СРЕДНЕЕ
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ

В.А. Фролов

федеральный государственный образовательный стандарт



# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

## ЧАСТЬ 1

Учебник

В.А. Фролов

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

В двух частях

## Часть 1

## Электронные приборы и устройства

*Рекомендовано*
*Московским государственным технологическим*
*университетом «СТАНКИН»*
*в качестве учебника для студентов, обучающихся*
*по специальности «Автоматика и телемеханика*
*на транспорте (на железнодорожном транспорте)» СПО.*
*Регистрационный номер рецензии 432*
*от 20 октября 2014 г. базового учреждения*
*ФГАУ «Федеральный институт развития образования»*

Москва
2015

УДК 621.3
ББК 31.2
Ф91

Рецензент: преподаватель Орловского филиала МИИТа *А.С. Одиноков*

**Фролов В.А.**

Ф91 Электронная техника: учебник: в 2 ч. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015.

ISBN 978-5-89035-834-9

Ч. 1: Электронные приборы и устройства. — 532 с.

ISBN 978-5-89035-835-6

Рассмотрены физические принципы действия, основные параметры и схемы включения полупроводниковых, электровакуумных, оптоэлектронных приборов и приборов отображения информации. Подробно описаны диоды, тиристоры, биполярные транзисторы и полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом и с изолированным затвором, нелинейные полупроводниковые, электровакуумные и ионные приборы, оптроны, фоторезисторы, фото- и светоизлучающие приборы, фототранзисторы и фотоумножители, жидкокристаллические приборы.

Предназначен для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта, обучающихся по специальности «Автоматика и телемеханика на транспорте», а также может служить пособием для инженерно-технического персонала различных отраслей промышленности.

УДК 621.3
ББК 31.2

ISBN 978-5-89035-835-6 (ч.1)
ISBN 978-5-89035-834-9

© Фролов В.А., 2015
© ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», оформление, 2015

## Введение

Современный мир в XXI в. невозможно представить без электронной техники. Достижения электроники влияют не только на экономическое развитие общества, но и на решение социальных задач (распределение рабочей силы, образование). Электронные устройства применяются во всех сферах деятельности человека, но особенно возрастает потребность в их применении в устройствах автоматизации производственных процессов. Электроника определяет технико-экономический потенциал страны и темпы научно-технического прогресса, так как современные электронные приборы и системы имеют существенные преимущества по сравнению с другими аналогичными устройствами и приборами.

Зарождение электроники в конце XIX в. было результатом общего прогресса науки и техники: изучения основ электродинамики (1856—73 гг.), исследования свойств термоэлектронной эмиссии (1882—1901 гг.), фотоэлектронной эмиссии (1887—1905 гг.), рентгеновских лучей (1895—97 гг.), открытия электрона (Дж. Дж. Томсон, 1897 г.), создания электронной теории (1892—1909 гг.).

Основными вехами в развитии электроники можно считать: изобретение радио А.С. Поповым (7 мая 1895 г.) и начало его использования; изобретение Ли де Форестом (1906 г.) трехэлектродной лампы (триода) — первого усилительного элемента; изобретение кристадина О.В. Лосевым (1922 г.) и использование проводникового элемента для усиления и генерации электрических сигналов; развитие твердотельной электроники; использование проводниковых и полупроводниковых элементов (работы Иоффе, Шоттки); самое революционное открытие XX в. — изобретение в 1947 г. транзистора Уильямом Шокли, Джоном Бардиным и Уолтером Браттейном; создание интегральной микросхемы и последующее развитие микроэлектроники — основной области современной электроники.

История электронных приборов начинается с обыкновенной лампы накаливания (открытие русского ученого А.Н. Лодыгина в

1872 г.), на основе которой американский изобретатель Т.А. Эдисон обнаружил прохождение тока в вакууме. Русский физик А.Г. Столетов в 1888 г. установил основные законы фотоэффекта и создал вакуумные фотоэлементы (экспериментальный образец).

Промышленное развитие электроники началось с изобретения лампового диода (Дж. А. Флеминг, 1904 г.), с использования триода для генерирования электрических колебаний (немецкий инженер А. Мейснер, 1913 г.), с разработки мощных генераторных ламп с водяным охлаждением (М.А. Бонч-Бруевич, 1919—1925 гг.), с создания промышленных образцов вакуумных фотоэлементов (немецкие ученые Ю. Эльстер и Г. Хейтель, 1910 г.) и фотоэлектронных умножителей (П.В. Тимофеев, 1928 г. и Л.А. Кубецкий, 1930 г.), благодаря которым было создано звуковое кино и которые послужили основой для разработки передающих телевизионных трубок.

Электронная техника стала основой радиоэлектроники, автоматики, электронных вычислительных машин, космической, медицинской и промышленной электроники, лазерной техники, оптоэлектроники и многих других направлений. Расширение сфер использования электроники — одно из основных направлений научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте.

С прогрессом в электронике теснейшим образом связано развитие рельсовых и безрельсовых транспортных средств. Современные устройства электронной техники способствуют созданию энергоэкономичных систем железнодорожной автоматики и телемеханики при обеспечении заданной пропускной и провозной способности на участках магистральных железных дорог, а также на метрополитене и городском электротранспорте.

Электронная техника железнодорожного транспорта должна обладать высокой надежностью аппаратуры и ее элементной базы; стабильностью работы при высоких и низких температурах; защищенностью от помех; устойчивостью работы при вибрациях и механических воздействиях; защищенностью от статического электричества и грозовых разрядов; технологичностью в профилактическом и ремонтном обслуживании.

Большой вклад в современную информационную технику внесли лауреаты Нобелевской премии по физике за 2000 г., присуждаемой Королевской Академией наук Швеции, — Жорес Иванович Алферов — директор Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе

РАН (Россия) и Герберт Кремер — профессор Калифорнийского института (США) за развитие полупроводниковых гетероструктур для высокоскоростной оптоэлектроники.

Создание микросхемы привело к бурному развитию микроэлектроники, которая сегодня составляет основу всей современной техники — от ручных часов до мировых систем связи. В качестве примера можно назвать мощные компьютеры и процессоры. Они собирают и обрабатывают информацию, контролируют работу множества механизмов от стиральной машины и автомобиля до космических спутников и медицинского оборудования — компьютерного томографа и диагностических приборов на основе ядерного магнитного резонанса.

# Раздел 1
# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

## Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

### 1.1. Полупроводниковые материалы

Основой современной электроники служат полупроводниковые приборы, отчего ее часто называют — полупроводниковой электроникой. Поэтому особое внимание обращают на структуру и параметры полупроводников.

*Полупроводниками* называются вещества, имеющие удельное сопротивление $\rho$ в пределах $10^4$—$10^{-10}$ См/см. Такое различие в удельной электрической проводимости (электропроводности) веществ обусловлено различием в энергетических спектрах этих материалов, т.е. различием в разрешенных значениях уровней энергии электронов в атомах, которые составляют структуру данного вещества.

Электропроводность полупроводников сильно зависит от окружающей температуры. При очень низкой температуре, близкой к абсолютному нулю (–273 °С), они ведут себя как изоляторы. С повышением температуры тепловое движение разрывает связи электронов, и часть их становится свободными носителями тока.

Связь электронов может быть разорвана не только тепловым движением, но и различными внешними воздействиями — светом, потоком быстрых частиц, сильным электрическим полем и т.д. Поэтому полупроводники очень чувствительны к внешним воздействиям, а также к содержанию примесей и дефектов в кристаллах. Возможность в широких пределах управлять электропроводностью полупроводников путем изменения температуры, введения примесей и т.д. является основой их многочисленных и разнообразных применений.

К полупроводникам относятся наиболее типичные группы веществ, полупроводниковые свойства которых четко выражены уже при комнатной температуре (300 °К). К таким группам относятся:

1. Элементы IV группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева — германий и кремний (Ge, Si), которые как полупроводники пока наиболее полно изучены и широко применяются в полупроводниковой электронике.

2. Алмазоподобные полупроводники. Это соединения элементов III группы Периодической системы (Al, Ga, In) с элементами V группы (As, P, Sb). Они называются полупроводниками типа $A^{III} B^{V}$. Соединения элементов II и VI групп Периодической системы называются полупроводниками типа $A^{II} B^{VI}$.

3. Элементы V и VI групп (As, Sb, O, S, Se) и их аналоги.

4. Соединения элементов VI группы с переходными или редкоземельными металлами.

5. Органические полупроводники (кристаллы и полимеры).

Наиболее часто используются кремний, германий, теллур, селен, сурьма, арсенид галлия, оксиды, сульфиды, нитриды, карбиды.

### *1.1.1. Основные положения теории электропроводности*

Атомы всех веществ состоят из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, движущихся в электрическом поле ядра.

Электроны в атоме не имеют траектории движения. Быстро движущийся электрон может находиться в любой части пространства, окружающего ядро, и различные положения его рассматриваются как *электронное облако* с определенной плотностью отрицательного заряда.

Пространство вокруг ядра, в котором наиболее вероятно нахождение электрона, называется *орбиталью (орбитой)*. Орбиты атома имеют разные размеры.

Электроны, движущиеся на орбитах меньшего размера, сильнее притягиваются ядром, чем электроны на орбитах большего размера.

Электроны в атоме перемещаются в пространстве вокруг ядра не по любым, а лишь по определенным — дискретным — орбитам, на которых они могут находиться неограниченно долго без излучения и поглощения энергии.

На каждой орбите электрон имеет определенное значение энергии, которое называется *разрешенным,* а энергетический уровень — *разрешенным* уровнем, который условно отражает энергетическое состояние электрона в атоме. Ближе к ядру находятся электроны, обладающие меньшей энергией. Чем выше энергетический уровень электрона, тем слабее связь его с атомом. По мере увеличения энергии разрешенные уровни (орбиты) располагаются все ближе друг к другу.

В нормальном состоянии (при отсутствии внешних воздействий) электроны в атоме заполняют низшие разрешенные уровни. Если атому сообщить извне дополнительную энергию, то за счет этой энергии электрон может преодолеть силу притяжения ядра и перейти на более высокий свободный энергоуровень (наступает возбуждение атома) или вовсе покинуть атом (происходит ионизация атома). При переходе электрона с одного разрешенного уровня на более отдаленный происходит поглощение энергии, а при обратном переходе — ее выделение. Поглощение и выделение энергии могут происходить только строго определенными порциями — *квантами.*

Энергетическое состояние электрона в атоме характеризуют четыре квантовых числа.

1. Главное квантовое число $n$ определяет уровень энергии, которому соответствует данная орбита, а также удаленность орбиты от ядра, и характеризует энергию электрона, занимающего данный энергетический уровень.

2. Орбитальное (азимутальное) квантовое число $l$ характеризует момент количества движения электрона относительно центра орбиты. Оно определяет форму орбиты — атомную орбиталь.

3. Магнитное число $m$ определяет положение плоскости орбиты электрона в пространстве.

4. Спиновое квантовое число $s$ определяет магнитные явления, связанные с вращением электрона вокруг собственной оси.

Согласно утверждению (постулату) Паули каждый электрон в энергетически замкнутой системе имеет свое особое энергетическое состояние движения. Следовательно, в атоме не может быть двух электронов, все четыре квантовых числа которых были бы одинаковы. Каждая орбита определяется тремя квантовыми числами, поэтому на ней могут находиться максимум два электрона, различающиеся спиновым квантовым числом.

Совокупность близко расположенных орбит, имеющих приближенно одинаковое значение уровня энергии ($n$), образуют энергетический уровень — электронный слой или электронную оболочку и обозначаются буквами $K$, $L$, $M$, $N$, $O$, $P$, $Q$ и нумеруются цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, указывающими уровень энергии.

Наибольшее число электронов на энергетическом уровне равно удвоенному квадрату номера энергетического уровня, т.е.

$$N = 2n^2,$$

где $N$ — число электронов; $n$ — номер энергетического уровня (считая от ядра) или главное квантовое число.

Начиная со значения главного квантового числа $n = 2$, энергетические уровни (оболочки) атомов подразделяются на подуровни (подоболочки), отличающиеся друг от друга энергией связи с ядром. Число подуровней равно значению главного квантового числа $n$. Подуровни, в свою очередь, составлены из орбиталей (орбит).

В подоболочках орбиты электронов имеют одинаковое значение орбитального (азимутального) квантового числа ($l = 0, 1, 2, ..., n - 1$), т.е. одинаковую форму орбиты. Подуровни (подоболочки) обозначаются буквами *s, p, d, f, g*, имеют значения $l = 1, 2, ..., n - 1$ и содержат соответственно 2, 6, 10, 14, 18 электронов, расположенных на соответствующем числе орбит (1, 3, 5, 7, 9).

Важным показателем в строении атома служит форма различных орбиталей (облаков). В настоящее время известны четыре формы электронных орбиталей:

*s*-орбиталь обладает сферической симметрией, т.е. имеет форму шара (рис. 1.1) на каждом энергетическом уровне;

*p*-орбиталь имеет эллиптическую форму гантели (гантелеобразная форма) или объемной восьмерки (рис. 1.2). Каждый энергетический уровень, начиная с $n = 2$, имеет три *p*-орбитали, расположенные в атоме взаимно перпендикулярно. Орбиты направлены вдоль осей пространственных коор-

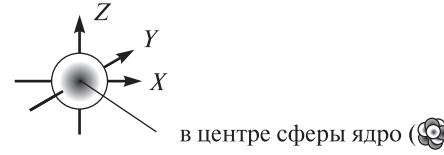



Рис. 1.1. Форма и пространственная ориентация электронных орбиталей в 1*s*-подоболочке; *s*-орбиталь (орбита) не имеет направленности (ориентации в пространстве, так как имеет форму шара

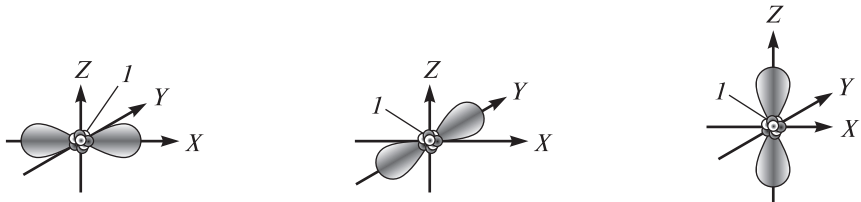



Рис. 1.2. Форма и пространственная ориентация электронных орбиталей в 2*p*-подоболочке; *p*-орбиталь (орбита) имеет направленность в пространстве (по пространственной системе координат), так как имеет форму объемной восьмерки (т.е. восьмерки, которую вращают вокруг оси); ядро находится в точке пересечения осей координат *1*

динат, проведенных через ядро, поэтому их обозначают как $p_x$-, $p_y$-, $p_z$- орбитали;

*d*-орбиталь имеет эллиптическую форму четырехлепестковой объемной фигуры (двойной гантелеобразной формы (рис. 1.3). Каждый электронный слой, начиная с $n = 3$, имеет пять *d*-орбиталей, смещенных в пространстве;

*f*-орбиталь имеет эллиптическую форму шестилепестковой объемной фигуры (тройной гантелеобразной формы). Каждый электронный слой, начиная с $n = 4$, имеет семь *f*-орбиталей, смещенных в пространстве.

В подуровнях (подоболочках) орбиты электронов имеют разное значение магнитного числа ($m$) — по-разному ориентированы в пространстве (наклон орбиты). Прочность связи электрона с ядром уменьшается с увеличением $n$, а при заданном $n$ — с увеличением $l$, и принимает значения $m = 0, \pm1, \pm2, ..., \pm l$.

Спиновое квантовое число принимает два значения $+^1/_2$, либо $-^1/_2$ и электроны, находящиеся на одной орбите, имеют разные спиновые моменты.

Структура электронных оболочек изолированных сложных атомов, содержащих 2 и более электронов, может иметь нормальную конфигурацию, когда электронные оболочки целиком заполнены, и возбужденную конфигурацию, когда электронные оболочки заполнены частично. Для упрощения рисунка структуры электронных оболочек изолированного атома все орбиты, подоболочки и оболочки изображены в виде правильных окружностей (рис. 1.4).

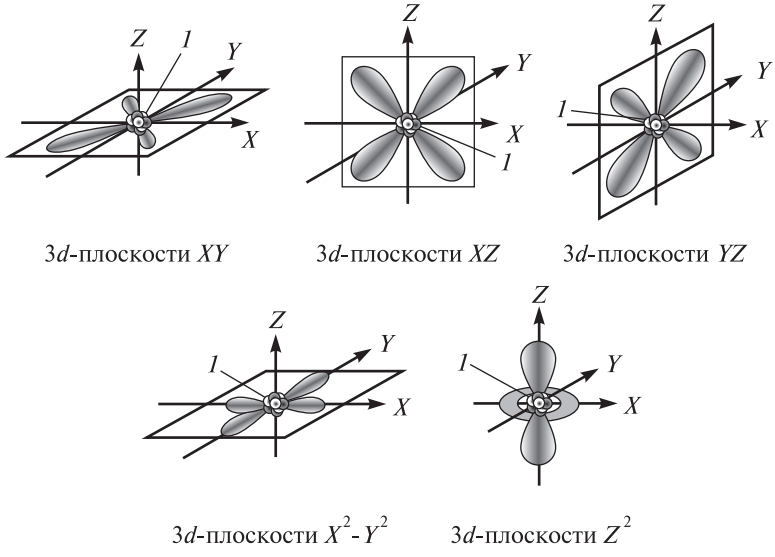



Рис. 1.3. Форма и пространственная ориентация электронных орбиталей в 3*d*-подоболочке; *d*-орбиталь (орбита) имеет направленность в пространстве (по пространственной системе координат), так как имеет форму двух взаимно перпендикулярных объемных восьмерок; ядро находится в точке пересечения осей координат *1*

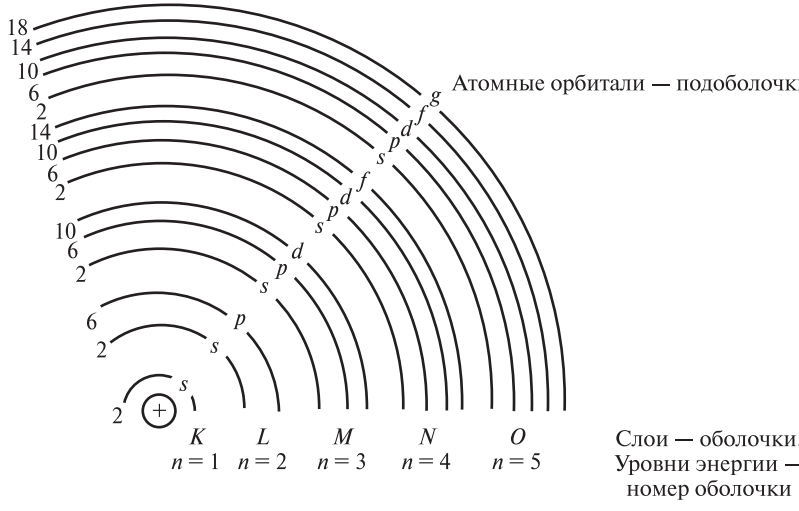



Рис. 1.4. Идеальная структура электронных оболочек изолированного атома

При таком упрощении нельзя забывать, что на каждом подуровне и подоболочке орбита электрона имеет свою атомную орбиталь — форму и наклон орбиты в пространстве.

Если рассматривать структуру атомов различных элементов, то можно выделить оболочки, которые полностью заполнены электронами (внутренние), и незаполненные оболочки (внешние).

В первую очередь заполняются оболочки с наименьшим значением главного квантового числа $n$ — им соответствует меньшая энергия электронов, а состояние с минимальной энергией наиболее устойчиво. Однако возможны перекрытия электронных оболочек по энергетической шкале, когда начинается заполнение оболочки с наибольшим номером при незаполненной оболочке с меньшим номером. Это заметно, начиная с четвертой оболочки.

Уровень энергии на подоболочках определяется по формуле $n + l$.

Например, на подоболочке $3p$ уровень энергии равен $n + l = 3 + 1 = 4$;

на подоболочке $3d$ — $n + l = 3 + 2 = 5$;

на подоболочке $4s$ — $n + l = 4 + 0 = 4$;

на подоболочке $4p$ — $n + l = 4 + 1 = 5$;

на подоболочке $4d$ — $n + l = 4 + 2 = 6$;

на подоболочке $5s$ — $n + l = 5 + 0 = 5$.

Отсюда видно, что четвертая электронная оболочка перекрывает третью ($4s < 3d$), а пятая четвертую ($5s < 4d$) и т.д., что свидетельствует о сложности заполнения оболочек и подоболочек атомов. Понятие о перекрытии относится только к уровню энергии.

Электроны, расположенные на внутренних оболочках, сильнее связаны с ядром атома и их взаимодействия с электронами других атомов несущественны. Следовательно, электроны заполненных зон не влияют на электрическую проводимость материала.

Электроны, расположенные на внешней недостроенной оболочке, легко вступают во взаимодействие с другими атомами, так как в оболочке с наибольшим значением главного квантового числа $n$ заполнены только $s$- и $p$-подоболочки с орбитальным значением $l = 0$ или $l = 1$.

Электроны незаполненных оболочек могут переходить на другие незаполненные подоболочки, приобретая дополнительную энергию, и вступать во взаимосвязь с другими атомами, дополняя

незаполненные уровни. Такие уровни и электроны называются *валентными*.

Выше валентной зоны находится зона проводимости; в нее может перейти валентный электрон, если он получит извне некоторую дополнительную энергию и, разорвав межатомные связи, станет свободным.

Валентная зона и зона проводимости могут разделяться энергетическим промежутком — *запрещенной* зоной. Запрещенная зона не имеет энергетических уровней, на которых могли бы находиться электроны. Ширина запрещенной зоны определяет наименьшее значение энергии, которое должен приобрести электрон, чтобы стать свободным.

Упрощенную зонную энергетическую модель атома можно представить в виде схемы, где показано разделение энергетических уровней разрешенной зоны на подуровни (рис. 1.5). Заполненная и ва-

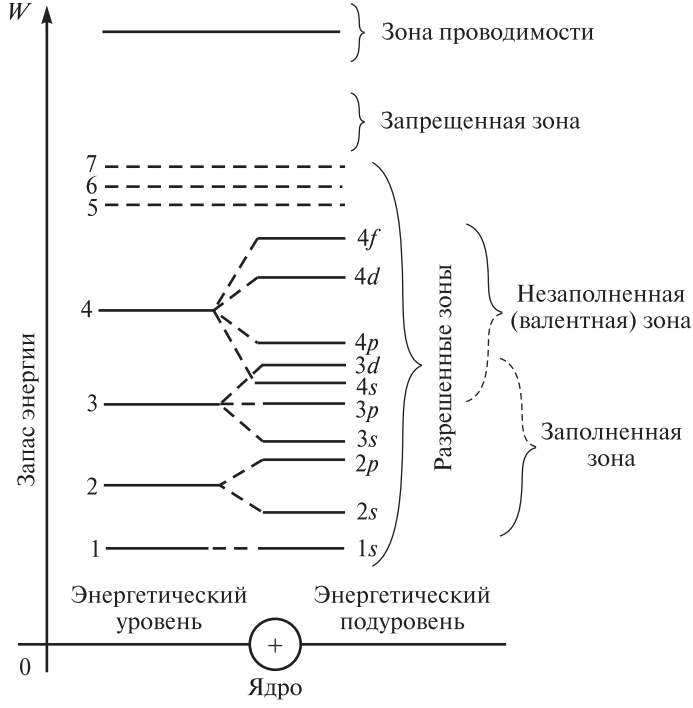



Рис. 1.5. Зонная энергетическая модель атома

лентная зона у каждого атома различаются по ширине. Ширина запрещенной зоны зависит от структуры строения отдельно взятого атома, у которого имеется определенное количество электронов на оболочках, и запаса потенциальной и кинетической энергии электронов.

Потенциальная энергия определяется только расстоянием электрона до ядра и сильно убывает с уменьшением этого расстояния.

Кинетическая энергия определяется внутренним электрическим полем атома, которое создается ядром, вращающимся вокруг собственной оси, и служит источником сильного магнитного поля. Вращающиеся электроны атома также создают собственное электрическое поле — источник орбитального магнитного поля. Электрон, как частица определенных размеров, вращается вокруг собственной оси, создавая магнитное поле спина электрона. Поля различных электронов также взаимодействуют между собой и с электромагнитным полем ядра.

Все эти сложные взаимодействия и определяют состояние каждого электрона в оболочках атомов.

Таким образом, вращательное движение ядра и электронов вокруг собственной оси приводит к возникновению взаимодействующих между собой магнитных полей в структуре атома. Результирующее магнитное поле вызывает вращательное движение электрона вокруг ядра с определенным запасом кинетической энергии.

### *1.1.2. Энергетическая структура твердого тела*

В атомах твердых тел распределение электронов по уровням энергии также подчиняется законам квантовой механики.

При сближении атомов образуется пространственная структура с различными типами связей между отдельными атомами. Для полупроводников наиболее распространенными являются *ковалентные связи,* образующиеся за счет обобществления валентных электронов соседних атомов. Ковалентную связь реализуют два валентных электрона, которые принадлежат двум соседним атомам и вращаются по орбите, общей для этих атомов. В результате такой взаимосвязи у соседних атомов появляются общие орбиты, на которых, в соответствии с постулатами Паули, находятся не более двух электронов, одинаково принадлежащих двум атомам.

При сближении атомов и образовании кристаллической решетки твердых тел происходит смещение энергетических уровней электронов взаимодействующих однородных атомов. Вся совокупность атомов в кристалле представляет собой единую энергетическую структуру. Электроны в кристалле приобретают различные энергии. Любой разрешенный уровень в атоме расщепляется на дополнительные подуровни, расположенные очень близко друг от друга. Возникает непрерывная разрешенная энергетическая зона. Энергетические уровни в разрешенной зоне распределяются неравномерно. По мере углубления в зону плотность уровней возрастает.

Электроны внутренних уровней сильнее связаны с ядром атома и взаимодействие их с электронами других атомов очень мало. Поэтому их энергетические уровни расщепляются незначительно.

Расщепление внешних энергетических уровней валентных электронов образует весьма широкую валентную зону. В результате расширения валентной зоны несколько уменьшается ширина запрещенной зоны, отделяющей валентную зону от зоны проводимости.

Энергетическая структура твердого тела, так же как и отдельного атома, имеет объемный характер, но отличается тем, что энергетические уровни нельзя выделить в отдельный объем, так как разрешенные энергетические зоны равномерно распределены вокруг атомов в кристалле, а запрещенная зона и зона проводимости располагаются в межатомном пространстве.

Упрощенная зонная энергетическая диаграмма кристалла твердого тела (кремния) показана на рис. 1.6, где энергетические уровни показаны в виде прямых линий.

Разделение веществ на металлы, полупроводники и диэлектрики выполняют исходя из зонной структуры тела при температуре абсолютного нуля $T = 0$ K.

В атомах металлов валентная зона и зона проводимости взаимно перекрываются, т.е. переход валентных электронов в зону проводимости требует малых затрат энергии, поэтому металлы обладают электропроводностью.

В полупроводниках и диэлектриках при $T = 0$ K зона проводимости пуста и электропроводность отсутствует. Различия между ними чисто количественные — в ширине запрещенной зоны. Диэлектриками считаются вещества с шириной запрещенной зоны, большей 3 эВ. Полупроводники занимают промежуточное положе-

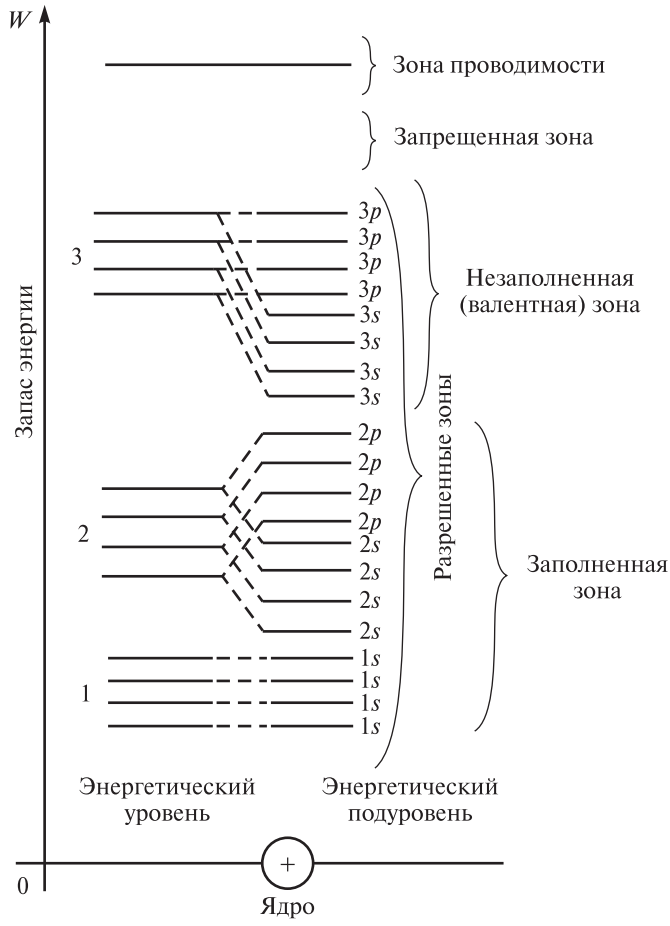



Рис. 1.6. Зонная энергетическая диаграмма кристалла кремния из четырех атомов

ние между проводниками и диэлектриками по ширине запрещенной зоны, характеризуются шириной запрещенной зоны от $10^{-15}$ до 3 эВ. С повышением температуры энергия запрещенной зоны немного снижается.

В полупроводниках при некотором значении температуры, отличной от нуля, часть электронов будет иметь энергию, достаточную для перехода в зону проводимости. Эти электроны становятся свободными, а полупроводник — *электропроводным*.

### *1.1.3. Собственные полупроводники*

*Собственным полупроводником* (*i*-типа) называют идеально чистый полупроводниковый материал с правильной и однородной кристаллической структурой (состоит из атомов одного химического элемента). Наиболее широко применяемыми полупроводниками являются химические элементы германий и кремний, имеющие по четыре электрона на валентных оболочках атомов, которые ковалентными связями связаны с электронами соседних атомов. Каждый атом расположен на одинаковом расстоянии от четырех соседних атомов. Такое соединение атомов образует монокристаллическую тетраэдрическую решетку, в которой каждый атом, находящийся в центре правильного *тетраэдра* (рис. 1.7), окружен четырьмя атомами того же вещества, расположенными в вершинах тетраэдра.

Атомы в кристаллической решетке связаны между собой силами ковалентных связей. Ковалентные связи реализуют два валентных электрона, которые принадлежат двум соседним атомам и вращаются по одной орбите, общей для этих атомов. Плоскостная модель такой кристаллической решетки представлена на рис. 1.8. В этой

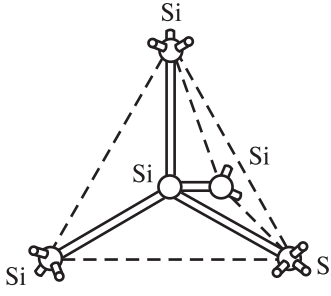



Рис. 1.7. Элемент структуры кристаллической решетки кремния в форме тетраэдра

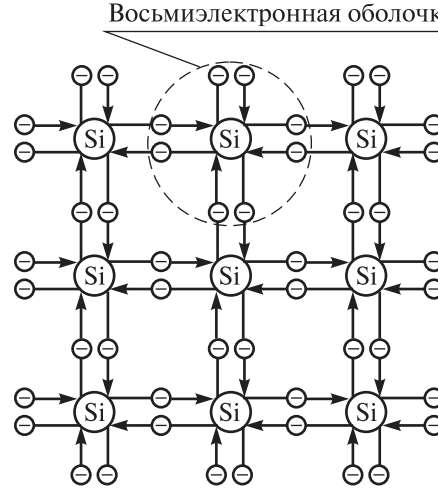



Рис. 1.8. Плоскостная модель кристаллической решетки собственного полупроводника при $T = 0$ К

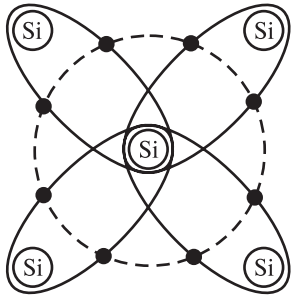



Рис. 1.9. Схема образования 8-электронной оболочки вокруг атома со смежными атомами

модели сохранена основная особенность тетраэдрической решетки — одинаковые расстояния между четырьмя смежными атомами. Ядро атомов изображено на рис. 1.8 в виде окружности, а ковалентные связи двух атомов условно обозначены двумя параллельными прямыми между ними. Каждый атом, оставаясь электронейтральным, обладает устойчивой восьмиэлектронной оболочкой (рис. 1.9), в которой заняты все энергоуровни. Такую идеально правильную кристаллическую решетку имеют химически чистые (беспримесные) собственные полупроводники. В такой кристаллической решетке силы притяжения электронов к ядру смежных атомов уравновешиваются силами их отталкивания, и равновесная система связей частиц остается устойчивой.

При температуре, близкой к абсолютному нулю (−273 °С), и при отсутствии других внешних факторов все валентные электроны заняты в ковалентных связях и свободных электронов нет. Электрическая проводимость такого полупроводника равна нулю. При действии внешних факторов возрастают колебания в узлах кристаллической решетки и связанных с ними электронов. Некоторые валентные электроны атомов приобретают энергию, достаточную для освобождения от ковалентных связей. В результате ухода электрона в одном из атомов появляется незаполненный энергетический уровень — *дырка*. Плоскостная модель такой кристаллической решетки представлена на рис. 1.10.

Атом с разорванной ковалентной связью (с дыркой) может быть представлен как положительный заряд $p_i$-типа, равный по величине заряду электрона.

Дырка, обладая положительным зарядом, может присоединить к себе электрон соседней ковалентной связи, в результате чего восстанавливается одна связь и разрушается соседняя. При переходе электронов из одной связи в другую требуется меньше энергии, чем для перехода в зону проводимости, на величину энергии запрещенной зоны. Такое перемещение электронов в одном направлении соответствует движению дырок в противоположном направлении.

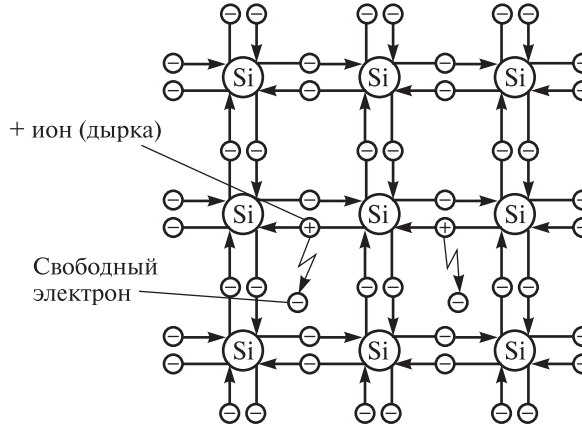



Рис. 1.10. Плоскостная модель кристаллической решетки собственного полупроводника при $T > 0$ К

Однако движение дырок нельзя отождествлять с движением положительно заряженных ионов газов и жидкостей, так как ионы (дырки) полупроводников, расположенные в узлах кристаллической решетки, свободны частично. Разрыв одной ковалентной связи в атоме не ведет к полному освобождению атома в кристаллической решетке, так как остальные связи существуют. Одновременный разрыв всех ковалентных связей требует большой затраты энергии, что ведет к разрушению химической структуры полупроводника. При малом энергетическом воздействии ковалентные связи разрушаются не все и за счет соседних свободных электронов восстанавливаются. Поэтому движение дырок можно рассматривать как *фиктивное*, т.е. как след, оставленный электроном при разрыве ковалентной связи.

Свободные электроны и дырки в собственном полупроводнике образуются парами, т.е. в равном количестве. Процесс образования пары электрон—дырка называется *генерацией*. Генерация может возникнуть под воздействием тепловой энергии (тепловая генерация), электрического поля (полевая генерация), кинетической энергии движущихся частиц (ударная генерация), светового излучения (световая генерация), радиации (радиоактивная генерация) и т.д.

Одновременно с процессом генерации некоторые свободные электроны теряют приобретенную энергию и, перемещаясь в крис-

таллической структуре, встречают разорванные ковалентные связи и заполняют их. Этот процесс называется *рекомбинацией*.

Промежуток времени, прошедший с момента генерации электрона до рекомбинации, называется *временем жизни,* а расстояние, пройденное электроном за время жизни, *диффузионной длиной пробега*.

Отдельные свободные электроны не вступают в ковалентную связь и остаются свободными ($n_i$-типа), совершая хаотическое движение в зоне проводимости атомов вещества.

Под действием внешнего электрического поля электроны и дырки приобретают направленное движение, определяемое силами электрического поля. Фиктивное направление движения дырок совпадает с направлением вектора электрического поля, а реальное движение электронов противоположно направлению вектора электрического поля.

Направленное движение носителей зарядов в кристалле полупроводника может возникнуть из-за разности концентрации носителей зарядов в различных его объемах. Эта разность возникает в результате неодинакового внешнего энергетического воздействия на отдельные объемы кристалла. Из-за этого в одной области кристалла процесс генерации больше, чем в другой, и в ней больше электронов, которые стремятся равномерно распределиться по всему объему. Перемещение свободных электронов из области их большей концентрации в область с наименьшей концентрацией называется *диффузией*.

Встречное движение одинакового числа электронов и дырок в химически чистом кристалле полупроводника называется собственной электронно-дырочной проводимостью полупроводника, которая очень мала. Механизм собственной электронно-дырочной электропроводности показан на рис. 1.11, где атом с «дыркой» заштрихован, а нейтральный атом не заштрихован. Видно, что процесс перемещения дырки из одной парноэлектронной связи к другой равноценен перемещению частицы, имеющей положительный заряд. При отсутствии внешнего электрического поля электроны и дырки в кристалле движутся беспорядочно. Под действием электрического поля напряженностью $E$, приложенного к кристаллу, движение электронов и дырок становится упорядоченным и в кристалле возникает электрический ток. Предположим, что в момент действия электричес-

кого поля образовалась дырка в атоме *3* (позиция *1*), который, став положительно заряженным, притянул к себе электрон атома *2* (позиция *2*). Таким образом, дырка в атоме *3* заполнилась и образовалась в атоме *2*. Так, последовательно переходя из одного атома в другой, дырка, появившаяся в крайнем правом атоме *3*, через некоторое время образуется в крайнем левом атоме *1* (позиция *3*), затем процесс повторится. Таким образом, проводимость собственного (чистого) полупроводника обусловлена встречным перемещением одинакового числа отрицательных и положительных носителей зарядов. Фиктивное перемещение дырок совпадает с направлением электрического поля, а движение электронов имеет встречное направление. В соответствии с этим различают электропроводности полупроводников двух видов — электронную и дырочную. Следует отметить, что дырочную электропроводность нельзя отождествлять с ионной электропроводностью, характерной для газовой и жидкой сред, в которых происходит перемещение в пространстве ионизированных атомов вещества. Так как атомы находятся в узлах кристаллической решетки и не перемещаются, то движение дырок представляет собой поочередную ионизацию неподвижных атомов. Следовательно, нельзя представлять дырку как непосредственное перемещение положительного заряда и понятие «дырка» является чисто условным. Термин «дырка» введен для упрощения рассмотрения сложных процессов движения электронов в кристаллической решетке.

