V2$. Поскольку $R_{\text{д}}$ и R_{V} — величины одного порядка, то напряжение U_{V} достаточно велико и вольтметр выйдет из строя.

Диод $D5$ для обратной полуволны напряжения включен в прямом направлении. Своим малым сопротивлением диод шунтирует вольтметр и величина U_{V} становится очень малой, так как почти все напряжение $U_{\text{обр}}$ прикладывается к диоду $D4$.

Маркированные диоды обычно проходят окончательную проверку по форме обратной ветви вольт-амперной характеристики. Необходимость данной операции вызвана тем, что в результате тренировки и испытаний диодов (подробно об этом будет сказано ниже) в кристалле могут появиться микротрещины. Кроме того, по тем же причинам диод может быть разгерметизирован, вследствие чего может произойти конденсация влаги на кристалле. Появление микротрещин в кристалле вызывает искажения формы обратной ветви ВАХ, подобные показанным на рис. 66, в.

Наблюдение обратной ветви ВАХ готовых диодов производится по схеме, приведенной на рис. 70. Принципи-

ально она не отличается от схемы для наблюдения обратной ветви ВАХ кристалла (см. рис. 67). Разница лишь в том, что на измеряемый диод подается обратное напряжение не 36 В, а соответствующее типу измеряемого диода. Напряжение, подаваемое на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа, снимается с резистора $R2$ делителя $R1—R2$. Величина и форма этого напряже-

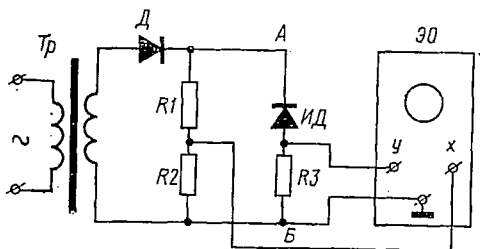


Рис. 70. Схема для наблюдения ВАХ диодов.

ния изменяются по тому же закону, что и величина и форма обратного напряжения между точками A и B (см. рис. 70).

Диод D включен в цепь в направлении, противоположном направлению измеряемого диода. Он запирает цепь в тот полупериод, когда измеряемый диод проводит ток. Прохождение прямого тока через измеряемый диод вызвало бы большое падение напряжения на резисторе $R3$ по формуле

$$U_R = I_{\text{пр}} R3$$

и как следствие этого — перегрузку осциллографа.

Следует отметить, что просмотр ВАХ $p-n$ -перехода и готового диода осуществляется в случае необходимости при производстве и других диодов (высокочастотных, опорных и т. п.).

§ 40. ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ И СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ДИОДОВ

При производстве высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) диодов, так же как и при производстве диодов выпрямительных, измеряется величина максимального обратного напряжения при заданном зна-

чении обратного тока. Кроме того, измеряется величина прямого падения напряжения при заданном прямом токе. Эти параметры являются классифицированными.

Другими параметрами, характеризующими качество ВЧ и СВЧ диодов, являются:

диапазон рабочих частот Δf ;

емкость C ;

добротность Q .

В соответствии с табл. 3 эти параметры также контролируются при производстве диодов.

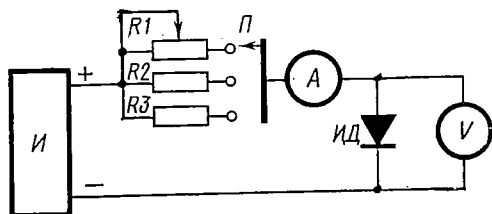


Рис. 71. Схема для измерения параметров прямой ветви вольт-амперной характеристики диодов

Прямое падение напряжения можно измерять как в динамическом, так и в статическом режимах. Измерения в динамическом режиме производятся так же, как и для выпрямительных диодов. В статическом режиме измеряемый диод *ИД* (рис. 71) подключают к источнику постоянного тока *И*. Величина тока задается резисторами *R1—R3* с помощью переключателя *П* в соответствии с техническими условиями на приборы данной серии. Прямое падение напряжения измеряют вольтметром *V*. Для исключения влияния подводящих проводов на показания вольтметра (сопротивление проводов соизмеримо с прямым сопротивлением диода) последний подключают непосредственно к выводам диода.

Межоперационные измерения $U_{пр}$ на *p—n*-переходе можно осуществлять только после припайки к нему выводов, в противном случае неизбежно повреждение *p—n*-перехода в местах контакта его со штеккером из-за достаточно большой величины прямого тока.

Если значение прямого падения напряжения оказывается в заданных пределах, прибор считается годным.

При классификационных измерениях поочередно с помощью переключателя Π задаются различными значениями прямого тока (согласно ТУ) и измеряют соответствующие им значения прямого падения напряжения. По максимальному значению прямого тока, при котором величина прямого падения напряжения не превысила нормы, измеряемый диод относят к определенному типу.

Проверка работы диодов в диапазоне частот проводится методом снятия частотных характеристик по схеме, приведенной на рис. 72.

Измеряемый диод ($p-n$ -переход) $ИД$ подключают по схеме однополупериодного выпрямителя к выходу генератора синусоидального напряжения $ГСН$. Параметры схемы выбирают из условия, что диод должен работать на участке вольт-амперной характеристики с явно выраженной кривизной (см. рис. 15), так как в этой части ВАХ можно измерять значения тока с достаточной точностью. Для выполнения данного условия амплитуда сигнала на выходе генератора $ГСН$ должна быть не более 2 В, а суммарное сопротивление, состоящее из сопротивления нагрузки R_H и внутреннего сопротивления миллиамперметра mA , — не более 1 кОм.

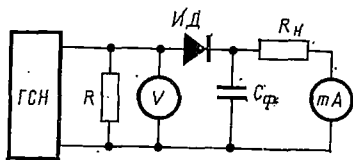


Рис. 72. Схема для проверки диодов в диапазоне частот:

$ГСН$ — генератор синусоидального напряжения, R — согласующее сопротивление, V — пиковый вольтметр, $C_Ф$ — конденсатор фильтра, R_H — сопротивление нагрузки

Измерения проводятся следующим образом. На генераторе $ГСН$ устанавливают частоту нижнего предела заданного частотного диапазона. Величину подводимого к диоду напряжения контролируют по пиковому вольтметру V и поддерживают неизменной при всех измерениях.

Величину выпрямленного тока, отсчитываемую по миллиамперметру mA , принимают за 100%. Затем не менее чем в 10 точках заданного диапазона частот измеряют выпрямленный ток при различных частотах входного сигнала, перекрывая весь диапазон. Значения выпрямленного тока пересчитывают в процентном отношении к его первичному значению.

Диод считается годным, если величина выпрямленного тока, измеренного в разных точках диапазона, состав-

ляет не менее 70% величины тока, измеренного на частоте нижнего предела частотного диапазона.

Резистор R в схеме служит для создания нагрузки на генератор ГСН в непроводящий полупериод измеряемого диода для исключения искажений формы напряжения на выходе генератора. Назначение конденсатора

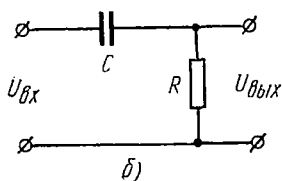
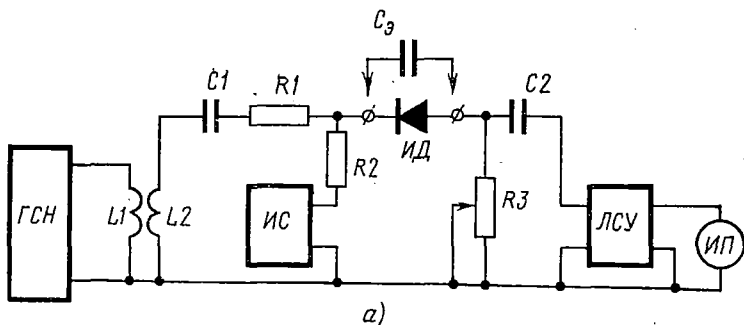


Рис. 73. Измерение емкости полупроводниковых приборов:

a — принципиальная схема, b — емкостно-омический делитель; $L1$ — $L2$ — контур связи, $C1$, $C2$ — разделительные конденсаторы, ЛСУ — линейный селективный усилитель, ИП — измерительный прибор, ИС — источник постоянного смещения, C_0 — эталонная емкость

фильтра C_f — уменьшение пульсаций выпрямленного диодом напряжения.

Измерение емкости диодов производят по схеме, приведенной на рис. 73, a . Для измерения применяют метод емкостно-омического делителя (рис. 73, b). Делитель состоит из конденсатора C и резистора R .

Из курса электротехники известно, что емкостное сопротивление выражается формулой

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C},$$

где f — частота подводимого напряжения.

Величина тока через делитель

$$I = \frac{U_{вх}}{\sqrt{X_C^2 + R^2}}, \quad (8)$$

где $U_{вх}$ — входное напряжение.

Из выражения следует, что напряжение на резисторе

$$U_{\text{вых}} = IR = \frac{U_{\text{вх}}R}{\sqrt{\left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2 + R^2}}, \quad (9)$$

где $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение делителя.

При $X_C \gg R$ можно принять из выражения (9), что

$$U_{\text{вых}} = \frac{RU_{\text{вх}}}{\frac{1}{2\pi fC}} = 2\pi RfCU_{\text{вх}}. \quad (10)$$

Из формулы видно, что величина напряжения $U_{\text{вых}}$ пропорциональна величине емкости C , т. е. зависимость $U_{\text{вых}} = f(C)$ линейна.

На рис. 73, а дана схема для измерения емкости диода описанным методом. Емкостно-омический делитель образован измеряемым диодом ID и резистором $R3$. Сопротивление резистора $R3$ намного меньше величины емкостного сопротивления диода. Синусоидальные колебания генератора $ГСН$ через контур связи $L1-L2$, разделительный конденсатор $C1$ и ограничительный резистор $R1$ поступают на делитель $ID-R3$.

С помощью источника постоянного смещения $ИС$ задают положение рабочей точки обратной ветви вольт-амперной характеристики измеряемого прибора. С резистора $R3$ снимается выходное напряжение и через разделительный конденсатор $C2$ подается на линейный селективный усилитель $ЛСУ$. Последний представляет собой многокаскадный усилитель с узкой полосой пропускания и линейной характеристикой «вход — выход» (эти два обстоятельства и определяют его название). Селективность (избирательность) усилителя позволяет избавиться от помех на других частотах. Напряжение высокой частоты на выходе усилителя выпрямляется и подается на стрелочный измерительный прибор $ИП$ — вольтметр, шкала которого равномерна и отградуирована в единицах емкости.

Перед измерением емкости диода производят калибровку шкалы измерительного прибора, для чего вместо диода подключают эталонную емкость C_0 . От генератора $ГСН$ подают переменное напряжение, величина и частота которого должны быть такими же, что и при измерении емкости диода. Затем регулировкой усилителя $ЛСУ$

стрелку прибора *ИП* устанавливают на делении, соответствующем величине эталонной емкости C_a .

Следует отметить, что при измерении и калибровке необходимо учитывать собственную емкость схемы и соответственно корректировать показания измерительного прибора.

Измерение добротности диодов производится методом *последовательного резонансного контура*.

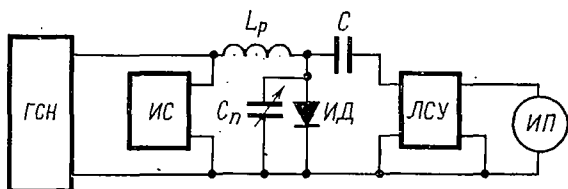


Рис. 74. Схема для измерения добротности полупроводниковых приборов

Для измерения используется схема, представленная на рис. 74. Контур образован резонансной катушкой L_p , конденсатором переменной емкости C_n и измеряемым диодом *ИД*. Как известно из курса радиотехники, при резонансе в последовательном контуре напряжение на емкости выражается формулой

$$U_c = U_L = U \cdot Q,$$

где U_c — переменное напряжение на конденсаторе C_n и диоде *ИД*; U_L — переменное напряжение на катушке L_p ; U — переменное напряжение, подаваемое на контур; Q — добротность контура.

Если задать добротность катушки значительно выше ожидаемой эквивалентной добротности параллельно включенных конденсатора C_n и диода *ИД*, то напряжение на емкости U_c будет определяться в основном эквивалентной добротностью $Q_{\text{экр}}$. Тогда можно считать, что

$$U_c = U \cdot Q_{\text{экр}}.$$

Приведенное выражение есть линейная функция. Напряжение, пропорциональное добротности, снимается с диода *ИД* и конденсатора C_n и подается через разделительный конденсатор C на линейный селективный усили-

тель ЛСУ. Выходное напряжение выпрямляется и поступает на измерительный прибор ИП. Шкала прибора отградуирована в единицах эквивалентной добротности. При измерении резонансный контур настраивают с помощью конденсатора C_{Π} в резонанс по максимальному отклонению стрелки измерительного прибора ИП. Конденсатор C_{Π} имеет лимб, по которому отсчитывают значение емкости диода $C_{д}$. В паспорте измерительного стенда указываются значения собственной добротности $Q_{соб}$ и собственной емкости $C_{соб}$, зная которые можно определить величину добротности диода по формуле

$$Q_{д} = \frac{Q_{соб} Q_{экв}}{Q_{соб} - Q_{экв}} \cdot \frac{C_{л}}{C_{соб}} \quad (11)$$

Величину Q можно определить также с помощью специальных номограмм, зная значения величин, входящих в выражение (11).

§ 41. ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ДИОДОВ

При производстве импульсных диодов измеряют параметры: $U_{обр.макс}$, $U_{пр}$. Для диодов одной серии параметр $U_{обр.макс}$ является классификационным. Кроме того, готовые диоды проверяют по значениям следующих параметров:

максимального импульсного сопротивления $R_{имп.макс}$; времени восстановления обратного сопротивления $t_{восст.}$

Измерение максимального импульсного сопротивления производят по схеме, приведенной на рис. 75. На измеряемый диод ИД в прямом направлении подаются прямоугольные импульсы от генератора импульсов тока ГИТ. Генератор представляет собой источник импульсного напряжения с очень большим внутренним сопротивлением. Поэтому, несмотря на малое прямое сопротивление диода, ток через диод не превышает допустимого значения. Ограничение тока обычным путем — с помощью добавочного сопротивления —

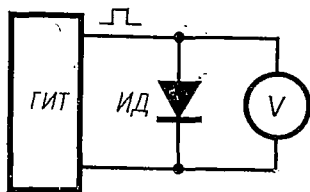


Рис. 75. Схема для измерения максимального импульсного сопротивления диодов:

ГИТ — генератор прямо-
угольных импульсов тока,
V — импульсный вольтметр

привело бы к увеличению постоянной времени внешней цепи и искажению формы импульса. Величина импульса тока через диод задается генератором и постоянна для любого измеряемого диода, так как

$$R_{\Gamma} \gg R_{\text{имп}},$$

где R_{Γ} — внутреннее сопротивление генератора; $R_{\text{имп}}$ — импульсное сопротивление диода.

Прямое падение напряжения на диоде измеряется импульсным вольтметром V .

Максимальное импульсное сопротивление подсчитывают по формуле

$$R_{\text{имп.макс}} = \frac{U_{\text{пр.имп.макс}}}{I_{\text{имп}}}, \quad (12)$$

где $U_{\text{пр.имп.макс}}$ — максимальное импульсное напряжение; $I_{\text{имп}}$ — импульс тока.

Диод считается годным, если величина сопротивления окажется в пределах норм ТУ.

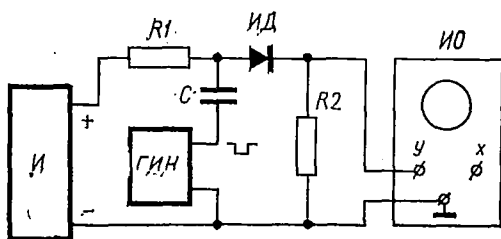


Рис. 76. Схема для измерения времени восстановления обратного сопротивления импульсных диодов:

ГИН — генератор прямоугольных импульсов напряжения, *R1* — ограничительный резистор, *R2* — измерительный резистор, *ИО* — импульсный осциллограф

Измерение времени восстановления обратного сопротивления производят по схеме, показанной на рис. 76. На измеряемый диод *ИД* подается прямой ток от источника постоянного тока *И* через ограничительный резистор *R1*. Кроме того, на диод подается импульс обратного напряжения от генератора прямоугольных импульсов *ГИН*. С помощью импульсного осциллографа *ИО* измеряется время восстановления $t_{\text{восст}}$,

прошедшее с момента, когда ток через диод равен нулю, до момента, когда обратный ток диода уменьшится до заданного значения (см. рис. 19). На вход осциллографа с резистора R_2 подается напряжение, пропорциональное току через диод.

Разделительный конденсатор C исключает влияние генератора $ГИН$ на величину постоянного тока от источника I . Он представляет собой для постоянного тока бесконечно большое сопротивление и преграждает току путь к генератору $ГИН$.

Источник тока I должен иметь достаточно большое сопротивление, чтобы по возможности меньше влиять на величину и форму импульса от генератора $ГИН$ (иначе говоря, не шунтировать диод ID по переменному току).

§ 42. ИЗМЕРЕНИЕ ОПОРНЫХ ДИОДОВ

Как видно из табл. 3, при производстве опорных диодов (стабилитронов) измеряют параметры $U_{пр}$, $U_{обр.макс}$. Кроме того, измеряют классификационные параметры:

напряжение стабилизации $U_{ст}$;

дифференциальное сопротивление R_d при заданных значениях тока стабилизации.

Измерения первых двух параметров производятся так же, как и в случае выпрямительных диодов. Однако в отличие от выпрямительных диодов, где классификация по типам осуществляется только по окончании изготовления диода, стабилитроны предварительно классифицируют уже в начале технологического процесса. Собственно, классифицируют пластины с $p-n$ -переходом. Задавая определенную марку кремния и выдерживая определенный режим термодиффузии, получают $p-n$ -переход, который должен иметь значения основных параметров, соответствующие конкретному типу приборов (например, Д815, Д815А и т. д.). Таким образом, получив $p-n$ -переход, предполагают, что он соответствует тому или иному типу стабилитрона. Кристаллы, образованные из этого $p-n$ -перехода, на всех технологических операциях сопровождаются маршрутным листом, в котором указан ожидаемый тип прибора.

Поэтому межоперационные измерения прямого падения напряжения выполняют при значении прямого тока, соответствующем ожидаемому типу стабилитрона. Анало-

гично измерения обратного напряжения производят при соответствующем значении обратного тока.

При измерении классификационных параметров $U_{ст}$ и R_d задаются значением классификационного тока также в соответствии с ожидаемым типом прибора.