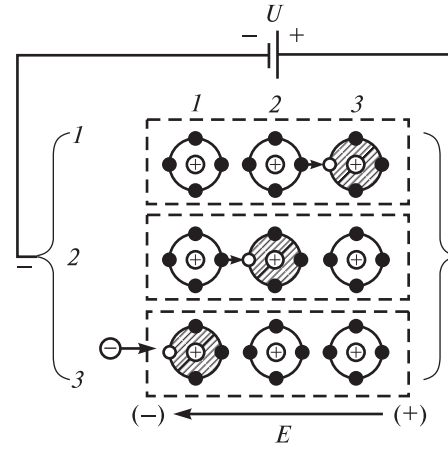



Рис. 1.11. Механизм собственной электронно-дырочной электропроводности полупроводника

С ростом температуры возрастают генерация пар носителей зарядов и переход электронов в зону проводимости и уменьшается рекомбинация, что повышает проводимость собственного полупроводника. На рис. 1.12 изображена энергетическая диаграмма, на которой условно показан переход электрона *1* из валентной зоны

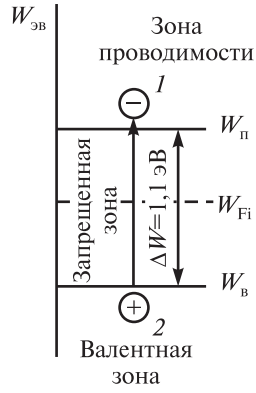



Рис. 1.12. Энергетическая диаграмма перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости

в зону проводимости, а в валентной зоне остается ионизированный атом — дырка *2*. Для преодоления запрещенной зоны необходима дополнительная энергия $\Delta W$, равная разности энергий нижнего энергетического уровня зоны проводимости свободных электронов и энергии верхнего уровня валентной зоны, т.е. $\Delta W = W_П + W_В$. Этот процесс ведет также к повышению концентрации носителей зарядов и уменьшению их подвижности — уменьшению проводимости полупроводника. С повышением внешнего электрического поля увеличивается вероятность рекомбинации и уменьшение свободных электронов проводимости. Поэтому можно сделать вывод о том, что электропроводность собственного полупроводника очень мала и практически неизменна при температуре $T < 0$ К.

### *1.1.4. Энергетическая диаграмма собственного полупроводника*

При температуре, близкой к абсолютному нулю, все энергетические уровни в валентной зоне полностью заполнены электронами, а в зоне проводимости — свободны (рис. 1.13, *а*).

С повышением температуры возрастает вероятность получения некоторыми электронами дополнительной энергии, большей, чем энергия запрещенной зоны, и перехода их в зону проводимости (рис. 1.13, *б*).

На зонной энергетической диаграмме дырка показана как вакантное место на энергетическом уровне в валентной зоне, откуда ушел электрон в зону проводимости. На рис. 1.13, *б*, условное заполнение электронами зон собственного полупроводника при температуре $T > 0$ К наглядно подтверждает равенство концентраций свободных электронов и дырок.

Распределение носителей зарядов по энергетическим зонам полупроводника и их концентрация зависят от многих факторов. Основными факторами являются температура и ширина запрещенной зоны. Температура влияет на величину энергии электрона, а ширина запрещенной зоны — на вероятность перехода электронов в зону

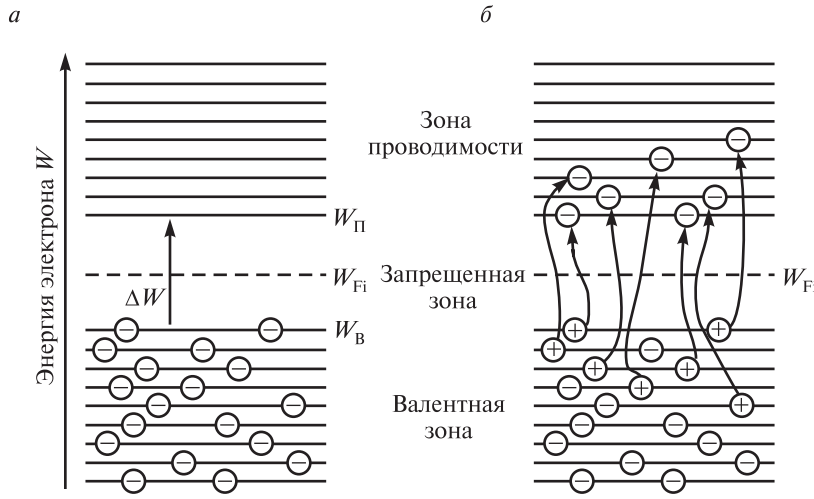



Рис. 1.13. Зонная модель валентной зоны и зоны проводимости собственного полупроводника и распределение электронов в них при температуре $T = 0$ K (*а*) и при $T \neq 0$ K (*б*)

проводимости. Основной характеристикой запрещенной зоны служит энергетический уровень Ферми ($W_{Fi}$), который в однородной структуре находится в середине запрещенной зоны (см. рис. 1.13). Энергия запрещенной зоны определяется по формуле

$$\Delta W = W_П - W_В,$$

где $W_П$ — энергия, соответствующая дну зоны проводимости; $W_В$ — энергия, соответствующая потолку валентной зоны.

Физический смысл уровня Ферми состоит в том, что при $T = 0$ K все разрешенные энергетические состояния (валентные уровни) до уровня Ферми заняты электронами, а выше уровня Ферми — свободны.

При увеличении температуры ($T > 0$ K) уровень Ферми не изменяет свое местоположение, т.е. остается в середине запрещенной зоны. Это объясняется тем, что ширина запрещенной зоны не изменяется, как не изменяется количество разрешенных уровней в валентной зоне.

### *1.1.5. Примесные полупроводники*

Электропроводность полупроводников можно повысить путем введения в них небольшого количества легирующих примесей элементов, имеющих валентность бóльшую или меньшую, чем валентность атомов собственного полупроводника. В зависимости от валентности введенной примеси можно получить в полупроводнике преобладание электронов или дырок, т.е. получить полупроводник с электронной или дырочной электропроводностью. В качестве примесей для германия и кремния используют пятивалентные элементы — фосфор, мышьяк, сурьму, или трехвалентные элементы — бор, индий, алюминий и другие элементы. Атомы примеси нарушают структуру собственного полупроводника, как и внешние энергетические воздействия, и служат источником дополнительных электронов или дырок. Различают электронные и дырочные примесные полупроводники.

Для создания полупроводников с электронной электропроводностью добавляют, например, к четырехвалентной структуре кристалла кремния пятивалентную примесь — фосфор. Примесь вводится равномерно по всему объему кристалла. Атом пятивалентной примеси фосфора замещает место одного из атомов собственного полупроводника и вступает в ковалентные связи с четырьмя атомами кремния, а пятый электрон атома фосфора оказывается не занятым в этих связях и избыточным (рис. 1.14). Как и все электроны, не охваченные ковалентной связью, он слабо связан с атомом и, получив небольшую дополнительную энергию при комнатной температуре $T > 0$ K (0,01 эВ), может его легко покинуть.

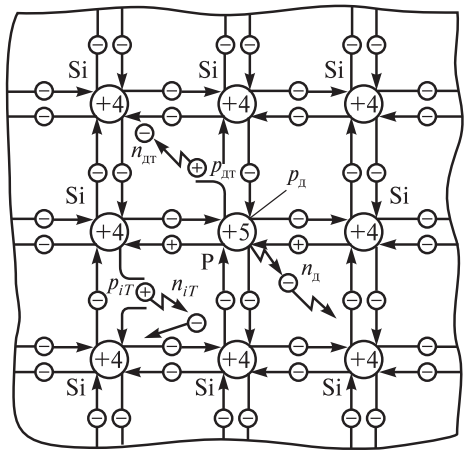



Рис. 1.14. Плоскостная модель кристаллической решетки электронного полупроводника при $T > 0$ K

Количество энергии, необходимое для перевода не

охваченного ковалентной связью электрона донорной примеси в зону проводимости называют *энергией активации* $\Delta W_{АК}$.

Появление свободного электрона не вызывает образование дырки, так как все ковалентные связи остаются заполненными. Уход электрона от атома примеси превращает атом в положительно заряженный ион. Этот ион неподвижен, так как прочно связан ковалентными связями в кристаллической решетке и не влияет на электропроводность. При увеличении содержания атомов примеси фосфора в кристалле кремния увеличивается содержание свободных электронов и неподвижных положительно заряженных ионов. Таким образом, при легировании собственного полупроводника донорами в нем возрастает концентрация свободных электронов без образования дырок. Примеси, увеличивающие в полупроводнике число свободных электронов, называются *донорами* (донор — поставщик).

В основном материале полупроводника с примесью, как и в чистом (собственном) полупроводнике, постоянно образуются дырки и электроны за счет теплового воздействия ($T > 0$ K), которые также участвуют в процессе электропроводности.

На рис. 1.15 представлена структура кристалла полупроводника *n*-типа, содержащая донорные примеси, при температуре $T > 0$ K, в которой находятся:

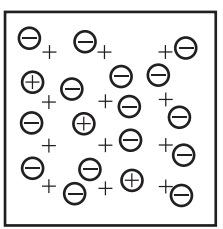
– хаотически подвижные, отрицательно заряженные электроны атомов донорной примеси, не вступившие в парную ковалентную связь ($n_д$), и электроны от тепловой генерации ($n_{дт}$);

– неподвижные, равномерно расположенные, положительно заряженные ионы атомов донорной примеси ($p_{дт}$);

– хаотически подвижные, отрицательно заряженные электроны атомов собственного полупроводника от тепловой генерации ($n_{iT}$);

– фиктивно подвижные, хаотически расположенные, положительно заряженные ионы-дырки атомов собственного ($p_{iT}$) и донорного полупроводников ($p_{дт}$) от тепловой генерации.

Таким образом, при легировании собственного полупроводника донорами возрастает число свободных электронов ($n_д$, $n_{дт}$, $n_{iT}$) по сравнению с числом дырок ($p_{дт}$, $p_{iT}$). Электроны, которых в данном полупроводнике больше, чем дырок, называются *основными* ($n_n = n_д + n_{дт} + n_{iT}$), а дырки, имеющие меньшую концентрацию



$n_д$ « ⊖ » хаотически подвижные, отрицательно заряженные электроны атомов донорной примеси;

$n_{дт}$ « ⊖ » хаотически подвижные, отрицательно заряженные электроны атомов донорной примеси при $T > 0$ K;

$n_{iT}$ « ⊖ » хаотически подвижные, отрицательно заряженные электроны атомов собственного полупроводника при $T > 0$ K;

$p_д$ « + » неподвижные, равномерно расположенные, положительно заряженные ионы атомов донорной примеси;

$p_{iT}$ « ⊕ » фиктивно подвижные, хаотически расположенные, положительно заряженные ионы-дырки атомов собственного полупроводника при $T > 0$ K;

$p_{дт}$ « ⊕ » фиктивно подвижные, хаотически расположенные, положительно заряженные ионы-дырки атомов донорной примеси при $T > 0$ K.

$$n_д = p_д,\ n_{iT} = p_{iT},\ n_{дт} = p_{дт},\ n_n = n_д + n_{iT} + n_{дт} >> p_{iT} + p_{дт} = p_n$$

Рис. 1.15. Виды зарядов и их расположение в кристалле полупроводника *n*-типа при $T > 0$ K

в данном полупроводнике, — *неосновными* ($p_n = p_{дт} + p_{iT}$) носителями зарядов. Полупроводник данного типа обладает электронной электропроводностью — примесной, и называется полупроводником *n*-типа, или электронным. Следовательно, в этих полупроводниках дырочный ток во много раз меньше электронного тока.

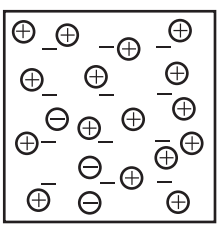
Рассмотрим вариант, когда в кристаллическую структуру собственного полупроводника кремния добавляют примесь трехвалентного атома бора. В кристаллической решетке собственного полупроводника атом бора образует только три ковалентные связи с атомами собственного полупроводника, четвертая связь с атомами собственного полупроводника остается незаполненной (рис. 1.16).

В незаполненную связь может легко перейти при небольшом тепловом возбуждении ($T > 0$ K) электрон от соседних заполненных связей атомов собственного полупроводника.

Для перехода валентных электронов атомов собственного полупроводника к атомам примеси не требуется много энергии, так как незаполненный уровень (валентный) атома бора имеет бóльшую энергию, чем уровень валентного электрона атома собственного полупроводника. Атом бора, получив дополнительный валентный электрон, становится отрицательно заряженным ионом. Этот ион неподвижен, так как прочно связан ковалентными связями в кристаллической решетке и не влияет на электропроводность. В разорванной ковалентной связи атомов собственного полупроводника нарушается электрическая нейтральность и возникает избыточный положительный заряд — дырка. В основном материале полупроводника с примесью, как и в чистом (собственном) полупроводнике, постоянно образуются дырки и электроны за счет теплового воздействия ($T > 0$ K), которые также участвуют в процессе электропроводности.

При соответствующей концентрации примеси дырок в кристалле становится во много раз больше, чем электронов, которые остаются свободными от ковалентных связей. Большая часть электронов вступает во взаимосвязь с атомами примеси.

Дырки, имеющие большую концентрацию в данном полупроводнике, называются *основными*, а электроны, имеющие меньшую концентрацию в данном полупроводнике, — неосновными. Полупроводники данного типа обладают дырочной электропроводностью и называются полупроводниками *p*-типа, или дырочными. Следо-



$n_A$ « – » неподвижные, равномерно расположенные отрицательно заряженные ионы атомов акцепторной примеси;

$p_i$ « ⊕ » фиктивно подвижные, равномерно расположенные положительно заряженные ионы — дырки атомов собственного полупроводника;

$n_{iT}$ « ⊖ » хаотически подвижные, отрицательно заряженные электроны атомов собственного полупроводника при $T > 0$ K;

$p_{iT}$ « ⊕ » фиктивно подвижные, хаотически расположенные положительно заряженные ионы — дырки атомов собственного полупроводника при $T > 0$ K;

$n_{AT}$ « ⊖ » хаотически подвижные, отрицательно заряженные электроны атомов акцепторной примеси при $T > 0$ K;

$p_{AT}$ « ⊕ » фиктивно подвижные, хаотически расположенные положительно заряженные ионы — дырки атомов акцепторной примеси при $T > 0$ K.

$$n_A = p_i,\ p_{iT} = n_{iT},\ n_{AT} = p_{AT},\ p_p = p_i + p_{iT} + p_{AT} >> n_{iT} + n_{AT} = n_p$$

Рис. 1.16. Виды зарядов и их расположение в кристалле полупроводника *p*-типа при $T > 0$K

вательно, в этих полупроводниках электронный ток во много раз меньше дырочного тока.

Примеси, увеличивающие в полупроводнике число дырок за счет захвата атомами примесей электронов у атомов собственного полупроводника, называются *акцепторными* (акцептировать — захватывать).

На рис. 1.17 представлена структура кристалла полупроводника *p*-типа, содержащая акцепторные примеси, при температуре $T > 0$ K, в которой находятся:

– неподвижные, равномерно расположенные, отрицательно заряженные ионы атомов акцепторной примеси, принявшие электрон от атомов собственного полупроводника ($n_{\text{A}}$);

– фиктивно подвижные, равномерно расположенные положительно заряженные ионы-дырки атомов собственного полупроводника, отдавшие электрон атомам акцепторной примеси ($p_i$);

– фиктивно подвижные, хаотически расположенные положительно заряженные ионы-дырки атомов собственного полупроводника ($p_{iT}$) и атомов акцепторной примеси ($p_{\text{A}T}$) при $T > 0$ K;

– хаотически подвижные, отрицательно заряженные электроны атомов собственного полупроводника ($n_{iT}$) и акцепторной примеси ($n_{\text{A}T}$) при $T > 0$ K;

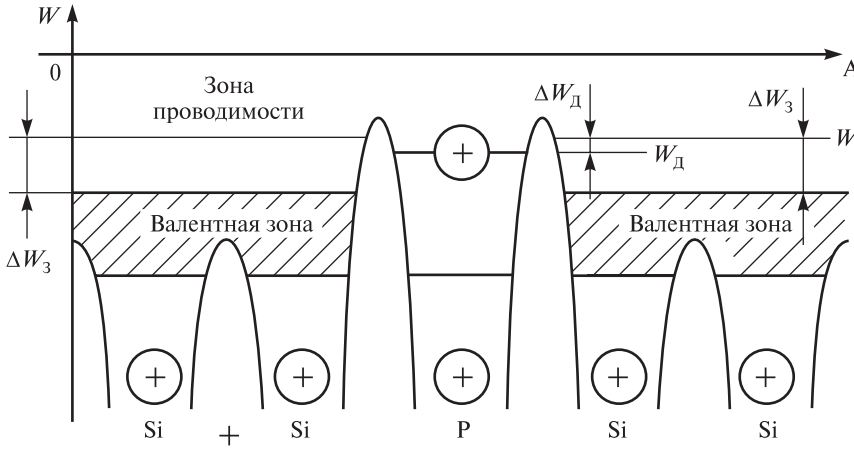



Рис. 1.17. Потенциальная диаграмма вблизи примесного атома *n*-полупроводника

Таким образом, при легировании собственного полупроводника акцепторами возрастает число фиктивно подвижных дырок ($p_i$, $p_{iT}$, $p_{AT}$) по сравнению с числом электронов ($n_{iT}$, $n_{AT}$). Дырки, которых в данном полупроводнике больше, чем электронов, называются основными ($p_p = p_i + p_{iT} + p_{AT}$), а электроны, имеющие меньшую концентрацию в данном полупроводнике, — неосновными ($n_p = n_{iT} + n_{AT}$) носителями зарядов. Полупроводник данного типа обладает дырочной электропроводностью — примесной, и называется полупроводником *p*-типа, или дырочным. Следовательно, в этих полупроводниках электронный ток во много раз меньше дырочного тока.

### *1.1.6. Энергетические диаграммы примесных полупроводников*

Атомы примесей обычно замещают в узлах кристаллической решетки атомы основного вещества, образуя дефекты замещения. Поскольку атом примеси имеет другое число электронов, чем атом основного вещества, и другой атомный радиус, периодическая потенциальная функция кристаллической структуры вблизи примесного атома искажается и его энергетический уровень располагается в запрещенной зоне (рис. 1.18 и 1.21).

Уровни доноров находятся около зоны проводимости (энергия ионизации их равна $\Delta W_Д = 0{,}01$ эВ), а уровни акцепторов — у валентной зоны (их энергия ионизации равна $\Delta W_{AK} = 0{,}01$ эВ).

На рис. 1.14 показана плоскостная модель кристаллической решетки *n*-полупроводника на основе кристалла кремния (Si) с атомом

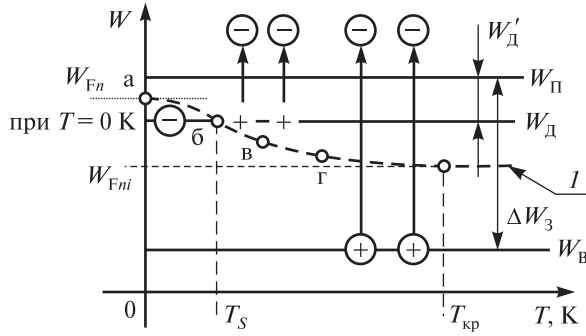



Рис. 1.18. Энергетическая диаграмма *n*-полупроводника

донорной примеси — фосфора (P), в которой межатомное расстояние основного кристалла кремния (Si) не изменилось при введении донорной примеси атома фосфора (P). Четыре валентных электрона донорной примеси фосфора образуют с валентными электронами соседних атомов кремния парноэлектронные ковалентные связи. Ковалентная связь — ионная, насыщенная, и пятый валентный электрон не участвует ни в одной связи, так как оказывается избыточным. Как и все электроны, не охваченные ковалентной связью, он слабо связан с атомом. Единственная связь этого электрона — кулоновская — с ядром атома фосфора. На свободный электрон воздействуют не только кулоновская сила ядра, но и периодическое поле кристаллической решетки кристалла кремния, заставляя его передвигаться к зоне проводимости. Поскольку суммарная энергия свободного электрона донора ($W_Д$) немного меньше энергии дна зоны проводимости ($W_П$), то он располагается ниже дна зоны проводимости при $T = 0$ K.

При небольшом внешнем, например тепловом, воздействии ($T > 0$ K) происходит частичная тепловая ионизация. В примесном *n*-полупроводнике для ионизации атомов донорной примеси требуется значительно меньшее количество энергии ионизации ($\Delta W'_Д$), чем для атомов собственного полупроводника ($\Delta W_З = W_П - W_В$ — энергия запрещенной зоны). Это объясняется тем, что свободные электроны атомов примеси находятся очень близко к дну зоны проводимости и необходимая энергия ионизации значительно меньше ($\Delta W'_Д = W_П - W_Д$) по сравнению с необходимой энергией ионизации электронов атомов собственного полупроводника ($\Delta W_З$), так как электроны атомов собственного полупроводника находятся в валентной зоне. Это видно на потенциальной диаграмме кристалла (см. рис. 1.17), отображающей функцию $W = \varphi(A)$, где $W$ — энергия зон кристалла; A — постоянная решетки собственного полупроводника (межатомное расстояние). При этом возрастает вероятность нахождения электронов в зоне проводимости (см. рис. 1.18) и несколько снижается вероятность появления дырок в валентной зоне, так как все валентные связи атомов собственного полупроводника и атомов примеси остаются заполненными.

По сравнению с собственным полупроводником в *n*-полупроводнике уровень Ферми ($W_{Fni}$) при $T = 0$ K лежит не на середине запрещенной зоны, а посередине между дном зоны проводимости

($W_{\text{П}}$) и уровнем доноров ($W_{\text{Д}}$) (рис. 1.18, точка а), так как валентные уровни электронов донорной примеси ($W_{\text{Д}}$) являются верхней границей заполненных уровней в общей структуре *n*-полупроводника, а запрещенной зоной в *n*-полупроводниках является промежуток от $W_{\text{Д}}$ до $W_{\text{П}}$, т.е. $\Delta W'_{\text{Д}} = W_{\text{П}} - W_{\text{Д}}$, равный энергии ионизации электронов донорной примеси.

При дальнейшем повышении температуры уровень Ферми ($W_{\text{F}ni}$) постепенно снижается от дна зоны проводимости к середине запрещенной зоны (кривая на рис. 1.18). При температуре, близкой к температуре *насыщения* ($T_S$), ионизирована приблизительно одна треть атомов примесного полупроводника (точка б) и $W_{\text{F}n} \approx W_{\text{Д}}$. Атомы примесных полупроводников оказываются полностью ионизированными при температуре в несколько десятков градусов Кельвина, когда уровень $W_{\text{F}n}$ лежит ниже уровня $W_{\text{Д}}$ (точка в). С дальнейшим ростом температуры уровень Ферми в примесных полупроводниках все более смещается к середине запрещенной зоны. Это объясняется началом процесса термогенерации и вероятностью появления дырок в валентной зоне. Дырки появляются не только от атомов донорной примеси, но и от атомов собственного полупроводника (точка г). При некоторой температуре $T_{\text{кр}}$, которую называют *критической*, концентрация неосновных носителей — дырок становится соизмеримой с концентрацией электронов. В этот момент уровень Ферми *n*-полупроводника находится в середине запрещенной зоны или ближе к потолку валентной зоны, т.е. к уровню $W_{\text{Fi}}$, и примесный полупроводник «вырождается» в собственный полупроводник.

На рис. 1.19 показана плоскостная модель кристаллической решетки *p*-полупроводника на основе кристалла кремния (Si) с атомом акцепторной примеси — бора (B). Три валентных электрона акцепторной примеси атома бора образуют с валентными электронами соседних атомов кремния парноэлектронные ковалентные связи, четвертая связь остается незаполненной. Такое состояние не является дыркой, так как атом акцепторной примеси остается электрически нейтральным. Упрощенно можно считать, что введение атома акцепторной примеси приводит к появлению незаполненного валентного энергетического уровня электронов атомов акцепторной примеси ($W_{\text{АК}}$), который лежит выше потолка валентной зоны атомов собственного полупроводника (при $T = 0$ K). Это

объясняется тем, что энергия валентных уровней тем больше, чем меньше валентность атомов вещества.

На этот свободный незаполненный уровень ($W_{AK}$) легко могут переходить валентные электроны атомов собственного полупроводника из соседних связей при $T > 0$ K, оставляя дырку в валентной зоне атома собственного полупроводника, которая может быть заполнена другими электронами. В связи с этим уровень $W_{AK}$ называется «ловушкой», т.е. улавливает электроны.

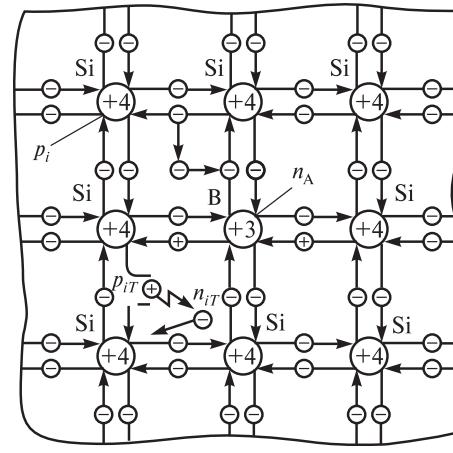



Рис. 1.19. Плоскостная модель кристаллической решетки дырочного полупроводника при $T > 0$ K

Это видно на потенциальной и энергетической диаграммах (рис. 1.20 и 1.21), где атом бора, получив дополнительный валентный электрон, становится отрицательным неподвижным ионом. При этом нарушается электрическая нейтральность и в той ковалентной связи атома собственного полупроводника, откуда электрон перешел к атому бора. На этом месте возникает избыточный положительный заряд — «дырка». В этом и заключается процесс ионизации атомов

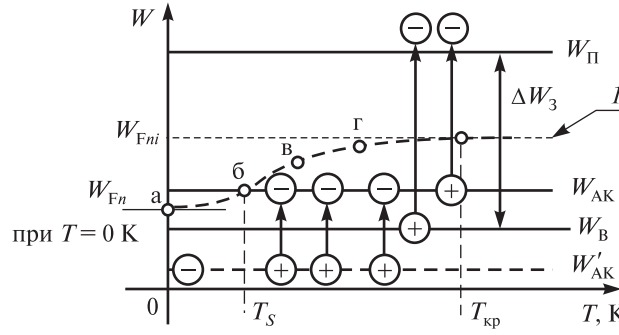



Рис. 1.20. Потенциальная диаграмма вблизи примесного атома *p*-полупроводника

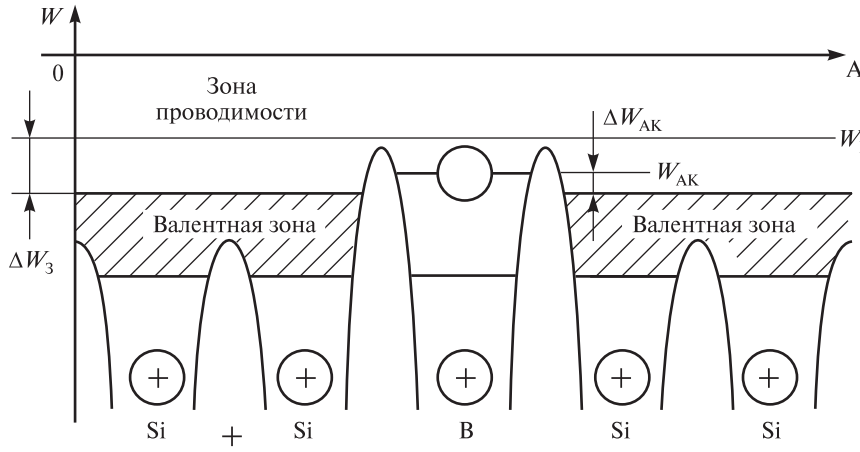



Рис. 1.21. Энергетическая диаграмма *p*-полупроводника

акцепторной примеси. Энергия ионизации акцепторной примеси очень мала и равна $\Delta W_{АК} = W_{АК} - W_{В}$.

По сравнению с собственным полупроводником в *p*-полупроводнике, так же как и в *n*-полупроводнике, уровень Ферми ($W_{Fp}$) при $T = 0$ К лежит не в середине запрещенной зоны, а посередине между потолком валентной зоны ($W_{В}$) и уровнем акцепторов ($W_{АК}$) (рис. 1.20, точка а). Это можно объяснить появлением незаполненных уровней акцепторных примесей $W_{АК}$, т.е. снижением суммарного уровня энергии потолка валентной зоны и расширением запрещенной зоны в общей энергетической структуре примесного *p*-полупроводника. На незаполненный уровень ($W_{АК}$) могут переходить электроны из валентной зоны собственного полупроводника, оставляя дырку в глубине валентной зоны с энергией равной $W'_{АК}$. Из-за этого вероятность нахождения электронов в валентной зоне снижается, т.е. уменьшается энергия заполненной зоны и расширяется запрещенная зона в общей энергетической структуре примесного *p*-полупроводника на величину энергии $\Delta W_{АК} = W_{В} - W'_{АК}$, равную энергии ионизации акцепторной примеси $\Delta W_{АК} = W_{АК} - W_{В}$. В общей энергетической структуре примесного *p*-полупроводника запрещенная зона теперь лежит в пределах от $W'_{АК}$ до $W_{П}$, т.е. $W'_{З} = W_{П} - W'_{АК}$. Запрещенная зона для атомов акцептор-

ной примеси находится в пределах уровней от $W_{\text{В}}$ до $W_{\text{АК}}$, которую уровень Ферми ($W_{\text{F}i}$) делит пополам.

С повышением температуры ($T > 0$ К) уровень Ферми ($W_{\text{F}p}$) в *p*-полупроводнике удаляется от потолка валентной зоны к середине запрещенной зоны (кривая 1 на рис. 1.20), так как увеличивается число ионизированных атомов акцепторной примеси (атомов примеси, присоединивших к себе электрон собственного полупроводника в ковалентную связь), и в структуре увеличивается энергия заполненных уровней и уменьшается необходимая энергия ионизации. При температуре, близкой к температуре насыщения ($T_S$), ионизирована приблизительно одна треть примесных атомов (точка б) и $W_{\text{F}p} \approx W_{\text{АК}}$. Атомы примесных полупроводников оказываются полностью ионизированными при температуре в несколько десятков градусов Кельвина, когда уровень $W_{\text{F}p}$ лежит выше уровня $W_{\text{АК}}$ (точка в). С дальнейшим ростом температуры уровень Ферми в *p*-полупроводниках, так же как и в *n*-полупроводниках, все больше смещается к середине запрещенной зоны и увеличивается вероятность появления дырок в валентной зоне атомов акцепторной примеси и атомов собственного полупроводника и электронов на локальном уровне акцепторов $W_{\text{АК}}$ (точка г). При некоторой критической температуре $T_{\text{кр}}$, которую называют *критической*, концентрация неосновных носителей — дырок — становится равной концентрации электронов. В этот момент уровень Ферми *p*-полупроводника находится в середине запрещенной зоны, т.е. на уровне $W_{\text{F}i}$, и примесный *p*-полупроводник «вырождается» в собственный полупроводник.

Положение уровня Ферми в примесных полупроводниках зависит от материала полупроводника, концентрации примесей и температуры.

Уровень Ферми в *n*-полупроводнике располагается тем выше, чем больше концентрация донорной примеси и чем меньше температура полупроводника, а в полупроводнике *p*-типа — тем ниже, чем больше концентрация акцепторов и чем меньше температура полупроводника. При комнатной температуре ($T_S$) уровень Ферми смещен ближе к уровню акцепторных примесей в *p*-полупроводнике и к уровню донорной примеси в *n*-полупроводнике (см. рис. 1.18 и 1.21).

Критическое значение температуры примесного полупроводника также зависит от материала полупроводника, концентрации примесей и температуры. Чем выше концентрация донорных и акцепторных примесей, тем выше значение температур $T_S$ и $T_{кр}$. Так, при одной и той же концентрации примесей разных материалов критическая температура существенно зависит от числа электронов в атомах вещества. Например, для германия $T_{кр} = 90$ °С, а для кремния $T_{кр} = 250$ °С при равной концентрации примесей $N_д = 10^{16}$см$^{-3}$. С ростом донорных или акцепторных примесей $T_{кр}$ возрастает. Таким образом, внесение примеси снижает влияние температуры на электропроводность *n*-полупроводника.

При внесении примесей, валентность атомов которых отличается от валентности атомов собственного полупроводника больше чем на единицу, атомы примеси могут быть ионизированы дважды и трижды и образуют несколько энергетических уровней примеси ($W_Д$ и $W_{АК}$), причем энергия ионизации двух- и трехкратно ионизированных атомов выше энергии ионизации однократно ионизированного атома. При невысокой концентрации примесей и их равномерном распределении в объеме собственного полупроводника расстояние между примесными атомами достаточно велико (много больше межатомного расстояния собственного полупроводника — постоянной кристаллической решетки). При такой концентрации энергетического уровня атомов примеси можно характеризовать единым дискретным уровнем ($W_Д$ и $W_{АК}$), так как он существует только вблизи атома примеси и является локальным (см. рис. 1.18 и 1.21).

При большой концентрации примесей энергетические зоны примесных атомов, расположенных на расстоянии постоянной кристаллической решетки, можно считать перекрывающимися друг с другом. В этом случае дискретный энергетический уровень примеси превращается в энергетическую примесную зону.

Энергетические уровни примесей, расположенные недалеко от уровней $W_В$ и $W_П$, называются мелкими, а расположенные на расстоянии, сравнимом с шириной запрещенной зоны, — глубокими. Примесные уровни перекрывают соседние энергетические зоны (рис. 1.22).

В *n*-полупроводнике уровни донорной примеси ($W_Д$) перекрывают уровни зоны проводимости ($W_П$). В *p*-полупроводнике уров-

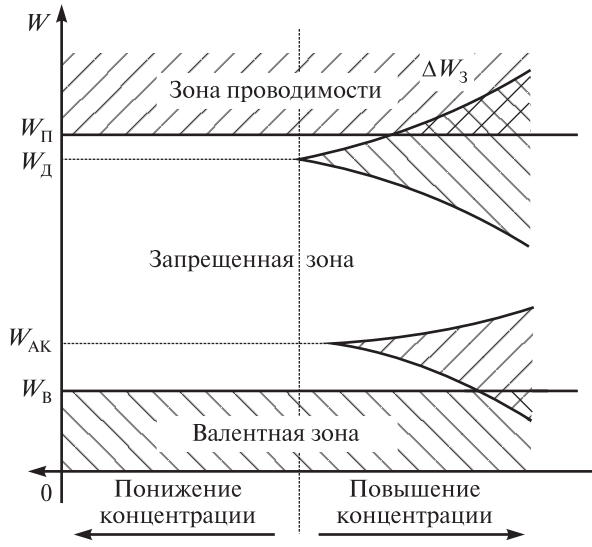



Рис. 1.22. Энергетическая диаграмма расщепления локального уровня примеси в примесную зону

ни акцепторной примеси ($W_{АК}$) перекрывают уровни валентной зоны ($W_В$). Мелкие примесные уровни создаются примесными атомами, валентность которых отличается от валентности атомов собственного полупроводника на единицу. Глубокие примесные уровни образуются примесными атомами, валентность которых отличается от валентности атомов собственного полупроводника более чем на единицу. При увеличении концентрации примесей расширяется зона перекрытия энергетических уровней.

Наибольшее перекрытие примесных энергетических зон достигается в мелких примесных уровнях. Их энергетическая диаграмма приближается к энергетической диаграмме металлов. Поэтому такие примесные полупроводники часто называют полуметаллами.

На практике не существует полупроводников с чисто электронной или чисто дырочной электропроводностью. Электропроводность полупроводника определяется основными носителями заряда, которых всегда больше, чем неосновных носителей заряда.

В полупроводнике *n*-типа число основных носителей заряда — электронов ($n_n$) намного больше неосновных — дырок ($p_n$), т.е.

$n_n >> p_n$, а в полупроводнике $p$-типа число основных носителей заряда — дырок ($p_p$) — намного больше неосновных — электронов ($n_p$), т.е. $p_p >> n_p$.

## 1.2. Электрические переходы

### *1.2.1. Классификация электрических переходов*

Электрическим переходом называют переходный слой в полупроводниковом материале между двумя структурами с различными типами электропроводности или различными значениями удельной электропроводимости.

Электрические переходы различаются по следующим признакам.

1. По типу электропроводности контактирующих материалов:

– электронно-дырочный переход (анизотипный от греч. anisos — неравный, typos — отпечаток, форма, образец) образуется между двумя примесными полупроводниками, один из которых имеет электропроводность $n$-типа, а другой — $p$-типа, т.е. переход $p$-$n$-типа;

– электронно-электронный или дырочно-дырочный переход (изотипный от изо... и греч. typos — отпечаток, форма, образец), образуется между двумя примесными полупроводниками с одинаковым типом электропроводности — электронной ($n$) или дырочной ($p$); соответственно различают электронно-электронный ($n^+$-$n$) и дырочно-дырочный ($p^+$-$p$) изотипный переход (верхний индекс «+» обозначает примесный полупроводник с большей концентрацией примесей, чем концентрация примесей в полупроводнике без индекса «+», т.е. несимметричный переход); изотипный переход может возникать также при контакте металла и примесного полупроводника $n$-типа или $p$-типа;

– переходы типа $n$-$i$ и $p$-$i$ — электрические переходы между двумя полупроводниками, один из которых имеет примесную электропроводность $n$- или $p$-типа, а другой — собственную; они представляют собой промежуточный вариант между изотипными и анизотипными переходами.

2. По типу контактирующих материалов.

– гомогенные переходы (гомопереход) (гомо... от греч. hjmos — равный, одинаковый, взаимный, общий) образованы в результате

контакта примесных полупроводников с разным типом электропроводности, но с одинаковой шириной запрещенной зоны, которые созданы на основе одного типа химического материала собственного полупроводника (например, кремний) типа $p$-$n$, $p^+$-$p$, $n^+$-$n$;

– гетерогенные переходы (гетеропереход) образованы в результате контакта примесных полупроводников с разным типом электропроводности и различной шириной запрещенной зоны, которые созданы на основе различных типов химических материалов собственных полупроводников, например — кремний для примесного полупроводника $n$-типа и германий для примесного полупроводника $p$-типа; гетеропереходы могут быть *анизотипные* (между примесными полупроводниками с разным типом электропроводности — электронной ($n$) и дырочной ($p$), типа $p$-$n$ и *изотипные* (между примесными полупроводниками с одним типом электропроводности) типа $p^{++}$-$p$, $n^{++}$-$n$ (верхние индексы «++» обозначают примесный полупроводник с концентрацией примеси во много раз большей, чем концентрация примесей в полупроводнике без знаков «++», т.е. односторонний переход);

– переход Шоттки образован в результате контакта металла и примесного полупроводника. Переход металл—полупроводник имеет две разновидности: с обедненной и повышенной концентрацией основных носителей зарядов в приконтактном переходном слое по сравнению с их концентрацией в остальном объеме полупроводника.

3. По соотношению концентрации примесей в контактирующих областях:

– симметричные ($p$-$n$-переход) переходы, в которых концентрация донорной примеси в полупроводнике $n$-типа равна концентрации акцепторной примеси в полупроводнике $p$-типа ($N_Д = N_A$), и концентрации основных носителей в $n$- и $p$-структурах равны, полупроводники созданы на основе одного химического материала собственного полупроводника;

– несимметричные ($p^+$-$n$, $p$-$n^+$-переходы) переходы, в которых концентрация примесей в полупроводниках $n$- и $p$-типа различается в несколько раз;

– односторонние переходы ($p^{++}$-$n$, $p$-$n^{++}$, $p$-$i$, $n$-$i$-типа и переходы металл — полупроводник с обедненным слоем носителей зарядов), в которых концентрация примесей в контактирующих полупроводниках различается более чем в 10 раз.

4. По зависимости электропроводимости и емкости перехода от величины и знака приложенного внешнего напряжения:

– выпрямляющие — электрические переходы, имеющие малое сопротивление при одном направлении тока и большое — при другом;

– емкостные — переходы, в которых ширина обедненного приконтактного слоя изменяется в зависимости от напряжения обратного смещения, вызывая изменение емкости перехода;

– инжекционные — электронно-дырочные переходы с особым видом эффекта инжекции основных носителей зарядов при прямом напряжении смещения;

– лавинные — электронно-дырочные переходы, вызывающие лавинное размножение носителей зарядов, а при большом обратном напряжение смещения — пробой перехода;

– омические — переходы, электрическое сопротивление которых не зависит от направления тока в заданном диапазоне его значений.

5. По распределению концентрации примесей в области перехода:

– плавные электронно-дырочные переходы, в приконтактном слое которых концентрация донорных и акцепторных примесей изменяется на глубину, значительно бóльшую, чем диффузионное проникновение основных носителей зарядов в приконтактном обедненном слое;

– резкие (ступенчатые) электронно-дырочные переходы, в которых изменение концентрации примеси происходит на глубину диффузионного проникновения основных носителей зарядов в приконтактном обедненном слое или немного меньше.

6. По форме переходов:

– точечные переходы образованы при малых площадях контактирующих поверхностей по сравнению с толщиной кристаллов;

– плоскостные переходы образованы при больших площадях контактирующих поверхностей по сравнению с толщиной кристаллов.

7. По методу формирования (создания) перехода:

– сплавные переходы, полученные методом вплавления металла или сплава, содержащего донорные или акцепторные примеси, необходимые для образования зоны с электропроводностью требуемого типа, в кристалл-пластину собственного полупроводника;

– диффузионные переходы, полученные путем введения донорных и акцепторных примесей в нагретую пластину собственного полупроводника из газовой среды; диффузия может проводиться не по всей поверхности кристалла, а на определенном участке, и тогда она называется планарной;

– эпитаксиальные переходы, в которых *p*-*n*-переход получен путем наращивания кристалла на поверхности другого кристалла при термической обработке;

– ионолегированные переходы, полученные путем бомбардировки в вакууме нагретой полупроводниковой пластины собственного полупроводника ионами донорной или акцепторной примеси.

### *1.2.2. Физические процессы в электронно-дырочном переходе*

Рассмотрим процессы, которые происходят при создании симметричного электронно-дырочного перехода между двумя полупроводниками, имеющими противоположные типы электропроводности, т.е. *p*-*n*-переход. Концентрация электронов в кристалле *n*-полупроводника значительно больше, чем в кристалле *p*-полупроводника, а число дырок в кристалле *p*-полупроводника значительно больше, чем в кристалле *n*-полупроводника ($n_n >> p_n$, $p_p >> n_p$) (см. рис. 1.15, 1.17). Неодинаковая концентрация подвижных носителей зарядов вызывает их диффузию из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией. Диффузия идет в приконтактном слое двух полупроводников на глубину, которая определяется длиной свободного пробега электрона без действия внешних сил, только за счет запаса собственной энергии и концентраций носителей зарядов в кристалле полупроводников ($l_{\text{дифф}}$). При увеличении концентрации носителей зарядов уменьшаются их подвижность и длина свободного пробега электрона.

Таким образом, при соединении полупроводника *n*-типа с полупроводником *p*-типа электроны из кристалла *n*-типа диффундируют в кристалл *p*-типа и рекомбинируются с дырками, образуя нейтральные атомы (рис. 1.23), т.е. течет диффузионный ток основных носителей зарядов $j_{\text{дифф}}$.

При уходе электронов из *n*-кристалла полупроводника в его приконтактном слое остаются положительно заряженные неподвижные ионы атомов донорной примеси, ранее компенсировавшиеся зарядами ушедших электронов, и небольшое количество неосновных носите-

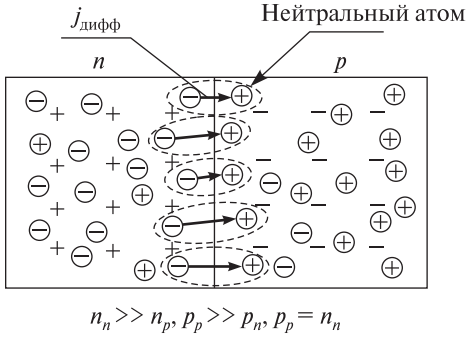



Рис. 1.23. Модель образования электронно-дырочного перехода (процесс диффузии)

лей зарядов — фиктивно подвижных дырок. Аналогично, в *p*-кристалле полупроводника в его приконтактном слое остаются отрицательно заряженные неподвижные ионы акцепторной примеси, ранее компенсировавшиеся зарядами дырок, и небольшое количество неосновных носителей зарядов — электронов. Противоположные по знаку заряды в приконтактном слое, обедненном подвижными носителями заряда, создают контактную разность потенциалов и внутреннее электрическое поле с напряженностью $E_{\text{внутр}}$ (рис. 1.24).

Это электрическое поле называется *диффузионным* и характеризуется направлением вектора напряженности из *n*-области в *p*-область кристаллов. Электрическое поле препятствует дальнейшему процессу диффузии основных носителей зарядов — электронов из полупроводника *n*-типа в полупроводник *p*-типа, но является ускоряющим для неосновных носителей зарядов — электронов из полупроводника *p*-типа в полупроводник *n*-типа. Движение неосновных носителей заряда—электронов под действием сил внутрен-

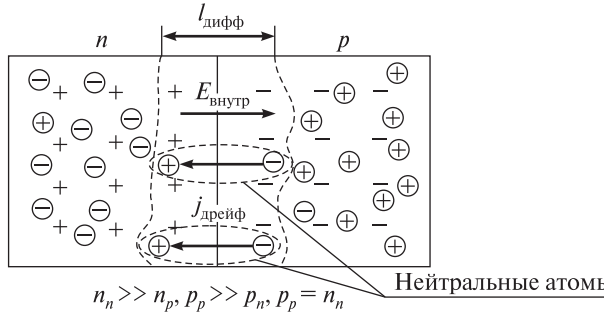



Рис. 1.24. Модель образования электронно-дырочного перехода (процесс дрейфа)

него электрического поля называется *дрейфом*, т.е. в приконтактном слое протекает дрейфовый ток $j_{\text{дрейф}}$ (см. рис. 1.24).

В результате дрейфа электронов из полупроводника *p*-типа в полупроводник *n*-типа электроны рекомбинируются с дырками *n*-полупроводника, образуя нейтральные атомы (см. рис. 1.24).

Таким образом, при формировании *p*-*n*-перехода в начальный момент диффузионное направленное движение электронов создает диффузионный ток $j_{\text{дифф}}$, а затем встречное движение электронов — дрейфовый ток $j_{\text{дрейф}}$.

В результате таких перемещений электронов в приконтактном слое двух полупроводников, имеющих противоположную электропроводность, остаются только неподвижные и противоположно заряженные ионы. В кристалле *n*-типа — положительные неподвижные ионы, а в кристалле *p*-типа — отрицательные неподвижные ионы. Между противоположными по знаку зарядами действует контактная разность потенциалов ($U_{\text{к}}$) и электрическое поле ($E_{\text{к}}$) (рис. 1.25).

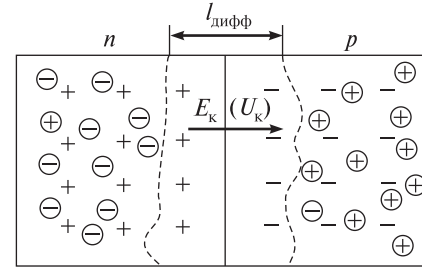



Рис. 1.25. Модель электронно-дырочного перехода

Область образовавшихся неподвижных пространственных зарядов (ионов) и есть область *p*-*n*-перехода. В ней имеет место пониженная концентрация подвижных носителей зарядов и, следовательно, повышенное сопротивление, которое определяет электрическое сопротивление всей структуры, т.е. возникает потенциальный барьер для движения основных носителей зарядов, созданный контактной разностью потенциалов. Однако это поле не препятствует движению через переход неосновных носителей, имеющихся в *p*- и *n*-областях. Неосновные носители заряда, как известно, возникают от теплового воздействия и генерируются в объемах полупроводников. Образовавшиеся неосновные носители захватываются электрическим полем перехода и диффундируют в противоположный полупроводник, создавая ток дрейфа ($j_{\text{дрейф}}$). Переход неосновных носителей приводит к уменьшению объемного заряда и внутреннего электрического поля перехода.

В то же время некоторые основные носители заряда, обладающие достаточной энергией, чтобы преодолеть это уменьшенное тормозящее поле *p-n*-перехода, совершают диффузию из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией и создается диффузионный ток ($j_{\text{дифф}}$).

Таким образом, через *p-n*-переход без внешнего электрического поля движутся два встречных потока носителей зарядов, находящихся в динамическом равновесии и взаимно компенсирующих друг друга, т.е. $j_{\text{дифф.}} = -j_{\text{дрейф}}$.

Результирующий ток через переход в этом случае равен нулю:

$$j_{\text{дрейф}} + j_{\text{дифф}} = 0; \; j_{\text{дрейф}} = j_{\text{дрейф } n} + j_{\text{дрейф } p};$$

$$j_{\text{дифф}} = j_{\text{дифф } n} + j_{\text{дифф } p}.$$

В зонах, прилегающих к месту контакта двух разнородных полупроводников, нарушается электронейтральность. В *p*-области остаются нескомпенсированные заряды отрицательно заряженных акцепторных примесей, а в *n*-области — положительно заряженных донорных примесей. За пределами *p-n*-перехода все заряды взаимно компенсируют друг друга, и полупроводники остаются электрически нейтральными.

Ширина запирающего слоя потенциального барьера зависит от концентрации ионов примеси в полупроводниках с донорной ($N_{\text{Д}}$) и акцепторной ($N_{\text{А}}$) примесями и тем меньше, чем больше концентрация примесей. Электронно-дырочный переход, в котором $N_{\text{А}} = N_{\text{Д}}$ ($p_p = n_n$), называется *симметричным*. Если концентрации примесей в контактируемых областях различны $N_{\text{А}} >> N_{\text{Д}}$ ($p_p >> n_n$) или $N_{\text{А}} << N_{\text{Д}}$ ($p_p << n_n$) и отличаются в 100—1000 раз, то такие *p-n*-переходы называются *несимметричными*.

В реальных полупроводниковых приборах используются несимметричные *p-n*-переходы.

### *1.2.3. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода*

Энергетическая диаграмма полупроводников до контакта между ними приведена на рис. 1.26. Каждая область характеризуется своей диаграммой уровней. При контакте между областями полупроводников и образовании электронно-дырочного перехода возникает




Рис. 1.26. Энергетическая диаграмма полупроводников до контактного соединения

равновесное состояние. Это состояние характеризуется равенством диффузионного тока основных носителей и дрейфового атома неосновных носителей навстречу друг другу, когда результирующий ток в переходе равен нулю. Поскольку суммарный ток равен нулю, энергетическая система должна характеризоваться единым энергетическим уровнем Ферми (рис. 1.27), т.е. $W_{Fp} = W_{Fn} = W_{Fi}$.

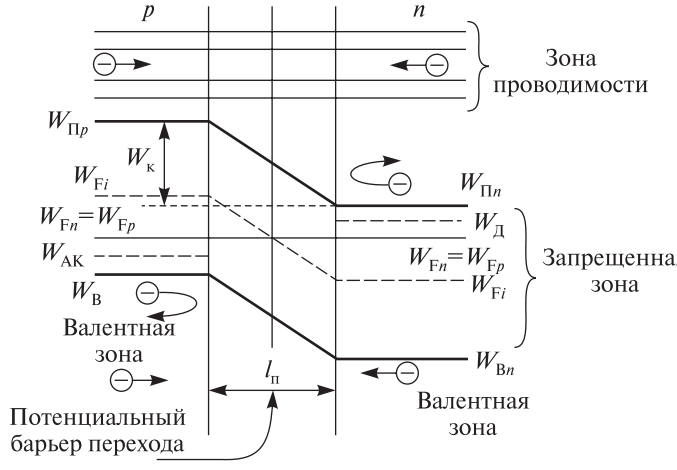



Рис. 1.27. Энергетическая диаграмма полупроводников при контактном соединении

В результате этого происходит смещение всех энергетических уровней. На зонной модели (рис. 1.27) видно, что из *n*-области в *p*-область могут перейти лишь те электроны, которые находятся в зоне проводимости на высоких энергетических уровнях, превышающих потенциальный барьер. Из *p*-области в *n*-область могут перейти электроны, находящиеся в зоне проводимости. Аналогично можно рассмотреть движение электронов в валентных зонах *n*- и *p*-областей. Величины сдвига энергетических зон в *n*- и *p*-областях соответствуют контактной разности потенциалов ($W_к$) высоте потенциального барьера перехода $W_п = W_{Пp} - W_{Пn}$.

### *1.2.4. Методы формирования p-n-переходов*

Электронно-дырочный *p-n*-переход практически нельзя получить при механическом соединении двух полупроводников, так как из-за шероховатостей контактирующих кристаллов контакт возникает лишь на небольшой площади, а из-за окисления контактирующие поверхности разделяются тонким слоем диэлектрика. Поэтому электронно-дырочный переход получают на внутренней границе *n*- и *p*-областей единого полупроводникового кристалла путем введения примесей в определенные области этого кристалла.

Наиболее распространены четыре метода введения примесей в кристаллическую структуру полупроводника — вплавление, диффузия, эпитаксия и ионное легирование. При получении *сплавного перехода* помещают, например, на пластину германия *n*-типа (*1*) (рис. 1.28) таблетку акцептора — индия (*2*) и нагревают их в вакууме до 500 °С. Когда индий и прилегающий к нему слой германия расплавляются, нагрев прекращают. При охлаждении германий рекристаллизуется, «захватывая» тонкий слой германия *p*-типа (*4*), в котором концентрация акцепторов $N_А > N_Д$. На границе этого слоя и *n*-германия возникает *p-n*-переход. На нижнюю часть пластины германия наносят слой олова (*5*) для присоединения внешнего контакта (*6*), второй контакт (*3*) припаивают к застывшему индию. Концентрация примесей на границе *p*- и *n*-областей сплавного перехода изменяется в значительных пределах, поэтому его относят к резким переходам.

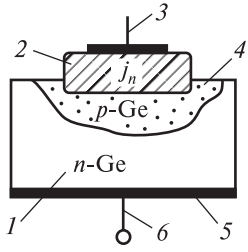



Рис. 1.28. Сплавной *p-n*-переход

Таким методом вплавления чаще всего получают низкочастотные и мощные полупроводниковые приборы с резкими *плоскостными* *p-n*-переходами. Вплавлением можно получать и переходы малой площади. Сплавной переход, образованный в результате вплавления на малую глубину металла или сплава, предварительно нанесенного на поверхность полупроводника, называют *микросплавным*. Недостатки метода вплавления — трудность дозировки примеси и поэтому возникает большой разброс параметров получаемых приборов. Кроме того, число формируемых на пластине переходов не превышает двух.

Диффузионное введение примесей из газовой среды является основным способом легирования полупроводников. Полученный в результате диффузии переход называют *диффузионным*.

Диффузия может быть общей или локальной. Например, кремний *p*-типа (*7*) (рис. 1.29, *а*) помещают в поток газа, содержащего пары фосфора (*9*), при 1200 °С. Атомы фосфора проникают в полупроводник, образуя область *n*-кремния (*8*). Концентрация донорной примеси уменьшается вглубь кристалла (рис. 1.29, *б*). В сечении $x_0$ концентрации доноров и акцепторов одинаковы; здесь проходит граница *p*- и *n*-областей и возникает плоскостной *p-n*-переход. Такой переход называют *плавным*.

Локальную диффузию осуществляют на определенных участках поверхности пластины через отверстие в маске (*10*) — защитном слое, нанесенном на поверхность полупроводника (рис. 1.30). С помощью локальной диффузии можно сформировать на полупроводниковой пластине десятки тысяч идентичных *p-n*-переходов,

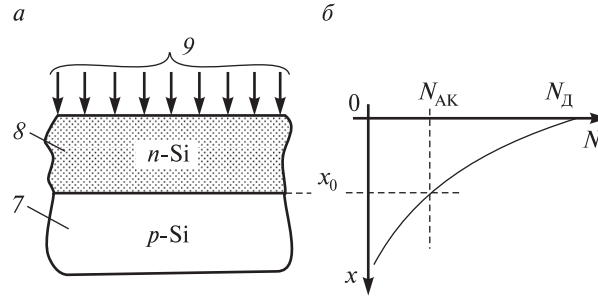



Рис. 1.29. Диффузионный *p-n*-переход и распределение в нем примесей

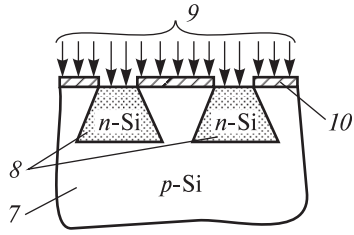



Рис. 1.30. Планарный *p-n*-переход

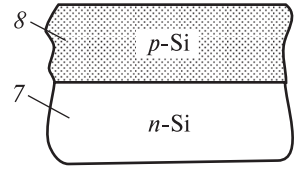



Рис. 1.31. Эпитаксиальный *p-n*-переход

которые называются *планарными* (от англ. planar — плоский). Планарная технология — основа производства современных полупроводниковых интегральных микросхем. Она позволяет контролировать концентрации вводимых примесей, обеспечивая тем самым минимальный разброс электрических параметров выпускаемой серии полупроводниковых приборов.

Эпитаксиальный способ получения *p-n*-переходов основан на наращивании на монокристаллической подложке (*8*) (рис. 1.31) слоя полупроводника (*7*), который сохраняет кристаллическую структуру подложки и содержит донорную и акцепторную примеси. Полученный в результате резкий плоскостной *p-n*-переход называют *эпитаксиальным*. Метод эпитаксии широко применяют при изготовлении быстродействующих полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Ионное легирование реализуют бомбардировкой поверхности полупроводниковой пластины (*7*) (рис. 1.32) потоком ионов примеси (*11*), формируемым ионной оптической системой (*12*). Основные преимущества этого метода — точная дозировка примесей, автоматизация и упрощение процесса. Ионное легирование широко применяется в производстве больших интегральных схем.

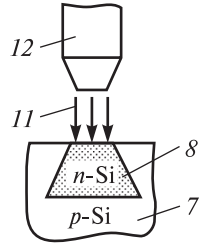



Рис. 1.32. Метод ионного легирования *p-n*-перехода

При изготовлении полупроводниковых приборов возможны сочетания разных методов формирования *p-n*-переходов. Соответственно различают сплавно-диффузионные, планарно-эпитаксиальные приборы и др.

Точечные *p-n*-переходы, применяемые в диодах того же названия, получают диф-

фузией примесей контактным способом. К поверхности отполированной пластины германия (*1*) (рис. 1.33) или кремния *n*-типа прижимают заостренную бронзовую иглу (*13*) диаметром 20—30 мкм. Затем пропускают через иглу и полупроводник кратковременные мощные импульсы тока. При этом кончик иглы сплавляется с полупроводником и часть ее акцепторной примеси (меди) диффундирует в полупроводник, образуя небольшую область *p*-типа (*4*) и плавный точечный *p*-*n*-переход.

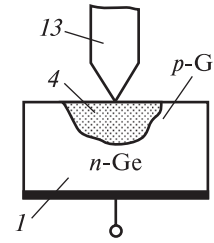



Рис. 1.33. Точечный *p*-*n*-переход

### *1.2.5. Режимы включения p-n-перехода*

Различают три состояния *p*-*n*-перехода: равновесное, когда к нему не приложено напряжение внешнего смещения; включение в прямом направлении — прямое смещение; включение в обратном направлении — обратное смещение. В последних двух случаях к выводам *p*-*n*-перехода подключают внешние источники ЭДС.

## 1.3. Свойства *p*-*n*-перехода при смещении

### *1.3.1. Общие сведения*

В данном разделе рассматриваются процессы, происходящие в электронно-дырочном переходе при включении *p*-*n*-перехода во внешнюю электрическую цепь, т.е. воздействие внешнего электрического поля на полупроводниковую структуру. Внешнее электрическое напряжение может быть как постоянным, так и переменным. Существенное значение имеет полярность подключения источника внешнего постоянного напряжения или мгновенное значение направления действующего переменного напряжения.

Если направление вектора напряженности внешнего электрического поля ($U_{пр}$), создаваемого внешним источником напряжения, направлено встречно с вектором напряженности собственного внутреннего электрического поля *p*-*n*-перехода ($U_к$), говорят, что *p*-*n*-переход смещен в прямом направлении или находится под прямым смещением. Практически это можно осуществить, если к *n*-области подключить «минус», а к *p*-области «плюс» источника внешнего напряжения смещения (рис. 1.34).

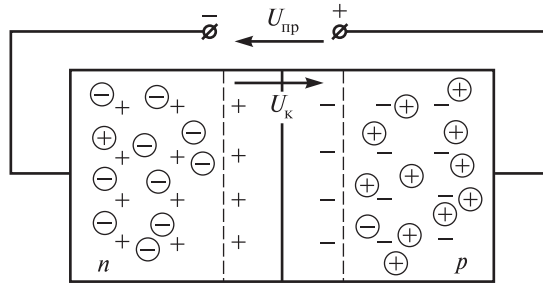



Рис. 1.34. Прямое смещение *p-n*-перехода

Если направление вектора напряженности внешнего электрического поля ($U_{обр}$) совпадает с направлением вектора напряженности собственного внутреннего электрического поля ($U_к$) *p-n*-перехода, говорят, что *p-n*-переход смещен в обратном направлении или находится под обратным смещением. Практически это можно осуществить, если к *n*-области подключить «плюс», а к *p*-области «минус» источника внешнего напряжения смещения (рис. 1.35).

Таким образом, к *p-n*-переходу можно подключить напряжение обратного смещения ($U_{обр}$) и напряжение прямого смещения ($U_{пр}$), которые будут по-разному влиять на структуру приконтактного слоя (потенциального барьера). Внешнее поле приведет к смещению установившегося состояния зарядов в структуре *p-n*-перехода. Напряжение, вызвавшее это смещение, называется напряжением смещения.

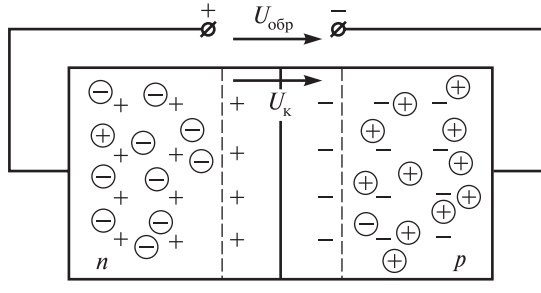



Рис. 1.35. Обратное смещение *p-n*-перехода

### *1.3.2. Прямое смещение p-n-перехода*

При включении *p-n*-перехода под напряжение прямого смещения (рис. 1.36) поле внешнего источника ЭДС ($E_{внеш} = U_{пр}$) направлено встречно внутреннему полю ($E_{внутр} = U_к$) потенциального барьера. Все внешнее напряжение практически оказывается приложенным к потенциальному барьеру, как к участку с наибольшим сопротивлением.

В начальный момент времени при подаче напряжения прямого смещения электроны источника $U_{пр}$, поступая в *n*-область с большим числом основных носителей зарядов — электронов — и сталкиваясь с ними, направляют их движение к потенциальному барьеру (одноименные заряды отталкиваются — закон Кулона). Для такого движения необходимо, чтобы напряженность внешнего ($U_{пр}$) была больше напряженности внутреннего поля контактной разности потенциалов ($U_{внутр} = U_к$). Основные носители заряда — электроны *n*-области, легко притягиваются неподвижными положительно заряженными ионами донорной примеси, находящимися в потенциальном барьере (разноименные заряды притягиваются — закон Кулона).

Электроны *n*-области и неподвижные положительные ионы потенциального барьера, находящиеся на очень близком расстоянии, не могут рекомбинироваться, так как в неподвижных положительных ионах заполнены все парные ковалентные связи. Однако близкое расстояние разноименных зарядов создает в данной

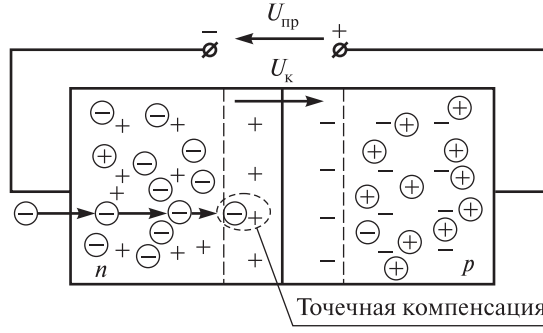



Рис. 1.36. Процесс разрушения потенциального барьера при прямом смещении *p-n*-перехода

точке объема полупроводника суммарный заряд, равный нулю, т.е. происходит *точечная компенсация*. Точечная компенсация — это суммарное равенство положительного и отрицательного зарядов в единой точке пространства. Таким образом, положительный потенциальный слой барьера в *n*-области разрушается — становится электронейтральным, и в приконтактном слое двух разноименных полупроводников прекращает действовать контактная разность потенциалов ($U_к$) и внутреннее электрическое поле $E_{внутр} = U_к$. Это означает разрушение потенциального барьера.

При дальнейшем увеличении внешнего напряжения прямого смещения основные носители заряда — электроны, поступившие в *n*-область, увеличивают ее концентрацию и под действием сил внешнего поля переходят в *p*-область, где рекомбинируются с дырками *p*-области (рис. 1.37). Процесс перехода основных носителей зарядов в электронно-дырочном переходе под действием сил внешнего электрического поля называется *инжекцией* — вбрасыванием, нагнетанием основных носителей зарядов при смещении потенциального барьера.

Число положительных носителей зарядов в *p*-области не уменьшается, так как они пополняются от внешнего источника питания. Число инжектированных электронов равно числу положительных ионов, поступивших в *p*-область от источника внешнего смещения. Это соответствует уходу электронов из *p*-области к источнику внешнего смещения.

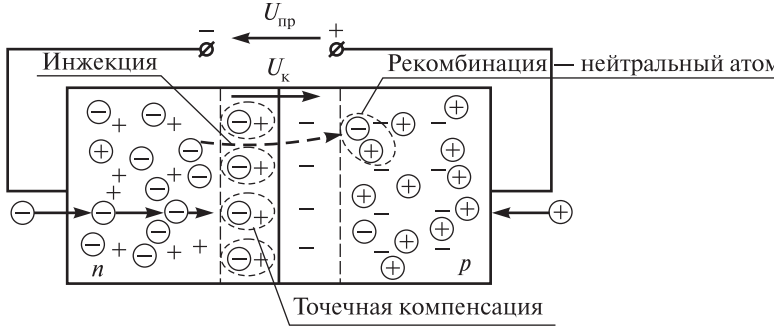



Рис. 1.37. Процесс инжекции при прямом смещении *p*-*n*-перехода

Установившееся состояние следует рассматривать как динамическое равновесие, при котором происходит непрерывная инжекция основных носителей и их рекомбинация. Полное число носителей — электронов и дырок — остается при этом постоянным.

Инжекция вызвана тем, что в *n*-области повышается концентрация основных носителей зарядов за счет сил внешнего электрического поля. Это вновь ведет к возникновению процесса диффузии основных носителей зарядов в *p*-область с меньшей концентрацией электронов.

Таким образом, при прямом смещении *p-n*-перехода, когда напряженность поля внешнего источника ЭДС ($U_{пр}$) превысит напряженность внутреннего поля потенциального барьера *p-n*-перехода ($E_{внутр} = U_к$), в электронно-дырочном переходе возникает направленное движение электронов — электрический ток основных носителей зарядов, который называется прямым током ($I_{пр}$).

Контактная разность потенциалов потенциального барьера составляет для германиевых *p-n*-переходов 0,1—0,4 В, для кремниевых — 0,5—1,5 В, т.е. очень мала. Отсюда следует, что для разрушения потенциального барьера требуется небольшое напряжение прямого смещения.

Число основных носителей зарядов велико, что указывает на большую силу тока.

Инжектирующий слой полупроводника называют *эмиттером;* слой, в который инжектируются неосновные для него носители зарядов, — *базой*.

### *1.3.3. Обратное смещение p-n-перехода*

При включении *p-n*-перехода под напряжение обратного смещения (рис. 1.38) поле внешнего источника ЭДС ($E_{внеш} = U_{обр}$) совпадает с внутренним полем ($E_{внутр} = U_к$) потенциального барьера. Поэтому возрастает общая напряженность поля, препятствующая диффузионному перемещению электронов из *n*-области, т.е. движению основных носителей зарядов.

В начальный момент времени при подаче напряжения обратного смещения электроны внешнего источника $U_{обр}$, поступая в *p*-область с большим числом основных носителей заряда — дырок, рекомбинируются с дырками. В *p*-области большое число дырок, и поступающие электроны не смогут достигнуть *n*-области, совер-

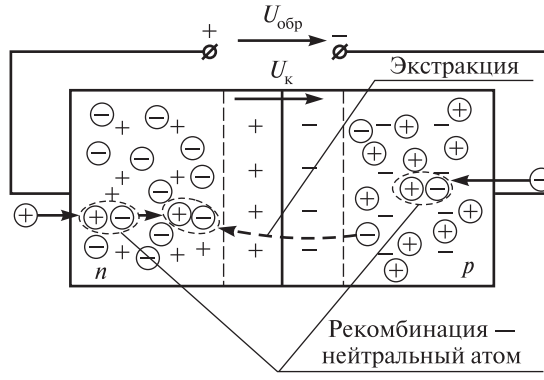



Рис. 1.38. Процесс экстракции при обратном смещении *p-n*-перехода

шая постоянные рекомбинации. Из этого следует, что для полной рекомбинации дырок необходимо подавать достаточно большое напряжение обратного смещения. При таком напряжении резко понизится концентрация дырок — основных носителей в *p*-области, что уменьшит вероятность рекомбинации электронов — неосновных носителей зарядов, поступающих от источника смещения ($U_{обр}$). Таким образом, в полупроводнике *p*-типа остается большое число неподвижных, отрицательно заряженных ионов примеси и небольшое число неосновных носителей зарядов электронов, оставшихся от рекомбинации.

Суммарное внешнее и внутреннее поле будет ускорять электроны (неосновные носители) *p*-области и втягивать их в смежную *n*-область, где они рекомбинируются с дырками — неосновными носителями зарядов.

В контактном слое *p-n*-перехода уменьшается число основных подвижных носителей зарядов дырок и электронов, и остаются только неподвижные носители зарядов (в *p*-области — отрицательные ионы и в *n*-области — положительные ионы). В результате увеличиваются ширина потенциального барьера и внутреннее электрическое поле, что ведет к увеличению суммарного поля в *p-n*-переходе (рис. 1.39).

Процесс перемещения неосновных носителей зарядов в электронно-дырочном переходе, обусловленный действием сил внешнего электрического поля, называется *экстракцией* — извлечением

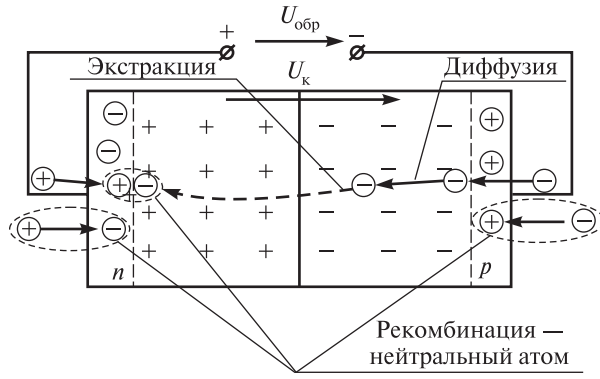



Рис. 1.39. Модель *p*-*n*-перехода при увеличении напряжения обратного смещения

неосновных носителей зарядов при повышении потенциального барьера.

Уход электронов из приконтактного слоя полупроводника *p*-типа снижает концентрацию неосновных носителей зарядов до значений, близких к нулю, поэтому начинается диффузия электронов из глубины полупроводника *p*-типа к границе перехода. Диффузия неосновных носителей идет очень медленно, так как во всем объеме полупроводника *p*-типа много равномерно расположенных, неподвижных, отрицательных ионов примеси. Эти отрицательные неподвижные ионы и электроны по закону Кулона отталкиваются, препятствуя прохождению подвижных электронов к приконтактному слою. Поэтому только большое напряжение обратного смещения позволяет преодолеть отталкивающую силу неподвижных отрицательных ионов и заставить электроны передвигаться к приграничному слою и экстрагировать в *n*-область соседнего полупроводника. Из этого можно сделать вывод о том, что диффузионное перемещение при обратном смещении *p*-*n*-перехода несравнимо с диффузией при создании перехода.

Таким образом, при обратном смещении *p*-*n*-перехода, когда совместное действие внутреннего поля потенциального барьера и поля внешнего источника обратного смещения преодолеет отталкивающую силу неподвижных носителей зарядов *p*-полупроводника, в *p*-*n*-переходе возникнет направленное движение электронов —

электрический ток неосновных носителей зарядов, который называется *обратным током* ($I_{обр}$).

Неосновные носители возникают за счет теплового воздействия и поэтому обратный ток еще называют *тепловым* ($I_0 = I_{обр}$). Величина обратного теплового тока ($I_0$) невелика, меньше прямого тока, так как концентрация неосновных носителей весьма мала — намного меньше концентрации основных носителей зарядов.

При увеличении напряжения обратного смещения до определенного значения концентрация неосновных носителей заряда практически не изменяется, так как их бóльшая часть рекомбинируется с основными носителями заряда — дырками, соответственно остается почти постоянным и тепловой обратный ток. Поэтому этот ток иногда называют обратным током насыщения, понимая под насыщением режим, когда ток не зависит от изменения напряжения в определенных пределах.

### *1.3.4. Вольт-амперная характеристика p-n-перехода*

Проведенный в предыдущих разделах анализ работы электронно-дырочного перехода при воздействии внешних смещений позволяет построить кривую зависимости тока через *p-n*-переход от приложенного к нему напряжения $I = \varphi(U)$, так называемую вольт-амперную характеристику.

Рассмотрим участок вольт-амперной характеристики, соответствующий напряжению прямого смещения от точки 0 до точки *1* при $0 < U_{пр} \le E_{внутр}$ (рис. 1.40).

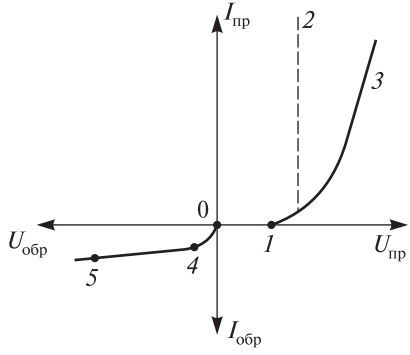



Рис. 1.40. Вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода

На этом отрезке характеристики ток отсутствует или имеет малые значения, так как потенциальный барьер разрушается неполностью и все напряжение прямого смещения расходуется на разрушение потенциального барьера.

При условии $U_{пр} > E_{внутр}$ (за точкой *1*) ток инжекции через переход возрастает и имеет резкое приращение и большую силу, так как потенциальный барьер

полностью разрушен, а число основных носителей заряда велико. В идеализированном *p-n*-переходе характеристика имела бы вид вертикальной линии (*2*).

В реальном переходе, учитывающем все факторы работы, характеристика имеет вид *3*, т.е. имеет наклон. Это обусловлено рядом факторов.

Разрушенный в результате точечной компенсации потенциальный барьер не остается постоянным. Движущиеся к нему электроны *n*-области отталкивают электроны, создавшие точечную компенсацию, от неподвижных положительных ионов, которые инжектируют в *p*-область, и сами создают точечную компенсацию. На время от момента разрушения точечной компенсации до ее восстановления вновь возникают потенциальный барьер и препятствие для инжекции.

Процесс инжекции ограничивает также сопротивление самого полупроводника, так как на пути движения электронов в структуре *n*-полупроводника встречаются неосновные носители зарядов — дырки, с которыми они рекомбинируются, и не участвуют в процессе электропроводимости — протекании тока. Это и есть действие объемного сопротивления полупроводников.

Из этого можно сделать вывод, что наклон вольт-амперной характеристики прямого тока в *p-n*-переходе есть результат неполного участия всех электронов в процессе инжекции.

Рассмотрим участок вольт-амперной характеристики, соответствующий напряжению обратного смещения $U_{обр} < 0$ (рис. 1.40), от точки 0 до точки 4. На этом отрезке характеристики ток экстракции начинает возрастать за счет того, что неосновные носители — электроны в *p*-полупроводнике — возле потенциального барьера ускоряются суммарным полем потенциального барьера и внешнего источника смещения.

Уход основных носителей заряда приводит к тому, что их концентрация у границы *p-n*-перехода снизится до нуля. Вместе с этим у границы двух полупроводников образуется большой слой неподвижных ионов и возрастает ширина потенциального барьера, что приводит к увеличению внутреннего поля *p-n*-перехода.