По современной технологии классификационные параметры опорных диодов измеряют как на кристаллах с

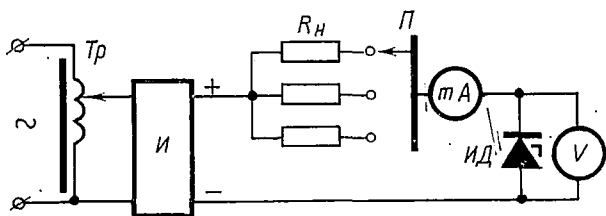


Рис. 77. Схема для измерения напряжения стабилизации опорных диодов

$p-n$ -переходом (межоперационные измерения), так и на готовых приборах. Готовые приборы классифицируются по напряжению стабилизации.

Измерение напряжения стабилизации производят по схеме, приведенной на рис. 77. От регулируемого с помощью автотрансформатора Tr источника постоянного тока $И$ через измеряемый диод $ИД$ пропускают классификационный ток. Ток контролируется миллиамперметром mA . С помощью магазина нагрузочных сопротивлений R_n устанавливают классификационный ток, соответствующий ожидаемому типу прибора. Вольтметром V измеряют напряжение стабилизации.

Дифференциальное сопротивление определяется как отношение величины изменения напряжения стабилизации к бесконечно малой величине изменения тока стабилизации. Определить величину дифференциального сопротивления измерением величины изменения напряжения стабилизации на постоянном токе очень сложно, так как величина изменения напряжения стабилизации ничтожно мала по сравнению с абсолютной величиной напряжения стабилизации.

Для измерения дифференциального сопротивления используется способ наложения переменной составляющей тока на постоянный ток стабилизации. При этом в

напряжении стабилизации также появится переменная составляющая, величина которой определяется по закону Ома:

$$\Delta U_{ст} = \Delta I_{ст} R_d,$$

где $\Delta I_{ст}$ — переменная составляющая тока стабилизации; R_d — дифференциальное сопротивление опорного диода.

Переменную составляющую напряжения стабилизации легко измерить милливольтметром переменного тока. Милливольтметр не реагирует на величину постоянного

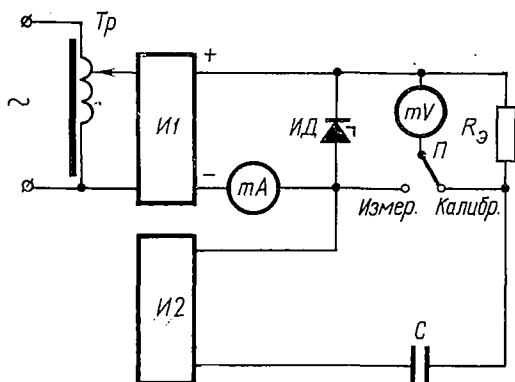


Рис. 78. Схема для измерения динамического сопротивления опорных диодов:

И1 — источник постоянного тока, *И2* — источник переменного тока, *mA* — миллиамперметр постоянного тока, *mV* — ламповый милливольтметр переменного тока, $R_э$ — эталонный резистор

напряжения, а измеряет только абсолютное значение приращения напряжения. Таким образом, задавшись переменной составляющей тока стабилизации и измерив переменную составляющую напряжения стабилизации, можно вычислить дифференциальное сопротивление диода.

Схема для измерения дифференциального сопротивления опорных диодов приведена на рис. 78. Измеряемый диод *ИД* подключают к регулируемому источнику постоянного тока *И1*. Классификационный ток через диод контролируется миллиамперметром *mA*.

Переменная составляющая тока через диод задается от источника переменного тока *И2*. Переменный ток про-

текает по цепи источник $I2$ — конденсатор C — резистор R_3 — диод ID — источник $I2$. Блокировочный конденсатор C не пропускает постоянный ток через источник $I2$, исключая его влияние на схему. Внутреннее сопротивление источника $I1$ должно быть по возможности большим, чтобы он не шунтировал измеряемый диод по переменному току.

Измерения производят следующим образом. Переключатель Π устанавливают в положение «Калибр». При этом по милливольтметру mV замеряют переменную составляющую напряжения U_R на эталонном резисторе R_3 . По напряжению U_R и сопротивлению резистора R_3 определяют величину переменной составляющей тока через измеряемый диод:

$$\Delta I_d = \frac{U_R}{R_3}.$$

Далее переключатель Π переводят в положение «Измер.» и по милливольтметру mV измеряют величину переменной составляющей напряжения на измеряемом диоде ΔU_d .

Зная значения ΔU_d и ΔI_d , по формуле

$$R_d = \frac{\Delta U_d}{\Delta I_d} \quad (13)$$

определяют величину дифференциального сопротивления диода. Если при измерениях задаваться одинаковым значением переменной составляющей тока для всех измеряемых диодов, т. е. сделать источник тока $I2$ стабилизированным, то шкала милливольтметра mV может быть градуирована непосредственно в омах.

§ 43. ИЗМЕРЕНИЕ ТИРИСТОРОВ

При производстве тиристорov, как управляемых, так и неуправляемых, измеряют следующие параметры (см. табл. 3):

- напряжение переключения $U_{пер}$;
- ток переключения $I_{пер}$;
- ток выключения $I_{выкл}$;
- остаточное напряжение $U_{ост}$;
- ток утечки $I_{ут}$;
- максимальное обратное напряжение $U_{обр. макс.}$.

Кроме того, при производстве управляемых тиристор-
ров измеряют параметры;

ток управления $I_{упр}$;

напряжение управления $U_{упр}$.

Для тиристор-
ов, как и для диодов, производится про-
смотр ВАХ кристалла и при необходимости — готового
прибора.

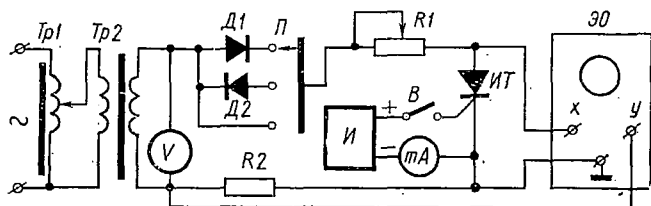


Рис. 79. Схема приставки для просмотра ВАХ тири-
стор-
ов

Выборочно проверяют время включения $t_{вкл}$ и время
выключения $t_{выкл}$ управляемых тиристор-
ов и симистор-
ов.

Классификационные параметры тиристор-
ов $I_{ут}$,
 $U_{обр.макс}$ измеряют так же, как параметры для выпрями-
тельных диодов.

Просмотр вольт-амперных характе-
ристик производят на осциллографе с помощью специа-
льной приставки (рис. 79).

Источник питания, состоящий из автотрансформатора
 $Tr1$, развязывающего трансформатора $Tr2$ и вспомо-
гательных диодов $D1$ и $D2$, формирует однополупериодное
напряжение. Величина напряжения регулируется авто-
трансформатором $Tr1$ и контролируется вольтметром V .

В первом положении переключателя $П$ обеспечи-
вается просмотр прямой, во втором — обратной, в третьем —
прямой и обратной ветвей ВАХ тиристор-
ов.

Напряжение на зажим x осциллографа подается с из-
меряемого диода. На зажим y напряжение поступает с
резистора $R2$. Это напряжение пропорционально току
через тиристор.

Для проверки ВАХ управляемых тиристор-
ов на управ-
ляющий электрод подают напряжение от стабилизи-
рованного регулируемого источника постоянного тока $И$.
Величину тока управления контролируют миллиампер-
метром mA . Замкнув контакт выключателя B , устанавли-

вают заданное значение тока управления. Увеличивая напряжение на выходе трансформатора $Tr1$, наблюдают за вольт-амперной характеристикой. Тиристор считается годным, если он переключается в пределах заданных значений тока управления. При этом на экране осциллографа наблюдается так называемая спрямленная ВАХ (см. рис. 31, в).

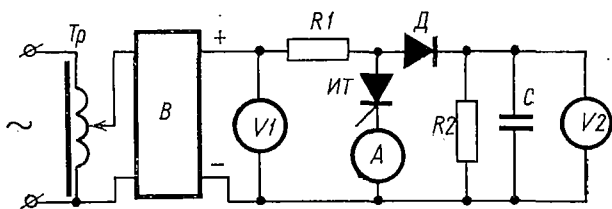


Рис. 80. Схема для измерения напряжения и тока переключения тиристоров

В схеме для наблюдения ВАХ неуправляемых тиристоров источник I отсутствует.

По схеме, приведенной на рис. 79, можно просматривать вольт-амперную характеристику не только готового прибора, но и кристалла, без обмотки и на обмотке.

Напряжение и ток переключения можно измерить по схеме, показанной на рис. 80. С выпрямителя B однополупериодное напряжение, регулируемое автотрансформатором Tr , через ограничительный резистор $R1$ подается на измеряемый тиристор IT . Величина напряжения контролируется вольтметром $V1$. Тиристор переключается, если амплитуда подводимого напряжения не меньше напряжения переключения. Момент переключения фиксируется амперметром A : при увеличении напряжения выше $U_{пер}$ ток в цепи тиристора начинает резко возрастать. При этом регистрируют значения $I_{пер}$ и $U_{пер}$.

На рис. 81 дана упрощенная форма кривой напряжения на тиристоре при подаче на него однополупериодного напряжения. Как видно из рисунка, на диоде формируются импульсы напряжения, амплитуда которых равна $U_{пер}$.

Импульсы напряжения измеряются диодным амплитудным вольтметром, образованным диодом D (см. рис. 80), резистором $R2$, конденсатором C и вольтметром $V2$. Измерения производят на готовом приборе.

Ток выключения измеряется по схеме, приведенной на рис. 82. На этом рисунке дан вариант схемы измерения для управляемых диодов.

От источника постоянного тока $I1$ на управляющий электрод измеряемого тиристора $ИТ$ подают ток управления, значение которого контролируется миллиамперметром $mA1$. Тиристор включают в цепь стабилизированного источника постоянного тока $I2$. Параллельно тиристор включен миллиамперметр $mA3$ со стабилитроном D .

Измерения проводят в следующем порядке. Замыканием кнопки Kn включают тиристор, после чего кнопку размыкают. Уменьшая ток источника $I2$, следят за показаниями миллиамперметра $mA3$. При скачкообразном увеличении его показаний прекращают уменьшение тока. По миллиамперметру $mA2$ определяют значение тока $I_{выкл}$.

Схема при измерениях работает та-

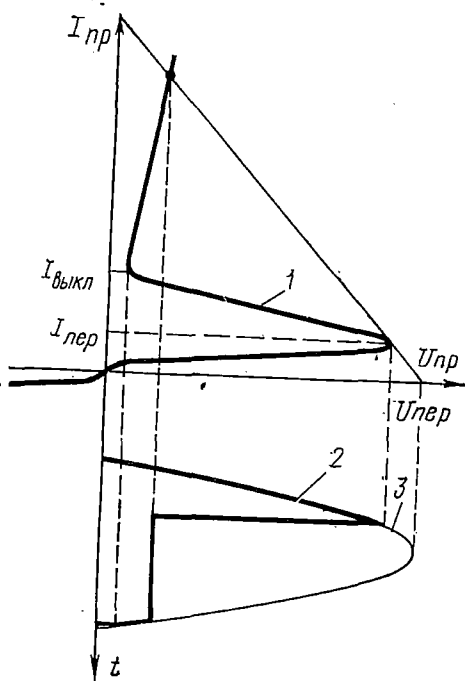


Рис. 81. Упрощенная форма импульса, формируемого тиристором при подаче на него однополупериодного напряжения:

1 — ВАХ тиристора, 2 — форма напряжения, выделяемого на тиристоре, 3 — напряжение на выходе выпрямителя

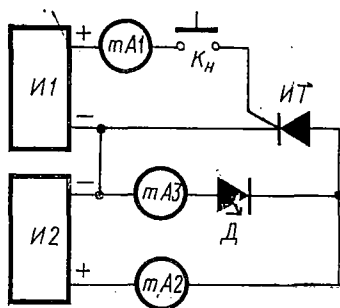


Рис. 82. Схема для измерения тока выключения тиристора

ким образом. При выключении тиристора напряжение на нем резко возрастает, что приводит к открыванию стабилитрона D . Ток через стабилитрон также резко возрастает. Ток от источника $I2$ теперь в основном протекает через стабилитрон. Так как сопротивления открытого тиристора и стабилитрона величины примерно одного порядка, а источник $I2$ стабилизирован по току, то в момент выключения измеряемого диода ток в цепи практически не изменится.

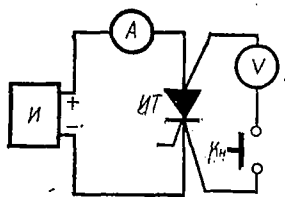


Рис. 83. Схема для измерения остаточного напряжения тиристоров

Вместо миллиамперметра $mA3$ может быть применен любой другой индикатор выключения, ток срабатывания которого не меньше тока в измеряемой цепи.

Ток включения *неуправляемых* тиристоров также можно измерять по вышеописанной методике. При этом тиристор включают, подавая на него напряжение, величина которого равна $U_{пер}$.

Величину тока выключения в зависимости от условий производства можно измерять и межоперационно, и на готовом приборе.

Остаточное напряжение измеряется по схеме, приведенной на рис. 83. На измеряемый тиристор (управляемый или неуправляемый) подают напряжение от регулируемого стабилизированного источника постоянного тока I . При измерениях тиристор переводят во включенное состояние (для упрощения чертежа схема включения не приводится). После включения тиристора, уменьшая или увеличивая напряжение, доводят значение тока через тиристор до заданной величины. Ток контролируют по амперметру A . Затем замыкают кнопку Kn и по вольтметру V производят отсчет значения остаточного напряжения.

Нажимать кнопку Kn при закрытом тиристоре недопустимо, так как при этом на тиристоре падает большое напряжение, которое может вывести вольтметр из строя.

Величину остаточного напряжения, как правило, проверяют на готовом диоде.

Ток утечки, максимальный прямой ток, обратный ток,

обратное напряжение и максимальное прямое напряжение измеряют способами, описанными в § 40.

Измерение тока и напряжения управления тиристоров производится по схеме, приведенной на рис. 84. Напряжение на измеряемый тиристор *ИТ* подают от источника постоянного напряжения *И1*, а управляющее напряжение — от источника постоянного тока

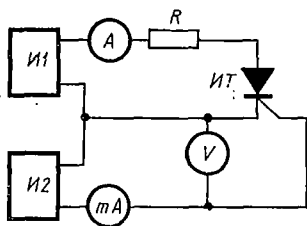


Рис. 84. Схема для измерения тока и напряжения управления триодных тиристоров

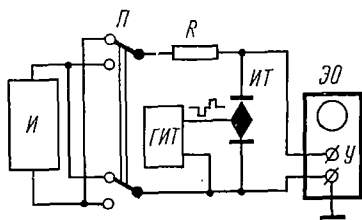


Рис. 85. Схема для измерения времени включения симметричных тиристоров

И2. Увеличивая ток управления, добиваются переключения тиристора. Момент переключения фиксируется по амперметру *A*. Миллиамперметром *mA* и вольтметром *V* измеряются значения тока и напряжения управления в момент включения тиристора. Прибор считается годным, если значения $I_{упр}$ и $U_{упр}$ находятся в пределах норм, указанных в технических условиях. Измерения $U_{упр}$ и $I_{упр}$ производят как межоперационно, так и на готовом приборе.

Временем включения $t_{вкл}$ тиристоров считается время, прошедшее с момента подачи управляющего импульса до момента, когда напряжение на открытом приборе станет равным 10% от заданного значения максимального напряжения на закрытом приборе. Время включения — параметр, характерный для всех видов управляемых тиристоров. Для примера рассмотрим схему измерения $t_{вкл}$ для управляемых симметричных тиристоров, показанную на рис. 85.

С помощью переключателя *П* задают полярность напряжения на измеряемом тиристоре *ИТ*, подаваемого от

источника постоянного напряжения U . Предварительно задают значение напряжения, равное $U_{\text{макс}}$ для данного типа приборов. С помощью генератора двуполярных импульсов тока ГИТ переводят измеряемый тиристор в открытое состояние.

Процесс открывания наблюдают по электронному осциллографу ЭО. Осциллограф должен иметь большое время послесвечения экрана.

Время включения $t_{\text{вкл}}$ (прошедшее с момента подачи управляющего импульса до того момента, когда напря-

жение на тиристоре станет равным $0,1 U_{\text{макс}}$) легко видеть на рис. 86. Момент начала управляющего импульса строго фиксирован по времени, и на экране осциллографа он взят за начало отсчета, что позволяет непосредственно измерять $t_{\text{вкл}}$.

Для симметричного тиристора измерения производят поочередно при подаче на прибор прямого и обратного напряжения (полярность изменяют с помощью переключателя П). Измерениям подвергается готовый прибор. Прибор считается годным,

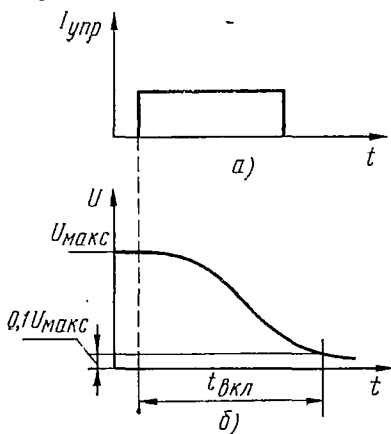


Рис. 86. К измерению времени включения симисторов:

a — импульс тока управления, b — напряжение на приборе в процессе открывания

если большее из значений времени включения при прямом и обратном напряжениях не превышает допустимого значения.

Общим для всех управляемых тиристоров параметром является также время выключения $t_{\text{выкл}}$.

После выключения тиристора на нем сохраняется электрический заряд, который постепенно исчезает вследствие рекомбинации носителей. Если на тиристор вновь подать прямое напряжение, то при достаточно большой величине этого напряжения тиристор вновь включится при значении $U_{\text{пр}}$, меньшем $U_{\text{пер}}$. Время между моментом, когда прямой ток через прибор станет равным нулю, и моментом, когда на прибор можно подавать прямое напряжение с заданными амплитудой и крутизной

фронта, которое еще не переключает его в открытое состояние, есть время выключения. Измерения производят по схеме, показанной на рис. 87. Схема дана для управляемых симметричных тиристоров. Назначение переключателя Π то же, что и на рис. 85.

Прибор $ИТ$ включают способом, описанным ранее. Затем прибор выключают подачей обратного напряже-

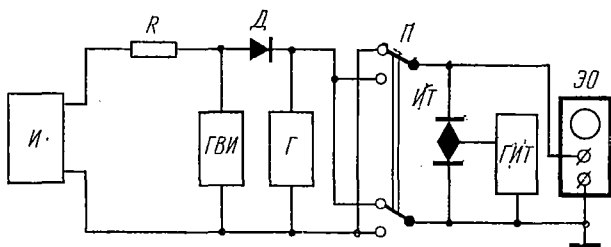


Рис. 87. Схема для измерения времени выключения симметричных тиристоров

ния от генератора выключающих импульсов $ГВИ$. Далее на прибор подают с регулируемым временем задержки напряжение прямой полярности от генератора $Г$ с заданными амплитудой и крутизной фронта. Время задержки контролируется. По осциллографу следят за поведением прибора. Минимальное время задержки, при котором прибор не переходит в открытое состояние, есть время выключения для данного прибора.