В дальнейшем из-за понижения концентрации у границы *p-n*-перехода начнется диффузия электронов из глубины *p*-полупроводника к приконтактному слою, компенсируя убыль носителей

зарядов в нем. Этому процессу помогает и внешнее электрическое поле, которое действует в направлении диффузионного перемещения электронов.

Процесс перемещения неосновных носителей к границе *p-n*-перехода идет очень медленно, так как этому препятствует внутреннее сопротивление полупроводника *p*-типа: основные носители дырки рекомбинируются с электронами и только небольшое их число достигает граничного слоя, но для этого требуется большое напряжение обратного смещения.

На рис. 1.40 от точки *4* до точки *5* видно, что обратный ток практически не изменяется. Это говорит о том, что число экстрагированных носителей зарядов неизменно и не зависит от приложенного напряжения. Электроны, поступающие от источника смещения, участвуют только в процессе рекомбинации с дырками, а в экстракции задействованы неосновные носители зарядов полупроводника, полученные от теплового воздействия.

Из этого следует, что $I_{обр}$ зависит только от температуры окружающей среды, материала полупроводника и примесей в полупроводниках.

Величина $I_{обр}$ и наклон ветви вольт-амперной характеристики характеризуются дифференциальным сопротивлением *p-n*-перехода $r_{диф}$ и являются показателем качества изготовления перехода. Чем меньше $I_{обр}$ и выше $r_{диф}$, тем лучше качество и тем больше ненадежность и долговечность перехода.

Из рассмотренного следует, что *p-n*-переход имеет вентильные свойства, т.е. пропускает ток в одном направлении. При приложении напряжения, смещающего его в прямом направлении, через переход протекает электрический ток, значение которого при повышении напряжения увеличивается по экспоненциальному закону. Изменение полярности приложенного напряжения приводит к смещению *p-n*-перехода в обратном направлении и его сопротивление возрастает. Через переход протекает малый тепловой ток, значение которого не зависит от приложенного напряжения и увеличивается только при повышении температуры.

### *1.3.5. Пробой электронно-дырочного перехода*

Пробой электронно-дырочного перехода — это явление резкого увеличения обратного тока через переход при достижении обратным

напряжением критического значения. Увеличение этого тока идет при малом увеличении приложенного напряжения.

В зависимости от физических явлений, приводящих к пробою, различают три основных вида пробоя: лавинный, туннельный и тепловой. Лавинный и туннельный пробои относятся к электрическим пробоям, при которых *p-n*-переход сохраняет свои вентильные свойства. Тепловой пробой вызывает необратимые изменения в *p-n*-переходе и ведет к его разрушению и выходу из строя.

Лавинный пробой — разновидность электрического пробоя перехода, вызванного лавинным размножением носителей зарядов под действием сильного электрического поля, созданного совместным действием внешнего электрического поля ($E_{внеш}$) и внутреннего поля потенциального барьера контактной разности потенциалов ($U_к$). Он обусловлен ударной ионизацией атомов полупроводника в *p-n*-переходе. Процесс ударной ионизации (точка *а* на рис. 1.41) в электронно-дырочном переходе начинается тогда, когда в структуре полупроводников практически отсутствуют основные носители зарядов. В полупроводнике *p*-типа все дырки рекомбинировались с электронами, поступившими от источника внешнего смещения, образовав нейтральные атомы, и остались неподвижные носители зарядов — отрицательные ионы примеси и подвижные неосновные носители заряда — электроны. В полупроводнике *n*-типа все электроны рекомбинировались с положительными ионами источника внешнего смещения, образовав нейтральные атомы, и остались неподвижные положительные ионы и фиктивно подвижные дырки (рис. 1.42).

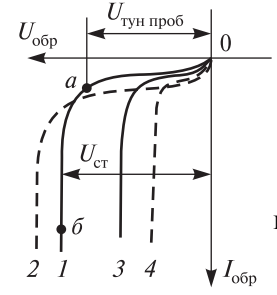



Рис. 1.41. Вольт-амперные характеристики *p-n*-перехода при электрических пробоях

Таким образом, возрастает контактная разность потенциалов за счет нескомпенсированных разноименных зарядов в каждом полупроводнике и во всей структуре *p-n*-перехода возникает запирающий слой — потенциальный барьер, определяемый числом неподвижных носителей зарядов. Весь электронно-дырочный переход представляет собой потенциальный барьер, обладающий дифференциальным сопротивлением. Увеличение внутреннего электри-

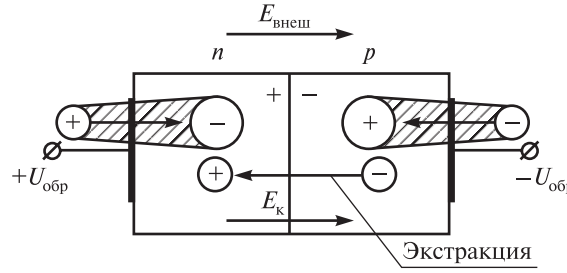



Рис. 1.42. Структура *p-n*-перехода перед пробоем

ческого поля действует ускоряюще на неосновные носители заряда *p*-области — электроны, которые получают дополнительную кинетическую энергию и двигаются к приконтактному слою.

В процессе движения электроны *p*-области разрывают парные ковалентные связи путем соударения с неподвижными отрицательными ионами, в результате чего образуются электрон и нейтральный атом, т.е. это один из видов генерации, связанный с потреблением электроэнергии (рис. 1.43). Вновь появившиеся носители зарядов — электроны в *p*-полупроводнике — ускоряются электрическим полем и в свою очередь могут вновь вызвать ионизацию следующего атома и т.д. Если процесс ударной ионизации идет лавинообразно, то по тому же закону увеличивается число неосновных носителей зарядов — электронов в *p*-полупроводнике и обратный ток в *p-n*-переходе (рис. 1.41: участок от точки *а* до точки *б*).

В результате ударной ионизации увеличивается число электронов в *p*-области перехода, что ведет к росту обратного тока за счет

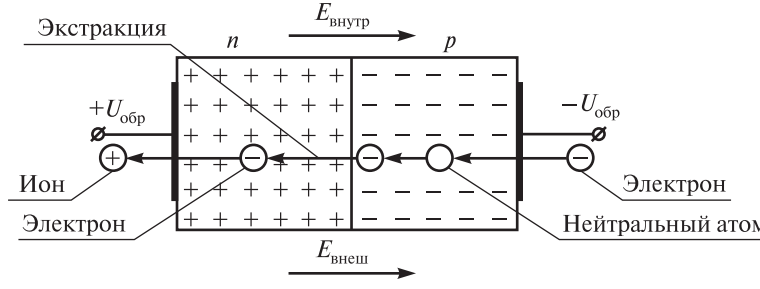



Рис. 1.43. Модель *p-n*-перехода при ударной ионизации

большого напряжения обратного смещения и уменьшению числа неподвижных отрицательных ионов. Уменьшение неподвижных отрицательных ионов ведет к уменьшению потенциального барьера и дифференциального сопротивления перехода. В соответствии с законом Ома при одновременном и пропорциональном увеличении силы тока и уменьшении дифференциального сопротивления *p-n*-перехода падение напряжения на *p-n*-переходе остается почти неизмененным ($U_{ст}$) (на рис. 1.41 участок от точки *а* до точки *б*).

С ростом температуры число свободных носителей зарядов в области перехода возрастает, а их подвижность и длина свободного пробега снижаются. Для того чтобы электрон на меньшей длине свободного пробега смог приобрести энергию, достаточную для ионизации, необходима еще большая напряженность поля перехода. Соответственно возрастает и напряжение лавинного пробоя (кривая *2* на рис. 1.41). Напряжение лавинного пробоя возрастает и при увеличении удельного сопротивления и концентрации носителей зарядов.

Туннельный пробой — разновидность электрического пробоя *p-n*-перехода — возникает под действием внешнего электрического поля в *p-n*-переходе с высоколегированными полупроводниками, имеющими малое удельное сопротивление базы ($\rho_б$).

В высоколегированных полупроводниках *n*-типа концентрация донорной примеси очень высока (до $10^{19}$ примесных атомов в 1 см$^3$; в обычном полупроводнике не превышает $10^{15}$ в 1 см$^3$). Полупроводники с таким содержанием примеси превращаются в полуметаллы и называются вырожденными полупроводниками; они обладают в большей степени свойствами металлов и в меньшей степени свойствами полупроводников. Электроны в вырожденных полупроводниках ведут себя, как и в металлах.

В полупроводнике *n*-типа при высокой концентрации электронов ширина зоны потенциального барьера, как и в полупроводнике *p*-типа, очень мала (приблизительно $\Delta x = 0{,}01$ мкм), меньше длины диффузионного пробега электрона. Вместе с тем концентрация неподвижных носителей зарядов очень велика, что указывает на высоту потенциального барьера (контактную разность потенциалов $U_0$), которая больше, чем энергия электронов ($\varepsilon$) в *p*-полупроводнике $U_0 = \varepsilon$ (рис. 1.44).

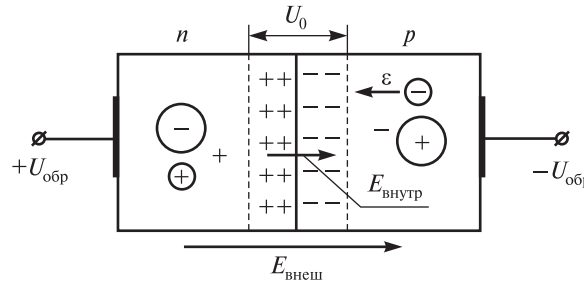



Рис. 1.44. Модель *p-n*-перехода при туннельным пробое

Напряженность внешнего электрического поля значительно меньше при туннельном пробое, чем при лавинном пробое.

Явление туннельного пробоя можно объяснить с помощью квантово-механических представлений и зонной теории. Энергетическая валентная зона *p*-полупроводников перекрывается зоной проводимости *n*-полупроводника из-за большой концентрации носителей зарядов (рис. 1.45). Энергетическая диаграмма тонкого *p-n*-перехода в отсутствие внешнего напряжения приведена на рис. 1.46. Из нее видно, что дно зоны проводимости *n*-области располагается ниже потолка валентной зоны *p*-области.

При этом, вопреки законам классической механики, существует возможность перехода электронов проводимости из *n*-области на свободные уровни (дырки) валентной зоны *p*-области, а валентных электронов из *p*-области в зону проводимости *n*-области без изменения их энергии. На рис. 1.46 это обозначено стрелками. Поскольку переходы электронов происходят без преодоления потенциального барьера, как бы по «туннелю», они и названы *туннельными*.

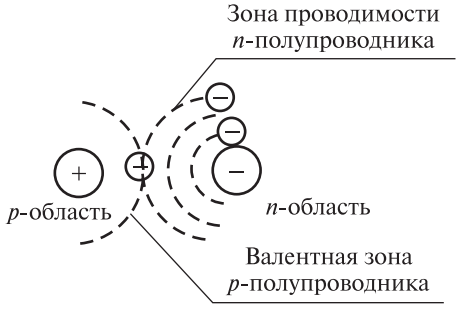



Рис. 1.45. Модель перекрытия зон в *p-n*-перехода при туннельном эффекте

В отсутствие внешнего напряжения движение электронов через *p-n*-переход в обоих направлениях уравновешено и результирующий ток туннельного эффекта равен ну-

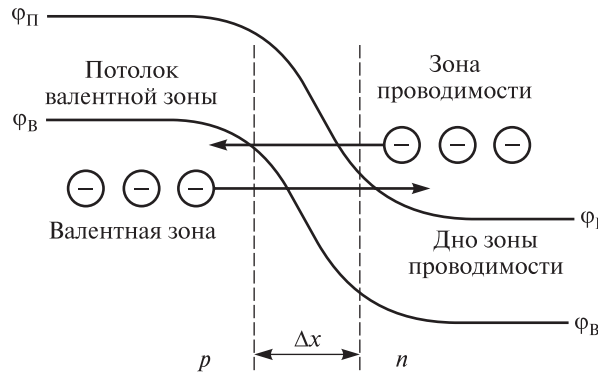



Рис. 1.46. Энергетическая диаграмма туннельного перехода электронов

лю. При включении внешнего напряжения обратного смещения (рис. 1.47) составляющая электронного тока из *p*-области превышает составляющую электронного тока из *n*-области.

Это достигается за счет сил внутреннего и внешнего электрических полей, действующих согласованно для электронов *p*-полупроводника. При высокой концентрации примесей возрастает вероятность появления электронов в зоне проводимости *n*-полупроводника и дырок в валентной зоне *p*-полупроводника. Высокое напряжение обратного смещения вместе с сильным внутренним полем ускоряет

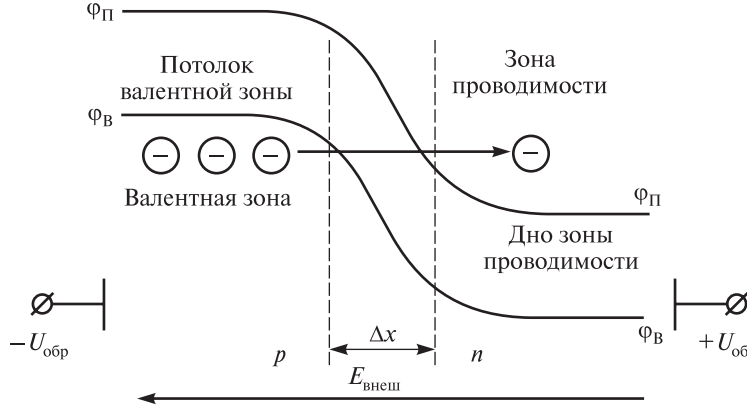



Рис. 1.47. Энергетическая диаграмма при туннельном пробое *p*-*n*-перехода

процесс рекомбинации основных носителей зарядов и экстракцию неосновных носителей зарядов — электронов из *p*-полупроводника в *n*-полупроводник. В *n*-полупроводнике электроны попадают в зону проводимости атома, которая перекрывается с валентной зоной *p*-полупроводника. В зоне проводимости *n*-полупроводника для них имеется достаточно много места, так как основные носители заряда рекомбинированы ионами внешнего источника напряжения.

По мере заполнения зоны проводимости вблизи приконтактного слоя *n*-области происходит частичная точечная компенсация (электроны подходят близко к неподвижным положительным ионам приконтактного слоя, не вступая в процесс рекомбинации, так как все парные ковалентные связи у положительных неподвижных ионов заполнены и в данной точке суммарный заряд равен нулю).

Однако надо отметить, что точечная компенсация существует непродолжительное время, так как вблизи приконтактного слоя *n*-полупроводника за счет внешнего поля уменьшается концентрация электронов и экстрагированные электроны, находящиеся в зоне проводимости *n*-полупроводника, совершают диффузию в глубину полупроводника. Процесс диффузии ускоряется и внешним полем источника смещения.

Таким образом, в электронно-дырочном переходе течет обратный ток без увеличения ширины потенциального барьера. Сила туннельного тока в основном зависит от концентрации примесей и мало зависит от приложенного напряжения, которое составляет примерно 2—7 В и пропорционально толщине *p*-*n*-перехода $U_{\text{обр пробой}} = E_{\text{обр см}}\Delta x$, где $\Delta x$ — толщина *p*-*n*-перехода (кривая *3* на рис. 1.41).

Повышение температуры, так же как и рост концентрации примесей, вызывает снижение напряжения туннельного пробоя (кривая *4* на рис. 1.41).

В приконтактной области *p*-полупроводника также создается пониженная концентрация носителей зарядов, но за счет внешнего поля она заполняется электронами, которые вновь совершают туннельный проход.

Тепловой пробой возникает при значительно более низких обратных напряжениях, когда не обеспечивается необходимый отвод тепла от электронно-дырочного перехода. При увеличении обратного напряжения резко возрастают процесс рекомбинации основных

носителей зарядов в электронно-дырочном переходе и выделение тепловой энергии, а также рост ширины потенциального барьера. Сопротивление слоя потенциального барьера *p-n*-перехода значительно превышает сопротивление *p*- и *n*-областей полупроводника. Поэтому на потенциальном барьере падает основная часть обратного напряжения, влияющая на увеличение выданной тепловой энергии. Это легко доказать на основании закона Джоуля—Ленца $Q = I^2R\Delta t$, приведя его к виду $Q = U^2/R\Delta t$. Из формулы видно, что увеличение напряжения на участке цепи приводит к нагреву этого участка. Если это тепло не отводить от *p-n*-перехода, то возникает процесс термогенерации пар носителей зарядов, что ведет к дальнейшему увеличению обратного тока. По закону Джоуля—Ленца это также ведет к дальнейшему нагреву *p-n*-перехода.Такая взаимосвязь приводит к лавинообразному нарастанию температуры (на рис. 1.48 участок *аб*).

В результате процесса термогенерации, разрыва парных ковалентных связей, уменьшаются ширина потенциального барьера, сопротивление перехода и падение напряжения на переходе, но увеличивается число подвижных носителей зарядов. С ростом числа носителей зарядов и уменьшением сопротивления потенциального барьера резко возрастает обратный ток (на рис. 1.48 участок *бв*). Взаимосвязь между увеличением силы тока и ростом сопротивления потенциального барьера неоднозначна, т.е. неодинакова. Из-за этого резко спадает характеристика на участке *бв* (рис. 1.48).

Таким образом, физическая природа теплового пробоя связана с температурной зависимостью плотности мощности, рассеиваемой в полупроводниковом приборе, и часто такой пробой возникает в результате развития электрического пробоя.

При температуре, близкой к критической, *p-n*-переход теряет выпрямительные свойства, структура разрушается и полупроводниковый прибор выходит из строя. Тепловой пробой — основная причина невосстанавливаемых отказов полупроводниковых приборов.

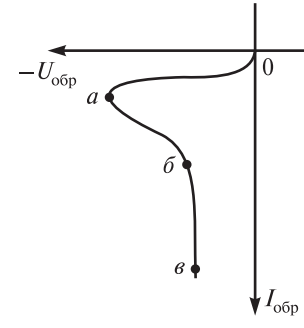



Рис. 1.48. Вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода при тепловом пробое

Тепловой пробой может возникнуть не на всем участке перехода, а в отдельных областях. Такие области возникают в *p-n*-переходе по нескольким причинам: неоднородность структуры, локальный нагрев и т.д. В этих локальных областях образуется так называемый шнур, или канал высокой проводимости, диаметром несколько микрометров. Из-за малого объема шнура тепловой пробой может начаться в нем при малых обратных токах и напряжениях. Поэтому не допускается даже кратковременное превышение обратного напряжения на *p-n*-переходе по сравнению с предельно допустимым напряжением.

Напряжение теплового пробоя зависит от температуры окружающей среды, обратного тока $I_{обр}$ и условий отвода тепла. Чтобы избежать теплового пробоя *p-n*-перехода, необходимо прежде всего улучшить отвод тепла от него.

### *1.3.6. Емкости электронно-дырочного перехода*

Электронно-дырочный переход представляет собой двойной слой противоположных по знаку объемных зарядов, поэтому можно считать, что он обладает определенной емкостью. Один объемный слой зарядов находится в самом потенциальном барьере, где сосредоточены разноименные неподвижные заряды примесей, и называется *барьерной* емкостью. Другой объемный слой зарядов находится в примыкающих к переходу областях, где сосредоточены основные подвижные носители зарядов, разделенные между собой потенциальным барьером. Поскольку потенциальный барьер возник из-за процесса диффузии при соединении двух полупроводников с разной электропроводностью, то емкость называется *диффузионной*.

Барьерная емкость обусловлена объемными неосновными неподвижными зарядами примеси (акцепторной $Q_А$ и донорной $Q_Д$), сосредоточенными в двух тонких слоях, расположенных по обе стороны от границы электронно-дырочного перехода (рис. 1.49), что напоминает поверхностные заряды на обкладках конденсатора. Значение любой емкости, в том числе и барьерной, определяется по формуле

$$C_{бар} = \varepsilon\varepsilon_0 S_{p\text{-}n}/\Delta x_{p\text{-}n},$$

где $\varepsilon$ — диэлектрическая проницаемость полупроводника; $\varepsilon_0$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; $S_{p\text{-}n}$ — площадь соприкосновения пластин полупроводников; $\Delta x_{p\text{-}n}$ — толщина слоя потенциального барьера.

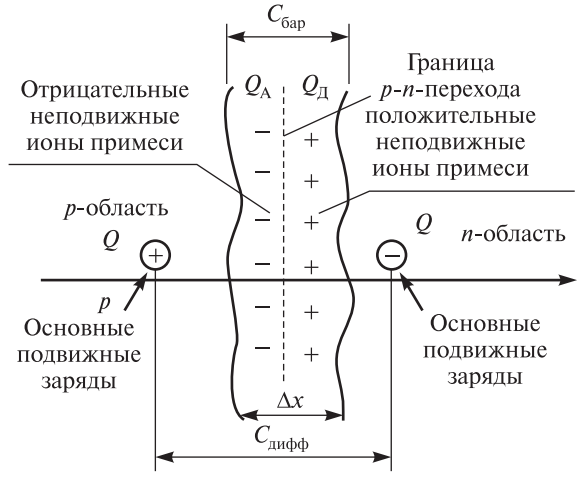



Рис. 1.49. Емкости $p$-$n$-перехода

Барьерная емкость $C_{бар}$ при $U = 0$ на переходе ($C_{бар} = C_{б0}$) составляет от 0,01 до 200—400 пФ. При увеличении напряжения обратного смещения значение барьерной емкости снижается. При обратном смещении толщина слоя потенциального барьера увеличивается ($\Delta x_{p\text{-}n}$) и поэтому уменьшается $C_{бар}$.

При увеличении напряжения прямого смещения толщина слоя потенциального барьера уменьшается и возрастает барьерная емкость.

Зависимость $C_{бар}$ от приложенного напряжения $C_{бар} = \varphi(U)$ называется вольт-фарадной характеристикой перехода (ВФХ) (рис. 1.50).

При некотором значении $U = U_к$, когда потенциальный барьер полностью разрушен, барьерная емкость отсутствует, т.е. теряет физический смысл при $\Delta x_{p\text{-}n} = 0$.

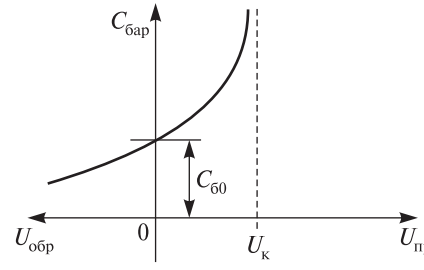



Рис. 1.50. Вольт-фарадная характеристика $p$-$n$-переход

Диффузионная емкость обусловлена перераспределением основных подвижных носителей зарядов в забарьерных областях

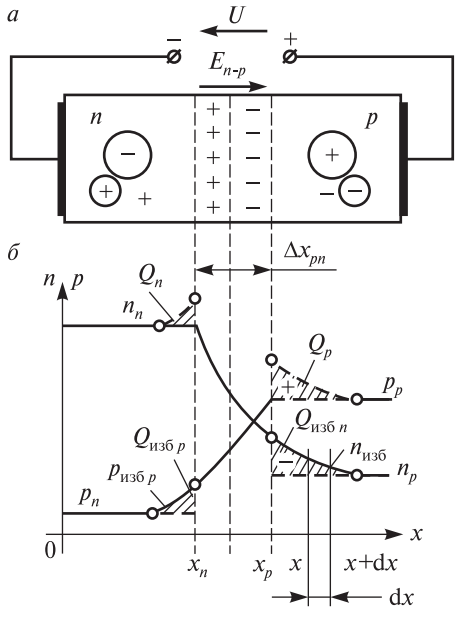



Рис. 1.51. Прямое включение *p-n*-перехода:
*а* — схема включения; *б* — распределение неравновесных концентраций носителей заряда

полупроводников, примыкающих к переходу $Q_n$ и $Q_p$ (рис. 1.49).

При прямом смещении *p-n*-перехода (рис. 1.51, *а*) в *p*- и *n*-областях накапливаются неосновные инжектированные избыточные носители заряда — дырки ($p_{\text{изб}}$) в *n*-полупроводнике, которые создают объемный положительный заряд $Q_{\text{изб}\,p}$, и электроны ($n_{\text{изб}}$) в *p*-полупроводнике, которые создают объемный отрицательный заряд $Q_{\text{изб}\,n}$ (рис. 1.51, *б*). Эти заряды притягивают и удерживают противоположные по знаку основные носители зарядов $Q_n$ и $Q_p$, концентрация которых вблизи перехода повышается. Повышение концентрации основных носителей зарядов зависит от числа инжектированных зарядов $Q_{\text{изб}}$, что влияет на величину диффузионной емкости. Это видно из формулы

$$C_{\text{дифф}} = Q_{\text{изб}}/U.$$

Избыточные заряды существуют недолго, так как в дальнейшем они рекомбинируются с основными носителями зарядов. Поэтому диффузионная емкость зависит от времени жизни неосновных носителей зарядов, т.е. их движения — тока в переходе.

Таким образом, диффузионная емкость зависит от значения прямого тока в переходе, времени свободного движения носителей зарядов — их жизни — и ширины *p-n*-перехода.

С увеличением напряжения прямого смещения диффузионная емкость возрастает и может достигнуть нескольких микрофарад. Чем больше время жизни неосновных носителей зарядов, тем дольше существует избыточный заряд и больше диффузионная емкость.

При обратном смещении *p-n*-перехода инжекция основных носителей зарядов прекращается, понижается концентрация их в объемах полупроводников за потенциальным барьером и диффузионная емкость стремится к нулю ($C_{\text{дифф}} = 0$).

В общем случае полная емкость *p-n*-перехода равна сумме барьерной и диффузионной емкостей $C_{p\text{-}n} = C_{\text{бар}} + C_{\text{дифф}}$.

Из вышесказанного можно сделать следующий вывод: при прямом смещении перехода преобладающее значение имеет диффузионная емкость ($C_{\text{дифф}}$), так как барьерная емкость при некотором значении $U = U_{\text{к}}$ теряет смысл, а при обратном — барьерная, так как $C_{\text{дифф}} = 0$.

### *1.3.7. Специальные виды электрических переходов. Металл—полупроводник*

В переходах металл—полупроводник возникают явления, связанные с разностью работ выхода электронов из металла и полупроводника. Под работой выхода электронов понимают энергию, необходимую для выхода электронов из твердого тела.

При создании контакта металла и полупроводника возникает диффузия электронов из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода. При этом происходит перераспределение зарядов, которое создает электрическое поле и контактную разность потенциалов в приконтактном слое.

В зависимости от типа электропроводности полупроводника и значений работы выхода контактирующего металла в полупроводнике возникает обедненный, инверсный или обогащенный слой.

Так, при контакте металла с *n*-полупроводником, у которого работа выхода меньше, чем у металла, электроны из зоны проводимости *n*-полупроводника будут переходить в металл. В результате металл заряжается отрицательно, а в обедненной приконтактной области *n*-полупроводника остаются нескомпенсированные положительные заряды ионов донорной примеси. В приконтактном слое возникает электрическое поле, которое будет препятствовать дальнейшему процессу диффузионного перехода электронов в металл. Образовавшийся запирающий слой расположен в основном в полупроводнике (неподвижные заряды). Если к такому переходу подключить внешнее напряжение, то переход будет обладать выпрямительными свойствами, т.е. пропускать ток в одном направлении.

Аналогичный переход с выпрямительными свойствами можно получить при контакте металла с *p*-полупроводником, работа выхода у которого выше, чем у металла. Электроны из металла будут переходить в *p*-полупроводник и рекомбинироваться с дырками. Концентрация дырок в *p*-полупроводнике в приконтактном слое уменьшается и нарушится электронейтральность. В приконтактном слое *p*-полупроводника останутся нескомпенсированные отрицательно заряженные ионы акцепторной примеси, а в металле с уходом электронов в приконтактном слое преобладают положительные заряды. В результате у границ контакта останутся объемные заряды и возникает контактная разность потенциалов. Образовавшееся электрическое поле будет препятствовать дальнейшему движению электронов из металла в *p*-полупроводник и способствовать переходу неосновных носителей зарядов (электронов) из полупроводника *p*-типа в металл. Если к такому переходу подключить внешнее напряжение, переход будет обладать выпрямительными свойствами, т.е. пропускать ток в одном направлении.

В двух видах переходов — металл — *n*-полупроводник и металл — *p*-полупроводник — в полупроводнике образуется обедненный слой основных носителей зарядов.

Такие электрические переходы были исследованы в 1930-х гг. физиком Шоттки, и их называют переходами Шоттки.

Из вольт-амперной характеристики перехода Шоттки следует, что напряжение прямого смещения такого перехода значительно меньше, чем у *p*-*n*-перехода, так как потенциальный барьер в нем меньше. Это указывает и на быстродействие перехода при прямом смещении, поэтому их можно применять для улучшения параметров полупроводниковых приборов в интегральных микросхемах.

Особый интерес представляют контактные соединения металл—полупроводник, когда работа выхода *n*-полупроводника больше, чем у металла, а работа выхода *p*-полупроводника меньше, чем у металла.

В этом случае при соединении металла с полупроводником *n*-типа электроны из металла переходят в *n*-полупроводник, обогащая его электронами — основными носителями заряда. В результате этого снижается удельное сопротивление приконтактного слоя.

Соединение металла с полупроводником *p*-типа в этом случае дает возможность электронам переходить из *p*-полупроводника в

металл и обогащать приконтактный слой полупроводника основными носителями зарядов — дырками. В таком переходе также снижается удельное сопротивление приконтактного слоя.

В переходах такого типа не существует потенциального барьера, что указывает на отсутствие выпрямительных свойств переходов, а низкое удельное сопротивление указывает на возможность их применения при создании выводов от полупроводниковых областей. Поэтому такие переходы называются *омическими* с обогащенным слоем основных носителей зарядов в полупроводниках. Подключение напряжения смещения изменяет лишь степень обогащения приконтактных областей основными носителями заряда.

Особый вид перехода представляет случай, когда в контакте с металлом находится полупроводник *p*-типа, у которого работа выхода во много раз больше, чем у металла. В этом случае на границе приконтактного слоя полупроводника *p*-типа остается слой нескомпенсированных электронов, а за ним обедненный слой отрицательных неподвижных ионов — потенциальный барьер. Нескомпенсированные электроны образуют также инверсный слой. При контакте с металлом *n*-полупроводника, у которого работа выхода во много раз меньше, чем у металла, также создаются инверсный слой на границе *n*-полупроводника и за ним обедненный слой — потенциальный барьер.

Действительно, при таком соединении электроны *n*-полупроводника, переходящие в металл из приграничного слоя *n*-полупроводника, оставляют слой фиктивно подвижных зарядов — дырок, которые не могут быть рекомбинированы встречным движением электронов из металла из-за малой работы выхода *n*-полупроводника. В результате в полупроводнике *n*-типа возникает инверсный обедненный электронами *p*-слой, а в металле приконтактный слой заряжен отрицательно, что создает разность потенциалов в приконтактном слое, т.е. потенциальный барьер.

Такие контактные соединения обладают выпрямительными свойствами за счет обедненного слоя потенциального барьера в полупроводнике, что требует большого напряжения прямого смещения и уменьшения напряжения обратного смещения.

Электронно-электроннные ($n^+$-$n$) и дырочно-дырочные ($p^+$-$p$) переходы не обладают вентильными свойствами, так как не имеют

потенциального барьера и используются при формировании контактных соединений — выводов от полупроводниковых структур.

Переходы *n*-*i* и *p*-*i* представляют собой промежуточный вариант между $p^+$-*p* и $n^+$-*n* и обычным *p*-*n*-переходом. Эти переходы имеют большую толщину, но малую ширину потенциального барьера по сравнению с *p*-*n*-переходом.

Гетеропереходы позволяют создать переход между двумя полупроводниками с разной шириной запрещенной зоны, где возможна односторонняя инжекция при подключении напряжения прямого смещения, в отличие от гомогенного *p*-*n*-перехода.

# Глава 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

## 2.1. Общие сведения и классификация полупроводниковых диодов

Полупроводниковым диодом называется двухэлектродный полупроводниковый прибор с одним электрическим *p-n*-переходом и двумя выводами для подключения в схему. Действие полупроводникового диода обусловлено свойствами либо электронно-дырочного перехода, либо контакта металл—полупроводник (диоды Шоттки), либо гетероперехода, либо других видов переходов.

Наибольшее распространение получили полупроводниковые диоды, работа которых основана на использовании *p-n*-перехода. Обычно полупроводниковые диоды имеют несимметричные электронно-дырочные переходы. Одна область полупроводника (с более высокой концентрацией примесей) называется *эмиттером*, а другая (с более низкой концентрацией примесей) — *базой*. Эмиттер (от лат. *emitto* — выпускаю) — область, инжектирующая заряды, а база — область приема зарядов.

При подключении напряжения прямого смещения к диоду разрушается потенциальный барьер и начинается инжекция из эмиттера в базу основных носителей зарядов. Вывод, к которому течет ток из внешней цепи при прямом смещении диода, называют *анодом*, а вывод, от которого течет ток во внешнюю цепь, — *катодом*.

Диоды классифицируются по следующим признакам.

1. По функциональному назначению:

– выпрямительные, импульсные, стабилитроны, стабисторы, варикапы, туннельные, фотодиоды, светодиоды, диоды Шоттки и другие, действия которых основано на различных свойствах переходов.

2. По соотношению линейных размеров перехода и его толщины:

– плоскостные диоды, в которых линейные размеры, определяющие площадь контактирующих поверхностей, больше толщины контактирующих поверхностей;

– точечные диоды, в которых линейные размеры, определяющие площадь контактирующих поверхностей, меньше толщины контактирующих поверхностей.

3. По мощности, в зависимости от пропускаемой силы тока при прямом смещении:
– малой мощности (менее 0,3 А);
– средней мощности (0,3—10 А);
– большой мощности (более 10 А).
4. По диапазону рабочих частот:
– низкочастотные;
– высокочастотные.
5. По материалу основного кристалла:
– германиевые (германий и его соединения);
– кремниевые (кремний и его соединения);
– соединения галлия (арсенид галлия);
– соединения индия (фосфид индия).

## 2.2. Устройство полупроводниковых диодов

Наибольшее применение получили полупроводниковые германиевые и кремниевые диоды, отличающиеся друг от друга конструктивным оформлением и размерами в зависимости от типа полупроводникового материала, номинального тока и напряжения. По конструктивному исполнению такие диоды бывают плоскостными и точечными. Плоскостные диоды изготавливаются на токи до нескольких ампер, а точечные — до нескольких миллиампер. В диодах малой мощности полупроводниковый кристалл, в котором одним из технологических методов выполнен электрический переход, помещается в герметический корпус из металла, стекла, керамики (корпусное исполнение) или покрывается изолирующей смолой (бескорпусные диоды).

***Плоскостные диоды*** изготавливаются в виде пластины примесного полупроводника *n*-типа *7* (рис. 2.1), закрепленной на металлическом держателе (основании) *8*. Держатель представляет собой нижний контакт *p-n*-перехода, к которому приварен катодный вывод *11*. В пластинках *7* из германия или кремния методом сплавления или диффузии создается плоский по форме электронно-дырочный переход *9*. В плоскостных германиевых диодах, изготовляемых сплавным методом, для получения электронно-дырочного перехода *9* в

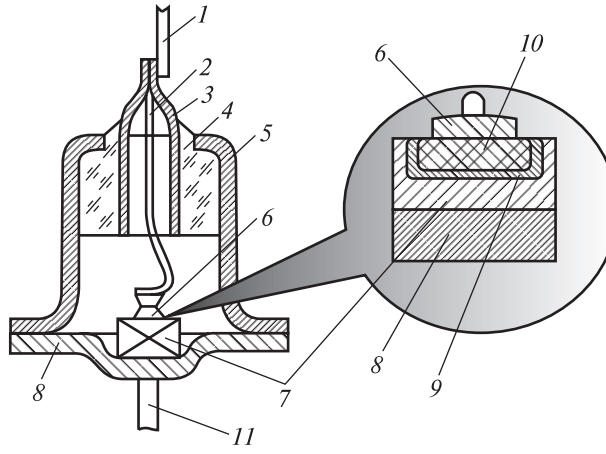



Рис. 2.1. Устройство маломощного плоскостного диода

пластину германия примесного полупроводника *n*-типа *7* добавляют каплю расплавленного индия, а затем нагревают. При нагревании плавящийся индий диффундирует в пластину основного полупроводника *7*, образуя в нем слой *10* с дырочной электропроводностью *p*-типа. Верхний контакт представляет собой массивную деталь *6*, способную пропускать значительные токи большого по площади *p-n*-перехода. Германиевая пластина *7* с *p-n*-переходом помещается в металлический корпус *5*, герметизированный сверху стеклянным проходным изолятором *4*, в который помещена трубка *3*. Через трубку *3* проходит внутренний вывод *2*, соединенный с пластиной *6* проводником *2* к наружному анодному выводу *1*. Наружную поверхность изолятора покрывают светонепроницаемым лаком, чтобы свет не проникал к кристаллу. В плоскостных кремниевых и германиевых диодах для получения электронно-дырочного перехода в пластину кремния примесного полупроводника *n*-типа вместо индия вплавляют алюминиевый столбик, который создает область кристалла с дырочной электропроводностью.

***В точечном диоде*** (рис. 2.2) полупроводниковый кристалл в виде тонкой пластины *n*-типа *7* покрывают тонким слоем металла и припаивают к металлическому кристаллодержателю *8*. Сверху в пластину кристалла *7* упирается острие контактной пружины *5* из вольфрамовой проволоки, заостренный конец которой покрыт сло-

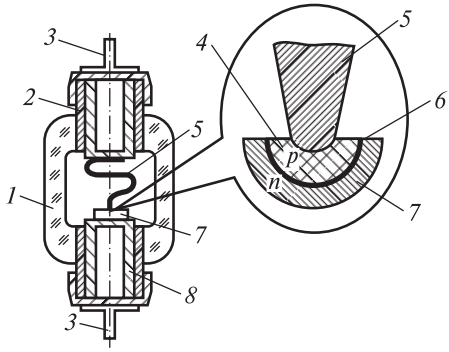



Рис. 2.2. Устройство маломощного точечного диода

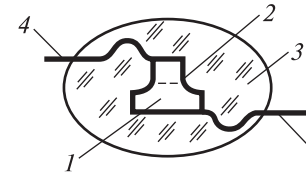



Рис. 2.3. Устройство бескорпусного маломощного диода

ем индия или алюминия. Этот слой является акцепторной примесью и обеспечивает формирование около заостренного конца полупроводника области *4* с дырочной электропроводностью — *p*-области в кристалле. Между *p*- и *n*-полупроводниками образуется электронно-дырочный переход *6* толщиной 10—12 мкм. Влажность и загрязнение снижают вентильные свойства *p-n*-перехода, поэтому диоды монтируются в стеклянном или металлическом корпусе *1*. Стеклянный корпус окрашивают для светозащиты *p-n*-перехода, так как действие света может увеличить обратный ток и привести к появлению фона переменного тока при освещении лампами дневного света. На концах стеклянного корпуса *1* установлены коваровые трубки *2* с выводами *3*. Кроме того, корпус защищает от механических повреждений и обеспечивает нормальную работу полупроводникового прибора в условиях вибрации, тряски и ударов.

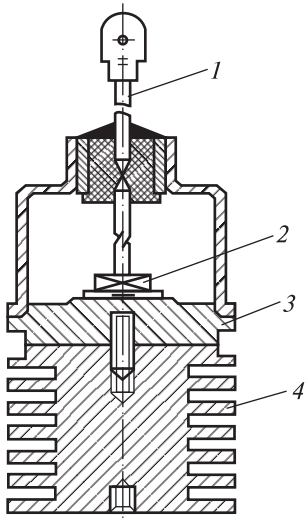



Рис. 2.4. Устройство плоскостного диода большой мощности с радиатором: *1* — токоотвод; *2* — кристалл; *3* — основание; *4* — радиатор

***В бескорпусном диоде*** (рис. 2.3) кремниевый кристалл *1*, покрытый изолирующей

пленкой *2* из $SiO_2$ (двуокись кремния), залит эпитаксиальной смолой *3*. На концах от кремниевого кристалла *1* сделаны выводы *4*.

Полупроводниковые диоды малой мощности изготавливают точечного типа, а большой мощности — плоскостного типа, и их снабжают радиаторами (алюминиевые, медные и др.) или принудительным воздушным или водяным охлаждением (рис. 2.4).

Выводы маркируют, изображая обозначение диода на корпусе прибора или на одном из ленточных выводов. При малых габаритных размерах диодов для маркировки используют цветовые коды — окраску концов корпуса у анодного и катодного выводов или метки в средней части корпуса. Анодный вывод обычно помечают красным цветом.

## 2.3. Система обозначений полупроводниковых диодов

Основой системы обозначений полупроводниковых диодов служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем (рис. 2.5). Эмиттер (анод) обозначен равносторонним треугольником, обозначающим полупроводниковую структуру *p*-типа, база (катод) обозначена отрезком линии к углу треугольника. Под углом 90° к базе через все элементы (база и эмиттер) проведена линия выводов базы и эмиттера. В обозначении полупроводниковых диодов допускается добавлять корпус, изображенный в виде окружности (корпус можно и не показывать).

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического

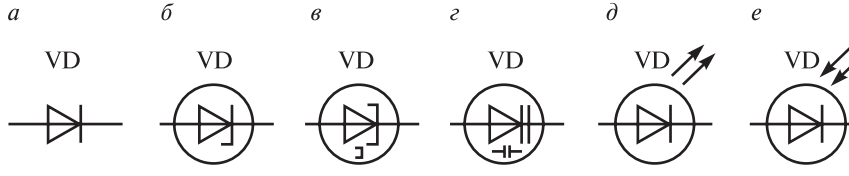



Рис. 2.5. Графическое изображение диодов:
*а* — выпрямительный, СВЧ, импульсный; *б* — стабилитрон; *в* — туннельный; *г* — варикап; *д* — светоизлучающий; *е* — фотодиод

обозначения и буквенно-числовой код обозначения полупроводникового диода, классифицирующий полупроводниковые диоды по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением указывается буквенно-символическое обозначение — символы: VD1, где V — полупроводниковый прибор, D — диод, номер 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Буквенно-числовой код в системе обозначений полупроводниковых диодов, классифицирующий полупроводниковые диоды по определенным признакам в справочниках, содержит определенную информацию о свойствах прибора и состоит из шести элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81.

*Первый элемент* — буква (для приборов широкого применения) или цифра (для приборов специального применения) указывает, на основе какого исходного полупроводникового материала выполнен диод: Г или 1 — германий и его соединения, К или 2 — кремний и его соединения, А или 3 — соединения галлия, И или 4 — соединения индия.

*Второй элемент* — буква, обозначающая подкласс или группу диодов по назначению: Д — выпрямительные, импульсные, универсальные; Ц — выпрямительные блоки; С — стабилитроны; В — туннельные, обращенные; В — варикапы; А — СВЧ-диоды.

Для обозначения наиболее характерных признаков прибора (их функциональные возможности) используются следующие цифры применительно к различным подклассам тиристоров:

Диоды (подкласс Д):

1 — выпрямительные диоды с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;

2 — выпрямительные диоды с постоянным или средним значением прямого тока от 0,3 до 10 А;

4 — импульсные диоды с временем восстановления обратного сопротивления более 500 нс;

5 — импульсные диоды с временем восстановления более 150 нс, но не свыше 500 нс;

6 — импульсные диоды с временем восстановления 30—150 нс;

7 — импульсные диоды с временем восстановления 5—30 нс;

8 — импульсные диоды с временем восстановления 1—5 нс;

9 — импульсные диоды с эффективным временем жизни неосновных носителей заряда менее 1 нс.

Выпрямительные столбы и блоки (подкласс Ц):

1 — столбы с постоянным или средним значением прямого тока не более 0,3 А;

2 — столбы с постоянным или средним значением прямого тока от 0,3 до 10 А;

3 — столбы с постоянным или средним значением прямого тока более 0,3 А;

4 — блоки с постоянным или средним значением прямого тока от 0,3 до 10 А.

Варикапы (подкласс В):

1 — подстроечные варикапы;

2 — умножительные варикапы.

*Третий элемент* — цифра, определяющая основной признак диода (назначение или принцип действия).

*Четвертый элемент* — цифры, определяющие порядковый номер разработки (двузначное число от 01 до 99 или трехзначное число от 01 до 999, у стабилитронов — номинальное напряжение стабилизации).

*Пятый элемент* — буква, показывающая деление технологического типа на группы по параметрам.

*Шестой элемент* — буква, показывающая деление технологического типа на группы по параметрам.

Имеются дополнительные элементы обозначения. Цифра обозначает модификацию прибора. Буква С после второго элемента обозначает сборку однотипных диодов, не соединенных или соединенных между собой в одном корпусе.

Все основные параметры полупроводниковых диодов и их назначение приведены в справочной литературе.

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* Тиристор КД226А: К — кремниевый, Д — выпрямительный диод, 2 — выпрямительный диод с постоянным или средним значением прямого тока от 0,3 до 10 А; 26 — порядковый номер разработки, А — в пластмассовом корпусе с гибкими выводами.

## 2.4. Выпрямительные диоды

Выпрямительные полупроводниковые диоды предназначены для преобразования переменного тока низкой частоты (менее 50 кГц) в постоянный ток. Диапазоны токов этих широко используемых на железнодорожном транспорте приборов весьма велик — от десятков миллиампер до десятков ампер.

Основу структуры выпрямительного диода составляет электронно-дырочный переход. Принцип работы выпрямительных диодов основан на свойствах односторонней проводимости электронно-дырочных переходов. Для получения большого прямого тока увеличивают площадь *p-n*-перехода, поэтому многие выпрямительные диоды имеют плоскостные *p-n*-переходы. Однако с увеличением площади перехода возрастает обратный ток, снижая допустимое обратное напряжение. Кроме того, увеличивается барьерная емкость, что уменьшает частоту переменного напряжения ($f_{max}$), уменьшается дифференциальное сопротивление при прямом смещении и возрастает прямой ток.

В качестве выпрямительных диодов используют сплавные, эпитаксиальные и диффузионные диоды, выполненные на основе несимметричных *p-n*-переходов.

В выпрямительных диодах применяются также *p-i*-переходы, которые позволяют снизить напряженность внутреннего поля потенциального барьера и повысить значение напряжения обратного смещения, при котором начинается пробой.

Допустимое обратное напряжение характеризует электрическую прочность диода, от которой зависит надежность. Увеличение допустимого обратного напряжения достигается выбором исходного материала монокристалла полупроводника. Для этой цели предпочтительны кремний и его соединения, арсенид галлия и эпитаксиальные структуры *p-i*, *n-i*, в которых увеличивается пробивное напряжение.

Эксплуатационные свойства выпрямительных диодов характеризуют их следующие параметры:

1. $U_{обр\ max}$ — максимально допустимое постоянное обратное напряжение диода, которое может выдержать диод в течение длительного времени без нарушения его работоспособности; превышение данного напряжения ведет к сбою.

2. $I_{\text{обр max}}$ — максимальное значение постоянного обратного тока диода, очень близкое к пробою.

3. $U_{\text{обр сред}}$ — среднее значение обратного напряжения за период.

4. $I_{\text{обр сред}}$ — среднее значение обратного тока за период.

5. $U_{\text{пр max}}$ — максимальное значение напряжения на диоде при прямом смещении.

6. $I_{\text{пр max}}$ — максимальный ток, протекающий при напряжении прямого смещения, не допускающий нагрев диода и большого падения напряжения.

7. $U_{\text{пр сред}}$ — среднее значение напряжения прямого смещения за период.

8. $I_{\text{пр сред}}$ — среднее значение прямого тока за период.

9. $P_{\text{max}}$ — максимальная рассеиваемая мощность на диоде при работе в цепях постоянного тока при прямом и обратном смещениях.

10. $P_{\text{сред}}$ — средняя рассеиваемая мощность за период.

11. $r_{\text{диф}}$ — дифференциальное сопротивление переменному току; при прямом смещении $r_{\text{пр диф}}$ и при обратном смещении $r_{\text{обр диф}}$.

12. $r_{\text{д}}$ — статическое сопротивление диода постоянному току при прямом смещении $r_{\text{пр д}}$ и при обратном смещении $r_{\text{обр д}}$.

## 2.5. Импульсные диоды

Импульсным диодом называют полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы. Основу структуры импульсного диода, как и всех типов диодов, составляет электронно-дырочный переход. От выпрямительных диодов они отличаются малыми емкостями *p-n*-перехода и рядом параметров, определяющих переходные процессы в диоде. Уменьшенная емкость достигается за счет площади *p-n*-перехода или толщины базы, а также использования переходов Шоттки. Поэтому допустимая мощность рассеивания таких диодов мала.

Для импульсных диодов характерен процесс быстрого перехода из одного переходного процесса в другой. Различают два вида переходных процессов: при включении диода в прямом направлении — установление прямого напряжения смещения; при переключении

диода из прямого направления в обратное — восстановление обратного сопротивления.

Из-за малой толщины потенциального барьера перехода времени на его разрушение и восстановление требуется немного.

Эксплуатационные свойства импульсных диодов характеризуются следующими параметрами:

1. Общие параметры, характерные для выпрямительных диодов.

2. $U_{\text{пр max}}$ — импульсное максимальное прямое напряжение.

3. $I_{\text{пр max}}$ — импульсный максимальный прямой ток.

4. $C_{\text{д}}$ — общая емкость диода (барьерная и диффузионная).

5. $t_{\text{уст}}$ — время установления падения напряжения при прямом напряжении смещения на диоде (от $U_{\text{пр}}$ до $U_{\text{уст}}$).

6. $t_{\text{вос}}$ — время восстановления потенциального барьера в переходе, т.е. время установления его обратного сопротивления.

Импульсные полупроводниковые диоды применяются главным образом в логических элементах и в схемах управления запоминающих устройств ЭВМ.

В качестве импульсных диодов используются диоды с барьером Шоттки, отличающиеся высоким быстродействием ($t_{\text{уст}}$ и $t_{\text{вос}}$), что является одним из показателей работы импульсных диодов.

Устройство диода Шоттки показано на рис. 2.6. На пластину низкоомного кремния (область $n^+$) наращивается тонкий (несколько микронов) эпитаксиальный слой более высокоомного кремния с концентрацией примесей $10^{16}$ см$^{-3}$ (область $n$). На поверхность этого слоя методом воздушного испарения осаждается слой металла. Площадь перехода очень мала и барьерная емкость не превышает 1 пФ. В качестве полупроводника используют кремний (Si), а в качестве металлического электрода — молибден, золото, алюминий и другие металлы, работа выхода электронов у которых больше, чем у кремния. Особенность физических процессов в диоде Шоттки — отсутствие инжекции неосновных носителей — дырок в базу (кремний $n$-Si). Таким образом, в базе не происходит накопление

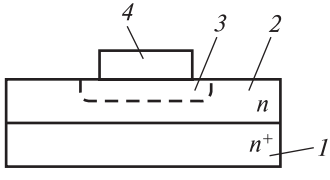



Рис. 2.6. Устройство диода Шоттки:
*1* — низкоомный $n^+$-Si; *2* — эпитаксиальный слой более высокоомного $n$-Si; *3* — запирающий слой; *4* — металлический контакт

дырок, что снижает время переходного процесса для создания условия пропускания тока через переход. В этих переходах значительно снижена барьерная емкость ($C_{бар}$). При подключении напряжения прямого смещения ток создается движением электронов из полупроводника в металл.

### *Схемы включения диодов*

Диоды, обладающие свойством односторонней проводимости, широко применяются в различных схемных решениях. Диоды могут применяться как в электрических цепях постоянного тока, так и в цепях переменного тока. В цепях постоянного тока диоды обычно выполняют функции ключевых элементов, а в цепях переменного тока как элементы, обеспечивающие преобразование переменного напряжения в постоянное.

Заданные функции для каждого вида диода выполняются за счет особых условий формирования электронно-дырочных переходов, которые обеспечивают необходимые эксплуатационные свойства (параметры) для каждой структуры перехода (соответственно и диода). Как правило, все эксплуатационные параметры для каждой группы диодов рассчитываются при проектировании до формирования структуры электронно-дырочных переходов, а на выходном этапе создания готового изделия проводятся технические проверки и электрические испытания по эксплуатационным показателям. Электрические параметры проверяются обычно по постоянному току при включении диодов под напряжение прямого смещения и напряжение обратного смещения. Схемы для исследования свойств и эксплуатационных электрических параметров диодов приведены на рис. 2.7.

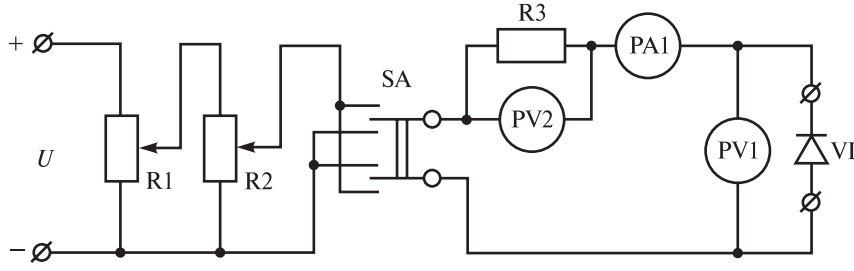



Рис. 2.7. Схемы для снятия вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов при прямом и обратном напряжениях смещении

Для исследования диода при прямом смещении на анод подключают положительный полюс источника питания, а к катоду — отрицательный. При исследовании диодов при обратном смещении к аноду подключают «минус», а к катоду «плюс» источник питания. Переменные резисторы в схемах исследования предназначены для изменения подключенных напряжений, что позволяет исследовать изменения тока в переходе при изменении напряжения и определить эксплуатационные параметры.

При исследовании параметров диодов строят вольт-амперную характеристику, по которой определяются основные эксплуатационные параметры. Необходимо отметить, что вольт-амперная характеристика диода несколько отличается от аналогичной характеристики *p-n*-перехода, так как реальный диод подвергается многим дополнительным воздействиям (корпус, магнитные и электрические взаимодействия и др.), поэтому вольт-амперную характеристику диода называют реальной вольт-амперной характеристикой.

Практические схемы включения диодов во многом отличаются от схем исследовательского характера. Это связано с тем, что при прямом смещении *p-n*-перехода диода дифференциальное сопротивление диода практически равно нулю и через диод создается короткое замыкание источника питания. В этом случае в схему включают нагрузку, например резистор или другой элемент, имеющий необходимое сопротивление (R3 на рис. 2.7), защищающее источник питания от короткого замыкания. Определенные требования предъявляются также и при обратном смещении, когда напряжение обратного смещения диода оказывается меньше, чем напряжение источника питания. Таким образом, в различных вариантах включения диодов в схемных решениях требуется выполнять определенные дополнительные схемы включения как самих диодов, так и других элементов.

В цепях постоянного тока диоды, выполняющие функции ключа, осуществляют бесконтактное соединение (включение) и разрыв (выключение) электрической цепи при определенных сигналах на входах. Рассмотрим схемное включение диода в цепи постоянного тока (рис. 2.8). В цепях постоянного тока в основном применяются импульсные диоды. На рис. 2.8, *а*, показано включение диода для управления режимом открытия от положительного потенциала, а на рис. 2.8, *б*, — для отрицательного потенциала. В схеме, работающей на открытие от положительного потенциала (рис. 2.8, *а*),

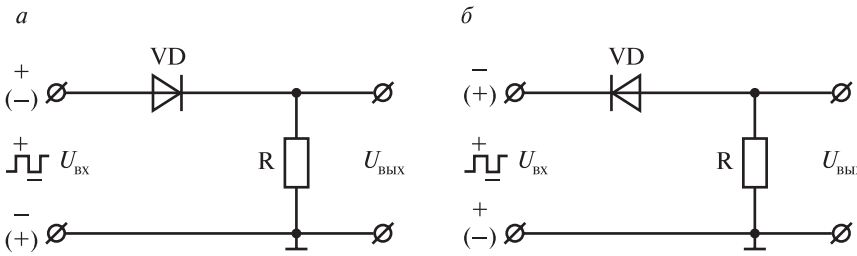



Рис. 2.8. Включение диода в ключевых схемах для открытия импульсным сигналом

при подключении напряжения к аноду диода подается «плюс», а к катоду — «минус», и диод получает прямое смещение. В этом случае диод открывается, и через него протекает ток по нагрузочному резистору. При обратном смещении, когда к аноду подключен «минус», а к катоду «плюс», диод закрыт и ток через нагрузку не протекает.

В цепях переменного тока применяются выпрямительные диоды, которые являются основными элементами схем выпрямительных устройств. Выпрямительные устройства, построенные на выпрямительных диодах, предназначены для преобразования переменного напряжения в постоянное. Основным принципом включения выпрямительных диодов в схемах выпрямления является пропускание тока в одном направлении. Как известно, переменный ток характеризуется периодическим изменением направления движения электронов в электрической цепи, а при постоянном токе направление движения электронов неизменно. Поскольку диоды обладают свойством односторонней проводимости, то при их включении в электрической цепи направление движения электронов будет неизменным, т.е. в одном направлении.

В выпрямительных схемах очень важно соблюдать условия соответствия эксплуатационных параметров выпрямительных диодов с параметрами, которыми должна обладать схема, обеспечивающая работу в заданном диапазоне напряжения на входе и напряжения и тока на выходе.

В ряде схем выпрямителей требования к диапазону среднего значения прямого тока ($I_{пр\ сред}$), обратному напряжению ($U_{обр\ сред}$), или к обоим параметрам одновременно превышают номинальные

значения параметров существующих выпрямительных диодов. В этих случаях задача решается параллельным или последовательным соединением, а при необходимости и параллельно-последовательным соединением нескольких однотипных диодов.

Параллельное соединение диодов предназначено для увеличения суммарного прямого тока на выходе выпрямителя ($I_{\text{пр}}$), когда прямой ток отдельного диода меньше необходимого тока на выходе выпрямителя (рис. 2.9, *а*).

Число параллельно соединенных диодов определяется по формуле $n = \dfrac{I_{\text{пр max}}}{I_{\text{пр сред}} K_{\text{з}}}$, где $K_{\text{з}}$ — коэффициент запаса, учитывающий неравномерность распределения тока через диоды, перегрузку, условия охлаждения, и равен обычно 1,2—1,4.

Последовательное соединение диодов предназначено для увеличения суммарного допустимого обратного напряжения на входе схемы ($U_{\text{вх max}}$), когда допустимое обратное напряжение диода ($U_{\text{обр сред}}$) недостаточно (рис. 2.9, *б*), и число последовательно соединенных диодов определяется по формуле $n = \dfrac{U_{\text{вх max}} K_{\text{з}}}{U_{\text{обр сред}}}$.

При построении схем с параллельным или последовательным соединением диодов необходимо подбирать диоды с одинаковыми эксплуатационными параметрами, чтобы избежать неравномерности распределения токов и напряжений между отдельными диодами. Неравномерность распределения тока и напряжения из-за неполного равенства параметров однотипных диодов можно устранять дополнительными схемными решениями, одно из которых показано на рис. 2.9 (последовательное и параллельное соединение резисторов с диодами). В схеме с последовательным соединением диодов включают шунтирующие резисторы (R1, R2, R3 на рис. 2.9, *б*) параллельно каждому диоду сопротивлением порядка 100 кОм, но меньше обратного сопротивления диода ($r_{\text{обр диф}}$), и последовательную цепь из шунтирующих резисторов и конденсаторов R4 и C1, R5 и C2, R6 и C3 на рис. 2.9, *б*). При параллельном соединении диодов включают балластный резистор (R1, R2, R3 на рис. 2.9, *а*) последовательно с диодом для выравнивая отклонений в значениях сопротивления диодов при прямом смещении ($r_{\text{пр диф}}$) сопротивлением порядка 3—5 Ом.

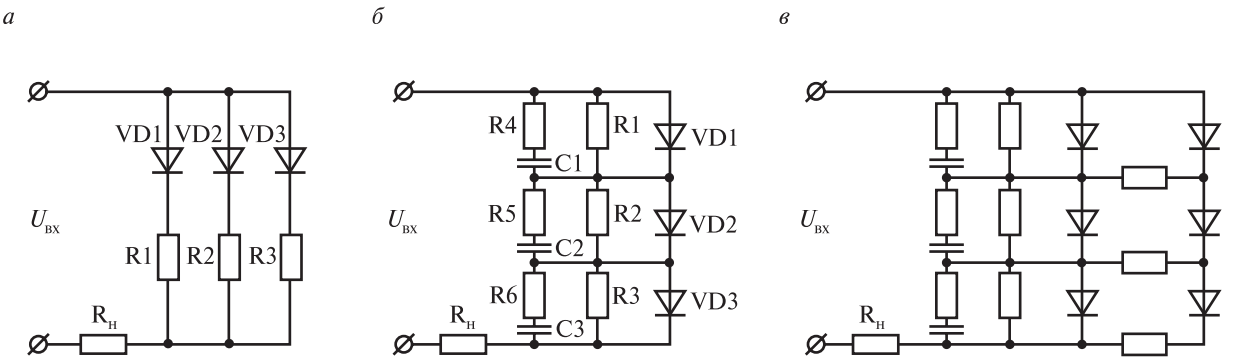



Рис. 2.9. Построение схем соединений диодов для установки эксплуатационных параметров групп диодов в ветвях выпрямительных схем

При одновременном решении задачи по току и напряжению строятся схемы параллельно-последовательного соединения выпрямительных диодов (рис. 2.9, *в*).

В отдельных случаях рассмотренные схемные соединения диодов применяются и для импульсных диодов, когда в цепях постоянного тока возникают аналогичные процессы согласования параметров диодов с параметрами схемотехнических решений.

## 2.6. Стабилитроны и стабисторы

Стабилитроны и стабисторы имеют на своих вольт-амперных характеристиках участки, где напряжение почти постоянно при значительном изменении тока. Их применяют для стабилизации напряжения, а также в качестве опорных элементов в схемах, где необходимы фиксированные значения напряжения при изменении значения силы тока. Поэтому эти приборы иногда называют опорными диодами.

Стабилитрон — это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя при обратном смещении слабо изменяется при резком увеличении тока.

Стабистор — это полупроводниковый прибор, на котором падение напряжения при прямом смещении слабо изменяется при резком увеличении тока.

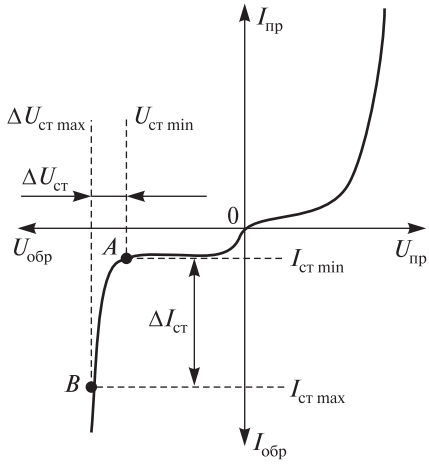



Рис. 2.10. Вольт-амперная характеристика стабилитрона при стабилизации под обратным смещением

Для работы в стабилитронах используют пологий участок вольт-амперной характеристики обратного тока диода (участок *AB* на рис. 2.10), в пределах которого резкие изменения обратного тока сопровождаются весьма малыми изменениями обратного напряжения (от $U_{ст\ max}$ до $U_{ст\ min}$), т.е. $\Delta U_{ст}$ бесконечно мала при разбросе тока (от $I_{ст\ min}$ до $I_{ст\ max}$).

Пробивное напряжение диода является напряжением стабилизации, которое зависит от толщины *p-n*-перехода или от удельного сопротивления базы диода. Поэтому разные типы ста-

билитронов имеют различные напряжения стабилизации $U_{ст}$ (от 3 до 400 В).

Низковольтные стабилитроны (с напряжением $U_{ст} \le 8$ В) выполняют на основе сильнолегированного кремния с малым удельным сопротивлением. В них создается узкий *p-n*-переход с высокой напряженностью поля, при которой происходит туннельный пробой.

Высоковольтные стабилитроны (с напряжением $U_{ст} > 8$ В) изготовляют на основе слаболегированного кремния с высоким удельным сопротивлением. В них создается широкий *p-n*-переход с низкой напряженностью поля, при которой проходит лавинный пробой. Схема включения стабилитрона показана на рис. 2.11.

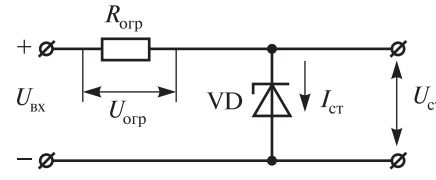



Рис. 2.11. Схема включения стабилитрона

Принцип действия стабилитрона основан на явлении электрического пробоя, связанного с протеканием обратного электрического тока без разрушения и наращивания ширины потенциального барьера *p-n*-перехода. В результате этого число неосновных носителей зарядов при лавинном пробое увеличивается за счет внешнего напряжения смещения и эти носители ускоряются суммарным внутренним и внешним полем, совершая процесс экстракции. При туннельном пробое неосновные носители зарядов, созданные за счет высокой концентрации зарядов, ускоряются большим внутренним и внешним полем, совершая беспрепятственный проход *p-n*-перехода.

Возрастающее число неосновных носителей зарядов увеличивает силу тока в *p-n*-переходе, однако из-за неизменного дифференциального сопротивления потенциального барьера ($r_{диф}$) падение напряжения остается постоянным. Исследуя схему (рис. 2.11) по второму закону Кирхгофа, необходимо соблюдать равенство подведенного напряжения к цепи и падение напряжения на отдельных участках цепи. Поскольку на $r_{диф}$ падение напряжения неизменно, необходимо включить дополнительный резистор для ограничения силы тока и соблюдения равенства $\sum U = \sum Ir$. Исходя из этого видно, что $U_{вх} = U_{ст} + U_{огр}$, т.е. избыток подведенного напряже-

ния падает на ограничительном резисторе ($R_{огр}$) $U_{вх} = I_{ст} r_{диф} + I_{ст} R_{огр}$.

Таким образом, ограничительный резистор $R_{огр}$ и стабилитрон VD, включенные последовательно, образуют делитель напряжения.

Эксплуатационные свойства стабилитронов характеризуют их параметры:

1. $U_{ст}$ — напряжение стабилизации, т.е. величина падения напряжения на стабилитроне при заданном токе в режиме пробоя ($I_{ст}$).

2. $I_{ст\ max}$ — максимальный ток стабилизации, определяющий начало электрического пробоя.

3. $I_{ст\ min}$ — минимальный ток стабилизации, ограничивающий тепловой пробой.

4. $r_{диф}$ — дифференциальное сопротивление стабилитрона в режиме электрического пробоя.

5. $\alpha_{ст}$ — температурный коэффициент напряжения (ТКН) стабилизации — относительное изменение напряжения стабилизации ($U_{ст}$) при изменении температуры окружающей среды; при туннельном пробое ТКН имеет отрицательное значение, так как с ростом температуры $U_{ст}$ уменьшается, а при лавинном пробое ТКН имеет положительное значение, так как с ростом температуры $U_{ст}$ увеличивается.

Для уменьшения $\alpha_{ст}$ и его влияния на величину $U_{ст}$ последовательно со стабилитроном включают диод при прямом смещении. С повышением температуры падение напряжения на диоде уменьшается, а на стабилитроне при лавинном пробое увеличивается; физический смысл компенсации температурного дрейфа напряжения стабилизации $U_{ст}$ состоит в том, чтобы при изменении температуры окружающей среды не изменялось $U_{ст}$. При положительном ТКН (лавинный пробой) при повышении температуры увеличивается число подвижных носителей зарядов в *p-n*-переходе стабилитрона и снижается их подвижность (это характерно в широких низколегированных *p-n*-структурах). Это явление ведет к увеличению пробивного напряжения. Если в этом случае включить последовательно со стабилитроном диод в прямом направлении, имеющий отрицательный ТКН, то в нем падение напряжения уменьшится. Таким образом, суммарное напряжение стабилизации остается неизменным (рис. 2.12): $U_{ст} = U_{обр} + U_{пр}$.

Такие стабилитроны представляют собой последовательное соединение *p-n*-перехода, работающего в режиме электрического пробоя (собственно стабилитрон), и *p-n*-переходов, смещенных в прямом направлении. Они называются прецизионными или термокомпенсационными стабилитронами.

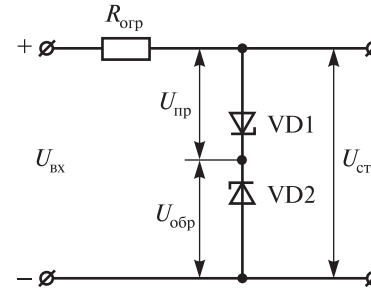



Рис. 2.12. Схема включения стабилитрона с диодом

Стабисторы — это диоды, в которых для стабилизации напряжения используется прямая ветвь вольт-амперной характеристики. В стабисторах использовано свойство электронно-дырочного перехода — стабильность падения напряжения при прямом смещении перехода. Это падение напряжения создается на потенциальном барьере при его разрушении точечной компенсацией. Так как величина барьера неизменна, то и неизменно его дифференциальное сопротивление, следовательно, и падение напряжения $U_{пр\ ст}$ (рис. 2.13).

Напряжение стабилизации стабилитрона очень мало (от 0,7 до 1,9 В). Оно определяется малым падением напряжения на диоде при прямом смещении.

Эксплуатационные свойства стабилитронов характеризуют их параметры:

1. $U_{ст}$ — напряжение стабилизации, равное контактной разности потенциала перехода, при понижении прямого смещения.

2. $I_{ст\ max}$ — постоянный максимальный прямой ток стабилизации.

3. $I_{ст\ min}$ — постоянный минимальный прямой ток стабилизации.

4. $\alpha_{ст}$ — температурный коэффициент напряжения (ТКН) стабилизации (отрицательный).

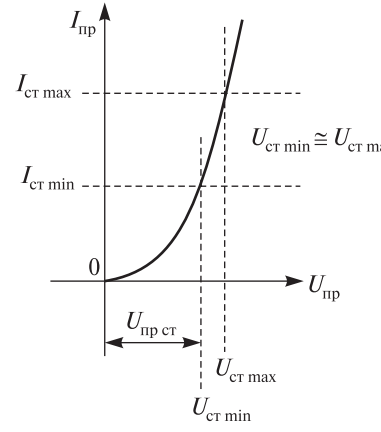



Рис. 2.13. Вольт-амперная характеристика стабилитрона при стабилизации под прямым смещением

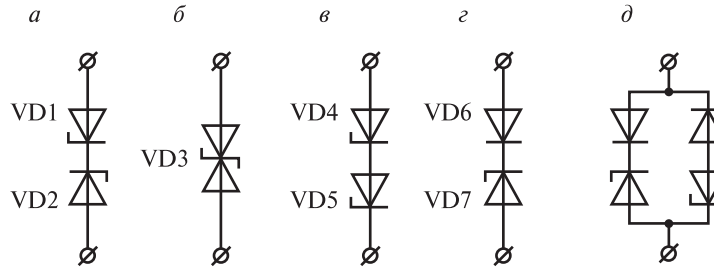



Рис. 2.14. Варианты схемы включения стабилитронов:
*а* — включение стабилитронов для двухполярной стабилизации постоянного напряжения и переменного напряжения; *б* — симметричный стабилитрон; *в* — включение стабилитронов для повышения напряжения стабилизации; *г* — включение стабилитрона с температурной компенсацией; *д* — включение термокомпенсационных стабилитронов для двухполярной стабилизации

Стабилитроны применяются в схемах стабилизации напряжения, ограничителей и формирователей импульсов. Для стабилизации постоянного напряжения разной полярности и переменного напряжения применяют два встречно включенных стабилитрона или один симметричный стабилитрон. Для расширения диапазона напряжения стабилизации используют последовательное соединение нескольких стабилитронов (рис. 2.14).

## 2.7. Варикапы

Варикап — это полупроводниковый прибор, предназначенный для использования в качестве управляемой напряжением барьерной емкости перехода, которая определяется по формуле

$$C_{\text{бар}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\delta},$$

где $\varepsilon\varepsilon_0$ — диэлектрическая постоянная; $S$ — площадь $p$-$n$-перехода; $\delta$ — ширина $p$-$n$-перехода.

Действие варикапа основано на использовании зависимости емкости $p$-$n$-перехода от напряжения обратного смещения. Варикапы нельзя включать под напряжение прямого смещения, так как при этом напряжении сопротивление $p$-$n$-перехода очень мало и барьерная емкость через него шунтируется. Это видно на эквивалентной схеме варикапа (рис. 2.15), где $C_{\text{бар}}$ — барьерная емкость перехода;

$r_{\text{диф пер}}$ — дифференциальное сопротивление потенциального барьера; $r_{\text{б}}$ — сопротивление $p$- и $n$-областей структуры и контактных выводов.

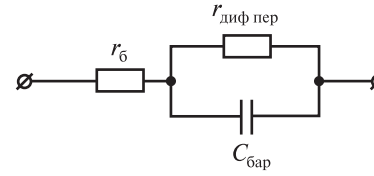



Рис. 2.15. Эквивалентная схема варикапа

Последовательно с варикапом включают высокоомный резистор, который уменьшает шунтирующее действие варикапа внутренним сопротивлением источника питания.

Эксплуатационные свойства варикапов характеризуются их параметрами:

$C_{\max}$ — максимальная емкость варикапа, зависящая от барьерной емкости при $U = 0$;

$r_{\text{б}}$ — сопротивление потерь в варикапе;

ТКЕ — температурный коэффициент емкости — изменение емкости в зависимости от температуры окружающей среды.

Варикапы используются в качестве электрически управляемых конденсаторов переменной емкости для настройки резонансных систем генераторов, для автоматической настройки частоты, в параметрических усилителях, для умножения частоты и в других устройствах.

## 2.8. Туннельные и обращенные диоды

***Туннельные диоды.*** Туннельный диод — полупроводниковый диод, содержащий $p$-$n$-переход с очень малой толщиной запирающего слоя (потенциального барьера). Действие туннельного диода основано на прохождении свободных носителей зарядов (электронов) сквозь узкий потенциальный барьер на основе туннельного эффекта. Как известно из курса физики, частица, имеющая энергию, недостаточную для прохождения через потенциальный барьер, может все же пройти сквозь него, если с другой стороны этого барьера имеется такой же свободный энергетический уровень, какой занимала частица перед барьером. Это явление называется *туннельным* эффектом, т.е. явлением перехода электрона через потенциальный барьер, высота которого превышает кинетическую энергию электрона. Туннельный переход совершается электронами без затрат энергии.

В качестве материалов используются высоколегированные полупроводники с большой концентрацией примесей ($10^{18}$—$10^{19}$ см$^{-3}$) на 2—3 порядка выше, чем в обычных диодах. При такой концентрации примесей ширина ($l_п$) перехода невелика (примерно $l_п$ = = 0,01—0,02 мкм), что создает высокую напряженность электрического поля внутри перехода ($10^6$—$10^7$ В/см$^{-3}$).

Таким образом, туннельный эффект возможен при реализации трех условий, а именно при *малой ширине потенциального барьера, высокой напряженности внутреннего поля электронно-дырочного перехода и наличии вакантного (свободного) энергетического уровня в контактирующем полупроводнике.*

Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода туннельного диода в отсутствие внешнего напряжения смещения показана на рис. 2.16. Как известно, в полупроводниках с высокой концентрацией примеси образуются примесные энергетические зоны, перекрывающие в *n*-полупроводнике зону проводимости, а в *p*-полупроводнике — валентную зону, т.е. возникает возможность появления электронов в зоне проводимости *n*-полупроводника и

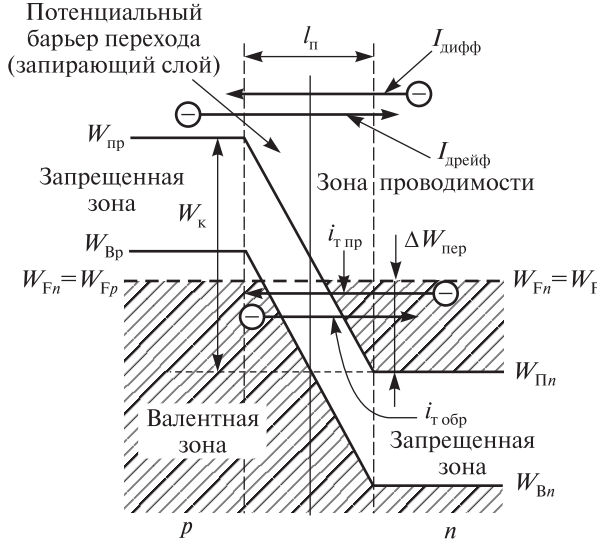



Рис. 2.16. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода туннельного диода в отсутствие внешнего напряжения смещения

дырок в валентной зоне *p*-полупроводника. В результате уровень Ферми в *n*-полупроводниках с высокой концентрацией примесей ($W_{\mathrm{F}n}$) смещается в зону проводимости, а в *p*-полупроводниках — в валентную зону ($W_{\mathrm{F}p}$), из-за чего и образуются примесные энергетические зоны. Полупроводник становится вырожденным и превращается в полуметалл.

При тепловом равновесии примесных полупроводников и отсутствии внешнего электрического поля, т.е. в равновесном состоянии, уровни Ферми в *p*- и *n*-областях полупроводников совпадают, т.е. $W_{\mathrm{F}} = W_{\mathrm{F}n} = W_{\mathrm{F}p}$.