Для симметричного тиристора измерения проводят поочередно при подаче на прибор прямого и обратного напряжения. Прибор считается годным, если большее из значений времени выключения при прямом и обратном напряжении не превышает допустимого значения. Измерения $t_{\text{выкл}}$ проводят на готовом приборе.

К числу параметров, измеряемых при производстве управляемых тиристоров, относятся также ток и напряжение помехи управления $I_{\text{пом.упр}}$, $U_{\text{пом.упр}}$. Это максимальное значение тока и соответствующее ему значение напряжения управления, при которых еще не происходит включения тиристора.

На рис. 88 показана схема для измерения $I_{\text{пом.упр}}$ и $U_{\text{пом.упр}}$ на примере симметричного тиристора.

На измеряемый тиристор *ИТ* подается синусоидальное напряжение с амплитудой, максимальной для данного типа приборов. От генератора разнополярных импульсов тока *ГИТ* в цепи управляющего электрода увеличивают ток до момента включения прибора.

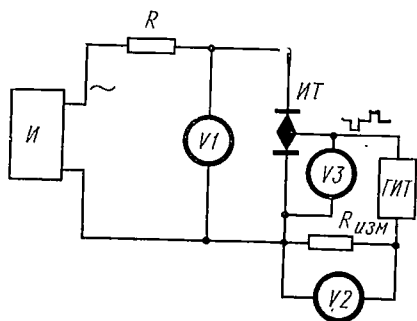


Рис. 88. Схема для измерения тока и напряжения помехи управления симметричного тиристора

Момент включения фиксируется с помощью вольтметра *V1*. По пиковому вольтметру *V3* определяют напряжение помехи. А по пиковому вольтметру *V2* измеряют падение напряжения на измерительном резисторе $R_{изм}$. Переведя показания вольтметра *V3* в миллиамперы, определяют ток помехи управления. Прибор считается годным, если значение тока помехи оказывается выше допустимого. Измерения проводят на готовом приборе.

Запираемые тиристоры измеряются по тем же параметрам, что и другие тиристоры. Кроме того, для запираемых тиристоров измеряют еще ток и напряжение запирающего ($I_{зап}$; $U_{зап}$), а также ток и напряжение помехи запирающего ($I_{пом.зап}$; $U_{пом.зап}$).

Измерение первых двух параметров производится аналогично измерению тока и напряжения управления. Измерение же $I_{пом.зап}$ и $U_{пом.зап}$ производят аналогично измерению $I_{пом.упр}$ и $U_{пом.упр}$. Разница в измерениях заключается в том, что тиристор переводят не из закрытого состояния в открытое, а наоборот.

Следует отметить, что измерение тока и напряжения помехи, а также времени включения и выключения, как правило, проводятся не на всех изготовленных приборах, а лишь на определенной партии приборов один раз в шесть или двенадцать месяцев. Такой порядок контроля существует тогда, когда завод-изготовитель гарантирует значение контролируемых при этом параметров.

§ 44. ИЗМЕРЕНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Транзисторы, так же как и диоды, делятся на классы по классификационным параметрам. Эти параметры особо выделяют в технических условиях на производство транзисторов. Например, маломощные низкочастотные и среднечастотные транзисторы классифицируют по коэффициенту усиления, по току и предельной частоте усиления или генерации. Маломощные высокочастотные транзисторы делят на классы по статическому коэффициенту усиления в схеме с общим эмиттером и модулю коэффициента усиления тока на частоте 10—20 мГц. Мощные низкочастотные транзисторы классифицируют по максимально допустимому обратному напряжению между коллектором и базой и статическому коэффициенту усиления тока в схеме с общим эмиттером.

В отдельных случаях в качестве классификационных указывают и другие параметры.

При производстве транзисторов после ряда операций выполняют межоперационные измерения. Применение тех или иных межоперационных измерений диктуется соображениями, указанными в § 40. Межоперационные и классификационные измерения выполняют, как правило, по единой методике. Ниже описываются методы измерения следующих основных параметров транзисторов:

обратных токов коллектора и эмиттера $I_{к.о}$, $I_{э.о}$;

выходной проводимости h_{22} ;

предельной частоты усиления f_{α} ;

модуля коэффициента усиления по току $|B|$;

максимальной частоты генерации $f_{\text{макс}}$;

коэффициента шума транзисторов $K_{ш}$;

крутизны статической характеристики $S_{ст}$;

напряжения между коллектором и эмиттером $U_{к.э}$, базой и эмиттером $U_{б.э}$ в режиме насыщения;

постоянной времени цепи обратной связи $r'_{б}C_{к}$;

емкости коллекторного и эмиттерного переходов.

Для транзисторов, как и для диодов, производится просмотр вольт-амперных характеристик методами, описанными ранее.

Следует отметить, что параметры h_{22} , f_{α} , $|B|$, $f_{\text{макс}}$, $K_{ш}$, $r'_{б}C_{к}$ и емкости переходов, называемые параметрами малого сигнала, измеряются на переменном токе при значениях амплитуд, много меньших значений постоянных составляющих. Это объясняется тем, что при малых

сигналах с достаточной точностью зависимость между токами и напряжениями можно считать линейной.

Параметры, измеряемые при производстве транзисторов, приведены в табл. 3.

Обратный ток коллектора измеряется по схеме, показанной на рис. 89. От источника постоянного напря-

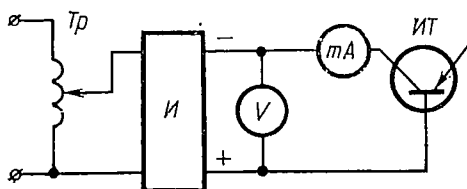


Рис. 89. Схема для измерения обратного тока коллектора транзисторов

жения I на переход коллектор — база транзистора $ИТ$ подается обратное напряжение*. Величина напряжения контролируется вольтметром V . Величина обратного тока измеряется миллиамперметром mA при значении напряжения источника I , указанном в технических условиях на измеряемый транзистор.

По такой же методике может быть измерен обратный ток эмиттера. При этом напряжение подается на переход эмиттер — база. Транзистор считается годным, если величина обратного тока коллектора (эмиттера) находится в пределах нормы.

Выходная проводимость измеряется в режиме холостого хода по входной цепи на переменном токе синусоидальной формы с частотой 50—100 Гц. Схема для измерения выходной проводимости приведена на рис. 90. Измеряемый транзистор $ИТ$ включен по схеме с общей базой. С помощью источников постоянного напряжения $И1$ и $И2$ устанавливают режим транзистора

* В схемах измерения параметров транзисторов здесь и далее указывается полярность включения источников питания и электронизмерительных приборов для транзисторов типа $p-n-p$. При измерениях параметров транзисторов типа $n-p-n$ полярность включения источников и электронизмерительных приборов должна быть обратной,

по постоянному току (по приборам $mA1$, $mA2$ и $V2$). Выходную проводимость определяют по формуле

$$h_{22} = \frac{I_{\kappa}}{U_{\kappa.б}}, \quad (14)$$

где I_{κ} — переменный ток коллектора; $U_{\kappa.б}$ — переменное напряжение перехода коллектор — база.

Напряжение $U_{\kappa.б}$ вырабатывается генератором синусоидального напряжения ГСН. Величина этого напряжения измеряется ламповым вольтметром $V1$ с помощью делителя $R_6 - R1$ при установке переключателя Π в по-

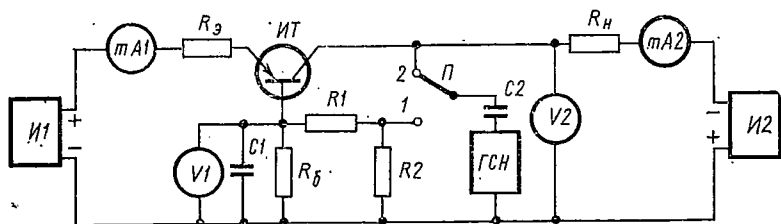


Рис. 90. Схема для измерения выходной проводимости транзисторов

ложение 1. Вольтметром $V1$ измеряется напряжение U_1 на резисторе R_6 , выражаемое зависимостью

$$U_1 = U_{\Gamma} \frac{R_6}{R_6 + R1}, \quad (15)$$

где U_{Γ} — переменное напряжение на выходе генератора после разделительного конденсатора $C2$.

Затем переключатель Π устанавливают в положение 2 и фиксируют напряжение U_2 на резисторе R_6 . Через значение U_2 можно выразить ток коллектора I_{κ} :

$$I_{\kappa} = \frac{U_2}{R_6}. \quad (16)$$

При переводе переключателя Π из положения 1 в положение 2 напряжение U_{Γ} сохраняют неизменным. Если резистор R_6 выбран из условия

$$R_6 \ll \frac{1}{100h_{22}},$$

то $U_{\kappa.б} \approx U_{\Gamma}$.

Тогда из выражения (15) получаем

$$U_1 = U_{к.б} \frac{R_6}{R_6 + R_1}. \quad (17)$$

Задавшись значением $R_1 \gg R_6$, из формулы (17) получим

$$[U_{к.б} \approx \frac{U_1 R_1}{R_6}. \quad (18)$$

Подставив выражения (16) и (18) в выражение (14), получим формулу для определения выходной проводимости:

$$h_{22} \approx \frac{U_2}{U_1 R_1}. \quad (19)$$

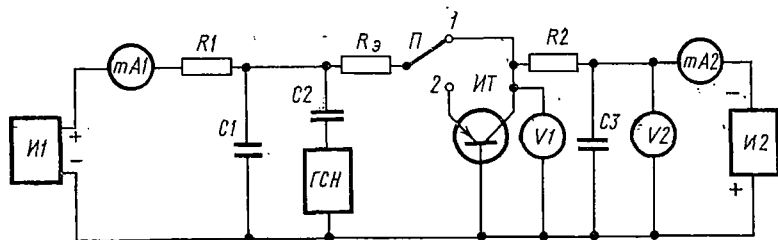


Рис. 91. Схема для измерения предельной частоты усиления транзисторов

Из выражения (19) видно, что при $U_1 = \text{const}$ зависимость $h_{22} = f(U_2)$ линейна. Следовательно, шкала вольтметра $V1$ может быть отградуирована непосредственно в единицах выходной проводимости.

Конденсатор $C1$ шунтирует резистор R_6 , исключая высокочастотную генерацию.

Предельная частота усиления измеряется по схеме, приведенной на рис. 91. Измеряемый транзистор $ИТ$ включен по схеме с общей базой. Ток эмиттера задается источником постоянного тока $И1$ через резисторы $R1$ и R_3 и контролируется миллиамперметром $mA1$. Напряжение на коллектор подается от источника $И2$ через резистор $R2$.

Для определения предельной частоты усиления измеряется модуль α , определяемый как отношение переменного тока коллектора I_k к току эмиттера I_3 .

При установке переключателя Π в положение 1 сигнал от генератора синусоидального напряжения ΓCH через разделительный конденсатор $C2$ и резистор R_3 подается на токосъемный резистор $R2$. Переменное напряжение U_1 на резисторе $R2$ измеряется ламповым вольтметром VI (сопротивлением емкости C_3 переменному току можно пренебречь). При этом

$$I_3 = \frac{U_1}{R2}.$$

Затем переключатель Π переводят в положение 2 и ток от генератора начинает поступать в цепь эмиттера. Величина тока остается неизменной, так как

$$R_r \gg R_2 \text{ и } R_r \gg h_{11},$$

где R_r — внутреннее сопротивление генератора; h_{11} — сопротивление перехода эмиттер — база (входное сопротивление транзистора).

Падение напряжения U_2 , создаваемое током коллектора на резисторе $R2$, регистрируется вольтметром VI . При этом

$$I_k = \frac{U_2}{R2}.$$

Исходя из определения модуля коэффициента усиления $|\alpha|$, имеем

$$|\alpha| = \frac{I_k}{I_3} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (20)$$

Измерения производят несколько раз при различных значениях частоты f .

Частота, при которой значение $|\alpha|$ равно 0,7, называется предельной частотой коэффициента передачи тока f_a . Из выражения (20) видно, что при $U_1 = \text{const}$ шкала вольтметра VI может быть проградуирована в значениях модуля $|\alpha|$.

Измерение модуля коэффициента усиления по току производится на высокой частоте по схеме, показанной на рис. 92. Измеряемый транзистор $ИТ$ включают по схеме с общим эмиттером по переменному току и общей базой по постоянному току. Источники $И1$ и $И2$ обеспечивают режим работы измеряемого транзистора по постоянному току. Напряжение высокой частоты от генератора высокой частоты $\Gamma В Ч$ через раз-

делительный конденсатор $C3$ подводится к эмиттерной цепи измеряемого транзистора $ИТ$.

Блокировочные конденсаторы $C1$ и $C2$ шунтируют соответственно источники $И1$ и $И2$ по переменному току.

Когда переключатель $П$ находится в положении 1, ламповый вольтметр $V1$ измеряет напряжение U_1 на резисторе $R2$:

$$U_1 = I_K R_2, \quad (21)$$

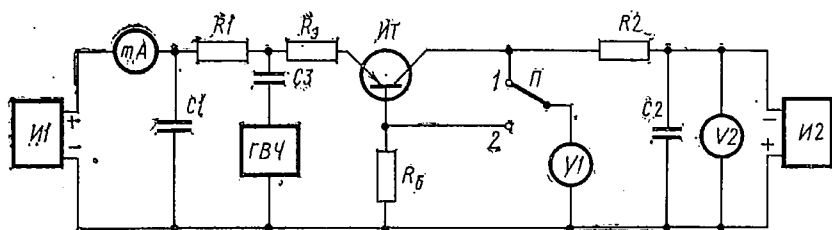


Рис. 92. Схема для измерения модуля коэффициента усиления по току транзисторов

где I_K — переменный ток коллектора.

При переводе переключателя $П$ в положение 2 вольтметр $V1$ измеряет падение напряжения U_2 на резисторе R_6 . Элементы схемы подобраны таким образом, что режим работы транзистора в обоих положениях переключателя $П$ одинаков. Напряжение

$$U_2 = I_6 R_6,$$

где I_6 — переменный ток базы.

Величина модуля коэффициента усиления по току

$$|B| = \frac{I_K}{I_6} = \frac{U_1 R_6}{U_2 R_2}. \quad (22)$$

При неизменной величине U_2 шкалу лампового вольтметра $V1$ можно отградуировать в единицах коэффициента $|B|$.

Максимальная частота генерации измеряется по схеме с самовозбуждением. Напряжение на коллектор измеряемого транзистора $ИТ$ (рис. 93) подается от источника постоянного напряжения $И$. Возбуждение (генерация) возникает при подаче напряжения обратной связи с коллектора на эмиттер через кон-

денсатор $C1$. Частота генерации выражается известной формулой, которая для данной схемы примет вид

$$f_{\text{макс}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{\text{экв}} C2}}, \quad (23)$$

где $t_{\text{экв}}$ — эквивалентная индуктивность контура $C2$ — $L1$ — $L2$ — $L3$; $C2$ — емкость конденсатора.

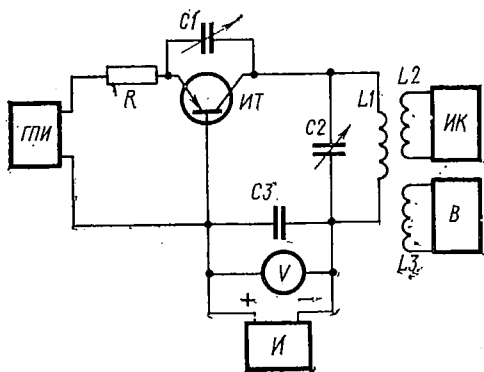


Рис. 93. Схема для измерения максимальной частоты генерации транзисторов:
ГПИ — генератор прямоугольных импульсов,
ИК — индикатор колебаний, В — волномер

При измерениях уменьшают емкость конденсатора $C2$ до срыва генерации. При этом в соответствии с формулой (23) частота генерации возрастает. Затем увеличением емкости $C1$ восстанавливают генерацию, потом опять уменьшают емкость $C2$. Этот процесс повторяют до тех пор, пока удастся восстановить генерацию изменением емкости $C1$.

Максимальная частота, на которой обнаруживается генерация, принимается за $f_{\text{макс}}$. Частоту генерации измеряют волномером В. Наличие генерации фиксируется индикатором колебаний ИК. Высокочастотные колебания тока эмиттера модулируются генератором прямоугольных импульсов ГПИ. Это позволяет применить в волномере и индикаторе колебаний измерительные усилители, повышающие их чувствительность. Параметр $f_{\text{макс}}$ для некоторых типов высокочастотных транзисторов является классификационным.

Коэффициент шума измеряется на частоте 1000 Гц по способу удвоения входной мощности шумов. Схема измерения дана на рис. 94.

Источники постоянного напряжения $I1$ и $I2$ обеспечивают режим измеряемого транзистора $ИТ$ по постоянному току в соответствии с техническими условиями. Напряжение на базу транзистора снимается с делителя $R3 - R2$ через резистор $R1$.

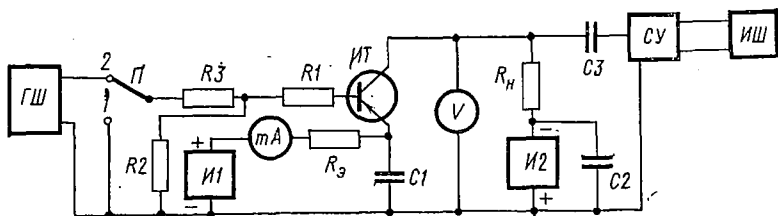


Рис. 94. Схема для измерения коэффициента шума транзисторов: $ГШ$ — генератор шумов, $СУ$ — селективный усилитель, $ИШ$ — индикатор мощности шумов

Режим работы транзистора по постоянному току контролируется приборами mA и V . В начале измерения переключатель $П$ устанавливают в положение 1 и по показанию индикатора мощности шума $ИШ$ через селективный усилитель $СУ$ фиксируют мощность шумов на нагрузке R_n транзистора. После этого на входе транзистора подключают генератор $ГШ$ (переключатель $П$ в положении 2).

Электродвижущую силу (э. д. с.) шума генератора $ГШ$ увеличивают до такого значения, при котором показания индикатора мощности $ИШ$ в два раза превышают показания, зафиксированные в положении 1 переключателя $П$. По калибровочному регулятору выходной э. д. с. генератора шума производят отсчет коэффициента шума.