Из-за высокой концентрации примесей электронно-дырочный переход получается очень узким, с высокой напряженностью электрического поля и свободными энергетическими уровнями выше уровня Ферми в зоне проводимости *n*-полупроводника ($W_{\mathrm{F}n}$) и в валентной зоне *p*-полупроводника и занятыми энергетическими уровнями ниже уровня Ферми в зоне проводимости *n*-полупроводника и в валентной зоне *p*-полупроводника ($W_{\mathrm{F}p}$) при $T = 0$ K.

На энергетической диаграмме (см. рис. 2.16) зона проводимости *n*-полупроводника перекрывается с валентной зоной *p*-полупроводника, ширина перекрытия составляет $\Delta W_{\text{пер}} = W_{\mathrm{F}p} - W_{\Pi n}$. В результате в пределах энергетического интервала $\Delta W_{\text{пер}}$ любому энергетическому уровню в зоне проводимости *n*-полупроводника может соответствовать такой же энергетический уровень за потенциальным барьером, т.е. в валентной зоне *p*-полупроводника.

При всех этих условиях передвижение электронов в переходе невозможно, так как электронам *n*-области нет свободных уровней в *p*-области, и наоборот.

При $T > 0$ K электроны *n*- и *p*-полупроводников переходят на энергетические уровни выше уровня Ферми, оставляя свободными уровни ниже уровня Ферми. На свободные уровни в пределах $\Delta W_{\text{пер}}$ в зоне проводимости *n*-полупроводника могут свободно переходить за счет теплового движения электроны из валентной зоны *p*-полупроводника, имеющие энергию, равную или бóльшую энергии уровней *n*-полупроводника в пределах $\Delta W_{\text{пер}}$ (обратный туннельный ток $i_{\text{т обр}}$ — (точка *а* на рис. 2.17). Возможен и встречный переход электронов из зоны проводимости *n*-полупроводника на свободные уровни с равными или меньшими энергиями валентной зоны *p*-полупроводника также в пределах $\Delta W_{\text{пер}}$ (прямой туннельный ток $i_{\text{т пр}}$ — точка *б* на рис. 2.17).

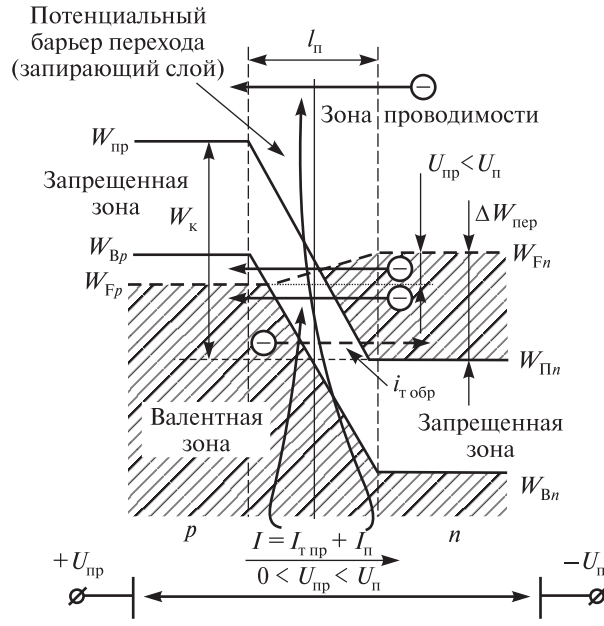



Рис. 2.17. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода туннельного диода при малом напряжении прямого смещения

Переход электронов через потенциальный барьер без затраты энергии называется *туннелированием,* а токи *туннельными* ($i_{т\ пр}$, $i_{т\ обр}$).

Результирующий туннельный ток при $T > 0$ К можно рассматривать как разность двух противоположно направленных равных потоков электронов. В результате суммарный туннельный ток равен нулю ($i_т = i_{т\ пр} - i_{т\ обр}$), так как $i_{т\ пр} = i_{т\ обр}$.

Кроме того, так же как и в обычном диоде, свободные электроны *n*-полупроводника, обладающие энергией, большей высоты потенциального барьера $W_к$, могут переходить за счет диффузии в зону проводимости *p*-полупроводника ($I_{дифф}$). Навстречу им могут перемещаться за счет дрейфа электроны из зоны проводимости *p*-полупроводника в зону проводимости *n*-полупроводника ($I_{дрейф}$). В результате создается встречное движение равного количества носителей зарядов и суммарный ток дрейфа и диффузии равен нулю ($I = I_{дрейф} + I_{дифф}$), так как $I_{дрейф} = I_{дифф}$.

Таким образом, высота потенциального барьера не влияет на туннельные токи и может во много раз превышать кинетическую энергию электрона, что особенно видно в сильнолегированных структурах.

Общий суммарный ток в переходе может быть вычислен по формуле $I_\Sigma = I + i_т$, а так как $i_т = 0$ и $I = 0$, то и общий ток в переходе равен нулю ($I_\Sigma = 0$).

Рассмотрим, как изменяются энергетические диаграммы и туннельные токи при прямом и обратном напряжениях смещения перехода туннельного диода по вольт-амперной характеристике туннельного диода (рис. 2.18).

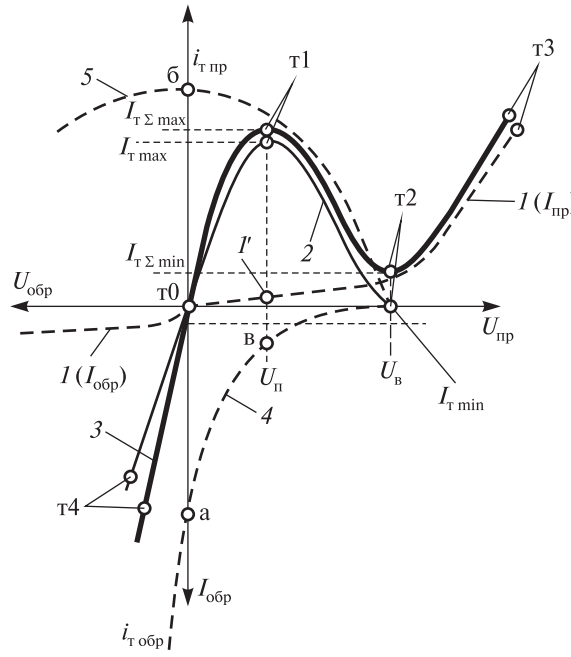



Рис. 2.18. Вольт-амперные характеристики в туннельном диоде:
*1* — обычный диод ($I_{пр}$; $I_{обр}$); *2* — туннельный диод при смещении ($I_{т\,пр}$; $I_{т\,обр}$); *3* — суммарная характеристика; *4* — прямой туннельный ток в состоянии равновесия при отсутствии внешнего смещения ($i_{т\,обр}$); *5* — обратный туннельный ток в состоянии равновесия при отсутствии внешнего смещения ($i_{т\,пр}$)

При малом напряжении прямого смещения туннельного диода изменяется перекрытие зон, что видно на энергетической диаграмме, показанной на рис. 2.18, и увеличивается число электронов, перешедших в зону проводимости в *n*-полупроводнике. В связи с этим уровень Ферми, отделяющий заполненные уровни от свободных в зоне проводимости, поднимается в зоне проводимости *n*-полупроводника. Происходит искривление уровня Ферми на границе *n*-*p*-перехода. Возрастает ширина перекрытия свободных уровней в валентной зоне *p*-области и заполненных уровней в зоне проводимости *n*-области ($\Delta W_{\text{пер}}$). Таким образом, заполненные уровни зоны проводимости *n*-области оказываются напротив свободных уровней валентной зоны *p*-области. При этом возрастает поток электронов из зоны проводимости *n*-полупроводника в валентную зону *p*-полупроводника без изменения своей энергии (направление движения электронов условно показано стрелкой), а встречный поток электронов из *p*-полупроводника в *n*-полупроводник уменьшается (показано штриховой стрелкой). В результате будет нарастать прямой туннельный ток ($I_{\text{т пр}}$), что видно на вольт-амперной характеристике (участок т0—т1 кривой *2* на рис. 2.18), и уменьшаться обратный туннельный ток ($I_{\text{т обр}}$) (участок *ав* кривой *4* на рис. 2.18), полный туннельный ток ($I_{\text{т}} = I_{\text{т пр}} - I_{\text{т обр}}$) достигает максимального значения ($I_{\text{т max}}$) при пиковом значении напряжения $U_{\text{пр}} = U_{\text{п}}$ (т1 кривой *2* на рис. 2.18). Необходимо отметить, что при этом замедляется процесс туннельного прохода электронов, происходивший при отсутствии внешнего напряжения смещения при $T > 0$ К и уменьшается прямой туннельный ток $i_{\text{т пр}}$ (кривая *5* от точки б до нуля на рис. 2.18).

При небольшом прямом смещении туннельного диода ($U_{\text{пр}} > U_{\text{п}}$), кроме туннельных токов, в туннельном диоде проходят обычные процессы, обусловленные частичным разрушением потенциального барьера и инжекцией электронов из *n*-области в *p*-область. Так как ток инжекции при прямом смещении ($I_{\text{инж}} = I_{\text{пр}}$) мал по сравнению с туннельным током $I_{\text{т пр}}$ и совпадает с ним по направлению (участок 0—1′ кривой *1* на рис. 2.18), то увеличение общего тока в туннельном диоде зависит в основном от туннельного тока, и общий ток в переходе *I* равен $I_{\text{т }\Sigma} = I_{\text{т пр}} + I_{\text{пр}}$ (участок 0—т1 кривой *3* на рис. 2.18).

При $U_{\text{пр}} = U_{\text{п}}$ уровень потолка валентной зоны в *p*-области ($W_{\text{Вр}}$) совпадает с уровнем Ферми ($W_{\text{F}n}$) в зоне проводимости *n*-области

$W_{Fn} = W_{Bp}$ (см. рис. 2.17) и общий ток в переходе увеличивается до пикового значения ($I_{т\,\Sigma\,max} = I_{т\,max} + I_{пр}$) (т1 кривой *3* на рис. 2.18). При этом уменьшается контактная разность потенциалов ($W_к$) на величину приложенного напряжения (см. рис. 2.17). Этот процесс связан с уменьшением разности потенциалов в приконтактном слое за счет точечной компенсации неподвижных положительных ионов в *n*-области электронами, движущимися под действием внешнего электрического поля в приконтактный слой *n*-полупроводника.

Таким образом, суть туннельного эффекта состоит в том, что под действием сильного электрического поля *p-n*-перехода электроны проходят потенциальный барьер с высотой, значительно превышающей их энергию в зоне перекрытия $\Delta W_{пер}$. Вероятность туннельного перехода тем выше, чем у́же потенциальный барьер и чем меньше его высота.

При дальнейшем увеличении напряжения прямого смещения ($U_{пр} > U_п$) уровень Ферми *n*-области смещается в область более высоких значений энергии. При этом сокращается перекрытие свободных уровней *p*-области заполненными уровнями *n*-области (рис. 2.19), из-за чего уменьшается вероятность перехода электронов в *p*-область. В результате этого туннельный ток снижается при $U_п < U_{пр} < U_в$ (участок т1—т2 кривой *2* на рис. 2.18) и достигает минимального значения $I_{т\,min}=0$ (т2 кривой *2* на рис. 2.18), при этом перекрытие зон равно нулю $\Delta W = 0$. В этот момент уровень потолка валентной зоны *p*-области ($W_{Bp}$) совпадает с дном зоны проводимости *n*-области ($W_{Пn}$), т.е. $W_{Bp}=W_{Пn}$ (рис. 2.19) и туннельный эффект исчезает.

Образование падающего участка в вольт-амперной характеристике (участок т1—т2 кривой *2* на рис. 2.18) можно объяснить следующим образом. Увеличение прямого смещения приводит к уменьшению напряженности в переходе от внешнего смещения, которое полностью затрачивается на разрушение потенциального барьера. С этого момента (от $U_П$ до $U_В$) в переходе идет обычный диодный процесс — инжектирование электронов $I_{инж} = I_{пр}$ из *n*-области с большей концентрацией, в *p*-область с низкой концентраций электронов (участок 1′—т2 кривой *1* на рис. 2.18) на энергетические уровни примесей в *p*-полупроводнике.

При $U_{пр} = U_в$ уровень потолка валентной зоны *p*-области ($W_{Bp}$) совпадает с дном зоны проводимости *n*-области ($W_{Пn}$), т.е. $W_{Bp}=W_{Пn}$

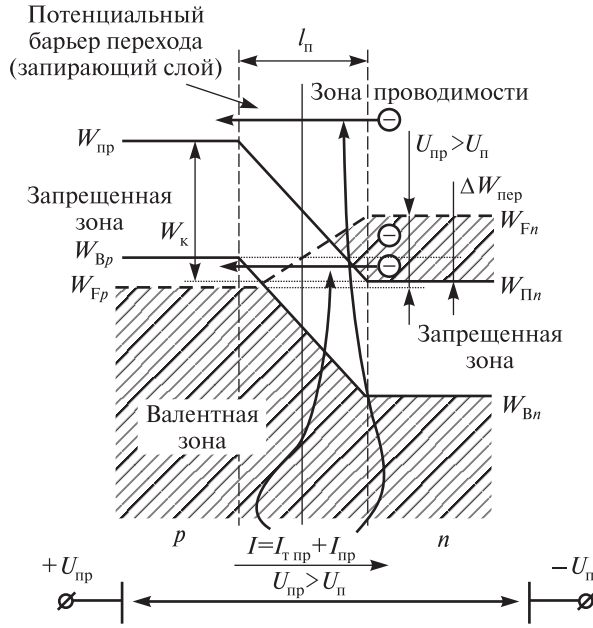



Рис. 2.19. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода туннельного диода при большом напряжении прямого смещения

(рис. 2.20). Перекрытие зон прекращается, и туннельный ток снижается до минимального значения. В связи с этим суммарный ток в туннельном диоде при $U_{gh} = U_В$ равен $I_{тΣ} = I_{т\,min} + I_{инж} = I_{инж} = I_{пр}$, т.е. только току инжекции при прямом смещении (т2 кривой *3* на рис. 2.18). В идеальном случае при $T > 0$ K ток инжекции равен нулю, соответственно и суммарный ток в туннельном диоде при $U_{пр} = U_в$ равен нулю.

При дальнейшем увеличении напряжения прямого смещения, когда $U_{пр} > U_в$, в электронно-дырочном переходе происходит обычный процесс инжекции основных носителей зарядов из зоны проводимости *n*-области в *p*-область и вольт-амперная характеристика туннельного диода (участок т2—т3 кривой *3* на рис. 2.18) повторяет вольт-амперную характеристику обычного диода (рис. 2.17). На рис. 2.18 кривая *3* представляет суммарный ток туннельного и обычного диода.

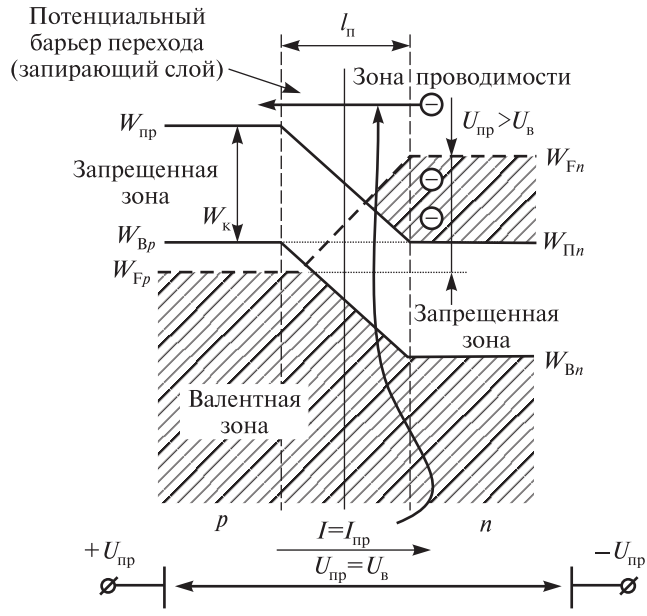



Рис. 2.20. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода туннельного диода при напряжении прямого смещения $U_{пр} = U_в$

При включении *p*-*n*-перехода под напряжение обратного смещения энергетические зоны смещаются таким образом, что напротив заполненных уровней валентной зоны *p*-области оказываются свободные уровни зоны проводимости *n*-области (рис. 2.21). При этом уровень Ферми в *n*-области ($W_{Fn}$) располагается ниже, чем в *p*-области ($W_{Fp}$). Перекрытие зон возрастает, что определяется величиной приложенного напряжения обратного смещения, и равно $W_{Ep} - W_{Fn} = W_{пер} = |e U_{обр}|$. В этот интервал попадают более глубокие занятые уровни валентной зоны *p*-полупроводника и более высокие свободные уровни в зоне проводимости *n*-полупроводника, которые обладают одинаковой энергией. В связи с этим резко возрастает туннельный переход валентных электронов *p*-области на свободные уровни зоны проводимости *n*-области в области перекрытия зон ($\Delta W_{пер}$) и возрастает туннельный обратный ток $I_{т\ обр}$ (участок 0—т4 кривой *2* на рис. 2.18). Одновременно в переходе идет процесс экстракции (кривая *1* на рис. 2.18) и создается об-

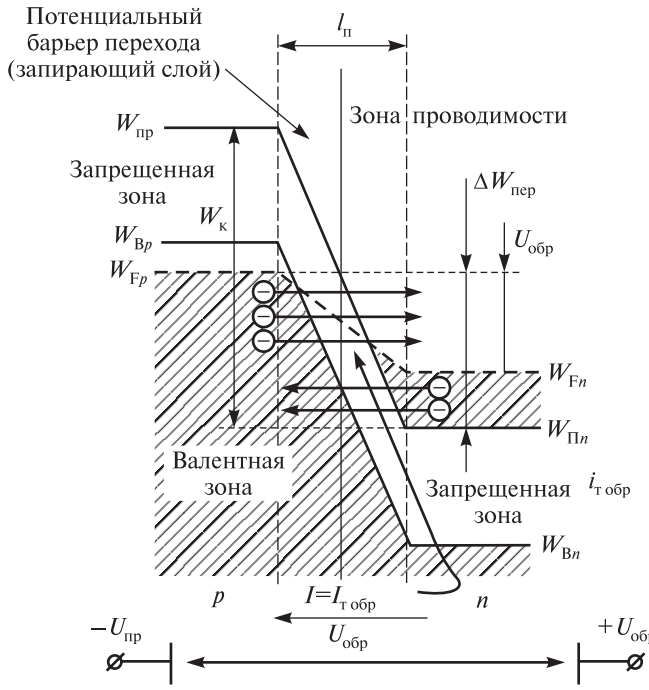



Рис. 2.21. Энергетическая диаграмма электронно-дырочного перехода туннельного диода при обратном смещении

ратный ток ($I_{обр}$), который очень мал по сравнению с туннельным током ($I_{т\ обр}$), но влияет на общий суммарный ток в переходе $I_{т\Sigma} = I_{обр}+I_{т\ обр}$ (кривая *3* на рис. 2.18). По мере увеличения напряжения обратного смещения происходит резкое увеличение обратного туннельного тока, т.е. линейное возрастание. Следовательно, односторонняя проводимость при туннельном пробое отсутствует. Из-за туннельного пробоя включение туннельных диодов под напряжение обратного смещения не рекомендуется.

Основные параметры туннельных диодов можно разделить на три группы параметров.

*Первая группа* — эксплуатационные параметры, определяющие основные свойства туннельных диодов, показаны на вольт-амперной характеристике (рис. 2.22):

$I_{\text{п}}$ ($I_{\text{т}\,\sum\,\max}$) — пиковый ток — значение прямого тока в точке максимума вольт-амперной характеристики;

$I_{\text{в}}$ ($I_{\text{т}\,\sum\,\min}$) — ток впадины — значение прямого тока в точке минимума вольт-амперной характеристики;

$I_{\text{п}}/I_{\text{в}}$ — отношение пикового тока к току впадины характеризует, насколько выражен участок с отрицательным сопротивлением;

$U_{\text{п}}$ — пиковое напряжение, напряжение прямого смещения, соответствующее току $I_{\text{п}}$ ($I_{\text{т}\,\sum\,\max}$);

$U_{\text{в}}$ — напряжение впадины, напряжение прямого смещения, соответствующее току $I_{\text{в}}$ ($I_{\text{т}\,\sum\,\min}$);

$U_{\text{пп}}$ — напряжение на второй восходящей части вольт-амперной характеристики (растворовое напряжение), соответствующее пиковому току $I_{\text{п}}$ ($I_{\text{т}\,\sum\,\max}$).

*Вторая группа* параметров связана с эквивалентными свойствами туннельного диода и его частотными свойствами: $r_{\text{диф}}$ — дифференциальное отрицательное сопротивление; $C_{\text{диф}}$ — емкость туннельного диода; $L$ —индуктивность туннельного диода, обусловленная выводами диода; $f_{\max}$ —максимальная частота, до которой активная

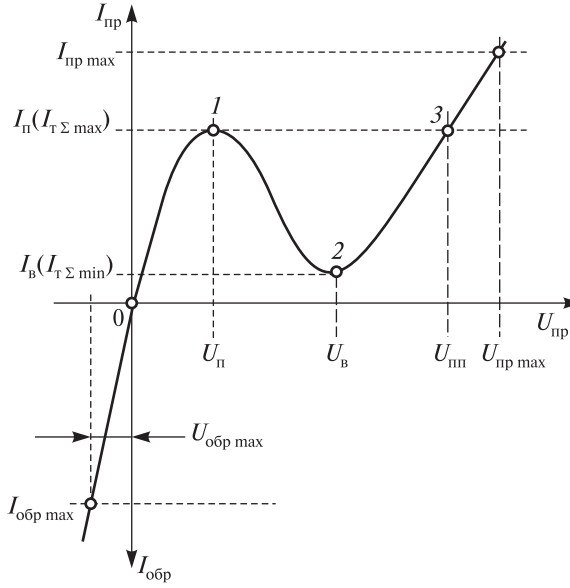



Рис. 2.22. Параметры туннельного диода

составляющая полного сопротивления туннельного диода остается отрицательной.

*Третья группа* — предельные (максимально допустимые) параметры туннельного диода $I_{\text{пр max}}$, $U_{\text{пр max}}$, $I_{\text{обр max}}$, $U_{\text{обр max}}$, соответствующие допустимым значениям токов и напряжений на прямой и обратной ветвях вольт-амперной характеристики; $P_{\max}$ — максимально допустимая рассеиваемая мощность туннельного диода.

Туннельный диод — активный двухполюсник. Благодаря отрицательному сопротивлению он способен выполнять разнообразные функции активного элемента (приборов, способных усиливать сигнал по мощности) в электронных схемах усилителей, генераторов, быстродействующих переключателей, устройств памяти с двоичным кодом, преобразователей сигналов, преимущественно в схемах, работающих в диапазоне СВЧ-частот. Туннельный диод может работать и при более низких частотах, однако его эффективность оказывается более низкой по сравнению с транзисторами. Туннельные диоды обладают большим быстродействием, малыми габаритными размерами и массой, надежно работают в широком интервале температур и энергоэкономичны.

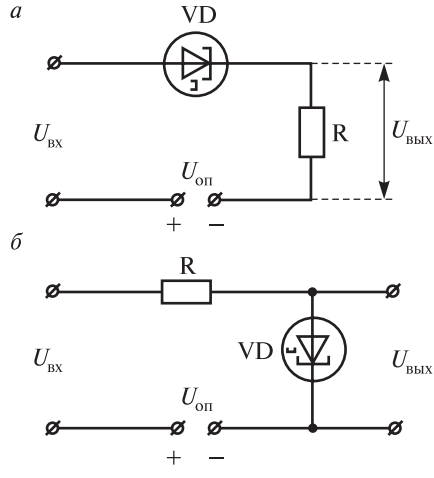



Рис. 2.23. Схемы включения туннельных диодов

К недостаткам туннельных диодов относятся: двухполюсность, что затрудняет в ряде схем разделить входные и выходные цепи, необходимость применения стабильных источников электропитания, а также невзаимозаменяемость из-за большого разброса параметров различных видов туннельных диодов. Поэтому туннельный диод в основном используется в схемах, работающих в диапазоне СВЧ-частот.

На рис. 2.23 показаны схемы включения туннельного диода как линейного усилителя с

ограничением амплитуды входного сигнала, а на рис. 2.24 — характеристика, поясняющая принцип работы схемы. Благодаря отрицательному сопротивлению туннельного диода спадающая часть его вольт-амперной характеристики (участок *1—2* на рис. 2.24) и небольшое входное переменное напряжение приводят к появлению в выходной цепи значительно большего напряжения. Таким образом, на данном участке проявляются усилительные свойства туннельного диода при условии, если сопротивление нагрузки меньше, чем дифференциальное отрицательное сопротивление туннельного диода ($-r_{диф}$), т.е. $R < |-r_{диф}|$, и опорное напряжение, определяющее положение рабочей точки туннельного диода, меньше напряжения впадины ($U_{оп} < U_{в}$). Если $R > |-r_{диф}|$ и $U_{оп} > U_{в}$, рассматриваемая схема становится переключающей, так как точки устойчивого равновесия определяются на пересечении нагрузочной и статической вольт-амперных характеристик туннельного диода (на восходящей части ветви статической вольт-амперной характеристики туннельного диода) (участок *2—3* на рис. 2.24).

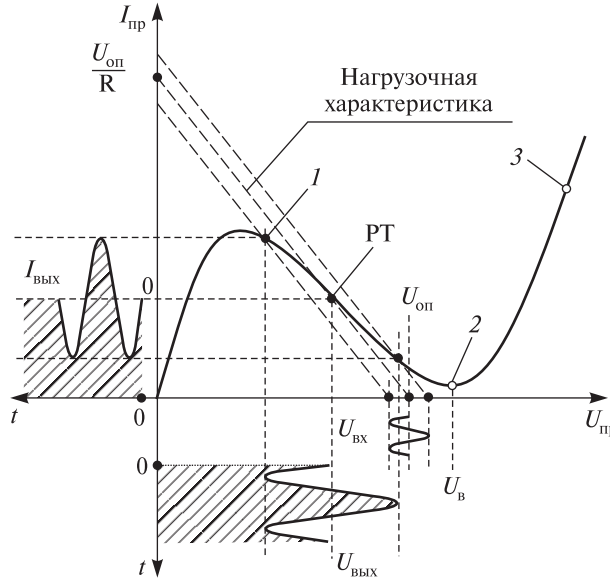



Рис. 2.24. Характеристика, поясняющая принцип работы туннельного диода в схемах (РТ — рабочая точка)

Необходимо отметить, что схемы на рис. 2.23, *а*, и отличаются способом включения туннельного диода. Так, на рис. 2.23, *а*, показана схема параллельного включения туннельного диода, в которой для защиты от короткого замыкания источника сигнала при включении туннельного диода устанавливается ограничительный резистор (R). На рис. 2.23, *б*, показана схема последовательного включения туннельного диода, в которой установлен источник опорного напряжения, определяющий напряжение туннельного пробоя, т.е. напряжение включения туннельного диода.

***Обращенные диоды.*** Обращенный диод — это полупроводниковый диод, в котором проводимость при напряжении обратного смещения из-за туннельного эффекта значительно выше, чем при напряжении прямого смещения. Такое действие достигается уменьшением концентрации примесей по сравнению с туннельным диодом до $10^{18}$ см$^{-3}$. В этом случае уровень Ферми находится очень близко к потолку валентной зоны *p*-полупроводника и к дну зоны проводимости *n*-полупроводника (рис. 2.25) и туннельный ток отсутствует ($I_т = 0$). Такие полупроводники называются слабовырожденными, так как у них концентрация примесей больше, чем у обычных диодов, но меньше, чем у туннельных.

При прямом смещении на вольт-амперной характеристике имеется резко выраженный падающий участок (резкое уменьшение тока при прямом смещении), так как в отличие от туннельного диода в обращенных диодах значение пикового тока ($I_П$) ниже, чем в туннельных диодах.

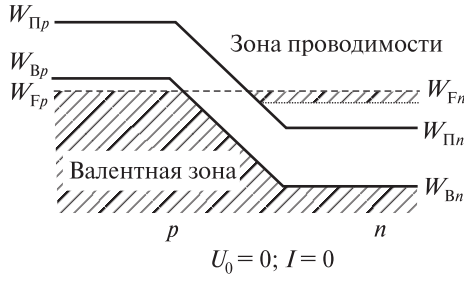



Рис. 2.25. Зонная диаграмма *p*-*n*-перехода обращенного диода

Низкое значение пикового тока ($I_П$) на рис. 2.26 объясняется тем, что при прямом смещении создается очень маленькое перекрытие заполненной зоны проводимости *n*-области и свободной валентной зоны *p*-области, равное $\Delta W = W_{Fn} - W_{Fp}$ (рис. 2.27). Начальный участок характеристики более пологий в промежутке от $U_0$ до $U_П$ и до-

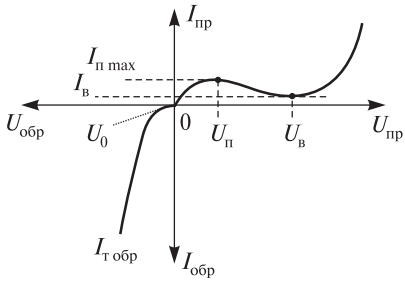



Рис. 2.26. Вольтамперная характеристика обращенного диода

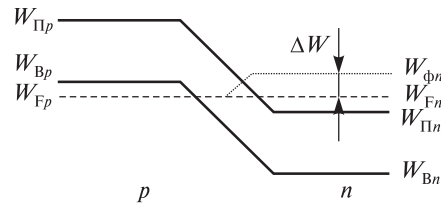



Рис. 2.27. Зонная диаграмма *p-n*-перехода обращенного диода при обратном смещении

стигает $I_{пр\ max}$ (рис. 2.26) при значительно больших напряжениях прямого смещения, чем у обычных диодов.

При малом напряжении обратного смещения в обращенном диоде ток начинает резко возрастать в результате увеличения зоны перекрытия заполненных уровней валентной зоны *p*-области со свободным уровнем зоны проводимости *n*-области.

Перекрытие зон при напряжении обратного смещения в обращенном диоде несколько больше, чем в туннельном диоде. Это объясняется тем, что в исходном состоянии при $U_{обр} = 0$ и $U_{пр} = 0$ уровень Ферми находится практически на уровне потолка валентной зоны *p*-области и дна зоны проводимости *n*-области (рис. 2.28). При небольшом напряжении обратного смещения происходит резкое перекрытие зон ($\Delta W$) (рис. 2.29) и начинается туннельный переход электронов из заполненной валентной зоны *p*-области на

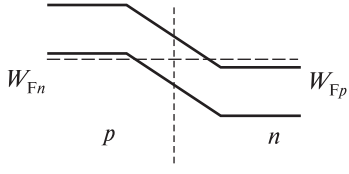



Рис. 2.28. Энергетическая диаграмма обращенного диода до смещения $U_{обр} = 0$ и $U_{обр} = 0$

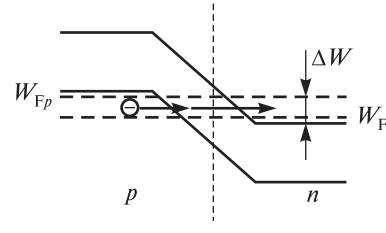



Рис. 2.29. Энергетическая диаграмма обращенного диода при обратном смещении $U_{обр} \neq 0$ и $U_{обр} = 0$

свободные уровни зоны проводимости *n*-области, т.е. возрастает туннельный обратный ток $I_{\text{т обр}}$ (см. рис. 2.26). Таким образом, при малом обратном смещении ток больше, чем при прямом смещении. Отсюда можно сделать вывод, что обращенные диоды пропускают ток при обратном смещении и плохо пропускают ток при прямом смещении. В результате в качестве рабочей характеристики в них используют обратную ветвь вольт-амперной характеристики и прямой ток принимают за обратный. Отсюда и название — обращенный диод.

Эксплуатационные параметры обращенных диодов такие же, как и у туннельных диодов, за исключением значения пикового тока ($I_{\text{П}}$), которое практически равно току впадины ($I_{\text{В}}$).

Обращенные диоды находят широкое применение в качестве детекторов, ограничителей и переключателей, так как они обладают высоким быстродействием. Быстродействие обеспечивается тем, что прохождение тока создается основными носителями зарядов и резким возрастанием зон перекрытия. Это свойство позволяет применять их в схемах, работающих на более высоких частотах.

# Глава 3. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

## 3.1. Основные определения, устройство и принцип действия

***Основные определения.*** Биполярным транзистором называют электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним или несколькими взаимодействующими электронно-дырочными переходами и тремя и более выводами, который обладает усилительными свойствами благодаря инжекции основных носителей зарядов и экстракции неосновных носителей зарядов. Термин «транзистор» происходит от сочетания английских слов transfer resistor, что означает «управляемое сопротивление». Термин «биполярный» означает, что работа прибора обусловлена движением носителей зарядов двух полярностей (видов) — электронами и дырками.

Два *p-n*-перехода транзистора сформированы очень близко друг к другу на расстоянии, меньшем длины диффузионного пробега носителей. Поэтому носители, инжектированные одним переходом, могут достичь второго перехода и войти в него. Соответственно изменение тока одного перехода влияет на ток второго перехода. Таким образом, имеет место единая система двух взаимодействующих *p-n*-переходов. Упрощенная структура плоскостного *p-n-p*-транзистора и *n-p-n*-транзистора показана на рис. 3.1.

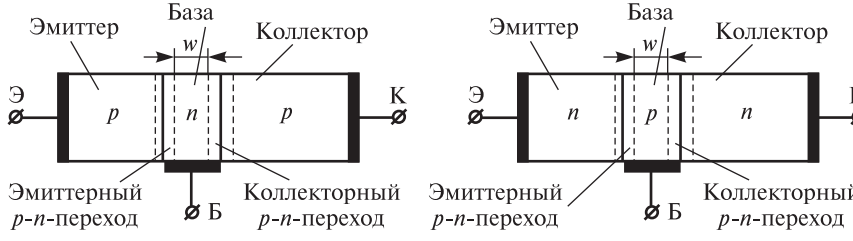



Рис. 3.1. Упрощенная структура плоскостного биполярного транзистора *p-n-p*- и *n-p-n*-структур

В зависимости от типа электропроводности наружных слоев различают биполярный транзистор *p-n-p* и *n-p-n* типа. Две крайние области всегда имеют электропроводность одного типа, противоположную электропроводности средней области.

***Устройство.*** В качестве исходного основного материала для изготовления биполярного транзистора используют Ge и Si. Однако в конце 1980-х гг. биполярные транзисторы в основном стали выпускать с использованием кремния, который по всем параметрам превосходит германий.

Основным элементом в устройстве биполярного транзистора является структура двух взаимодействующих между собой электронно-дырочных переходов. Рассмотрим структуру биполярного транзистора на примере плоскостной конструкции, изготовленной сплавным методом (рис. 3.2, *а*). Основным элементом двухпереходного биполярного транзистора, т.е. основанием, является тонкая пластинка монокристалла германия или кремния *1*, который легируют примесью для создания примесного полупроводника *n*- или *p*-типа. Среднюю область называют базой. На рис. 3.2, *а*, базовый монокристалл германия (Ge) легирован сурьмой (Sb) — донорной примесью для получения примесного полупроводника *n*-типа *1*. С двух сторон в базу вплавлены таблетки индия *2* — легирующей акцепторной примеси. При температуре около 500 °С индий расплавляется и постепенно растворяет германий. В германиевой пластине (базе) на границе вплавления образуется углубление, заполненное расплавленным индием. При охлаждении германий рекристаллизуется из расплава. В области рекристаллизации остается некоторое число атомов индия, который является акцепторной примесью в германии. Так возникают слои германия с дырочной электропроводностью, представляющие собой коллекторную *3* и эмиттерную *4* области. На границе основного кристалла, имеющего электронную электропроводность (базовая область), с дырочными рекристаллизационными областями образуются электронно-дырочные *p-n*-переходы — коллекторный *7* и эмиттерный *8*. Остаток индиевой таблетки *2*, нерекристаллизованный с основным кристаллом, осуществляет электрический контакт с рекристаллизованным слоем основного кристалла, имеющего дырочную электропроводность *p*-типа. Эмиттер и коллектор изготавливаются одинаковым способом и отличаются лишь размерами: диаметр таблетки индия, необходимый для

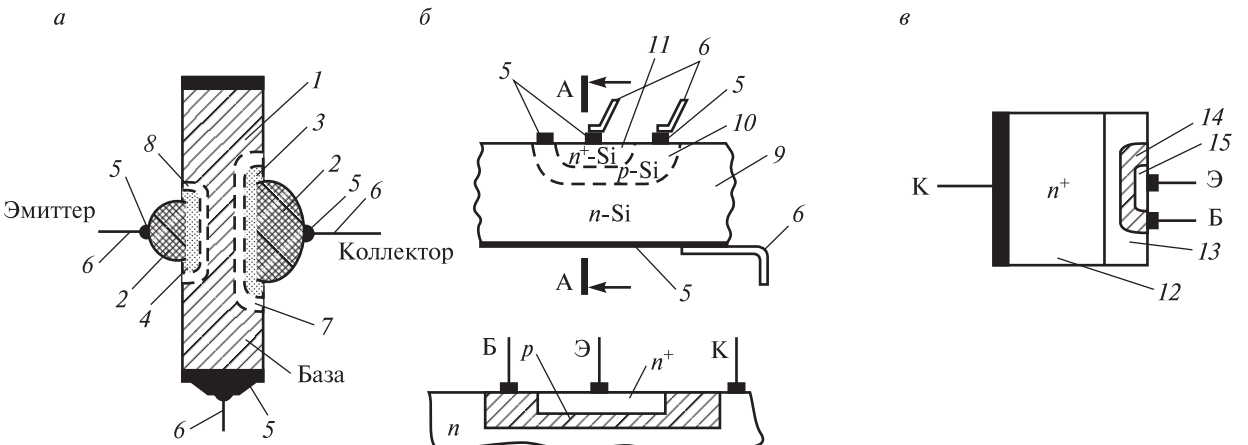



Рис. 3.2. Структуры транзисторов:
*а* — сплавной; *б* — планарный; *в* — эпитаксиально-диффузионный; *1* — база *n*-типа (Ge); *2* — таблетка индия (In); *3* — коллектор *p*-типа (Ge); *4* — эмиттер *p*-типа (Ge); *5* — омический контакт; *6* — внутренние выводы; *7* — коллекторный *p*-*n*-переход; *8* — эмиттерный *p*-*n*-переход; *9* — коллектор кристалл *n*-типа (Si); *10* — база — кристалл *p*-типа (Si); *11* — эмиттер — высоколегированный кристалл $n^+$-типа (Si); *12* — подложка; *13* — коллектор (эпитаксиальная пленка); *14* — база (эпитаксиальный слой); *15* — эмиттер (эпитаксиальный слой)

изготовления коллектора, примерно в два раза больше, чем диаметра таблетки индия, необходимый для изготовления эмиттера. На внешнюю поверхность индиевых таблеток и основного кристалла (база) наносится металлическая пленка *4* для создания низкоомного омического контакта с кристаллами эмиттера, коллектора и базы, к которой привариваются внутренние металлические выводы этих электродов *5*.