Транзистор считается годным, если коэффициент шума находится в пределах нормы, указанной в технических условиях.

Конденсаторы $C1$ и $C2$ блокируют источники $I1$ и $I2$ соответственно по переменной составляющей тока эмиттера и коллектора.

Измерение крутизны статической характеристики производится по схеме с общим эмиттером, приведенной на рис. 95. Режим измеряемого

транзистора *ИТ* обеспечивается источниками постоянного напряжения *И1* и *И2* и контролируется вольтметрами *V1* и *V2* и миллиамперметром *mA*.

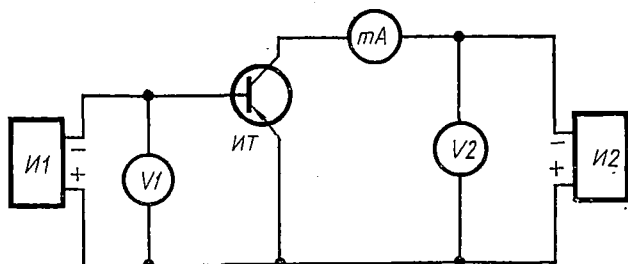


Рис. 95. Схема для измерения крутизны статической характеристики транзисторов

Выходное напряжение источника *И1* увеличивают до тех пор, пока ток коллектора I_K не достигнет уровня, указанного в технических условиях на прибор.

Крутизна характеристики

$$S_{ст} = \frac{I_K}{U_б},$$

где $U_б$ — напряжение на базе.

Напряжение насыщения измеряется по схеме с общим эмиттером (рис. 96). На базу измеряемого

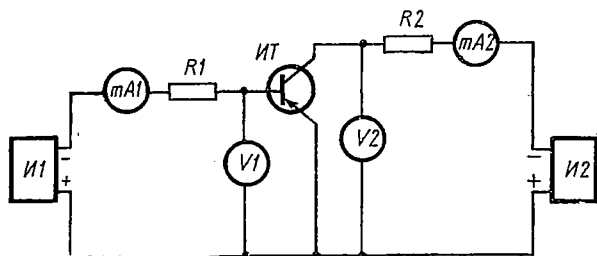


Рис. 96. Схема для измерения напряжения насыщения транзисторов

транзистора *ИТ* от регулируемого источника постоянного напряжения *И1* через резистор *R1* подают ток базы $I_б$, значение которого устанавливают по миллиампермет-

ру $mA1$. Напряжение на коллектор транзистора поступает от источника постоянного напряжения $I2$. Ток коллектора задается по миллиамперметру $mA2$. Токи базы и коллектора стабилизируются резисторами соответственно $R1$ и $R2$ независимо от параметров измеряемого прибора.

Насыщенный ток базы задается из условия

$$I_b = \frac{(2-5) I_k}{B_{ст}},$$

где $B_{ст}$ — максимальное значение статического коэффициента усиления по току для транзисторов данного типа.

В режиме насыщения измеряют два параметра: напряжение на базе $U_{б.н}$ и напряжение на коллекторе $U_{к.н}$.

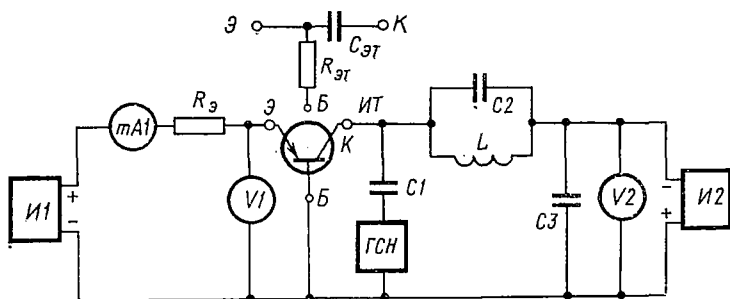


Рис. 97. Схема для измерения постоянной времени обратной связи транзисторов

Эти параметры контролируются соответственно вольтметрами $V1$ и $V2$. Транзистор считается годным, если параметры $U_{б.н}$ и $U_{к.н}$ имеют значения не выше норм, указанных в технических условиях.

Постоянная времени цепи обратной связи измеряется для высокочастотных транзисторов. Измерения проводят на частоте 5 МГц. Схема измерения приведена на рис. 97. Режим работы измеряемого транзистора $ИТ$ по постоянному току устанавливается источниками напряжения $И1$ и $И2$. Резистор $Rэ$ стабилизирует ток в цепи эмиттера. От высокочастотного генератора синусоидального напряжения $ГСН$ через разделительный конденсатор $C1$ на коллектор подается напряжение с частотой f . Напряжение между эмиттером и базой, измеряемое ламповым вольтметром $V1$, пропор-

ционально величине внутренней обратной связи с постоянной времени $r'_{б}C_K$.

Величину $r'_{б}C_K$ измеряют методом сравнения показаний вольтметра $V1$ при включенном транзисторе $ИТ$ с показаниями, когда вместо транзистора включена эталонная цепочка $R_{эт}C_{эт}$. Подключая эталонные цепочки с разной величиной произведения $R_{эт}C_{эт}$, можно отградуировать шкалу вольтметра $V1$ в единицах времени. Контур $C2 - L$ настроен на частоту измерений и развязывает цепи генератора $ГСН$ с цепями питания. Выходное напряжение генератора должно оставаться неизменным при измерениях эталонной цепочки и транзистора. Транзистор считается годным, если значение постоянной времени цепи обратной связи находится в пределах норм, указанных в технических условиях.

Для некоторых типов высокочастотных транзисторов (например, П414 — П415) параметр $r'_{б}C_K$ является классификационным.

Измерение емкости коллекторного и эмиттерного переходов производится методом, описанным в § 40.

§ 45. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Параметры, измеряемые при производстве полевых транзисторов, перечислены в табл. 3. Кроме того, для полевых транзисторов, так же как и для других приборов, могут рассматриваться вольт-амперные характеристики $p - n$ -переходов. Для простоты изложения все измерения будут рассмотрены на примере транзисторов с $p - n$ -переходом.

Выходная проводимость h_{22} аналогична тому же параметру для биполярных транзисторов и измеряется по той же методике.

Межэлектродные емкости измеряются методом емкостно-омического делителя, описанным ранее. Делитель образуют из сопротивления измерительного (эталонного) резистора и измеряемой межэлектродной емкости транзистора.

Входная емкость $C_{вх}$ — это емкость между затвором и истоком при коротком замыкании сток — исток по переменному току.

Прходная емкость $C_{прох}$ есть емкость меж-

ду затвором и стоком при коротком замыкании затвор — исток по переменному току.

Выходная емкость $C_{\text{вых}}$ есть емкость между стоком и истоком при коротком замыкании затвор — исток.

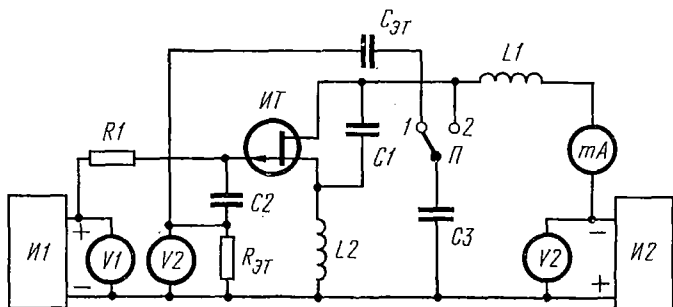


Рис. 98. Схема для измерения входной емкости транзисторов

Для иллюстрации метода измерения межэлектродных емкостей на рис. 98 показана схема для измерения входной емкости*.

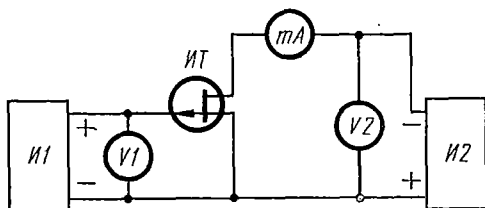


Рис. 99. Схема для измерения напряжения отсечки и порогового напряжения полевых транзисторов

Эталонный емкостно-омический делитель образован емкостью конденсатора $C_{\text{ЭТ}}$ и сопротивлением резистора $R_{\text{ЭТ}}$. При измерениях емкость конденсатора $C_{\text{ЭТ}}$ замещается емкостью затвор — исток (при переводе переключателя П в положение 2). Короткое замыкание между стоком и истоком по переменному току создается конденсатором $C1$ большой емкости.

* Здесь и далее полярность питающего напряжения указывается для транзисторов с затвором n -типа проводимости.

Напряжение отсечки U_0 измеряют по схеме, приведенной на рис. 99. Измеряемый транзистор $ИТ$ включают в схему и с помощью источника постоянного напряжения $И2$ устанавливают заданное значение напряжения между стоком и истоком. От источника $И1$ подают напряжение на затвор. Увеличивая от нуля напряжение на затворе, следят за показаниями миллиамперметра mA . Ток стока начинает падать. Затем доводят величину тока стока до заданного минимального значения и по вольтметру $V1$ измеряют напряжение отсечки.

Параметры h , $C_{вх}$, $C_{прох}$, $C_{вых}$ и U_0 измеряют на готовых приборах. По результатам измерения каждого из этих параметров производится отбраковка негодных приборов. Приборы признаются годными, если каждый из перечисленных параметров находится в заданных пределах.

Пороговое напряжение $U_{пор}$ — это напряжение на затворе, при котором начинается проводимость канала, т. е. ток стока становится управляемым. Этот параметр характерен только для транзисторов с изолированным затвором. Измерение проводят по схеме рис. 99. При заданном напряжении на стоке начинают от нуля плавно увеличивать напряжение на затворе. Момент начала увеличения тока стока определяют по миллиамперметру mA . При этом по вольтметру $V1$ фиксируют значение порогового напряжения.

Для некоторых групп приборов параметр $U_{пор}$ является классификационным, т. е. по результатам измерений производят классификацию приборов по группам внутри приборов общего типа (серии). Измерения проводят на готовых приборах.

Крутизна характеристики S есть отношение изменения выходного тока к изменению входного напряжения при коротком замыкании по переменному току на выходе транзистора. Схема измерения приведена на рис. 100. Измерение производят в следующем порядке.

С помощью источников постоянного напряжения $И1$ и $И2$ устанавливают заданный режим питания измеряемого транзистора $ИТ$ по постоянному току: напряжение на затворе (по вольтметру $V2$) и напряжение и ток в цепи стока (по вольтметру $V3$ и миллиамперметру mA).

Переключатель $П$ устанавливают в положение 1 и, установив заданную величину напряжения генератора

синусоидального напряжения ΓCH частотой 50—1500 Гц, фиксируют показания U_1 лампового вольтметра $V1$. Затем переводят переключатель Π в положение 2 и фиксируют новые показания U_2 вольтметра $V1$. Крутизну характеристики определяют по известным законам электротехники:

$$S = \frac{R1 + R2}{R2} \cdot \frac{1}{R_k} \cdot \frac{U_2}{U_1}.$$

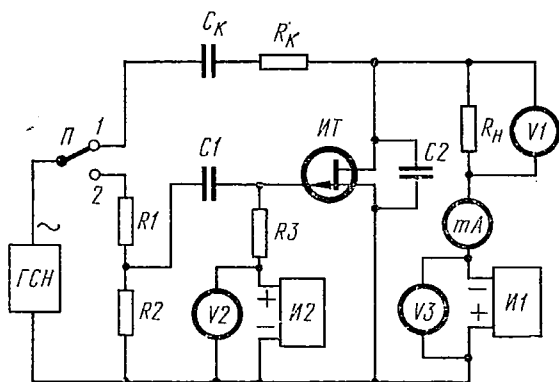


Рис. 100. Схема для измерения крутизны характеристики полевых транзисторов

Для удобства измерений при постоянном режиме вольтметр $V1$ может быть отградуирован непосредственно в значениях крутизны.

Ток стока $I_{ст}$ при нулевом напряжении на затворе измеряют по схеме, изображенной на рис. 101. С помощью источника постоянного напряжения $И$ устанавливают заданное значение напряжения между стоком и истоком измеряемого транзистора $ИТ$. По миллиамперметру mA определяют значение $I_{ст}$.

Параметры $I_{ст}$ и S являются классификационными. Измерения проводят на готовом приборе.

Коэффициент шума $K_{ш}$ измеряют по методике, аналогичной методике измерения этого параметра для биполярных транзисторов. Коэффициент шума является классификационным параметром.

Током затвора $I_з$ называют ток утечки между затвором и замкнутыми между собой стоком и истоком

(рис. 102). Для измерения на затвор транзистора $ИТ$ подают заданное напряжение от источника $И$, а ток затвора $I_з$ определяют по миллиамперметру $мА$.

Измерение тока затвора производят в процессе изготовления прибора на заготовке. По результатам измерений приборы разделяют на годные и бракованные.

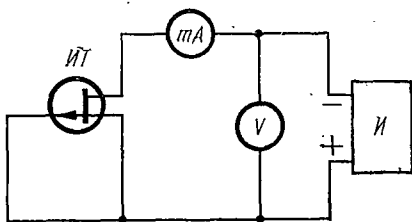


Рис. 101. Схема для измерения тока стока полевых транзисторов

§ 46. ИЗМЕРЕНИЕ ВАРИКАПОВ И ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

Варикапы. При производстве варикапов измеряются следующие классификационные параметры:

номинальная емкость $C_{ном}$ при заданных значениях напряжения смещения;

максимальное напряжение смещения $U_{см}$;

добротность Q при заданных значениях частоты и напряжения смещения.

Кроме того, выполняют межоперационные измерения обратного тока $I_{обр}$. Так как параметры варикапов сильно зависят от температуры, то в технических условиях строго оговаривается температура, при которой производятся измерения.

Емкость и добротность варикапа измеряют способами, описанными в § 40.

В справочниках приводится значение коэффициента перекрытия по емкости:

$$k = \frac{C_{макс}}{C_{мин}}$$

где $C_{макс}$ — максимальная емкость варикапа; $C_{мин}$ — минимальная емкость варикапа.

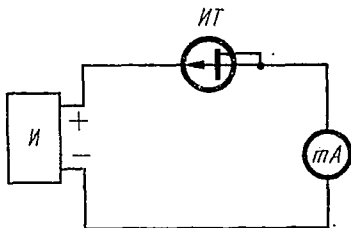


Рис. 102. Схема для измерения напряжения затвора полевых транзисторов

Для измерения максимального напряжения смещения варикап включают по схеме для измерения обратной ветви ВАХ выпрямительных диодов (см. рис. 68).

Туннельные диоды. Они классифицируются по следующим параметрам: ток максимума $I_{\text{макс}}$, емкость диода C .

Кроме того, при измерениях тока $I_{\text{макс}}$ контролируется напряжение максимума $U_{\text{макс}}$.

Некоторые группы туннельных диодов классифицируют не только по значению $I_{\text{макс}}$, но и по отношению $\frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{мин}}}$. Последний параметр удобно оценивать при просмотре вольт-амперной характеристики на характеристикографе. При этом одновременно измеряют и абсолютное значение тока $I_{\text{макс}}$.

Для измерения тока максимума используют схему для снятия вольт-амперной характеристики (см. рис. 71). Ток через диод медленно увеличивают с помощью резистора RI до тех пор, пока напряжение на диоде ID не изменится скачком от значения $U_{\text{макс}}$ до значения $U_{\text{н}}$. Регистрируемый амперметром A ток в момент скачка равен $I_{\text{макс}}$.

Емкость туннельного диода измеряют так же, как и емкость высокочастотного диода. Изменяя величину постоянного напряжения на диоде ID (см. рис. 73, а), можно получить значение емкости диода в различных точках его вольт-амперной характеристики. Обычно емкость измеряют в точке характеристики, соответствующей напряжению $U_{\text{мин}}$. При положении рабочей точки в точке $U_{\text{мин}}$ изменение напряжения как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения приводит к увеличению тока через туннельный диод.

Одним из параметров, характеризующих качество туннельных диодов, является величина времени переключения $t_{\text{пер}}$ из состояния с меньшим напряжением на диоде $U_{\text{макс}}$ в состояние с большим напряжением на диоде $U_{\text{мин}}$. Время переключения зависит не только от свойств самого диода, но и от параметров схемы, в которую диод включен. Величина $t_{\text{пер}}$ тем меньше, чем меньше отношение $\frac{C}{I_{\text{макс}}}$.

Время переключения современных туннельных диодов порядка 10^{-9} с. Измерение $t_{\text{пер}}$ представляет опреде-

ленные трудности, поэтому при массовом производстве не выполняется.

§ 47. ИЗМЕРЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Фотодиоды. Они могут работать и измеряться в двух режимах:

в вентильном режиме, или режиме без внешнего источника напряжения (рис. 103, а);

в фотодиодном режиме, или режиме с внешним источником питания (рис. 103, б).

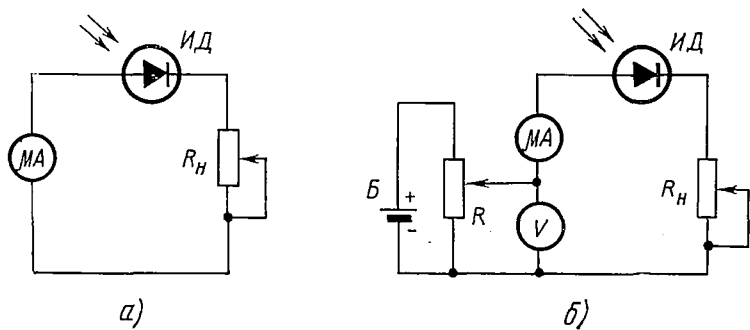


Рис. 103. Схемы для измерения параметров фотодиодов: а — в режиме без источника напряжения, б — в режиме с источником напряжения; μA — микроамперметр, R_H — сопротивление нагрузки, Б — батарея питания

Вентильный режим характеризуется отсутствием темнового тока и низким уровнем собственных шумов, но диоды при этом имеют слишком малую фото-э. д. с.

В фотодиодном режиме фототок в 2—3 раза больше, чем в вентильном режиме, но имеется темновой ток и внутренние шумы значительно больше, чем в вентильном режиме.

По схеме, показанной на рис. 103, а, измеряют один параметр фотодиода: световой ток I_c . По схеме, изображенной на рис. 103, б, снимают две вольт-амперные характеристики: при отсутствии освещенности (темновая ВАХ) и при определенной внешней освещенности (световая ВАХ).

Кроме того, для фотодиодов могут измеряться те же параметры, что и для обычных диодов.

Фототранзисторы. Измеряют их по тем же параметрам, что и фотодиоды (I_T и I_C). Схемы измерения аналогичны схемам, приведенным на рис. 103. Питающее напряжение прикладывается между эмиттером и коллектором, на базу напряжение не подается. Обычно снимают, как и для фотодиода, две характеристики: темновую и световую. При необходимости для фототранзисторов могут измеряться и другие параметры, те же, что и для обычных транзисторов: $I_{КБ}$; $I_{ЭО}$; $K_{ш}$; $S_{ст}$ и другие в зависимости от назначения приборов.

Фототиристоры. Они характеризуются параметром, называемым световой мощностью управления P . Параметр определяет мощность, приходящуюся на единицу площади освещаемой поверхности, которую нужно затратить при освещении фототиристора, чтобы перевести его в открытое состояние.

При измерении освещают фототиристор точечным источником света, для которого известна зависимость мощности излучения от потребляемого тока. В качестве такого источника может быть использован светодиод. Увеличивая ток в цепи источника, обычным способом фиксируют момент открывания тиристора. По показаниям миллиамперметра в цепи источника в момент открывания тиристора определяют световую мощность источника. Затем определяют световую мощность управления:

$$P = \frac{P}{S},$$

где P — световая мощность источника; S — площадь освещенной поверхности тиристора.

Современные фототиристоры имеют световую мощность управления в пределах от 15 до 100 мВт/см².

Для фототиристоров, так же как и для обычных тиристоров, могут измеряться и другие параметры, характерные для этих приборов.

Фоторезисторы. Их включают в схему для измерений так же, как фотодиоды. Темновая и световая характеристики снимаются аналогично.

§ 48. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОДИОДОВ

При производстве светодиодов измеряются два параметра: яркость излучения B и прямое падение напряжения на светодиоде U_F .

Измерение обоих параметров производят по схеме, показанной на рис. 104. С помощью регулируемого источника тока I устанавливают по миллиамперметру заданный прямой ток через измеряемый диод $ИД$. По вольтметру V определяют прямое падение напряжения на светодиоде. Для выпускаемых в настоящее время све-

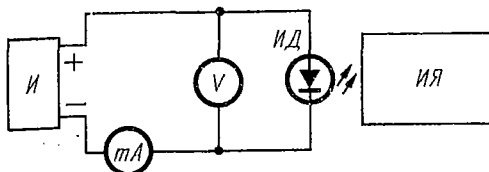


Рис. 104. Схема для измерения прямого падения напряжения и яркости излучения светодиодов:

$ИЯ$ — измеритель яркости

тодиодов задаваемый прямой ток равен 5 и 10 мА, а прямое падение напряжения должно быть в пределах 3—3,8 В в зависимости от типа прибора.

По измерителю яркости $ИЯ$ определяют яркость излучения прибора. За единицу яркости принята 1 кд/м² (кандела на квадратный метр). Яркость отечественных светодиодов лежит в пределах 5—30 кд/м².

В качестве измерителя яркости применяют фотометр, серийно выпускаемый отечественной промышленностью.

Измерения светодиодов являются классификационными. Их проводят на готовых приборах после различных видов испытаний.

§ 49. ИЗМЕРЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

Оптические полупроводниковые квантовые генераторы — лазерные диоды — характеризуются, как было сказано выше, мощностью (интенсивностью) излучения $P_{и}$, плотностью тока возбуждения (накачки) $I_{нак}$ и спектром излучения (зависимостью мощности излучения от длины световой волны) $P_{и} = f(\lambda)$.

Измерение мощности излучения производится по схеме, показанной на рис. 105. Генератор импульсов $ГИ$ вырабатывает прямоугольные импульсы очень малой длительности (порядка 10^{-6} с). Эти импульсы поступают на генератор тока накачки $ГТН$, на-

значение которого — получение неискаженного импульса очень большой мощности. Измеряемый лазерный диод *ИД* подключен к генератору *ГТН* в прямом направлении. При этом импульс тока, проходящего через диод, достигает нескольких десятков и даже сотен ампер. Прохождение импульса тока такой величины вызы-

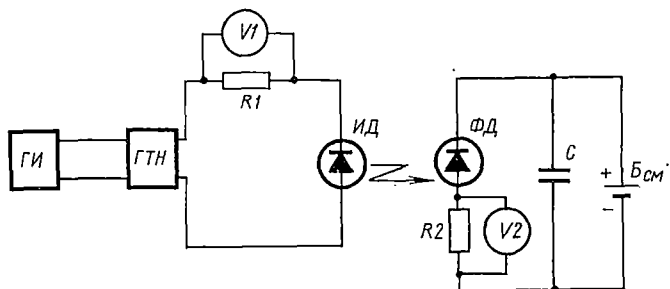


Рис. 105. Схема для измерения мощности излучения лазерных диодов:

ГИ — генератор импульсов, *ГТН* — генератор тока накачки, *ФД* — фотодиод, *Б_{см}* — батарея смещения, *С* — блокировочный конденсатор, *V1*, *V2* — импульсные вольтметры

вает возбуждение лазерного диода, т. е. излучение светового импульса.

Напряжение, пропорциональное импульсу тока, выделяется на резисторе *R1* и измеряется импульсным вольтметром *V1*.

Импульсы света, излучаемые лазерным диодом, воспринимаются фотодиодом *ФД*. Напряжение батареи смещения *Б_{см}* запирает фотодиод. Поскольку сопротивление фотодиода обратно пропорционально его освещенности, импульс тока в цепи фотодиода прямо пропорционален освещенности. Следовательно, напряжение, выделяемое импульсом тока на резисторе *R2*, пропорционально освещенности фотодиода, которая в свою очередь пропорциональна мощности излучения лазерного диода. Измеряя напряжение на резисторе *R2* импульсным вольтметром *V2*, шкала которого отградуирована в единицах мощности, получают непосредственно значение мощности излучения лазерного диода.

Конденсатор *С* шунтирует батарею *Б_{см}* по переменному току, так как он представляет собой очень малое сопротивление для короткого импульса.

Зная ток накачки и площадь $p-n$ -перехода, можно определить плотность тока $p-n$ -перехода лазера по формуле

$$\Psi = \frac{I_{\text{нак}}}{S},$$

где $I_{\text{нак}}$ — ток накачки; S — площадь $p-n$ -перехода.

Спектр излучения лазерного диода измеряют на стенде, блок-схема которого показана на рис. 106. Измеряемый диод *ИД* помещают перед входной оптической си-

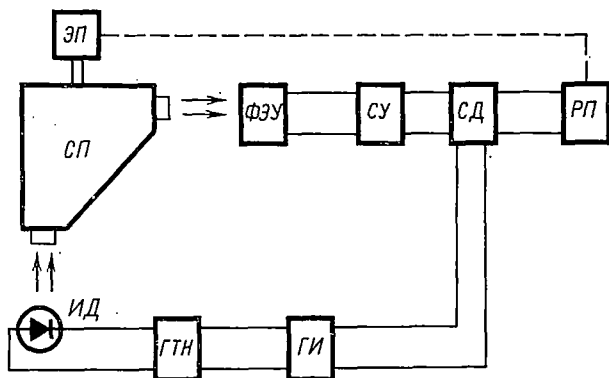


Рис. 106. Блок-схема для измерения спектра излучения лазерных диодов:

ЭП — электропривод, *СП* — спектрограф, *ФЭУ* — фотоэлектронный усилитель, *СУ* — селективный усилитель, *СД* — синхронный детектор, *РП* — регистрирующий прибор

стемой спектрографа *СП*. Спектрограф — это прибор, позволяющий выделить из общего светового потока световые потоки, соответствующие определенной длине волны. Генератор импульсов *ГИ* через генератор тока накачки *ГТН* возбуждает лазерный диод. Световые импульсы, излучаемые диодом, проходят через спектрограф и поступают на вход фотоэлектронного усилителя *ФЭУ*, преобразующего световые сигналы в электрические. С выхода усилителя сигналы поступают на селективный усилитель *СУ*, усиливаются и попадают на вход синхронного детектора *СД*. Детектор открывается только на время генерации светового импульса, что позволяет повысить точность измерения. Это объясняется тем, что в момент отсутствия светового импульса уменьшает-

ся уровень мешающего сигнала на выходе схемы. Мешающий сигнал в основном вызван внутренними шумами усилителей $\PhiЭУ$ и $СУ$, а также внешними помехами.

Напряжение, пропорциональное интенсивности излучения лазерного диода, с детектора $СД$ поступает на регистрирующий прибор $РП$ — электронный самопишущий потенциометр. С помощью последнего получают спектральную зависимость мощности излучения

$$P_n = f |\lambda|.$$

Настройка спектрографа на определенную длину световой волны производится поворотной оптической призмой, которая приводится во вращение электроприводом $ЭП$. При точной настройке призмы на определенную световую волну, излучаемую лазерным диодом, на выходе спектрографа появляется световой поток соответствующей мощности. Запись величины мощности излучения производится на равномерно перемещающейся бумажной ленте. Вращение ленты осуществляется также приводом $ЭП$ синхронно с вращением призмы. По направлению движения ленты расположена ось абсцисс, на которую откладывают длину волн, поскольку бумажная лента движется синхронно с разверткой спектра. На оси ординат, перпендикулярно направлению перемещения ленты, прибор записывает значение интенсивности излучения света для каждой длины волны.

§ 50. ИЗМЕРЕНИЕ ОПТРОНОВ

Резисторные оптроны. Измеряются они по следующим параметрам: темновое сопротивление R_T ; световое сопротивление R_C ; входное напряжение $U_{вх}$; время выключения $t_{выкл}$.

На рис. 107 показана схема для измерения R_T ; R_C и $U_{вх}$. Сначала при разомкнутом ключе $В1$ по омметру Ω определяется темновое сопротивление прибора $ИП$, т. е. сопротивление неосвещенного резистора.

Далее замыкают ключ $В1$ и с помощью регулируемого источника постоянного тока I устанавливают по миллиамперметру mA заданное значение тока через измеряемый прибор $ИП$. По омметру Ω определяют световое сопротивление. Входное напряжение определяют с помощью вольтметра V при нажатии кнопки $Кн$.

Прибор признается годным, если темновое сопротивление его не менее, а световое — не более граничных значений. Параметр $U_{вх}$ также не должен превышать

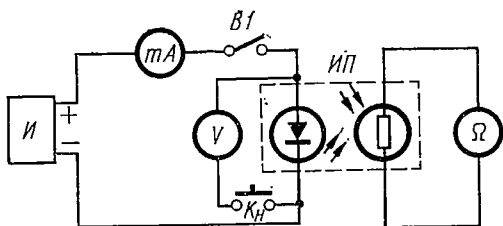


Рис. 107. Схема для измерения резисторных оптронов:

ИП — измеряемый прибор, Ω — омметр

определенного значения. Кроме того, по значениям R_c и $U_{вх}$ производится классификация приборов по группам.

Время выключения приборов измеряется по схеме, показанной на рис. 108. Временем выключения

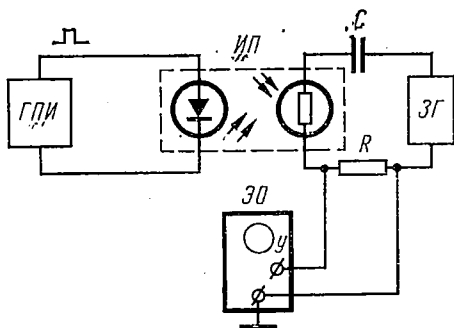


Рис. 108. Схема для измерения $t_{выкл}$ резисторных оптронов:

ГПИ — генератор прямоугольных импульсов тока, *ЗГ* — генератор звуковой частоты, *R* — измерительный резистор

считается промежуток времени, прошедший с момента снятия входного тока, в течение которого выходной ток снизится до 50% от своего нормального значения.

На вход прибора *ИП* подаются периодические импульсы тока амплитудой 10 мА и длительностью 50 мкс от генератора прямоугольных импульсов *ГПИ*. Частота следования импульсов 1 Гц. На выход прибора через ем-

кость C подается синусоидальное напряжение звуковой частоты от генератора $ЗГ$. В качестве измерителя применен электронный осциллограф $ЭО$ с большим временем послесвечения. Измеряемое напряжение снимается с резистора R .

Время выключения прибора определяется по осциллограмме переходного процесса, приведенной на рис. 109. Время $t_{\text{выкл}}$ вычисляется как разность (рис. 109, б):

$$t_{\text{выкл}} = t_2 - t_1,$$

где t_1 — длительность импульса входного тока (рис. 109, а); t_2 — время, прошедшее от начала входного импульса до момента, когда выходное напряжение станет равным $U_2 = 0,5U_1$.

Момент окончания входного импульса строго фиксирован во времени и на экране осциллографа он взят за начало отсчета, что позволяет непосредственно измерить $t_{\text{выкл}}$.

Измерение времени выключения производится на готовом приборе. Этот параметр является классификационным и отбраковочным.

Тиристорные оптроны.

Измеряются они по следующим параметрам: номинальный входной ток $I_{\text{вх}}$ и номинальное входное напряжение $U_{\text{вх}}$; ток утечки прямой

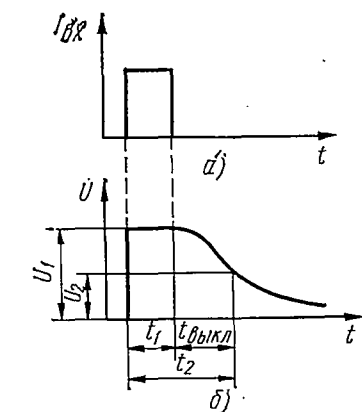


Рис. 109. К способу измерения времени выключения резисторных оптронов:

а — импульс входного тока, б — напряжение на измерительном резисторе

$I_{\text{ут.пр}}$ и ток утечки обратный $I_{\text{ут.обр}}$; остаточное напряжение $U_{\text{ост}}$; ток выключения $I_{\text{выкл}}$; ток помехи $I_{\text{пом}}$.

Номинальным входным током считается минимальный прямой ток на входе прибора, при котором прибор переходит в открытое состояние при заданном прямом напряжении на выходе прибора.

Номинальный входной ток измеряют по схеме, приведенной на рис. 110. Замыкают ключ B и с помощью регулируемого источника постоянного напряжения $И2$ задают значение прямого напряжения на тиристоре,

равное минимальному прямому напряжению ($U_{пр.мин}$), при котором гарантируется включение прибора при заданных параметрах на его входе. Затем с помощью источника постоянного тока $I1$ плавно, начиная от нуля, увеличивают ток через светодиод до момента открывания тиристора, который фиксируется по вольтметру $V2$ (показания его резко падают). Значение тока $I_{вх}$ опре-

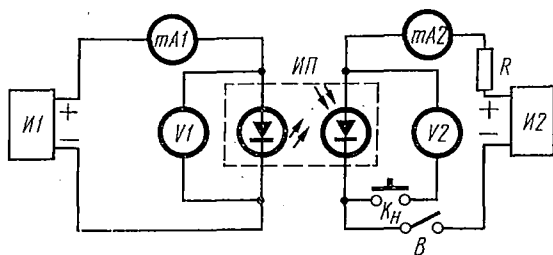


Рис. 110. Схема для измерения номинального входного тока и тока помехи тиристорных оптронов

деляется по миллиамперметру $mA2$. Напряжение $U_{вх}$ измеряется по вольтметру $V1$. Резистор R в схеме служит для ограничения тока в выходной цепи при открытом состоянии тиристора.

Параметры $I_{вх}$ и $U_{вх}$ являются классификационными. Измерения их проводятся дважды: вначале — как межоперационные на заготовке (операция позволяет отбраковать негодные кристаллы и произвести предварительную классификацию годных кристаллов по трем группам), далее измерения $I_{вх}$ и $U_{вх}$ производят на готовом приборе после испытаний.

Током помехи считают максимальное значение постоянного тока или амплитуды прямого тока на входе прибора, не вызывающее переключения прибора из закрытого состояния в открытое.

Измерения $I_{ном}$ производят по схеме, показанной на рис. 110. Вольтметры $V1$ и $V2$ в данном случае не используются.

На тиристор измеряемого прибора $ИП$ от источника $I2$ подают напряжение, максимально установленное для данного типа приборов (классификационное), при котором он не должен переключаться при отсутствии входного сигнала. Величина его 200—400 В. Через светодиод

измеряемого прибора пропускают ток от источника $И1$, плавно увеличивая его значение. Момент переключения прибора фиксируют по резкому увеличению показаний миллиамперметра $mA2$. Соответствующее этому моменту значение тока, показанное миллиамперметром $mA1$, есть величина тока помехи.

Прямым током утечки называют прямой ток закрытого прибора при максимально допустимом прямом напряжении на тиристоре.

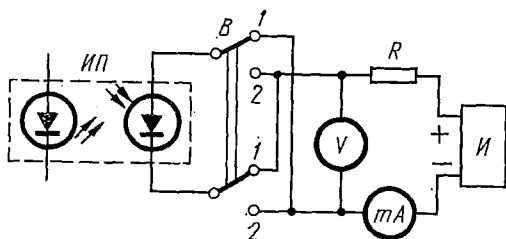


Рис. 111. Схема для измерения токов утечки тиристорных оптронов

Обратным током утечки называют обратный ток прибора при максимальном допустимом обратном напряжении на тиристоре.

Измерение производят по схеме, показанной на рис. 111. Входная цепь измеряемого прибора $ИП$ разомкнута. Переключатель $В$ устанавливают в положение 1. От регулируемого источника $И$ на тиристор подают напряжение, равное предельно допустимому значению для данного типа измеряемого прибора $ИП$. Величину напряжения контролируют с помощью вольтметра V . Ток утечки измеряют с помощью миллиамперметра mA . Обычно ток утечки лежит в пределах долей миллиампера.

Для измерения обратного тока утечки переключатель $В$ устанавливают в положение 2. Порядок измерения тот же. Резистор R в схеме служит для ограничения тока в измеряемой цепи в случае переключения тиристора или пробоя его (при измерении $I_{ут.обр}$).

Остаточным напряжением принято считать прямое напряжение, соответствующее протеканию максимально допустимого прямого тока открытого прибора.

Схема для измерения остаточного напряжения аналогична схеме для измерения $I_{вх}$ и $U_{вх}$ (см. рис. 110). По миллиамперметру $mA1$ с помощью источника тока $I1$ устанавливают заданное значение входного тока для данного типа прибора. С помощью источника $I2$ (при включенном ключе B) по миллиамперметру $mA2$ устанавливают максимальное для данного типа приборов

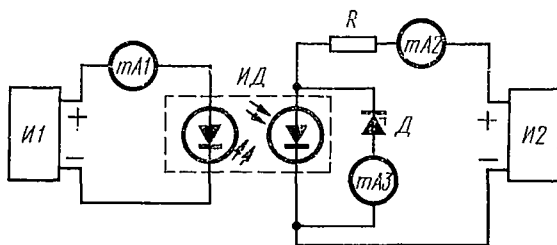


Рис. 112. Схема для измерения тока выключения тиристорных оптронов

значение прямого тока через тиристор. Остаточное напряжение измеряют по вольтметру $V2$ при нажатии кнопки $Kн$.