Устройство биполярного сплавного транзистора показано на рис. 3.3. Изготовленную структуру транзистора, показанную рис. 3.2, *а*, помещают в кристаллодержатель *4* (рис. 3.3), который припаивают ко дну герметизированного корпуса *1*. Внутренние выводы от эмиттере *2* и коллектора *5* соединяют с наружными выводами *6*, проходящими в корпусе через изоляторы *7*. Вывод базы крепится непосредственно ко дну корпуса *1*.

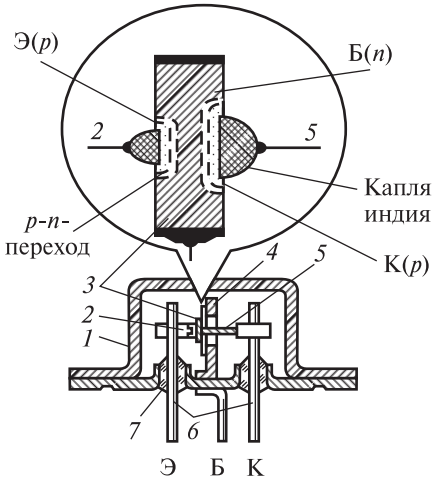



Рис. 3.3. Устройство германиевого сплавного транзистора *p-n-p*-структуры:
*1* — герметизированный корпус; *2* — внутренний вывод эмиттера; *3* — пластина германия; *4* — кристаллодержатель; *5* — внутренний вывод коллектора; *6* — наружные выводы коллектора и эмиттера; *7* — изолятор

Сплавление — не единственный метод изготовления транзисторов. Наряду с ним применяются и другие. Например, структура транзистора на рис. 3.2, *б*, изготовлена по планарной технологии — электроды прибора и их выводы расположены в одной плоскости — на поверхности кристалла. В пластине *n*-типа (Si), служащей коллектором *9*, методом локальной диффузии (введение атомов легирующего вещества в кристалл через некоторую часть его поверхности) образована базовая область *p*-типа (Si) *10*. В этой области также методом локальной диффузии образована эмиттерная область $n^+$-типа (Si) *12* с высокой концентрацией донорной примеси.

На границе эмиттерной области с базовой, а также на гра-

нице базовой области с коллекторной образуются электронно-дырочные переходы. Нижняя поверхность транзистора покрывается металлической пленкой *5* и к ней приваривается внутренний вывод коллектора *6*. Металлические пленки также наносятся на часть поверхности эмиттера и базы *5*, а к ним привариваются внутренние выводы этих электродов *6*.

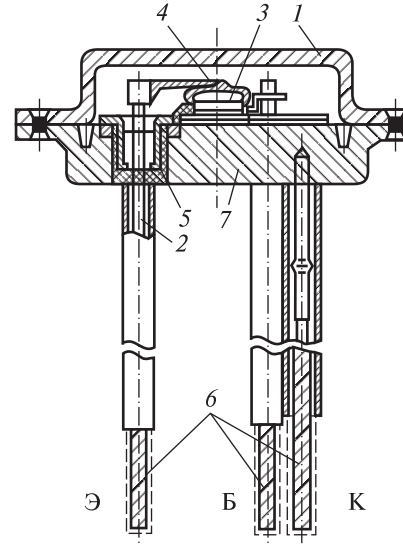



Рис. 3.4. Устройство планарного биполярного транзистора:
*1* — герметизированный корпус; *2* — внутренний вывод; *3* — кристалл полупроводника планарной структуры *p-n-p*; *4* — кристаллодержатель; *5* — изолятор; *6* — наружные выводы; *7* — основание — подложка (полупроводниковый кристалл *n*-типа (Si))

Конструкция биполярного планарного транзистора показана на рис. 3.4. Изготовленную структуру транзистора, показанную на рис. 3.2, *б*, укрепляют на специальном кристаллодержателе *4*, установленном на подложке (основании), и помещают в герметизированный металлический или пластмассовый корпус *1*, или при бескорпусном исполнении покрывают защитным лаком и эпоксидной смолой. В металлическом корпусе два внутренних вывода полупроводникового кристалла пропускают через стеклянные изоляторы *5*, создавая внешние выводы *6*, один из выводов соединяют непосредственно с корпусом прибора (на рис. 3.4 на корпус сделан вывод коллектора). У маломощных транзисторов с корпусом соединяют вывод базы транзистора, а в мощных транзисторах — вывод коллектора транзистора для лучшего охлаждения транзистора.

В транзисторах с пластмассовым корпусом и в бескорпусных выводы от кристалла опрессовывают и заливают специальной пластмассой, которая защищает соединения от внешних воздействий.

При изготовлении транзисторов обязательно должны выполняться следующие условия:

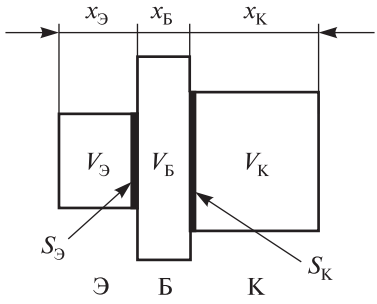



Рис. 3.5. Соотношение ширины, объема и площади контактирующих поверхностей в биполярном транзисторе

1. Толщина базы ($x_Б$) (расстояние между эмиттерным и коллекторным переходами) должна быть значительно меньше, чем длина диффузионного пробега электронов ($L_{эл\ дифф}$), т.е. от 1 до 25 мкм (рис. 3.5) $x_Б < L_{эл\ дифф}$.

2. Площади контактирующих поверхностей эмиттера $S_Э$ и коллектора $S_К$ должны удовлетворять равенству $S_Э = S_К$ или неравенству $S_Э << S_К$ (примерно в 4-5 раз) рис. 3.5.

3. Толщина эмиттера должна быть меньше толщины коллектора, но больше, чем толщина базы, т.е. $x_Б < x_Э < x_К$ (рис. 3.5).

4. Объемы областей имеют соотношение $V_Э < V_Б < V_К$ (рис. 3.5).

5. Концентрация зарядов примесей (основных носителей зарядов) в эмиттере должно быть значительно больше, чем в базе ($N_Э >> N_Б$), а в коллекторе концентрация примеси зависит от технологии изготовления:

– в планарном и диффузионном транзисторах — концентрация примесей в базе и в коллекторе примерно равны $N_Б \cong N_К$ (рис. 3.6);

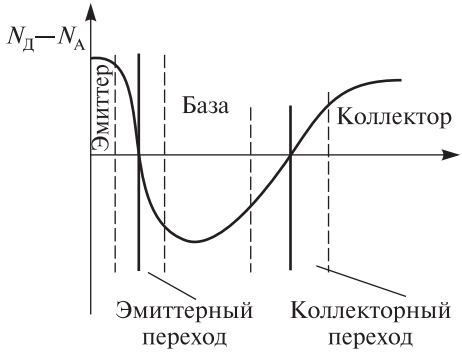



Рис. 3.6. Диаграмма изменения концентрации примесей в планарном транзисторе

– в сплавном и эпитаксиальном транзисторах — концентрация примесей в эмиттере и коллекторе примерно равны между собой ($N_Э = N_К$).

Необходимо также отметить, что в зависимости от технологии изготовления распределение примесей в базовой области может быть равномерным и неравномерным. Наиболее равномерно легирующие примеси в базе распределяются при эпитаксии, а при использовании других техно-

логий концентрация примеси в базовой области уменьшается от эмиттера к коллектору (рис. 3.7).

Транзисторы, имеющие неравномерное распределение примесей в базовой области, называются дрейфовыми, а транзисторы с равномерно легированной базой — бездрейфовыми.

6. Удельное сопротивление области эмиттера меньше, чем области коллектора и много меньше, чем удельное сопротивление базы, т.е. $\rho_Э < \rho_К < \rho_Б$, эта взаимосвязь видна из формулы

$$\rho = RS/x,$$

где $R$ — сопротивление, Ом; $S$ — площадь поперечного сечения, м$^2$; $x$ — толщина перехода, м.

7. Сопротивление областей имеют соотношения $r_Э < r_К << r_Б$.

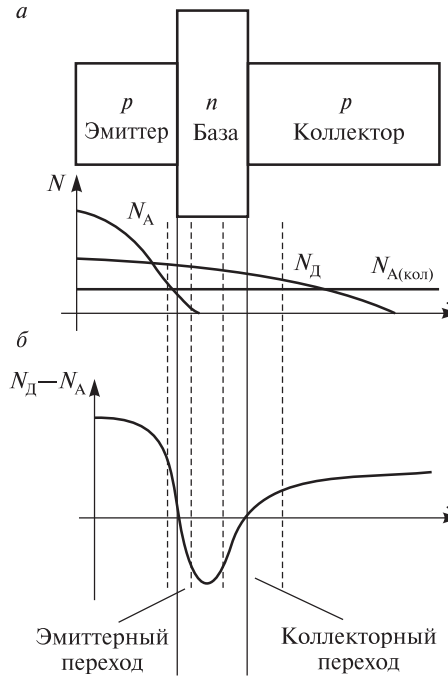



Рис. 3.7. Концентрация примесей в дрейфовом транзисторе при сплавно-диффузионной технологии:
*а* — кривая изменения концентрации акцепторных и донорных примесей; *б* — кривая разности концентраций $N_А - N_Д$

Рассматривая структуру биполярного транзистора на основе условий его построения, можно отметить:

• поскольку степень легирования эмиттера и коллектора весьма высока по сравнению со степенью легирования базы, большая часть потенциального барьера эмиттерного и коллекторного переходов находится в базовой области, т.е. переходы несимметричны;

• ширина потенциального барьера эмиттерного перехода значительно меньше, чем коллекторного перехода. Это объясняется тем, что концентрация зарядов возле коллекторного перехода в базовой и коллекторной областях, значительно меньше, чем возле эмиттерного перехода.

***Принцип действия.*** Принцип действия биполярного транзистора основан на управлении движением потока неосновных носителей заряда, протекающих через среднюю область транзистора. Одна крайняя область, инжектирующая заряды в базу, называется эмиттером, а другая область, осуществляющая экстракцию носителей зарядов из базы, называется коллектором. Электронно-дырочный переход между базой и эмиттером называют эмиттерным, обычно он смещен в прямом направлении, а переход между базой и коллектором — коллекторным, он смещен в обратном направлении. Все области транзистора имеют невыпрямляемые контактные выводы для соединения с другими элементами электронных схем.

Однотипность областей коллектора и эмиттера позволяет при включении в схему менять их местами. Такое включение называют инверсным. При инверсном включении параметры транзистора существенно отличаются от параметров при нормальном включении.

Типовые структуры биполярных транзисторов, изготовленных различными методами, приведены на рис. 3.2.

## 3.2. Классификация биполярных транзисторов

Классификация биполярных транзисторов производится по следующим признакам:

1) по типу электропроводности внешних областей:

– *p-n-p* — дырочная электропроводность;

– *n-p-n* — электронная электропроводность;

2) по применяемому материалу:

– германиевые, кремниевые, арсенид-галлиевые;

3) по конструктивному исполнению:

– *точечные* — линейные размеры, определяющие площадь ($S$) контактирующих поверхностей электронно-дырочного перехода, намного меньше толщины контактирующих поверхностей ($x$) (рис. 3.8); (линейными размерами, определяющими площадь контактирующих поверхностей, являются ширина ($h$) и длина ($L$) сторон прямоугольника контактирующей плоскости или диаметра окружности ($D$) контактирующей плоскости);

– *плоскостные* — линейные размеры, определяющие площадь ($S$) контактирующих поверхностей электронно-дырочного перехода, намного больше толщины контактирующих поверхностей полупроводников ($x$) (рис. 3.9);

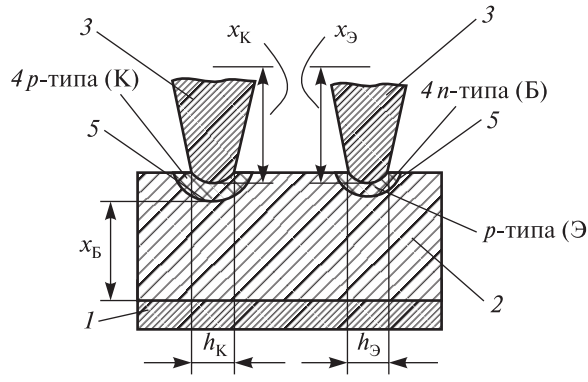



Рис. 3.8. Устройство точечного транзистора:
*1* — металлический держатель (основание); *2* — пластина кристалла *n*-типа (база); *3* — острие контактной пружины из вольфрама, покрытое слоем акцепторной примеси (индий); *4* — сформированный слой *p*-типа (база и эмиттер); *5* — электронно-дырочный переход *p-n-p*-типа (эмиттерный и коллекторный)

4) по технологии и методу изготовления *p-n*-переходов:

— *сплавные* — *p-n*-переходы получены вплавлением примесей с двух сторон в кристалл базы (см. рис. 3.2, *а*);

— *диффузионные* — *p-n*-переходы получены введением примесей в полупроводниковый материал с помощью двух процессов диффузии. Изготавливаются на основе Ge (в основном *p-n-p*-типа) и Si (в основном *n-p-n*-типа). Исходную полупроводниковую пластину легируют донорной или акцепторной примесью, создавая необходимую электропроводность (*p*- или *n*-типа) в данном объеме основного кристалла, а затем одновременно или последовательно вводят в нее два вида примеси (донорную и акцепторную), атомы которых имеют различные скорости диффузии (например, для Ge — In, Ga и Sb, для Si — B, As и P). Установлено,

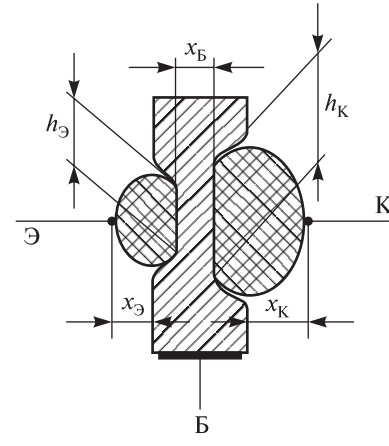



Рис. 3.9. Устройство плоскостного транзистора

что коэффициент диффузии, следовательно и скорость диффузии, зависят от вида диффундирующей примеси. Скорость диффузии донорной примеси в германии выше, чем скорость диффузии акцепторной примеси, а в кремнии наоборот, акцепторные примеси диффундируют быстрее, чем донорные. Различие в скорости диффузии акцепторных и донорных примесей в различных материалах дает возможность осуществлять одновременную диффузию нескольких примесей, получая в толще полупроводника многослойные структуры с *p*-*n*-переходами. Легирующие примеси вводятся в виде химических веществ, имеющих газообразное или жидкое состояние и не вступающих в химические реакции с основным кристаллом. Примеси вводятся в замкнутом пространстве путем контакта диффузанта (жидкие, твердые или газообразные) с полупроводниковым материалом с возможным подогревом. Суть метода состоит в том, что легирующие примеси вводятся направленно на определенный участок основной пластины полупроводника в виде пара или жидкости, которые интенсивно внедряются в кристаллическую структуру основной пластины полупроводника на определенную глубину, создавая необходимую электропроводность (*p*- или *n*-типа) в данном объеме основного кристалла. Тип электропроводности зависит от вида легирующей примеси — донорной или акцепторной. В результате получают базовую и эмиттерную области с переменной концентрацией примесей, которые с основной полупроводниковой пластиной, являющейся коллекторной областью транзистора, образуют два *p*-*n*-перехода. Неравномерность распределения концентрации легирующих примесей заключается в том, что наибольшая концентрация создается вблизи эмиттерного перехода и уменьшается ближе к коллекторному переходу, а максимальное значение достигается в середине базовой области (рис. 3.10). Неравномерная концентрация носителей зарядов в базовой области создает в ней электрическое поле ($E_Б$), подобно тому, как это происходит в электронно-дырочном переходе. Вектор напряженности поля направлен от эмиттера к коллектору (см. рис. 3.10). Под действием этого поля движение неосновных носителей заряда, инжектированных в базу из эмиттера, носит не столько диффузионный характер, сколько дрейфовый, под действием внутреннего поля базовой области; поэтому такие транзисторы принято называть дрейфовыми;

— *эпитаксиальные* — *p-n*-переходы получены методом эпитаксиального наращивания тонких высокоомных монокристаллических слоев (пленок) вещества на низкоомную подложку (кристалл), которые служат как бы ее естественным продолжением, так как кристаллографическая ориентация наращиваемого слоя повторяет кристаллографическую ориентацию подложки. Эпитаксия позволяет получить тонкие (1—10 мкм) однородные монокристаллические слои (эпитаксиальные слои) любого типа проводимости, электропроводности и удельного электрического сопротивления, какие невозможно создать иным способом. Такие пленки называют эпитаксиальными. Обычно эпитаксиальный слой получают выращиванием из газовой среды или раствора (расплава) вакуумным осаждением. Для изготовления биполярных эпитаксиальных транзисторов (рис. 3.11) чаще всего берут пластину кремния *1* ($n^+$-типа) (подложка) с удельным сопротивлением 0,01 Ом·см, на ней наращивают эпитаксиальный слой *2* (*n*-типа) толщиной 1—10 мкм с удельным сопротивлением 0,1—1,0 Ом·см, который служит продолжением подложки — коллектора. Базовый слой *3* (*p*-типа) не более 1 мкм и эмиттерный слой *4* (*n*-типа) также создаются методом эпитаксии. Эмиттерный слой создают из менее легированного полупроводникового материала, чем материал базы. Электрический переход между слоями *n*- и $n^+$-типа создает омический контакт подложки с базо-

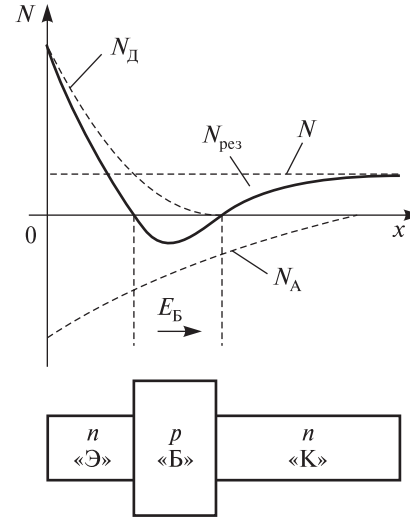



Рис. 3.10. Диаграмма изменения концентрации примесей в диффузионном транзисторе

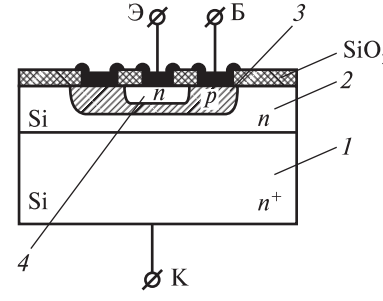



Рис. 3.11. Эпитаксиальный транзистор

вой структурой и имеет линейную вольт-амперную характеристику. Омические контакты применяются для электрических выводов от областей полупроводников, образующих *p-n*-переходы, без большого переходного сопротивления;

– *планарные* (плоские) *p-n*-переходы получены методом фотолитографии — плоские контактирующие поверхности создаются по шаблону-плану травлением и диффузионным напылением на вытравленные участки. При планарной технологии процесс диффузии осуществляется многократно с целью последовательного образования слоев с различным типом электропроводности. Одновременно на поверхности полупроводникового кристалла выращивается пленка окисла. Электронно-дырочные переходы при планарной технологии создаются методом локальной диффузии или эпитаксии. Рассмотрим пример: основу планарного биполярного транзистора *n-p-n*-структуры (рис. 3.12) составляет хорошо отшлифованная пластина монокристаллического легированного фосфором кремния, имеющая переменную концентрацию примесей $n$-$n^+$ (рис. 3.12, *а*).

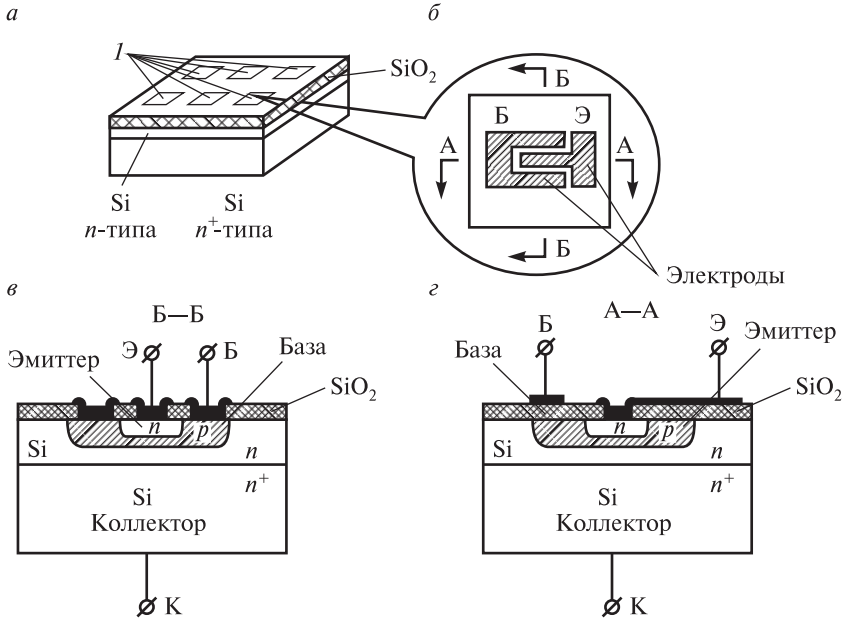



Рис. 3.12. Структура планарного транзистора

Структура *n*-типа выполняет роль высокоомного коллектора, а общая структура $n$-$n^+$-типа является омическим контактным выводом. После химической очистки пластина покрывается плотной пленкой двуокиси кремния $SiO_2$ для защиты от воздействия внешней среды. В пленке методом фотолитографии окисла вытравливаются до слоя *n*-типа окна по форме необходимой конфигурации для создания следующего слоя. На исходной пластине одновременно можно создавать несколько биполярных транзисторов по планарной технологии *1* (рис. 3.12, *а*). Через вскрытые окна локально воздействуют методом диффузии акцепторной примесью, например парами борной кислоты, создавая в окне слой с электропроводностью *p*-типа — базу транзисторной структуры. Созданную *n*-*p*-структуру вновь покрывают защитной пленкой двуокиси кремния $SiO_2$ и, вскрывая новые окна, проводят локальную диффузию донорной примесью например пятиокисью фосфора, для создания эмиттерного слоя *n*-типа; на рис. 3.12, *б*, приведена сформированная структура базы и эмиттера для одного биполярного транзистора. На контактных соединениях базового слоя с эмиттерным создается эмиттерный переход, а в контактном соединении базового слоя с коллекторным слоем — коллекторный переход. Дальнейшее вскрытие базового и эмиттерного слоев предназначено для создания выводов от них путем напыления алюминия и подсоединения к нему отводящих проводников (Б и Э), а вывод коллектора (К) создается от пластины $n^+$-типа. На рис. 3.12, *в* и *г*, показаны разрезы планарной структуры транзистора;

— *мезодиффузионные, мезосплавные, мезоэпитаксильные* — получены после предварительной обработки поверхности полупроводника, в результате которой образуются небольшие столбики (рис. 3.13). Эти столбики получили название *мезо* (от исп. mesa — стол, плато, выступ). На них формируются различными методами полупроводниковые переходы;

— *конверсионные* — *p*-*n*-переходы созданы изменением (конверсией) типа электропроводности исходной полупроводниковой пластины в результате термической об-

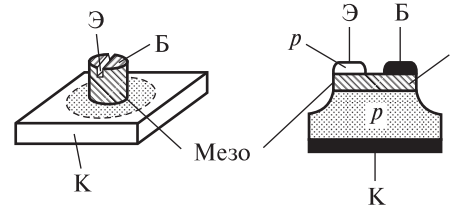


Рис. 3.13. Структура мезотранзистора

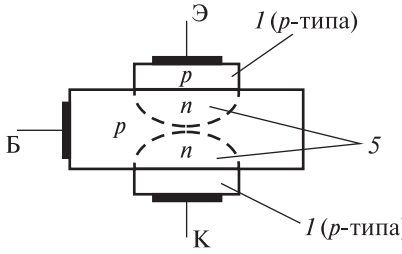



Рис. 3.14. Структура конверсионного транзистора

работки и введением в нее примеси с помощью вплавления и диффузии, т.е. изготавливаются по диффузионно-сплавной технологии. Исходным материалом служит пластина полупроводника, содержащая донорную и акцепторную примеси, но одна из них преобладает, поэтому полупроводник имеет определенный тип электропроводности (например, *p*-типа) (рис. 3.14). На поверхность пластины накладывают кусочек металла *1* (сплава), который является навеской и используется в качестве примеси. Всю эту структуру нагревают до расплавления и в результате преобладающая примесь полупроводника переходит в область навески с одной и другой стороны из приграничной зоны *5* в навеску *1*. Приграничная зона *5*, оставшаяся без преобладающей примеси, приобретает другой тип электропроводности (*n*-типа на рис. 3.14), а навески приобретают структуру *p*-типа (*1* на рис. 3.14) и служат в качестве эмиттерной и коллекторной областей, а между ними образуется тонкий слой базовой области.

По технологии и методу изготовления *p-n*-переходов биполярные транзисторы могут изготавливаться по смешанной технологии, при которой отдельные структуры транзистора изготавливаются разными методами и технологическими процессами. В результате такие транзисторы классифицируются как сплавно-диффузионные, мезодиффузионные, планарно-эпитаксиальные и т.д.

5. *По распределению примесей в объеме базовой области:*

– *диффузионные* — все атомы примеси равномерно распределены по всему объему базы, а заряды движутся в ней благодаря диффузии, поэтому такие транзисторы называются диффузионными или бездрейфовыми;

– *дрейфовые* — атомы примеси неравномерно распределены по всему объему базы. У эмиттерного перехода их концентрация значительно выше. В результате в базе создается внутреннее электрическое поле (при сохранении в целом электронейтральности базы) и заряды движутся в ней в основном под действием внутреннего поля (дрейфуют). Поэтому такие транзисторы называются дрейфовыми.

6. *По граничной или предельно допустимой рабочей частоте*:

– низкочастотные (НЧ) $f_{гр} \leq 3$ МГц; среднечастотные (СЧ) 3 МГц $< f_{гр} < 30$ МГц; высокочастотные (ВЧ) $f_{гр} > 30$ МГц; сверхвысокочастотные (СВЧ) $f_{гр} > 300$ МГц.

7. *По максимальной рассеиваемой мощности*:

– малой мощности $P_{max} \leq 0{,}3$ Вт; средней мощности 0,3 Вт $< P_{max} \leq 15$ Вт; большой мощности $P_{max} > 1{,}5$ Вт.

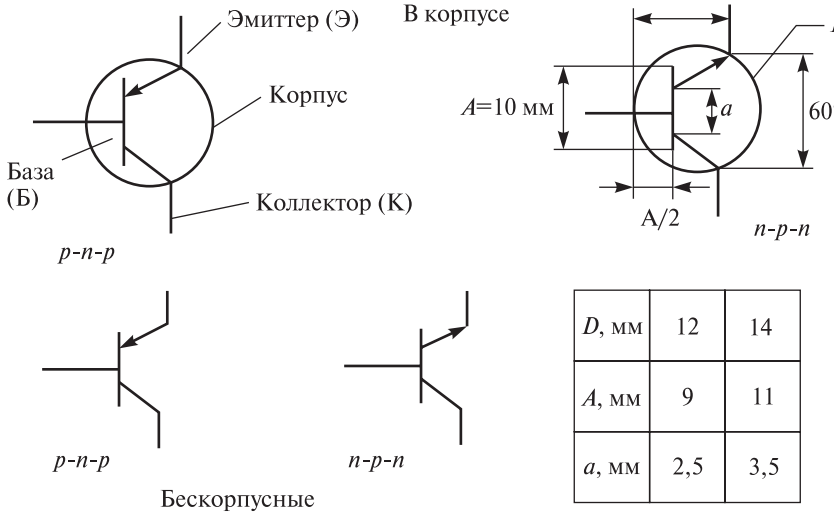
8. *По функциональному назначению*:

– усилительные; генераторные; переключательные; импульсные; универсальные.

## 3.3. Система обозначений транзисторов

Основой системы обозначений транзистора служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем (рис. 3.15). База обозначена отрез-




| | | |
|---|---|---|
| *D*, мм | 12 | 14 |
| *A*, мм | 9 | 11 |
| *a*, мм | 2,5 | 3,5 |

Рис. 3.15. Условное графическое и символическое обозначения биполярных транзисторов

ком, эмиттер — линией со стрелкой под углом к базе, где стрелка указывает тип транзистора. Если стрелка направлена в сторону базы, то транзистор *p-n-p*-типа, а если стрелка направлена от базы, то транзистор *n-p-n*-типа. В дискретной схемотехнике в обозначение транзистора добавляется корпус в виде окружности, а в интегральной схемотехнике корпус отсутствует. Размеры графического обозначения биполярного транзистора показаны на рис. 3.15.

Графическое обозначение полевого (униполярного) транзистора рассмотрено в гл. 4.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения транзистора, классифицирующий транзисторы по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: VT1, где V — полупроводниковый прибор, Т — триод, номер 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Буквенно-числовой код в системе обозначений транзисторов, классифицирующий транзисторы по определенным признакам в справочниках и содержащий определенную информацию о свойствах прибора, состоит из семи элементов:

*первый элемент* — буква для транзисторов широкого применения или цифры для транзисторов общетехнического применения, обозначают исходный материал, на основе которого изготовлен транзистор (Г или 1 — германий, К или 2 — кремний, А или 3 — галлий, И или 4 — соединения индия);

*второй элемент* — буква, указывающая подкласс (группу) транзистора (Т — биполярный, П — полевой);

*третий элемент* — цифра, указывающая подкласс транзистора по значениям рассеиваемой мощности и граничной частоте:

| | | |
|---|---|---|
| 1 — НЧ | 4 — НЧ | 7 — НЧ |
| 2 — СЧ | 5 — СЧ | 8 — СЧ |
| 3 — ВЧ и СВЧ | 6 — ВЧ и СВЧ | 9 — ВЧ и СВЧ |
| малой мощности | средней мощности | большой мощности |
| $P_{max} \le 0{,}3$ Вт | $0{,}3 \le P_{max} \le 1{,}5$ Вт | $P_{max} > 1{,}5$ В; |

*четвертый элемент* — цифры, указывающие порядковый номер разработки (от 1 до 99);

*пятый элемент* — буква, показывающая распределение транзисторов данной разработки по классификационным параметрам — по технологии изготовления;

*шестой элемент* — (дополнительный) — цифра от 1 до 9 для обозначения модернизаций транзистора, приводящих к изменению его конструкции или электрических параметров; буква С — обозначает набор в одном общем корпусе однотипных транзисторов, т.е. сборка; цифра, написанная через дефис для бескорпусных транзисторов, указывает: конструкцию выводов и основу кристалла, 1 — гибкие выводы без подложки; 2 — гибкие выводы с подложкой; 3 — жесткие выводы без подложки; 4 — жесткие выводы с подложкой; 5 — с контактными площадками без подложки и без выводов; 6 — с контактными площадками на подложке, но без выводов.

Например: КТ315А — кремниевый биполярный транзистор широкого применения, маломощный ($P_{max} \le 0{,}3$Вт), высокочастотный (30 МГц $< f_{гр} \le$ 30 МГц), 15-й номер разработки, группа А.

## 3.4. Режимы работы и схемы включения транзистора

Для задания режима включения транзистора на эмиттерный и коллекторный переходы подключают постоянные напряжения внешних источников питания.

В схемах электронных устройств различают две основные цепи: входную (управляющую) и выходную (управляемую). В биполярном транзисторе во входную цепь включается эмиттерный переход, а в выходную — коллекторный или эмиттерный переход. Поскольку транзистор — трехэлектродный прибор, то один из его электродов является общим для двух цепей. В зависимости от того, какой из электродов при включении транзистора является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзисторов в электрическую цепь — с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК) (рис. 3.16).

В схеме с ОБ (рис. 3.16, *а*) напряжение смещения на эмиттерный переход включено между эмиттером и базой ($U_Э = U_{ЭБ}$), а напряжение смещения на коллекторном переходе включено между коллектором и базой ($U_К = U_{КБ}$). Обозначение напряжения в схемах транзисторов снабжено буквенными индексами, указывающими на электроды, между которыми оно включено, причем вторым индексом указывается общий электрод схемы, в данной схеме — Б.

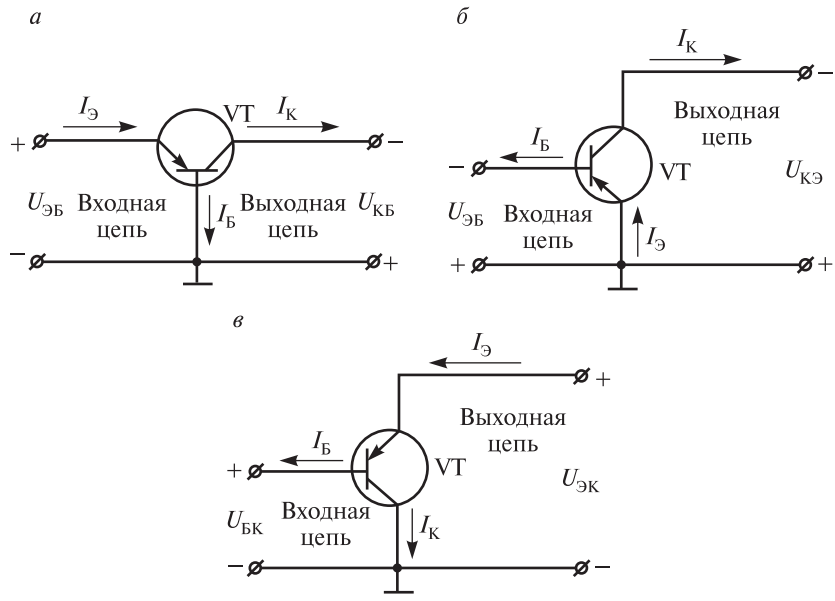



Рис. 3.16. Схемы включения биполярных транзисторов в статическом режиме

Входным управляющим током является ток эмиттера ($I_Э$), а выходным — ток коллектора ($I_К$). Ток базы ($I_Б$) является общим для входной и выходной цепей.

В схеме с ОЭ (рис. 3.16, *б*) напряжение смещения на эмиттерный переход включено между базой и эмиттером ($U_Э = U_{БЭ}$), а напряжение на коллекторный переход включено между коллектором и базой и определяется действием двух источников питания ($U_{БЭ}$ и $U_{КЭ}$), включенных встречно ($U_К = U_{КЭ} - U_{БЭ}$). Входным управляющим током является ток базы ($I_Б$), а выходным — ток коллектора ($I_К$). Ток эмиттера ($I_Э$) является общим для входной и выходной цепей.

В схеме с ОК (рис. 3.16, *в*) напряжение смещения на эмиттерный переход включено между эмиттером и базой и определяется действием двух источников питания ($U_{БК}$ и $U_{ЭК}$), включенных встречно ($U_Э = U_{ЭК} - U_{БК}$), а напряжение на коллекторный переход включено между базой и коллектором ($U_К = U_{БК}$). Входным управляющим током является ток ($I_Б$), а выходным — ток эмиттера ($I_Э$). Ток коллектора ($I_К$) является общим для входной и выходной цепей.

Для транзисторов структуры *n-p-n* в аналогичных схемах меняется полярность напряжения и направление токов.

Рассмотренные схемы включения транзисторов создают статический режим включения транзистора — без входного сигнала во входной цепи и нагрузки в выходной цепи.

Схемы включения транзистора в динамическом режиме содержат источник входного сигнала во входной цепи и нагрузку в выходной цепи. В качестве источника сигнала может быть любой источник постоянного, переменного или импульсного напряжения или тока. Источник сигнала может включаться параллельно или последовательно с источником смещения во входной цепи. Нагрузка в выходной цепи может включаться последовательно или параллельно с транзистором.

На рис. 3.17 показано последовательное включение источника сигнала ($U_{ис}$) и нагрузки ($R_{Н}$) в схемах включения транзисторов, а на рис. 3.18 — параллельное. Необходимо отметить, что источник сигнала во входной цепи может быть включен с источником смещения последовательно, а нагрузка в выходной цепи включена с транзистором параллельно, и наоборот, т.е. возможна комбинация различных вариантов включения во входной и выходной цепях.

Каждый *p-n*-переход транзистора может быть включен под напряжение прямого и обратного смещения. Соответственно различают четыре режима включения биполярного транзистора:

– нормальный активный режим, при котором эмиттерный переход включается под напряжение прямого смещения, а коллекторный переход под напряжение обратного смещения;

– инверсный активный режим, когда эмиттерный переход включается под напряжение обратного смещения, а коллекторный переход под напряжение прямого смещения;

– отсечки, при котором эмиттерный и коллекторный переходы включены под напряжение обратного смещения, транзистор полностью закрыт и ток через транзистор ничтожно мал;

– насыщения, когда эмиттерный и коллекторный переходы включены под напряжения прямого смещения; в переходах идет инжекция основных носителей зарядов, вследствие чего транзистор превращается в двойной диод, а ток в выходной цепи достигает максимального значения, при выбранном значении нагрузки, и не управляется током входной цепи — транзистор полностью открыт.