Током выключения оптрона считается минимальный прямой ток, при котором сохраняется открытое состояние прибора. Для измерений $I_{выкл}$ используется схема, приведенная на рис. 112. При заданном значении входного тока плавно уменьшают ток в выходной цепи с помощью регулируемого источника тока $I2$ и следят за показаниями миллиамперметра $mA3$. При скачкообразном увеличении его показаний прекращают уменьшение тока. По миллиамперметру $mA2$ определяют значение тока выключения.

Эта часть схемы работает аналогично схеме для измерения тока выключения тиристорных оптронов, рассмотренной в § 43. В момент выключения тиристора измеряемого прибора напряжение на нем резко возрастает, что приводит к открыванию стабилизатора D и резкому возрастанию обратного тока через него, фиксируемого миллиамперметром $mA3$.

Параметры $I_{вх}$, $I_{ут}$, $U_{ост}$ и $I_{выкл}$ являются классификационными и измеряются на готовом приборе после серии испытаний приборов.

§ 51. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Развитие различных областей науки и техники требует постоянного роста производства полупроводниковых приборов. Увеличение выпуска приборов может быть обеспечено как благодаря увеличению производственных мощностей (строительство новых цехов и предприятий), так и благодаря росту выпуска продукции с единицы производственной площади.

Резкое увеличение выпуска полупроводниковых приборов без увеличения производственных площадей и числа рабочих возможно только при комплексной механизации и автоматизации производственного процесса. При этом необходимой составной частью производственного процесса являются автоматические измерения.

При автоматизации измерений резко сокращается время, затрачиваемое на измерительную операцию, и, следовательно, возрастает производительность труда.

Автоматические измерения исключают или уменьшают субъективные ошибки ручного измерения, связанные с психикой человека, инерционностью мышления, погрешностью зрения и т. д., в результате чего исключается или снижается вероятность ошибки при классификации приборов.

Кроме того, учитывая, что при автоматизации измерений число работников, занятых измерениями, сокращается, можно, не нарушая санитарно-технических норм, размещать дополнительное оборудование на существующих производственных площадях.

По способу ведения измерительного процесса различают измерения однопозиционные и многопозиционные. В первом случае все параметры полупроводниковых приборов измеряют на одной единице оборудования. При многопозиционных измерениях на одной единице оборудования измеряют один или несколько параметров приборов.

Процесс измерения на одной измерительной позиции включает в себя следующие операции:

- подачу измеряемого прибора на измерительное устройство;
- задание режима измерения (величины тока, напряжения, температуры, влажности и т. п.);
- измерение;

сортировку измеренных приборов по параметрам и отбраковку негодных приборов.

Измерение считается автоматическим, если каждая из перечисленных операций полностью автоматизирована. Если же одна или несколько операций производятся вручную или автоматизированы частично, измерение считается полуавтоматическим.

В предыдущих параграфах этой главы мы уже встречались с некоторыми элементами автоматизации измерений. Так, во многих описанных схемах требуется сохранение одного и того же значения тока независимо от конкретного экземпляра измеряемого прибора (внутреннего сопротивления измеряемого $p-n$ -перехода). Эта задача выполняется с помощью стабилизированных источников тока, автоматически поддерживающих заданное значение тока независимо от нагрузки.

При измерении спектра излучения лазерного диода применялся синхронный детектор, работающий синхронно с генератором импульсов. В той же схеме синхронизировалось вращение спектрографа и самопишущего прибора.

Механизм подачи измеряемого прибора может представлять собой транспортер с лентой, движущейся непрерывно или периодически, с которого специальное устройство снимает измеряемый прибор (или кассету с группой приборов) и подает на измерительное устройство. В другом случае механизм подачи — это так называемый вибробункер. Вибробункер представляет собой цилиндр, открытый сверху, на внутренней поверхности стенок которого укреплена восходящая винтовая направляющая. На дно бункера загружают партию измеряемых приборов (несколько десятков штук), а самому бункеру с помощью электромагнитов придают колебательное движение в определенном направлении с частотой 50 Гц. Под воздействием колебаний приборы перемещаются вверх по направляющей. Направляющая устроена так, что прибор на ней ориентируется в определенном положении. С верхнего конца направляющей ориентированный прибор поступает на измерительное устройство.

Кроме описанных конструкций механизмов подачи существуют и другие конструкции, выбор которых определяется конкретными условиями.

Режим измерений задается с помощью специальных приборов и устройств. Необходимые значения тока и напряжения обеспечиваются трансформаторами, выпрямителями, стабилизаторами и др. Длительность измерения устанавливается при помощи специальных элементов задержки или реле времени. Программа измерений задается программными устройствами. Требуемая температура корпуса измеряемого прибора обеспечивается и поддерживается так называемыми изотермическими установками тепла и холода. Кроме того, при необходимости могут задаваться влажность, вибрация и другие параметры.

Измерение производится специальным измерительным устройством с помощью измерительной схемы. Значение измеренного параметра определенным образом фиксируется или преобразуется. Кроме того, при необходимости значение параметра можно контролировать по приборам. После одного измерения прибор поступает или на сортировку, или на следующее измерительное устройство для измерения другого параметра. Во втором случае результат каждого измерения «запоминается», а после измерения всех параметров прибор поступает на сортирующее устройство.

В обоих случаях результаты измерений анализируются и схема выдает соответствующий сигнал на схему сортирующего устройства.

Сортирующее устройство обеспечивает сортировку приборов по значениям измеренных параметров и отбраковку негодных приборов. Приборы, значения параметров которых находятся в одних заданных пределах, направляются в общий бункер. Количество бункеров равно числу классификационных групп измеряемого прибора.

На рис. 113 приведена блочно-функциональная схема автомата для сортировки кристаллов с $p-n$ -переходом по обратному напряжению, на которой показаны основные элементы измерительных схем, описанные в гл. V. Схема составлена на бесконтактных транзисторных логических элементах.

Механизмом подачи переходов на измерительную позицию является вибробункер (на схеме не показан).

Измерительный механизм состоит из измерительного штеккера и толкателя. Штеккер подходит к измеряемому кристаллу $ИК$, касается его омических контактов и

подключает измерительную схему. После измерения штеккер отходит от кристалла, а толкатель сталкивает измеренный кристалл в соответствующий бункер.

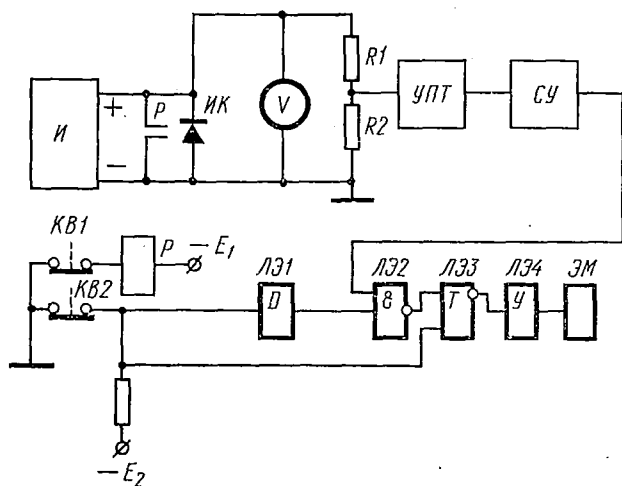


Рис. 113. Схема автомата сортировки $p-n$ -переходов до $U_{обр}$:

И — стабилизированный источник тока, *УПТ* — усилитель постоянного тока, *СУ* — сравнивающее устройство, *KB1*, *KB2* — концевые выключатели, *ЭМ* — электромагнит, *ЛЭ1* — *ЛЭ4* — бесконтактные логические элементы

Режим измерения задается стабилизированным источником постоянного тока и коммутирующими элементами.

Синхронизация работы электрической схемы и механизмов измерения и сортировки производится кулачковым механизмом. Последний приводится в действие электродвигателем (на схеме не показан). Привод самого измерительного механизма осуществляется от того же двигателя.

Схема автомата работает следующим образом.

В начале цикла измеряемый кристалл находится на измерительной позиции. Контакты концевых выключателей *KB1* и *KB2* замкнуты, реле *P* включено, контакты его шунтируют выход стабилизированного источника тока и измеряемый кристалл *ИК*.

Специальный механизм опускает измерительный штеккер на кристалл. При соприкосновении штеккера с кристаллом первый кулачок привода синхронизирующего механизма нажимает на выключатель $KB1$. Реле P отключается, размыкая свой контакт, и через измеряемый кристалл $ИК$ начинает протекать обратный ток от источника I .

Одновременно с первым кулачком привода второй кулачок нажимает на концевой выключатель $KB2$. При этом включается логический элемент задержки $ЛЭ1$ *.

Напряжение, пропорциональное обратному напряжению измеряемого перехода, снимается с резистора $R2$ делителя напряжения $R1—R2$ и подается на вход усилителя постоянного тока $УПТ$, который предназначен для согласования величины сопротивления резистора $R2$ с величиной входного сопротивления сравнивающего устройства $СУ$. Сравнивающее устройство срабатывает, если падение напряжения на $p—n$ -переходе оказалось не ниже заданной величины. При срабатывании $СУ$ сигнал «1» выдается на первый вход логического элемента $ЛЭ2$ (схема «И—НЕ»). Элемент задержки $ЛЭ1$ через время t , необходимое для окончания переходных процессов в измерительных цепях автомата (время установления напряжения на выходе $УПТ$ и время срабатывания $СУ$), выдает на второй вход элемента $ЛЭ2$ сигнал «1». При этом на выходе элемента $ЛЭ2$ появляется сигнал «0», который переключает триггер («ПАМЯТЬ») — элемент $ЛЭ3$. Сигнал «1», поданный с элемента $ЛЭ3$, включает усилитель $ЛЭ4$ и электромагнит $ЭМ$. При срабатывании электромагнита открывается бункер с годными кристаллами, затем первый кулачок привода механизма возвращает в исходное состояние концевой выключатель $KB1$, который включает реле P . Контакт реле закорачивает выход источника I . После этого привод механизма автомата отводит от измеряемого перехода штеккер, а толкатель сбрасывает измеренный кристалл в бункер годных диодов. При поступлении кристалла в бункер замыкается концевой выключатель $KB2$. Входным сигналом «0» через выключатель $KB2$ триггер $ЛЭ3$ возвращается в исходное состояние и

* Схемы транзисторных логических элементов таковы, что для них сигнал «1» на входе есть отсутствие замыкания входа на общую шину («землю»),

выключается элемент задержки ЛЭ1. Под действием вибрации вибробункера на измерительную позицию поступает следующий кристалл.

Если падение напряжения на $p-n$ -переходе окажется ниже заданного значения, то сравнивающее устройство не сработает и электромагнит не включится. При этом измеряемый кристалл поступит в бункер бракованных диодов.

Элемент памяти ЛЭЗ необходим в схеме для того, чтобы запомнить результат измерения и отсортировать $p-n$ -переход после отсоединения от него штеккера.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение межоперационным измерениям, классификационным измерениям и измерениям при испытаниях.
2. Какие параметры измеряются у выпрямительных диодов?
3. Перечислите параметры, характеризующие ВЧ и СВЧ диоды.
4. Какими параметрами характеризуются импульсные диоды?
5. Какими параметрами характеризуются переключающие управляемые и неуправляемые диоды?
6. Какими основными параметрами характеризуются транзисторы?
7. В чем заключается метод измерения максимальной частоты генерации транзистора?
8. Какими электрическими параметрами характеризуются туннельные диоды и как они измеряются?
9. Нарисуйте схемы измерения фотодиодов, фототранзисторов.
10. Какими параметрами характеризуются светодиоды?
11. Какими параметрами характеризуются оптроны?
12. Перечислите преимущества автоматического измерения параметров полупроводниковых приборов.

ИСПЫТАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**§ 52. ВОЗДЕЙСТВИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ**

Полупроводниковые приборы применяют в разнообразной аппаратуре, работающей в самых различных условиях. Одна аппаратура используется в условиях низких температур, другая — в тропическом климате, а измерительная аппаратура должна надежно работать как при низких, так и при высоких температурах. Иногда необходимо, чтобы полупроводниковые приборы нормально работали при резких изменениях температуры в широких пределах.

Приборы, применяемые в авиации, станкостроении, на транспорте и в некоторых других отраслях промышленности, должны выдерживать большие ускорения, вибрацию. Полупроводниковые приборы должны быть устойчивы против воздействия случайных ударов.

Параметры полупроводниковых приборов в значительной степени зависят от условий окружающей среды. Очень велика зависимость параметров от температуры. Это является принципиальной особенностью полупроводниковых приборов, обусловленной физическими свойствами полупроводников (см. гл. III).

В процессе хранения и эксплуатации приборов возможно изменение (дрейф) их параметров. Наиболее существенным является дрейф обратных токов переходов и коэффициента усиления транзисторов.

В зависимости от типа приборов и способа их изготовления обратные токи переходов могут увеличиваться или уменьшаться в несколько раз; коэффициент усиления транзисторов может увеличиваться или уменьшаться обычно не более чем на 50%.

Качество изготовления также оказывает значительное влияние на параметры приборов. Если герметичность корпуса прибора нарушена при изготовлении или при воздействии на прибор механических нагрузок в процессе эксплуатации, это приводит к попаданию влаги и других загрязнений внутрь прибора. Такие приборы будут иметь значительный дрейф параметров. При производстве приборов могут быть плохо закреплены отдельные их детали, некачественно изготовлены омические

контакты, ненадежно образован сам $p-n$ -переход и другие дефекты.

Для проверки параметров прибора в различных условиях окружающей среды, а также для проверки качества изготовления приборы проходят комплекс испытаний.

§ 53. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

Испытания полупроводниковых приборов проводятся в соответствии с техническими требованиями на эти приборы.

Технические требования к полупроводниковым приборам указываются в технических условиях. Существуют общие технические условия на большую часть полупроводниковых приборов (ОТУ) и частные технические условия на приборы одной серии (ЧТУ), выпускаемые предприятиями-разработчиками этих приборов.

Общие технические условия кроме требований к приборам содержат правила приемки и контроля качества приборов. В соответствии с ОТУ завод-изготовитель должен проводить испытания полупроводниковых приборов следующих категорий:

приемо-сдаточные;
периодические;
испытания на гарантийную наработку (на срок службы).

Приемо-сдаточные испытания проводит отдел технического контроля (ОТК) завода. Для испытаний предъявляются приборы партиями, скомплектованными из приборов одного типа, изготовленных в течение последних трех месяцев в количестве до 22 000 штук. Проверяется каждая партия.

Проводятся два вида контроля:

контроль внешнего вида: покраска, маркировка, расположение выводов, размеры, состояние резьбы и другие параметры, определяемые внешним осмотром;

контроль электрических параметров, которые ЧТУ или другой документацией отнесены к приемо-сдаточным испытаниям.

Порядок проведения приемо-сдаточных испытаний установлен общими техническими условиями. В результате испытаний определяется доля негодных приборов по отношению к общему числу приборов в партии. Эта доля не должна быть больше установленной ЧТУ для

каждого типа приборов и в любом случае не превышать 2,5%. Если процент негодных приборов окажется больше установленного значения, то партия считается не выдержавшей приемо-сдаточных испытаний. Такая партия приемке не подлежит. Приборы непринятых партий возвращаются цеху-изготовителю для стопроцентной перепроверки и удаления всех забракованных приборов.

После перепроверки приборов годные приборы вновь комплектуются к приемо-сдаточным испытаниям.

Периодические испытания проводит ОТК завода-изготовителя раз в три месяца, а также в случае изменения конструкции приборов, технологии их изготовления, замены применяемых материалов и других изменений, если эти изменения могут повлиять на качество и параметры приборов.

Периодическим испытаниям подвергают приборы, прошедшие приемо-сдаточные испытания. Для испытаний отбирают приборы любого типа, производимые по одной технологии.

Отобранные приборы подвергают испытаниям по трем группам в следующем объеме и последовательности.

1-я группа:

проверка смачиваемости выводов припоем и отсутствие повреждения приборов при пайке;

испытания механической прочности выводов.

2-я группа:

проверка электрических параметров, которые в соответствии с ЧТУ отнесены к категории периодических испытаний;

проверка на отсутствие коротких замыканий и обрывов;

испытание на теплоустойчивость;

испытание на холодоустойчивость;

испытание на устойчивость к циклическим изменениям температуры;

испытание на ударную прочность;

испытание на вибропрочность;

испытание на устойчивость к постоянному ускорению;

испытание на влагоустойчивость и герметичность.

3-я группа:

испытание на стабильность работы.

Периодическим испытаниям подвергают 20 штук приборов по каждой группе испытаний. Приборы считаются прошедшими испытания, если по каждой группе испытаний оказалось не более одного прибора, не удовлетворяющего требованиям ЧТУ. При неудовлетворительных результатах испытаний проводят повторные испытания на удвоенном количестве приборов по той группе, где были получены неудовлетворительные результаты.

Испытания на гарантийную наработку (на срок службы) имеют целью проверку работы полупроводниковых приборов в режимах и условиях, допускаемых ОТУ и ЧТУ в течение 5000 ч. В некоторых случаях продолжительность гарантийной наработки может быть иной и оговаривается в ЧТУ на конкретные типы приборов. Испытаниям подвергают 100 приборов один раз в 12 месяцев.

В ОТУ указываются основные режимы испытаний по каждому виду испытаний. Кроме того, в ОТУ содержатся требования, предъявляемые к испытательным и измерительным установкам.

Частные технические условия разрабатываются для каждой серии (типа) полупроводниковых приборов как дополнение к общим техническим условиям. В ЧТУ подробно указываются методика и режимы проведения испытаний с учетом параметров, конструкции и других особенностей приборов данной серии, в частности следующее: способ установки приборов, количество одновременно испытываемых приборов, размеры радиаторов, способ отвода тепла, величина усилия, а также способ и направления его приложения к прибору при механических испытаниях, длительность испытаний, допустимые отклонения значений испытательных параметров, формы кривых тока и напряжения.

Перед предъявлением приборов в ОТК для приемосдаточных испытаний цех-изготовитель проводит так называемые технологические испытания. Это означает, что все приборы, изготовленные цехом, проходят комплекс испытаний, установленный общими техническими условиями. Нормы на параметры приборов, проверяемые при технологических испытаниях, жестче, чем нормы на те же параметры, проверяемые отделом технического контроля. Например, если после цикла технологических испытаний диода серии Д231—Д234 оказалось, что его паспортное значение обратного тока (не более 3 мА)

выдерживается при обратном напряжении до 300 В, то диод классифицируют и маркируют как диод Д232 (с обратным напряжением 200 В). По нормам ОТУ прибор испытывают в соответствии с присвоенным ему классификационным типом (группой). В приведенном примере диод будут испытывать как двухсотвольтовый.

Требования, предъявляемые к приборам, можно разделить на пять основных групп: к конструкции; к электрическим параметрам; по устойчивости к механическим воздействиям; по устойчивости к климатическим воздействиям; к надежности и гарантийной наработке.

Гарантийная наработка — это минимальная продолжительность времени работы прибора, в течение которой завод-изготовитель гарантирует и обеспечивает выполнение определенных требований к изделию при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации.

В соответствии с перечисленными требованиями имеется программа испытаний, по которой испытания проводятся. Иначе говоря, при испытаниях проверяется соответствие приборов предъявленным к ним требованиям.

§ 54. ИСПЫТАНИЯ НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ К КОНСТРУКЦИИ

Испытания включают в себя проверку общего вида приборов, правильности присоединения выводов, размеров, механической прочности выводов, качества антикоррозийных покрытий, герметичности, светонепроницаемости, качества сварки и лужения выводов, качества стекла, а также проверку массы приборов. Внешний вид приборов, их размеры, защитные покрытия, качество сварных соединений проверяют, осматривая невооруженным глазом и при помощи мерительных инструментов и специальных калибров.

Массу прибора проверяют взвешиванием его на весах с погрешностью $\pm 5\%$ от номинальной массы прибора.

Смачиваемость выводов приборов припоем и отсутствие повреждения приборов при пайке проверяют следующим образом. Вывод, предварительно смоченный флюсом, погружают на 2—3 с луженой частью в расплавленный припой с температурой $250 \pm 10^\circ \text{C}$. Прибор считается годным, если припой свободно растекается по поверхности вывода.

Механическую прочность выводов приборов проверяют следующим образом. При испытании выводов на натяжение прибор закрепляют, а к выводам поочередно прикладывают усилие вдоль их оси, величина которого и время действия указываются в ЧТУ. Усилие прикладывается постепенно, время действия — не более 2 мин.

При испытаниях гибких выводов на изгиб каждый вывод натягивают относительно корпуса с усилием, указанным в ЧТУ, и изгибают на расстоянии 3 мм от основания прибора или от начала гибкой части составных выводов. Радиус изгиба 1,5—2,0 мм, угол изгиба 90°. После этого вывод возвращают в исходное состояние. Указанную операцию повторяют трижды.

При испытании выводов на воздействие скручивающего момента усилие прикладывается так, чтобы скручиванию подвергались места у основания прибора. Усилие прикладывается плавно, без толчков. Величина усилия, продолжительность его воздействия, место и способ приложения указываются в ЧТУ.

Для проверки герметичности полупроводниковых приборов применяют несколько методов.

Метод радиоактивного анализа наиболее сложен и дорог. Он состоит в том, что испытываемые приборы помещают в герметичную камеру, которую наполняют радиоактивным газом. После удаления газа приборы извлекают из камеры и проверяют на способность радиоактивного излучения. Если у испытываемого прибора нарушена герметизация, то радиоактивный газ проникает внутрь баллона и после извлечения из камеры прибор будет обладать способностью радиоактивного излучения. Такой метод испытания дает возможность определить величину «течи» в достаточно большом диапазоне.

Гелиевый метод испытания заключается в воздействии на приборы гелием и дальнейшем обнаружении гелиевым течеискателем потока газа сквозь негерметичные узлы и элементы прибора. Этот метод проще, чем первый.

Метод испытания горячим маслом — самый простой и дешевый, ибо он не требует сложных приборов и оборудования. Готовые приборы погружают в сосуд с прозрачным маслом, нагретым до температуры 120° С. Под воздействием высокой температуры давление воздуха внутри корпусов приборов повышается и

воздух в виде пузырьков начинает выходить через негерметичные участки в приборах.

Герметичность приборов проверяют при испытании на влагоустойчивость (кратковременное воздействие) по методике, описанной в следующем параграфе.

Светонепроницаемость приборов проверяют по изменению их обратного тока в режиме, указанном в ЧТУ. Обратный ток замеряют сначала при затемненном приборе, а затем при освещении его электролампой мощностью 200 Вт, расположенной на расстоянии 200—300 мм от прибора. При испытании между прибором и лампой устанавливают плоский прозрачный сосуд с водой для защиты прибора от нагрева световыми лучами.

§ 55. ИСПЫТАНИЯ НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ПО УСТОЙЧИВОСТИ К КЛИМАТИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Комплекс испытаний включает в себя следующие испытания:

на теплоустойчивость;

на холодоустойчивость;

на устойчивость к термоциклированию;

на влагоустойчивость (кратковременные и длительные испытания);

на устойчивость к пониженному атмосферному давлению;

на устойчивость к повышенному атмосферному давлению;

на устойчивость к воздействию морского тумана.

Испытаниям на соответствие требованиям по устойчивости к климатическим воздействиям подвергают все изготовленные приборы. Для некоторых типов приборов испытания проводят не в полном объеме.

После каждого вида испытаний производят внешний осмотр приборов и измеряют электрические параметры методами, описанными в гл. VI. Режим измерения электрических параметров задается ЧТУ.

Теплоустойчивость приборов проверяют в камере тепла при температуре, указанной в ЧТУ (от 100 до 130° С).

Камера тепла представляет собой герметично закрываемый объем с хорошей теплоизоляцией стенок, в котором установлены нагреватели. Для равномерного распределения температуры в камере предусмотрено при-

нудительное перемещение воздуха с помощью вентилятора. Температура в камере поддерживается автоматически с помощью терморегулирующего прибора.

Установленные на кассеты приборы помещают в камеру так, чтобы каждый прибор соединялся с внешней электрической схемой, с помощью которой задается электрический режим работы приборов. Параметры электрического режима указываются в ЧТУ. После 30-минутной выдержки без извлечения приборов из камеры измеряют их электрические параметры, указанные в ЧТУ для данного вида испытаний.

По окончании испытаний приборы извлекают из камеры и выдерживают в нормальных климатических условиях в течение не менее 2 ч. Затем измеряют электрические параметры по программе прямо-сдаточных испытаний.

На рис. 114 показана камера тепла (с открытой дверцей), предназначенная для испытания диодов серии Д242—Д46, Д231—Д234. Испытуемые диоды укреплены на кассете, установленной в нижней части камеры таким образом, что нижние выводы диодов плотно входят в специальные разъемы, соединенные с измерительной схемой.

На стенках камеры укреплены кассеты, не включенные в электрическую схему. Здесь диоды предварительно прогреваются до заданной температуры испытаний.

Холодоустойчивость приборов проверяют в камере холода при температуре, заданной ЧТУ (от -40 до -60°C).

Принципиально камера холода не отличается от камеры тепла. Основное различие состоит в том, что вместо

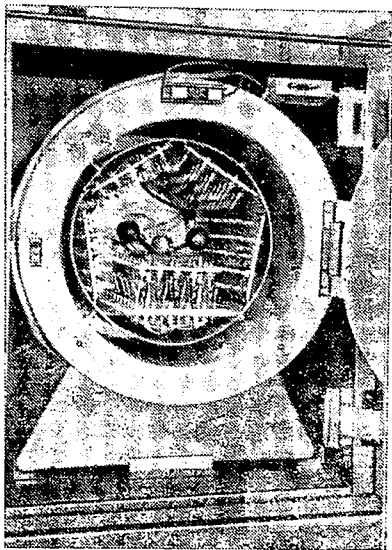


Рис. 114. Камера тепла

нагревателей установлен испаритель, в котором испаряется жидкий азот, поступающий из сосуда Дьюара. В сосуде Дьюара азот находится под большим давлением в жидком состоянии. Поступая в испаритель, азот увеличивается в объеме и, следовательно, превращается в газ (испаряется). При этом с поверхности испарителя

поглощается большое количество тепла. Поверхность испарителя, в свою очередь, поглощает тепло из объема камеры, что приводит к понижению температуры в последней.

В камере установлен вентилятор для равномерного перемешивания воздуха. Заданная температура поддерживается автоматически. Испытания проводятся так же, как и в камере тепла.

На рис. 115 дан общий вид камеры холода для испытания диодов (дверца камеры открыта). Испытуемые диоды расположены так же, как и в камере тепла.

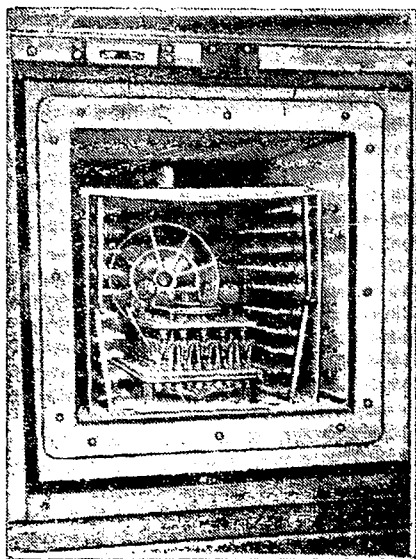


Рис. 115. Камера холода

Устойчивость к термоциклированию проверяется в следующем порядке. Приборы помещают в камеру тепла, температуру в которой заранее доводят до заданного в ЧТУ значения, и выдерживают 30 мин. Затем приборы переносят в камеру холода. Время переноса не должно превышать 1 мин. Температура в камере холода так же заранее доводится до заданного значения. Приборы выдерживают в камере холода в течение 30 мин, а затем вновь переносят в камеру тепла. Цикл повторяют три раза. Отклонение температуры в камерах от заданного значения в результате перегрузки приборов не должно превышать $\pm 10^{\circ}\text{C}$.

После испытаний приборы выдерживают в нормальных условиях не менее 2 ч. Затем измеряют основные электрические параметры по программе приемо-сдаточных испытаний.

Влагоустойчивость приборов проверяют в камере влажности без подачи напряжения на электроды в течение нескольких суток (в зависимости от типа приборов).

Камера влажности представляет собой довольно сложное устройство, обеспечивающее в испытательном объеме заданное значение температуры и влажности воздуха. Заданная температура обеспечивается нагревателями, а заданная влажность — испарением воды из специального увлажнителя. Равномерная температура достигается циркуляцией воздуха в испытательном объеме, создаваемой вентилятором, а равномерная влажность — циркуляцией воздуха через слой воды увлажнителя, создаваемой другим вентилятором. Температура контролируется и поддерживается электронным мостом, а влажность — электронным психрометром.

Электронный психрометр представляет собой измерительный показывающий самопишущий прибор, на входе которого включен мост. В одно из плеч моста включен датчик, сопротивление которого изменяется в зависимости от относительной влажности контролируемой среды.

В конце испытания на длительное воздействие влаги перед извлечением приборов из камеры на них в течение 5 мин подается напряжение, указываемое в ЧТУ.

После испытаний приборы выдерживают в нормальных климатических условиях не менее 2 ч, а затем измеряют их основные электрические параметры по программе приемо-сдаточных испытаний.

Устойчивость к пониженному атмосферному давлению проверяют в барокамере при давлении 5 мм рт. ст. При этом давлении приборы испытывают в течение 15 мин в электрическом режиме, указываемом в ЧТУ, и затем измеряют параметры в соответствии с ЧТУ. По окончании испытаний приборы извлекают из камеры и измеряют электрические параметры, отнесенные в категории приемо-сдаточных испытаний к важнейшим.

Устойчивость к повышенному атмосферному давлению проверяют в барокамере при давлении 3 ат. Испытание проводится без подачи напря-

жения на электроды приборов в течение 15 мин. По окончании испытаний поступают так же, как и в предыдущем случае.

Устойчивость к воздействию морского тумана проверяют следующим образом. Приборы помещают в камеру с температурой 26° С, в которой создают условия морского тумана распылением специального синтетического раствора солей. Общее время испытания — несколько суток. По окончании испытания измеряют электрические параметры, отнесенные в категории прямо-сдаточных испытаний к важнейшим.

Некоторые типы приборов проверяют на грибоустойчивость. Этот вид испытаний проводится по специальной инструкции и здесь не рассматривается.

После каждого вида испытаний перед измерением электрических параметров необходимо произвести внешний осмотр приборов.

Выдержавшими испытания считаются приборы, у которых отсутствуют дефекты, вызывающие потерю их работоспособности, внешний вид соответствует требованиям ОТУ и ЧТУ, а значения электрических параметров или их изменения сохранились в пределах норм, установленных в ЧТУ для соответствующего вида испытаний. Кроме того, при испытаниях на влагуустойчивость отбраковывают приборы, у которых наблюдались пробои (искрения) внутри или по поверхности.

§ 56. ИСПЫТАНИЯ НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ПО УСТОЙЧИВОСТИ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Проверка приборов на соответствие требованиям по устойчивости к механическим воздействиям включает в себя следующие виды испытаний:

на устойчивость к длительной вибрации в диапазоне частот;

на вибропрочность в диапазоне частот;

на устойчивость к длительной вибрации на фиксированной частоте;

на устойчивость к многократным ударам;

на устойчивость к одиночным ударам;

на устойчивость к постоянному ускорению.

Испытания проводят при жестком креплении приборов к платформам испытательных стендов, чтобы воздействие нагрузки передавалось приборам с минималь-

ными потерями (без амортизации). Воздействие на приборы производится в двух наиболее опасных для них положениях, указываемых в ЧТУ.

Приборы испытывают в электрическом режиме (за исключением испытаний на длительную вибрацию в диапазоне частот). После каждого вида испытаний производят внешний осмотр приборов и измеряют электрические параметры методами, описанными в гл. VI. Режим измерения электрических параметров задается ЧТУ.

Устойчивость приборов к длительной вибрации в диапазоне частот проверяют на вибрационном стенде, обеспечивающем гармонические колебания, без подачи напряжения на электроды прибора. Испытание проводится в диапазоне частот от нескольких герц до нескольких килогерц с заданным ускорением. Диапазон частот разбит на четырнадцать поддиапазонов. При испытании плавно изменяют частоту в каждом поддиапазоне. Время прохождения поддиапазона — порядка 1 мин. На высшей частоте каждого поддиапазона приборы выдерживают в течение времени, указанного в ОТУ (несколько часов).

Для испытаний на вибростенде приборы устанавливают в заданном положении на общую кассету по несколько десятков штук. Несколько кассет (в зависимости от размеров приборов) размещают на специальной горизонтальной площадке вибростенда, которая получает колебательные движения с заданной частотой в вертикальной плоскости.

Вибростенды бывают двух типов: электромеханические и электродинамические. В электромеханических стендах вибрация площадки создается благодаря вращению разбалансированных дисков, приводимых во вращение электродвигателем. Эти стенды не позволяют получить большой диапазон частот и ускорений. В электродинамических стендах вибрация создается при взаимодействии магнитных полей неподвижного постоянного магнита и подвижной катушки, в обмотку которой подается переменный ток нужной частоты и напряжения. Эти стенды позволяют получить вибрационные воздействия на испытываемые диоды в широком диапазоне частот и ускорений.

Вибропрочность приборов в диапазоне частот проверяют в электрическом режиме. Приборы, укрепленные на кассетах и установленные на вибро-

стенд, с помощью специальных разъемов включают на все время испытаний в индикаторную схему. На сигнальном щите каждому испытываемому прибору соответствует группа сигналов, оповещающих об обрыве или о коротких замыканиях соответствующих $p - n$ -переходов внутри прибора. Даже при кратковременных обрывах или к. з. срабатывает запоминающее устройство и соответствующий сигнал сохраняется до конца испытаний. Испытания проводят на частотах нескольких поддиапазонов. При обнаружении частот, на которых наблюдается выход приборов из строя, дополнительно испытывают всю группу приборов на вибрацию на этих частотах.

Устойчивость приборов к длительной вибрации на фиксированной частоте проверяют на вибрационном стенде, обеспечивающем простые гармонические колебания. Испытание проводится на заданной частоте с заданным ускорением по несколько десятков часов в каждом положении прибора.

Устойчивость приборов к многократным ударам проверяют на ударном стенде. В каждом положении прибор подвергается заданному числу ударов с заданной частотой, с очень большим ускорением.

Для испытаний на ударном стенде приборы устанавливают на кассеты, укрепляемые на горизонтальной массивной стальной плите, которая может свободно перемещаться по вертикальным направляющим. Плита поднимается в верхнее положение под действием кулачка, насаженного на вал, приводимый во вращательное движение от двигателя постоянного тока. Кулачок имеет такую форму, что после того как плита будет поднята в верхнюю «мертвую» точку, она резко падает вниз под действием сильной пружины. Падая, плита ударяется об опоры.

Высоту подъема плиты можно регулировать, изменяя высоту кулачка. Частоту ударов регулируют изменением числа оборотов приводного двигателя постоянного тока.

Устойчивость приборов к одиночным ударам проверяют на ударном стенде с ускорением, во много раз превышающим ускорение свободного падения, и очень короткой длительностью удара.

При испытании приборы помещают в металлическую гильзу (сборку) и заливают парафином или другим ве-

ществом с температурой плавления меньшей, чем предельно допустимая рабочая температура прибора.

Производится десять ударов, по пять ударов в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Разрешается проведение испытаний без изменения положения приборов, если половина приборов испытывает ускоряющее воздействие в одном направлении, а другая половина — в перпендикулярном. В этом случае производится десять ударов.

Перед проверкой электрических параметров приборы выплавляют из сборки, промывают и просушивают.

Устойчивость приборов к воздействию постоянного ускорения проверяют на центрифуге.

Испытания проводят при заданном ускорении в течение заданного времени в каждом положении прибора. Ускорение прикладывается примерно в геометрическом центре прибора и должно поддерживаться постоянным во все время испытаний.

Выдержавшими испытания на устойчивость к механическим воздействиям считаются приборы, у которых в процессе испытаний или после них (в зависимости от вида испытаний) не обнаружено нарушений контактов или коротких замыканий и после испытаний отсутствуют дефекты, вызывающие потерю их работоспособности. Кроме того, внешний вид приборов должен соответствовать требованиям ОТУ и ЧТУ, а электрические параметры или их изменения должны находиться в пределах норм, установленных ЧТУ.

§ 57. ИСПЫТАНИЯ НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Требования к электрическим параметрам приборов включают в себя следующее:

электрические параметры и характеристики приборов должны соответствовать требованиям и сохраняться в пределах норм, установленных ЧТУ, как в процессе эксплуатации и хранения в условиях и в течение времени, установленных ОТУ и ЧТУ, так и после транспортировки в условиях, установленных ОТУ;

в приборах не должно быть коротких замыканий и обрывов в цепях электродов как кратковременных, так и постоянных;

электрические параметры должны быть стабильными в пределах норм, установленных ЧТУ.

Электрические параметры и характеристики приборов измеряют методами и способами, описанными в гл. VI. Последовательность измерений указывается в ЧТУ. Там же указываются режимы и точность измерения каждого параметра для конкретного типа приборов.

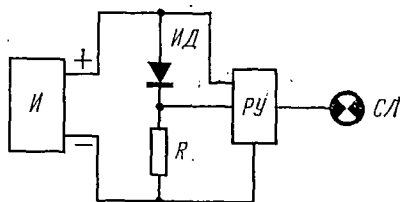


Рис. 116. Схема для проверки короткого замыкания и обрывов выпрямительных диодов

Проверка электрических параметров приборов, отнесенных к приемо-сдаточным испытаниям, производится после испытаний на климатические и механические воздействия. Тогда же осуществляется испытание на отсутствие коротких замыканий и обрывов.

Схемы для проведения этих испытаний для разных видов приборов не имеют принципиальных отличий. Для примера рассмотрим схему проверки на отсутствие короткого замыкания и обрывов для выпрямительных диодов, показанную на рис. 116.

На испытуемый диод *ИД* подается постоянное напряжение от источника *И*. Если в диоде есть короткое замыкание, то падение напряжения на нем становится равным нулю. При этом срабатывает регистрирующее устройство *РУ* и включает сигнальную лампу *СЛ*. При обрыве в испытуемом диоде все напряжение источника *И* прикладывается к выводам диода, а падение напряжения на резисторе отсутствует. В этом случае также срабатывают регистрирующее устройство *РУ* и лампа *СЛ*.

Стабильность параметров приборов контролируется:

испытанием при включении на длительную нагрузку; проверкой характера и степени изменения (дрейфа) параметров проверяемого прибора.

Контроль дрейфа параметров производится, как правило, одновременно с измерением самих параметров после испытаний на климатические и механические воздействия, при приемо-сдаточных испытаниях, при испытании на надежность и гарантийную наработку. Перечень па-

раметров, для которых контролируется дрейф, указывается в ЧТУ. В ЧТУ указываются критерии оценки дрейфа каждого из контролируемых параметров, максимально допустимое время, в течение которого значение параметра может изменяться до допустимой величины; скорость изменения этого параметра за последнюю минуту.

Стабильность параметров путем испытания приборов на длительную нагрузку проверяют при специальном виде технологических испытаний, называемом *тренировкой*. Различают два вида тренировки: электрический и термоэлектрический.

При электрической тренировке приборы включают в электрическую схему, с помощью которой создают режим работы приборов со средними значениями их основных параметров. В таких условиях прибор выдерживают несколько часов или несколько десятков часов (в соответствии с ЧТУ). При работе схемы специальные устройства фиксируют выход из строя любого из испытуемых приборов. По окончании тренировки измеряют основные электрические параметры.

При термоэлектрической тренировке прибор помещают в камеру, в которой создается высокая температура, максимально допустимая для данного типа прибора, т. е. имитируется токовая нагрузка прибора. Температура в камере во время испытаний автоматически поддерживается постоянной. Прибор включают в электрическую цепь и задают средние для него значения обратного напряжения, напряжения переключения или другого параметра в зависимости от вида прибора. Прибор выдерживается в этих условиях в течение нескольких часов или нескольких десятков часов. По окончании тренировки измеряют электрические параметры прибора. Иногда параметры измеряют в процессе тренировки периодически или непрерывно. В последнем случае измерения можно производить самопишущим прибором.

Методы тренировки различных полупроводниковых приборов не имеют принципиальных различий по способу включения тренируемого прибора в электрическую схему и способу измерения параметров. Поэтому достаточно рассмотреть схему тренировки одного из приборов. Для примера рассмотрим схему стенда для термоэлектрической тренировки диодов средней мощности (рис. 117). Схема включает нагреватель H с терморегу-

лирующим устройством *ТРУ* и схему включения и измерения испытуемых диодов *1ИД* и *2ИД*. Диоды работают в статическом режиме и включены в обратном направлении. Питание диодов осуществляется от источника постоянного напряжения *И*, на вход которого подается напряжение, стабилизированное стабилизатором *Ст*.

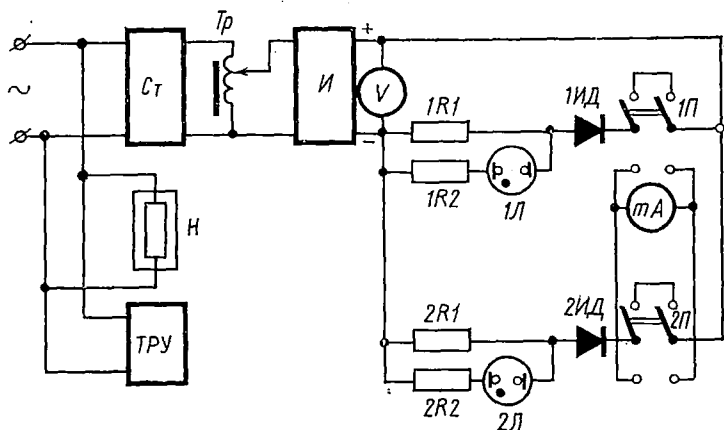


Рис. 117. Схема стенда для тренировки диодов:

Н — нагреватель, *ТРУ* — терморегулирующее устройство, *1Л* и *2Л* — неоновые сигнальные лампы, *1ИД* и *2ИД* — испытуемые диоды, *1П* и *2П* — переключатели, *Ст* — стабилизатор напряжения

Величину напряжения можно регулировать автотрансформатором *Тр*. На диоды подается обратное напряжение, соответствующее их типу. Резисторы *1R1* и *2R1* служат для ограничения тока в цепи в случае пробоя испытуемых диодов (короткое замыкание электродов). О пробое диода сигнализирует неоновая лампа *1Л* (*2Л*). Нормально лампа не светится, так как к ней приложено очень малое напряжение. Большая часть питающего напряжения падает на обратном сопротивлении испытуемого диода *1ИД* (*2ИД*).

Схема позволяет периодически измерять величину обратного тока любого из тренируемых диодов. Для этого переключатель *1П* (*2П*) переводят в нижнее (по схеме) положение. При этом последовательно с диодом включается миллиамперметр *mA*.

Практически на стенде одновременно испытывают не два, а несколько десятков или сотен приборов.

На рис. 118 представлен общий вид стенда для термоэлектрической тренировки диодов. Испытуемые диоды устанавливают на специальные радиаторы и помещают в большую прямоугольную камеру так, что выводы приборов входят в разъемы, через которые они включаются

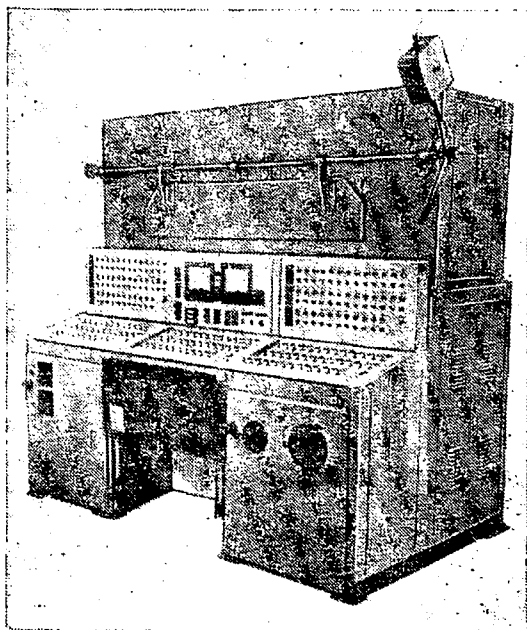


Рис. 118. Общий вид стенда для тренировки диодов

в электрическую цепь. В средней части стенда установлены лицевые панели, на которых расположены переключатели (1П и 2П на рис. 117) по числу тренируемых диодов. На средней панели находятся вольтметр V , по которому устанавливают величину обратного напряжения, и миллиамперметр mA для контроля величины обратного тока диодов.

Следует отметить, что при этом виде испытаний, а также при климатических испытаниях, где применяют радиаторы, необходимо следить, чтобы поверхность радиатора была гладкой и приборы плотно прилегали к нему. Из-за несоблюдения этих требований может ухуд-

шиться отвод тепла от прибора, что вызовет его перегрев и может привести к выходу прибора из строя или ухудшению его параметров.

Перед началом испытаний приборов измеряют их электрические параметры. По окончании испытаний приборы выдерживают заданное ЧТУ время в нормальных условиях, осматривают их и измеряют электрические па-

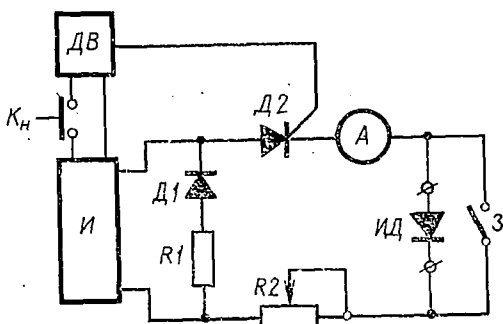


Рис. 119. Схема для испытания диодов на перегрузку по прямому току:
 ДВ — дозатор времени, З — замыкатель

раметры, указанные в ЧТУ. Кроме того, проверяют дрейф параметров.

Некоторые виды приборов проверяют на перегрузку по прямому току. Нормы на кратность тока перегрузки и длительность его воздействия устанавливаются ЧТУ. Например, диод Д231 и Д234 должны выдерживать трехкратную перегрузку в течение 1,5 с и десятикратную перегрузку в течение 50 мс.

На рис. 119 показана схема для испытания диодов на перегрузку по прямому току. Схема для испытания коллекторного и эмиттерного переходов транзисторов выглядит аналогично. Через испытуемый диод ИД пропускается импульс переменного тока заданной величины от источника тока И. Длительность импульса задается дозатором времени ДВ. При нажатии кнопки Кн сигнал с выхода дозатора открывает управляемый диод Д2, через который пропускается ток перегрузки на испытуемый диод. По окончании импульса с дозатора времени, в момент когда значение испытательного тока (полусинусоиды) равно нулю, управляемый диод закрывается.

Значение испытательного тока задают перед испытанием при отключенном от зажимов испытуемом диоде и замкнутом замыкателе Z с помощью переменного резистора R_2 . В качестве дозатора времени $ДВ$ может быть применен формирователь импульсов, описанный в гл. V.

Приборы считаются выдержавшими испытания на соответствие требованиям к электрическим параметрам, если в процессе испытаний и после них внешний вид, электрические параметры и их изменения сохранились в пределах норм, установленных ЧТУ для этих видов испытаний.

§ 58. ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ И ГАРАНТИЙНУЮ НАРАБОТКУ

Завод-изготовитель гарантирует работу приборов широкого применения в течение 5000 ч. Надежность приборов проверяется в процессе испытаний на гарантийную наработку за 500 ч их работы. По ЧТУ задается критерий надежности (интенсивность отказов), показывающий максимально допустимое число отказавших приборов в единицу времени.

В ЧТУ также указывается минимальное значение вероятности безотказной работы приборов как доля приборов, выдержавших испытания, от общего количества испытуемых приборов (обычно не менее 0,95).

Испытания проводят один раз в 12 месяцев. Количество испытуемых приборов — 100.

Испытания проводят при температуре окружающей среды $+25 \pm 10^\circ \text{C}$. Приборы крепят на индивидуальные радиаторы, помещают в специальную камеру, где они через разъемы соединяются с электрической схемой. Испытания, как правило, проводят в следующих режимах:

диоды — в динамическом с однополупериодным выпрямлением при максимальном значении обратного напряжения и максимальном значении прямого тока для температуры проведения испытаний;

транзисторы — в статическом при максимальной мощности рассеяния на коллекторе и максимальном значении напряжения коллектор — эмиттер или коллектор — база для температуры проведения испытаний.

Для отдельных видов приборов режим испытаний указывается в ЧТУ в соответствии с особенностями использования этих приборов.

В процессе испытаний производят замеры электрических параметров — критериев годности с заданной периодичностью (100, 500, 1000 ч). Измерения производят, не извлекая приборы из испытательной установки.

Приборы, имеющие к. з. или обрывы, или параметры которых отклонились от заданных норм, из схемы исключаются.

Выдержавшими испытания считаются приборы, у которых внешний вид и электрические параметры — критерии годности сохранились в пределах норм, установленных ЧТУ на приборы конкретных типов.

По окончании испытаний вычисляется интенсивность отказов и вероятность безотказной работы приборов.

Если результаты испытаний оказались неудовлетворительными, то на основании характера отказа каждого прибора определяются причины отказов. Затем проводятся мероприятия, направленные на устранение выявленных дефектов и приведение качества приборов в соответствии с требованиями ЧТУ.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение испытаний полупроводниковых приборов?
2. Что такое ОТУ и ЧТУ?
3. Какие категории испытаний приняты для полупроводниковых приборов?
4. Какие испытания проводятся для проверки на соответствие требованиям к конструкции?
5. Какие испытания проводятся для проверки на соответствие требованиям по устойчивости к климатическим воздействиям?
6. Какие испытания проводятся для проверки соответствия требованиям к электрическим параметрам?
7. Расскажите порядок испытаний в камерах тепла, холода и влаги.
8. Как проводятся испытания на удар, вибрацию и ускорение?
9. Что такое тренировка и как она проводится?
10. Как проводятся испытания на надежность и гарантийную наработку?

ЛИТЕРАТУРА

Алукер Ш. М. Электроизмерительные приборы. М., Профтехиздат, 1962.

Брук В. А. и др. Производство полупроводниковых приборов. М., «Высшая школа», 1968.

Будинский Я. Усилители низкой частоты на транзисторах. М., Связьиздат, 1963.

Гольденберг Л. М. Основы импульсной техники. М., Связьиздат, 1963.

Городецкий А. Ф., Кравченко А. Ф. Полупроводниковые приборы. М., «Высшая школа», 1967.

Гусев В. П. Производство радиоаппаратуры. М., «Высшая школа», 1970.

Курносов А. И., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов. Л., «Судостроение», 1965.

Лендоел Б. Лазеры. Перевод с англ. Крохина О. Н. и Попова Ю. М. М., «Мир», 1964.

Маслов А. А. Электронные полупроводниковые приборы. М. — Л., Госэнергоиздат, 1960.

Мионов К. А., Шипетин Л. И. Теплотехнические измерительные приборы. М., Машгиз, 1959.

Назаров Г. В., Гревцов Н. В. Сварка и пайка в микроэлектронике. М., «Советское радио», 1969.

Севин Л. Полевые транзисторы. М., «Советское радио», 1968.

Свечников С. В. Элементы оптоэлектроники. М., «Советское радио», 1971.

Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963.

Тиристоры. Технический справочник. Перевод с англ., под ред. Лабунцова В. А. и Свиридова А. Ф. М. — Л., «Энергия», 1971.

Тихонов Р. И. Технология изготовления германиевых и кремниевых диодов и триодов. М. — Л., «Энергия», 1964.

Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. М., «Советское радио», 1970.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава I. Основные сведения о радиодеталях	6
§ 1. Резисторы	6
§ 2. Конденсаторы	10
§ 3. Катушки индуктивности	14
§ 4. Трансформаторы и дроссели низкой частоты	16
§ 5. ГОСТы, каталоги и справочники	17
Глава II. Измерения и измерительные приборы	20
§ 6. Методы измерений	20
§ 7. Классификация электроизмерительных приборов	21
§ 8. Приборы для измерения электрических величин	22
§ 9. Приборы для измерения температуры неэлектрическими методами	23
§ 10. Приборы для измерения температуры электрическими методами	26
Глава III. Полупроводниковые приборы и их назначение	33
§ 11. Общие сведения о полупроводниковых приборах	33
§ 12. Полупроводниковые диоды	38
§ 13. Транзисторы	48
§ 14. Полевые транзисторы	54
§ 15. Тиристоры	58
§ 16. Фотоэлектронные приборы	62
§ 17. Излучающие диоды	65
§ 18. Оптоэлектронные приборы	67
§ 19. Интегральные схемы	69
§ 20. Конструкции полупроводниковых приборов	70
Глава IV. Технологический процесс изготовления полупроводниковых приборов	72
§ 21. Требования к технологическому процессу	72
§ 22. Методы получения $p-n$ -переходов	73
§ 23. Получение омических контактов	81
§ 24. Прогрессивные технологические приемы изготовления полупроводниковых структур	83

§ 25. Методы присоединения выводов	87
§ 26. Технологическая схема полупроводникового производства	89
§ 27. Изготовление пластин и кристаллов	94
§ 28. Сборка планарно-эпитаксиальных диодов	96
§ 29. Сборка диффузионно-сплавных высокочастотных транзисторов	98

Глава V. Измерительные схемы и их монтаж 101

§ 30. Основные понятия о единой системе конструкторской документации	101
§ 31. Структурные схемы измерительных устройств	107
§ 32. Источники питания	110
§ 33. Усилители	117
§ 34. Импульсные схемы измерительных устройств	120
§ 35. Сравнивающие устройства	125
§ 36. Понятие о логических элементах	127
§ 37. Конструкции измерительных устройств и виды электромонтажа	131

Глава VI. Измерение электрических параметров полупроводниковых приборов

§ 38. Назначение и способы измерений	134
§ 39. Измерение выпрямительных диодов	137
§ 40. Измерение высокочастотных и сверхвысокочастотных диодов	145
§ 41. Измерение импульсных диодов	151
§ 42. Измерение опорных диодов	153
§ 43. Измерение тиристоров	156
§ 44. Измерение биполярных транзисторов	165
§ 45. Измерение полевых транзисторов	175
§ 46. Измерение варикапов и туннельных диодов	179
§ 47. Измерение фотоэлектронных приборов	181
§ 48. Измерение светодиодов	182
§ 49. Измерение лазерных диодов	183
§ 50. Измерение оптронов	186
§ 51. Автоматизация измерений	192

Глава VII. Испытания полупроводниковых приборов

§ 52. Воздействие окружающей среды на полупроводниковые приборы	198
§ 53. Классификация испытаний	199
§ 54. Испытания на соответствие требованиям к конструкции	202

§ 55. Испытания на соответствие требованиям по устойчивости к климатическим воздействиям	204
§ 56. Испытания на соответствие требованиям по устойчивости к механическим воздействиям	208
§ 57. Испытания на соответствие требованиям к электрическим параметрам	211
§ 58. Испытания на надежность и гарантийную наработку	217
Литература	219

ГРИГОРИЙ ИСААКОВИЧ ГРИН

Измерение параметров и испытание
полупроводниковых приборов (2-е издание)

Редактор М. В. Золоева

Художник А. И. Шаваря

Художественный редактор Т. В. Панина

Технический редактор Г. Г. Киселева

Корректор Г. И. Кострикова

Т-03552. Сдано в набор 11/Х—73 г. Подп. к печати 26/II—74 г.
Формат 84×108¹/₃₂. Бум. тип. № 2. Объем 7 печ. л. Усл. п. л. 11,76. Уч.-пзд. л. 11,39
Изд. № ЭГ—212 Тираж 18 000 экз. Цена 39 коп.
План выпуска литературы издательства «Высшая школа» (профтехобразование)
на 1974 г. Позиция 65

Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,
Издательство «Высшая школа»

Московская типография № 8 «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли,
Хохловский пер., 7. Зак. 3674.

30123

94

24206