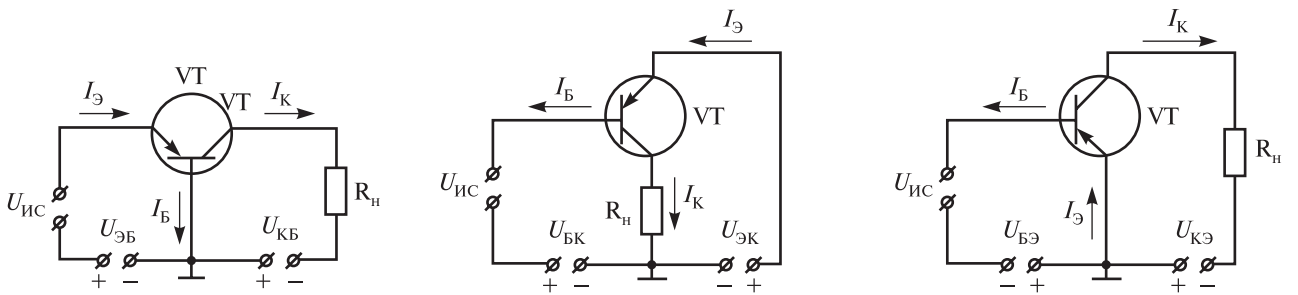



Рис. 3.17. Схемы включения биполярных транзисторов в динамическом режиме с последовательным включением источника сигнала во входной цепи и нагрузки в выходной цепи

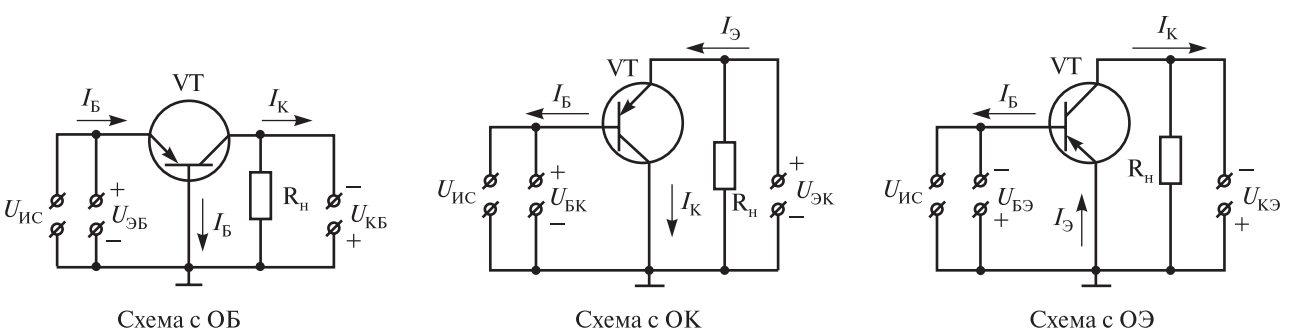



Рис. 3.18. Схемы включения биполярных транзисторов в динамическом режиме с параллельным включением источника сигнала во входной цепи и нагрузки в выходной цепи

Нормальный режим включения транзистора используется в схемах усилителей и генераторов, инверсный режим используется крайне редко, отсечки и насыщения характерны в схемах импульсных устройств.

## 3.5. Принцип работы и токи в биполярном транзисторе при нормальном включении

### *3.5.1. Структура биполярного транзистора*

Рассмотрим принцип работы биполярного транзистора на модели планарного бездрейфового *n-p-n*-транзистора, включенного по схеме с общей базой при нормальном включении, т.е. в активном режиме. Для анализа принципа работы биполярного транзистора необходимо вспомнить некоторые особенности построения биполярного транзистора на примере одного из вариантов реальной структуры, показанной в разрезе на рис. 3.19. В полупроводниковую пластинку *4* с относительно небольшой концентрацией донорной примеси, обеспечивающей проводимость *n*-типа, внедрена акцепторная примесь относительно небольшой концентрации, но достаточной для того, чтобы образовался слой с электропроводностью *p*-типа, отмеченный цифрами *2* и *3*. Затем через отверстие в маске внедрена донорная примесь большой концентрации, в результате чего образуется область *1* с электропроводностью $n^+$-типа.

На границах между областью *1* и слоем *2-3,* а также между слоями *2-3* и *4* образуются *n-p*-переходы. Концентрация примесей (следовательно, и основных носителей зарядов) в области *1* значительно выше концентрации примесей в слое *2-3*. Область *1* является эмиттером, область *2-3* — базой, а переход *1 — 2-3* — эмиттерным. Область *4* является коллектором, а переход *4 — 2-3* — коллекторным. На поверхности базы, эмиттера и коллектора нанесен слой металла, образующий эмиттерный Э, базовый Б и коллекторный К выводы. Как видно из рис. 3.19,

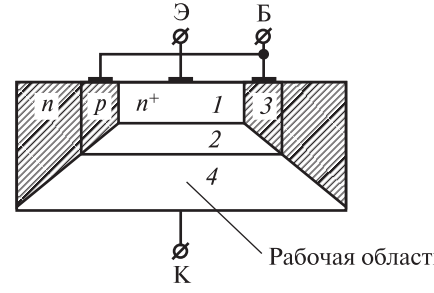



Рис. 3.19. Схематическое изображение реальной структуры биполярного транзистора

каждый из переходов имеет донную и боковые части. Коллекторная рабочая (активная) область транзистора расположена под донной рабочей частью эмиттерного перехода (на рис. 3.19 не заштрихована). Область базы *2* называется активной, а область *3* — пассивной, остальные (заштрихованные) области структуры также являются пассивными, т.е. в известной мере паразитными, их наличие неизбежно, но в процессе электропроводности не участвуют.

Таким образом, на структуре, представленной на рис. 3.19, наглядно видно, что эмиттерная область занимает наименьший объем, и толщина базы меньше толщины эмиттера и коллектора, что было отмечено при описании устройства биполярного транзистора. Необходимо уточнить особенности размещения зарядов в каждой из структур биполярного транзистора. Поскольку структура эмиттерной и коллекторной областей одинакова, то и виды зарядов и их расположение в данных структурах одинаковы. Существенным отличием является только то, что концентрация носителей зарядов в эмиттерной области больше, чем в коллекторной области.

В эмиттерной и коллекторной областях *n*-типа находятся: положительные, равномерно расположенные по всему объему неподвижные ионы атомов донорной примеси *1* (рис. 3.20, *а*);

– отрицательные, подвижные, хаотично расположенные электроны *2* от атомов донорной примеси и электроны от атомов собственного полупроводника *2*, образовавшихся при генерации;

– положительные, фиктивно подвижные, равномерно расположенные дырки *3*, образовавшиеся от атомов собственного полупроводника при генерации.

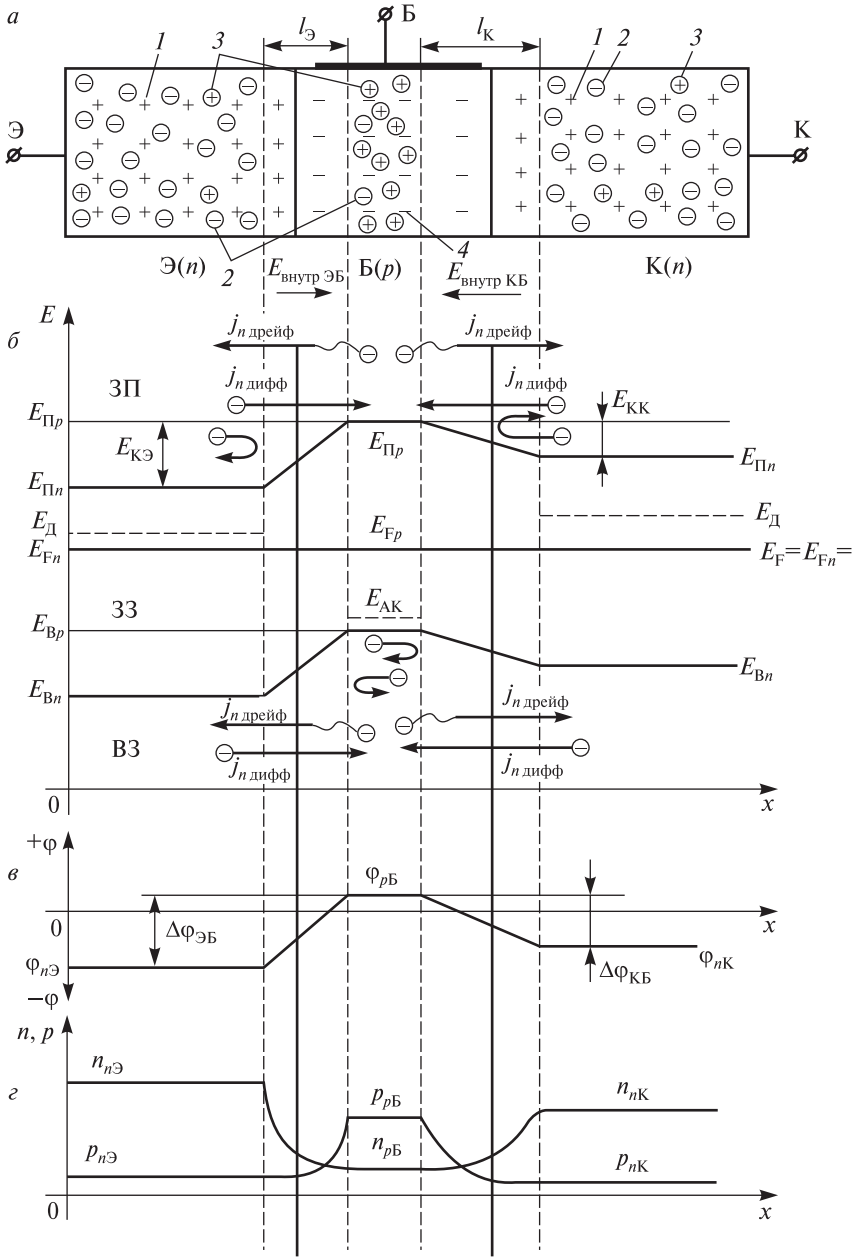
В базовой области *p*-типа находятся:

– отрицательные, равномерно расположенные по всему объему, неподвижные ионы атомов акцепторной примеси *4* (рис. 3.20, *а*);

– положительные, фиктивно подвижные, приблизительно равномерно расположенные дырки (ионы) *3* от атомов собственного

→

Рис. 3.20. Биполярный бездрейфовый транзистор без напряжения смещения: *а* — идеализированная плоскостная модель; *б* — энергетическая диаграмма *n-p-n* транзистора без напряжения смещения; *в* — структура распределения потенциалов; *г* — структура распределения носителей зарядов; ЗП — зона проводимости; ЗЗ — запрещенная зона; ВЗ — валентная зона


а
Б
$l_Э$
$l_К$
1
3
1
2
3
Э
К
4
2
Э(n)
$E_{внутр\ ЭБ}$
Б(p)
$E_{внутр\ КБ}$
К(n)
б
E
$j_{n\ дрейф}$
$j_{n\ дрейф}$
$j_{n\ дифф}$
$j_{n\ дифф}$
ЗП
$E_{Пp}$
$E_{КЭ}$
$E_{Пp}$
$E_{КК}$
$E_{Пn}$
$E_{Пn}$
$E_Д$
$E_Д$
$E_{Fp}$
$E_{Fn}$
$E_F=E_{Fn}=$
$E_{АК}$
ЗЗ
$E_{Вp}$
$E_{Вn}$
$E_{Вn}$
$j_{n\ дрейф}$
$j_{n\ дрейф}$
ВЗ
$j_{n\ дифф}$
$j_{n\ дифф}$
0
x
в
+φ
$φ_{pБ}$
0
x
$Δφ_{ЭБ}$
$φ_{nЭ}$
$φ_{nК}$
$Δφ_{КБ}$
−φ
г
n, p
$n_{nЭ}$
$p_{pБ}$
$n_{nК}$
$p_{nЭ}$
$n_{pБ}$
$p_{nК}$
0
x

полупроводника, образовавшихся при введении акцепторной примеси и при генерации;

– отрицательные, подвижные, хаотично расположенные электроны *2*, образовавшиеся от атомов собственного полупроводника при генерации.

Переходам транзистора присущи некоторые особенности. Обычно эмиттерную и коллекторную области легируют примесями значительно больше, чем базу, поэтому концентрации основных носителей зарядов (электронов) в эмиттере и коллекторе превышают концентрацию основных носителей зарядов (дырок) в базе. По этой же причине эмиттерный и коллекторный переходы несимметричны и имеют бóльшую толщину в области базы. Таким образом, для транзистора базовый слой должен быть более высокоомным, чем эмиттерный и коллекторный слои. Концентрация основных носителей зарядов в эмиттерном слое ($n_{n\text{Э}}$) несколько больше, чем в коллекторном слое транзистора ($n_{n\text{К}}$) (рис. 3.20, *г*).

### *3.5.2. Энергетическая диаграмма биполярного транзистора*

Энергетическая диаграмма биполярного транзистора в отсутствие напряжения смещения на электродах приведена на рис. 3.20, *б*. Она показывает величину потенциальной энергии в полупроводниках и в контактном соединении на определенном энергетическом уровне от «обобщенного» ядра всех атомов, находящихся в единой кристаллической структуре твердого полупроводника. Величина энергии выражена через напряженность $E$, которая прямо пропорциональна запасу энергии электрона на энергетическом уровне $W$, обратно пропорциональна величине электрического заряда электрона $e$ и равна $E = W/e$ (В).

На энергетической диаграмме (рис. 3.20, *б*) видно, что бóльшая часть потенциальных барьеров переходов лежит в базовой области, так как концентрация зарядов в ней меньше, чем в коллекторе и значительно меньше чем в эмиттере. Из этого следует, что переходы несимметричны, ширина потенциального барьера эмиттерного перехода меньше коллекторного перехода ($l_{\text{Э}} < l_{\text{К}}$), так как при создании коллекторного перехода применяются менее легированные полупроводники, чем при создании эмиттерного перехода (рис. 3.20, *г*). Поэтому эмиттерный и коллекторный переходы имеют разную величину напряженности. Напряженность в контактном

слое коллекторного перехода ($E_{КК}$) меньше, чем в контактном слое эмиттерного перехода ($E_{КЭ}$), т.е. $E_{КК} < E_{КЭ}$.

Вся система находится в состоянии термодинамического равновесия и характеризуется единым уровнем Ферми во всех областях ($E_{Fn} = E_{Fp} = E_F$). При комнатной температуре все примесные атомы ионизированы и поэтому уровень Ферми вне границ запирающих слоев ($l_Э$ и $l_К$) лежит в *p*-полупроводнике выше уровней акцепторов ($E_{Fp} > E_{АК}$), а в *n*-полупроводниках — ниже уровня доноров ($E_Д > E_{Fn}$), т.е. энергетические уровни *p*-области потолка валентной зоны $E_{Вp}$ и дна зоны проводимости $E_{Пp}$ сдвинуты относительно соответствующих уровней $E_{Вn}$ и $E_{Пn}$ в *n*-областях на величину контактной разности потенциалов в переходах $\varphi_{ЭБ}$ и $\varphi_{КБ}$ (рис. 3.20, *в*), равную соответственно напряженности в контактном слое коллекторного перехода ($E_{КК}$) и эмиттерного перехода ($E_{КЭ}$).

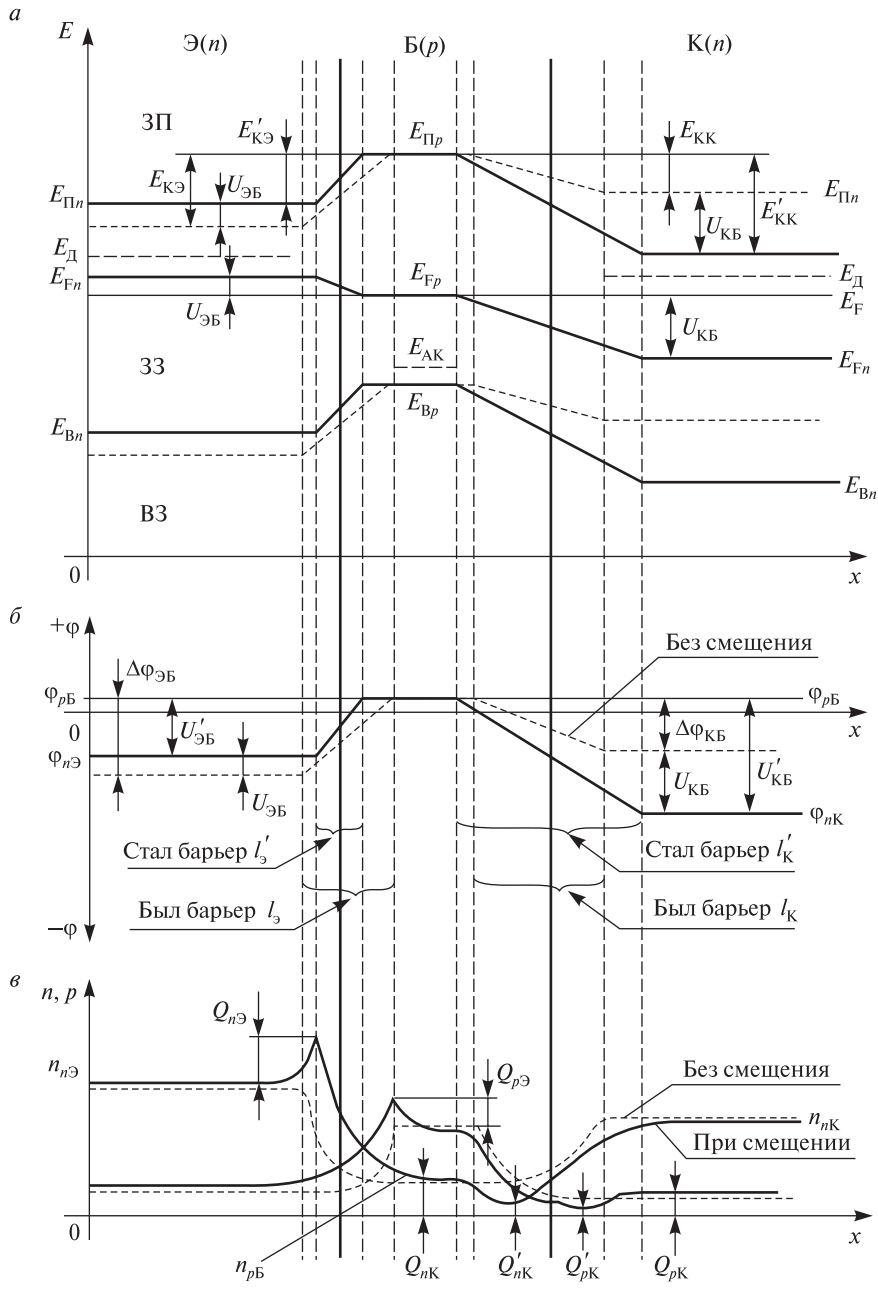
Структура распределения потенциалов в транзисторе, показанная на рис. 3.20, *в*, построена с учетом следующих условий:

– поскольку концентрация подвижных носителей зарядов в потенциальном барьере значительно ниже, чем в *p*- и *n*-областях, электрическое сопротивление *p*-*n*-переходов достаточно велико по сравнению с сопротивлением областей базы, эмиттера и коллектора;

– в однородных областях базы, эмиттера и коллектора поле очень мало и практически отсутствует, так как они однородны и электрически нейтральны, т.е. потенциал равен нулю.

Таким образом, на рис. 3.20, *в*, показано распределение потенциалов в переходах, т.е. контактная разность потенциалов ($\varphi_{ЭБ}$ и $\varphi_{КБ}$) и изменение ее величины при переходе от одного контактирующего полупроводника к другому. В равновесном состоянии (при отсутствии внешних напряжений) диффузионный ток и ток дрейфа в каждом переходе взаимно компенсируются, поэтому результирующий ток в переходах и транзисторе равен нулю ($j_{n\,дифф} = j_{n\,дрейф}$, $j_{p\,дифф} = j_{p\,дрейф}$). Диффузионное и дрейфовое движение электронов в переходах показано на энергетической диаграмме рис. 3.20, *б*, в зонах проводимости и в валентных зонах контактирующих полупроводников ($j_{дифф} = j_{дрейф}$).

При подключении к транзистору в активном режиме напряжений внешнего источника (прямого смещения $U_{ЭБ}$ к эмиттерному переходу и обратного смещения $U_{КБ}$ к коллекторному переходу) энергетическая диаграмма изменяется (рис. 3.21, *а*).


а
E
Э(n)
Б(p)
К(n)
ЗП
ЗЗ
ВЗ
$E'_{КЭ}$
$E_{КЭ}$
$U_{ЭБ}$
$E_{Пn}$
$E_{Д}$
$E_{Fn}$
$E_{Пp}$
$E_{Fp}$
$E_{AK}$
$E_{Bp}$
$E_{Bn}$
$E_{КК}$
$E_{Пn}$
$U_{КБ}$
$E'_{КК}$
$E_{Д}$
$E_{F}$
$E_{Fn}$
0
x
б
+φ
−φ
$Δφ_{ЭБ}$
$φ_{pБ}$
$φ_{nЭ}$
$U'_{ЭБ}$
$Δφ_{КБ}$
$U'_{КБ}$
$φ_{nК}$
Без смещения
Стал барьер $l'_{э}$
Был барьер $l_{э}$
Стал барьер $l'_{К}$
Был барьер $l_{К}$
в
n, p
$Q_{nЭ}$
$n_{nЭ}$
$Q_{pЭ}$
$n_{nК}$
При смещении
$n_{pБ}$
$Q_{nК}$
$Q'_{nК}$
$Q'_{pК}$
$Q_{pК}$

Напряжение смещения на коллекторном переходе ($U_{КБ}$) больше напряжения смещения на эмиттерном переходе ($U_{ЭБ}$), т.е. $U_{КБ} >> U_{ЭБ}$. Это вызвано тем, что в коллекторном переходе высота потенциального барьера (контактная разность потенциалов $\Delta\varphi_{КБ} = \varphi_{n\text{К}} - \varphi_{p\text{Б}}$ (рис. 3.20, *в*) меньше, чем потенциальный барьер (контактная разность потенциалов $\Delta\varphi_{ЭБ} = \varphi_{n\text{Э}} - \varphi_{p\text{Б}}$) в эмиттерном переходе. Поле коллекторного перехода является ускоряющим для неосновных носителей зарядов, которые должны совершать экстракцию при работе транзистора в активном режиме. Поскольку напряженность поля очень мала, то для его увеличения необходимо подать на коллекторный переход напряжение обратного смещения. Под действием этого напряжения увеличивается контактная разность потенциалов ($U'_{КБ} = \Delta\varphi_{КБ} + U_{КБ}$) (рис. 3.21, *б*) между неподвижными зарядами в приконтактном слое, т.е. образуется потенциальный барьер и возрастает напряженность поля перехода ($E = \frac{U}{l_{К}}$). Потенциальный барьер — слой неподвижных носителей зарядов, а для освобождения приконтактного слоя от основных подвижных носителей зарядов, которых очень много, необходимо большое внешнее напряжение обратного смещения — порядка 5—50 В.

В эмиттерном переходе контактная разность потенциалов больше, чем в коллекторном переходе, однако на него подается напряжение прямого смещения и он предназначен для инжекции основных носителей зарядов. При прямом смещении потенциальный барьер разрушается основными носителями заряда, которых в структуре много. Из-за этого их дополнительный приток от источника смещения не должен быть большим. Это указывает на необходимость подключения напряжения смещения небольшой величины — порядка 0,1—1 В.

Напряжение на эмиттерном переходе создает прямое смещение, понижая высоту потенциального барьера до значения напряжен-

←

Рис. 3.21. Диаграммы биполярного бездрейфового транзистора при напряжении прямого смещения:
*а* — энергетическая диаграмма *n-p-n*-транзистора; *б* — структура распределения потенциалов; *в* — структура распределения носителей зарядов; ЗП — зона проводимости; ЗЗ — запрещенная зона; ВЗ — валентная зона

ности в приконтактном слое, равном $E'_{КЭ} = E_{КЭ} - U_{ЭБ}$, и уменьшая ширину потенциального барьера до значения $\ell'_{Э} < \ell_{Э}$ (рис. 3.21, *б*). Под действием этого напряжения уменьшается контактная разность потенциалов ($U'_{ЭБ} = \Delta\varphi_{ЭБ} - U_{ЭБ}$) (рис. 3.21, *б*) между неподвижными эарядами в приконтактном слое, т.е. потенциальный барьер снижается и уменьшается напряженность поля перехода. Это происходит из-за повышения концентрации основных носителей зарядов в эмиттере и базе. Границы зон проводимости $E_{Пn}$, валентной зоны $E_{Вn}$ и уровня Ферми $E_{Fn}$ в области эмиттера сместятся вверх на величину $U_{ЭБ}$ (рис. 3.21, *а*), так как увеличение концентрации основных носителей зарядов в *n*-полупроводнике повышает уровень Ферми ($E_{Fn}$) и все энергетические уровни по сравнению с их положением без смещения электронно-дырочных переходов. Также понижается дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода ($r_{Э\ диф}$).

Напряжение на коллекторном переходе создает обратное смещение, увеличивая высоту потенциального барьера до значения напряженности в контактном слое, равного $E'_{КК} = E_{КК} + U_{КБ}$, и увеличивая ширину потенциального барьера до значения $\ell'_{К} > \ell_{К}$ (рис. 3.21, *б*). Это происходит из-за понижения концентрации неосновных носителей зарядов в коллекторе и базе. Границы зон проводимости $E_{Пn}$, валентной зоны $E_{Вn}$ и уровня Ферми $E_{Fn}$ в области коллектора сместятся вниз на величину $U_{КБ}$ (рис. 3.21, *а*) по сравнению с базой, так как понижение концентрации основных носителей зарядов в *n*-полупроводнике понижает уровень Ферми ($E_{Fn}$) и все энергетические уровни по сравнению с их положением без смещения. Также повышается дифференциальное сопротивление коллекторного перехода ($r_{К\ диф}$), при котором ограничивается движение основных носителей зарядов.

Энергетические уровни базы (рис. 3.21, *а*) не снижаются, так как в ней не изменяется концентрация основных носителей зарядов. Это связано с тем, что избыток поступивших носителей зарядов из эмиттерного перехода (неосновные носители заряда для базы) компенсируется поступившими (основными носителями заряда для базы) противоположными по знаку зарядами от источника смещения $U_{ЭБ}$ и переходом неосновных носителей зарядов в коллектор.

Распределение носителей зарядов в транзисторе показано на рис. 3.21, *в*. Видно, что число основных носителей зарядов в эмиттере возле эмиттерного перехода возрастает из-за диффузионного движения электронов от источника прямого смещения $U_{ЭБ}$. Эти заряды расходуются на объемную точечную компенсацию — разрушение потенциального барьера ($Q_{n Э}$). Аналогично происходит увеличение основных носителей зарядов в области базы ($Q_{p Э}$).

В коллекторном переходе неосновные носители зарядов покидают *p*- и *n*-области, т.е. их число снижается в объемах, близких к границе перехода, до значений, близких к нулю, в результате экстракции ($Q'_{n К}$, $Q'_{p К}$). Однако в глубине кристалла базы и коллектора объем зарядов остается практически постоянным за счет притока зарядов от внешнего источника $U_{КБ}$ ($Q_{n К}$ и $Q_{p К}$).

### *3.5.3. Движение носителей зарядов при нормальном включении*

При прямом смещении эмиттерного перехода транзистора ширина потенциального барьера уменьшается до значения $\ell'_К$ (рис. 3.21, *а*) и начинаются инжекция электронов из эмиттера в базу и встречное движение основных носителей — дырок из базы в эмиттер.

Благодаря инжекции электронов из эмиттера в базу их концентрация в базе вблизи эмиттерного перехода повышается, за счет разности концентрации электронов вблизи эмиттерного и коллекторного переходов возникает диффузионное движение электронов в направлении коллекторного перехода. Во время этого движения некоторые электроны рекомбинируются с основными носителями базы — дырками и положительными ионами источника смещения эмиттерного перехода ($U_{эБ}$). Положительные заряды исчезают в базе в процессе рекомбинации. Таким образом, база остается электрически нейтральной.

Процесс рекомбинации практически отсутствует, так как ширина базы меньше диффузионной длины свободного пробега электронов в ней. Благодаря этому большинство электронов (93 %), инжектированных из эмиттера в базу, диффундируют через базу и достигают коллекторного перехода без рекомбинации. В дрейфовых транзисторах заряды в базовой области перемещаются под действием сил электрического поля базы, которое создается из-за неравномерного распределения концентрации примесей в объеме базы. В коллекторном переходе при напряжении обратного смещения ширина по-

тенциального барьера увеличивается до значения $\ell'_{К}$ (рис. 3.21) и напряженность внутреннего электрического поля перехода повышается. Это поле действует согласованно с полем внешнего источника напряжения на переходе.

Таким образом, результирующее поле в коллекторном переходе резко возрастает и для неосновных носителей зарядов является ускоряющим (электроны базы и дырки коллектора). Под действием этого поля происходит экстракция электронов, инжектированных в базу из эмиттера и из базы в коллектор. И возникает встречное движение неосновных носителей зарядов — дырок из коллектора в базу. Это движение существенно менее интенсивно, так как в коллекторе мало неосновных носителей, а в базе их количество увеличивается за счет инжекции из эмиттера. Электроны, экстрагированные в коллектор, рекомбинируются с основными носителями заряда — дырками и положительными ионами от источника $U_{КБ}$, в результате чего во внешней цепи протекает ток.

В рассматриваемом активном режиме включения через транзистор протекает сквозной ток (от эмиттера через базу и коллектор). Изменяя в небольших пределах напряжение на эмиттерном переходе $U_{ЭБ}$, можно в широких пределах управлять входным током $I_{Э}$, следовательно, и выходным током $I_{К}$. Таким образом, транзистор является прибором с управляемым током.

### *3.5.4. Токи в биполярном транзисторе при нормальном включении*

При нормальном активном режиме включения токи транзистора связаны уравнением: $I_{Э} = I_{Б} + I_{К}$, причем ток базы $I_{Б}$ значительно меньше токов эмиттера $I_{Э}$ и коллектора $I_{К}$.

***Ток в эмиттерном переходе.*** В активном нормальном режиме переход эмиттер—база находится под напряжением прямого смещения и электроны из эмиттера свободно инжектируют через *p*-*n*-переход в базу и создают электронный ток эмиттерного перехода $I_{Эn}$, а из базы в эмиттер инжектируют дырки, создавая встречную составляющую дырочного тока эмиттерного перехода $I_{Эp}$. Значения этих токов соответствуют концентрации основных носителей зарядов, поэтому при $N_{nЭ} \approx N_{pБ}$ справедливо неравенство $I_{Эn} >> I_{Эp}$. Суммарный ток инжекции в эмиттерном переходе (рис. 3.22 и 3.23) равен $\overline{I}_{Э} = \overline{I}_{Эn} + \overline{I}_{Эp} + \overline{I}_{Э\ рек}$.

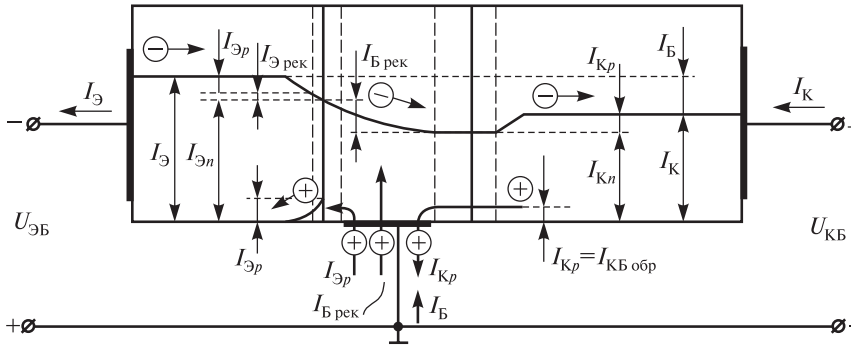



Рис. 3.22. Распределение токов в *n-p-n*-транзисторе при нормальном активном режиме

Ток $I_{Э\ рек}$ создан зарядами, участвующими в точечной компенсации неподвижных носителей зарядов — дырок — в потенциальном барьере, т.е. в его разрушении.

Инжекционный ток дырок ($I_{Эp}$) из базы в эмиттерную область мал. Он замыкается во входной цепи и является источником потерь.

Эффективность работы эмиттера оценивается коэффициентом инжекции (или коэффициентом эффективности эмиттера), который равен отношению полезного тока к полному току в переходе и определяет, какую долю в токе эмиттера имеет его составляющая, обусловленная инжекцией носителей из эмиттера в базу при $U_{КБ}$ = const:

$$\gamma_и = \frac{I_{Эn}}{I_Э} = \frac{I_{Эn}}{I_{Эp} + I_{Эn} + I_{Э\ рек.}} \approx 0{,}99—0{,}997.$$

***Ток в базовой области.*** Области базы достигают лишь заряды, составляющие ток $I_{Эn} = I_Э - I_{Эp} - I_{Э\ рек}$. Через базовый электрод протекает ток $I_Б$, т.е. проходят электроны (рис. 3.23). Ток базы состоит из трех составляющих (рис. 3.22 и 3.23).

Первая составляющая $I_{Эp}$ обусловлена инжекцией основных носителей базы (дырок) в эмиттер через открытый эмиттерный переход. Вторая составляющая $I_{Б\ рек}$ обусловлена конструктивной рекомбинацией электронов и дырок в базе и состоит из $I_{рек\ кон}$ (рекомбинация электронов и дырок осуществляется на поверхности

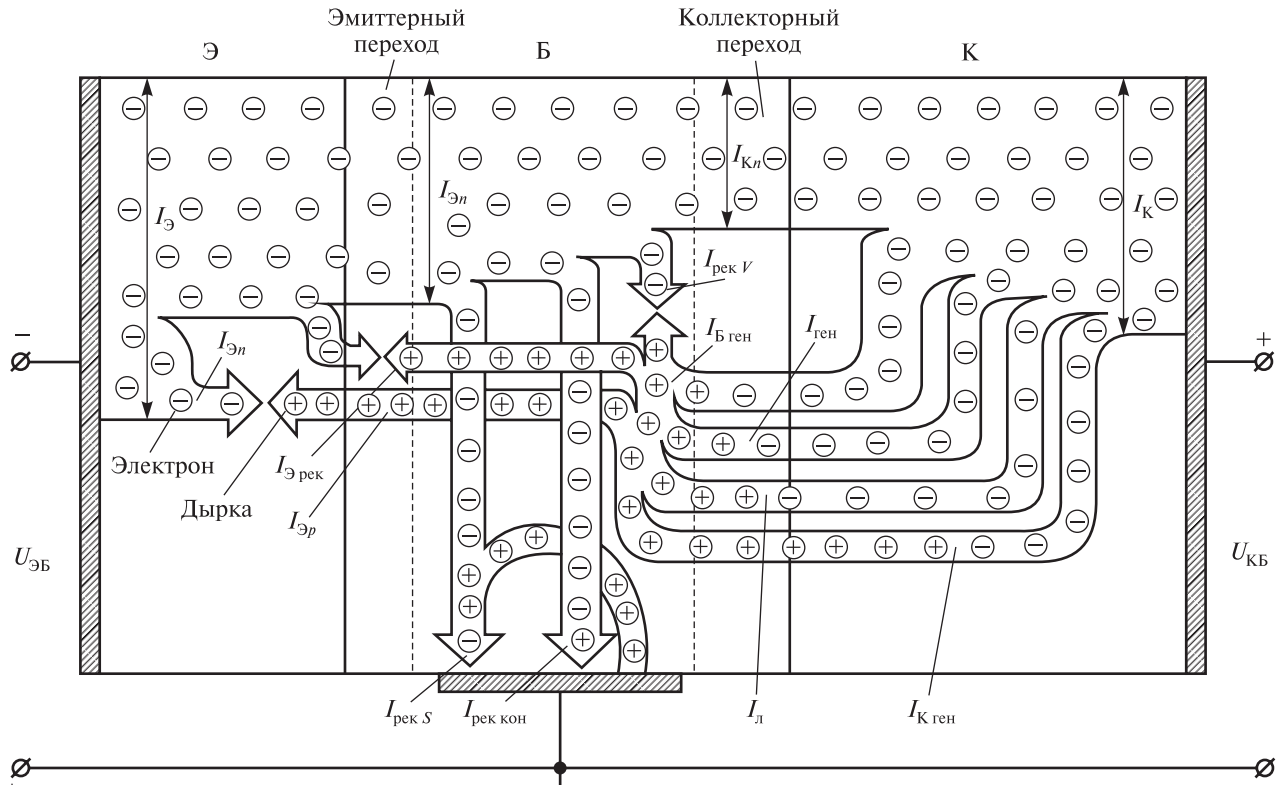



Рис. 3.23. Структура распределения потоков зарядов и токов каждого потока в *p-n-p*-транзистора при нормальном активном режиме включения

конструкции контакта базы), $I_{\text{рек }S}$ (рекомбинация на поверхности полупроводника), $I_{\text{рек }V}$ (рекомбинация электронов, поступивших из эмиттера, с основными носителями заряда в объеме полупроводника базы — дырками). Уменьшение числа дырок в базе при рекомбинации вызывает приток новых носителей от источника смещения $U_{\text{ЭБ}}$ для восстановления электрической нейтральности базы.

В процессе объемной рекомбинации (ток $I_{\text{рек }V}$) уменьшается число неосновных подвижных носителей заряд — электронов. В результате база обедняется подвижными носителями зарядов, что ведет к расширению потенциального барьера коллекторного перехода.

Таким образом, вторая составляющая тока базы ($I_{\text{Б рек}}$) определяется суммой токов $I_{\text{Б рек}} = I_{\text{рек кон}} + I_{\text{рек }S} + I_{\text{рек }V} = I_{\text{Э}n} - I_{\text{К}n}$.

Кроме процессов рекомбинации, в структуре транзистора происходят процессы генерации электронно-дырочных пар. Генерация происходит и в объеме базы, что порождает два потока носителей зарядов: поток электронов, составляющий ток $I_{\text{рек }V}$ и равный ему по значению поток дырок, составляющий ток дырок $I_{\text{Б ген}}$, образовавшихся при генерации (рис. 3.23). Третьей составляющей тока базы является составляющая $I_{\text{К}p} \approx I_{\text{КБ обр}}$, где $I_{\text{КБ обр}}$ — малый обратный ток коллекторного перехода, который направлен встречно с током $I_{\text{Б рек}}$ и $I_{\text{Э}p}$ и не зависит от тока $I_{\text{Э}}$. Таким образом, ток базы определяется по формуле

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}p} + I_{\text{Б рек}} - I_{\text{К}p} = I_{\text{Э}p} + I_{\text{рек кон}} + I_{\text{рек}S} + I_{\text{рек}V} - I_{\text{К}p} =$$

$$= I_{\text{Э}p} - I_{\text{К}p} + I_{\text{Э}n} - I_{\text{К}n} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}},$$

где $I_{\text{Э}} \approx I_{\text{Э}p} + I_{\text{Э}n}$, $I_{\text{К}} \approx I_{\text{К}p} + I_{\text{К}n}$.

Эффективность переноса неосновных носителей зарядов в базе от эмиттерного перехода к коллекторному оценивается коэффициентом переноса, который равен отношению тока $I_{\text{К}n}$ неосновных носителей, достигших коллекторного перехода, к току $I_{\text{Э}n}$ инжектированных основных носителей в базу из эмиттера, и показывает, какая часть инжектированных в базу носителей достигает коллектора при $U_{\text{КБ}} = \text{const}$:

$$\delta_{\text{П}} = \frac{I_{\text{К}n}}{I_{\text{Э}n}} \approx 0{,}99\text{—}0{,}999.$$

***Ток в коллекторном переходе.*** В активном режиме коллекторный переход включен под напряжение обратного смещения. Для неосновных носителей зарядов базы и коллектора поле этого перехода является ускоряющим. Под действием поля коллекторного перехода происходят экстракция электронов из базы в коллектор и встречная экстракция дырок из коллектора в базу. Составим баланс токов. Часть тока электронов, проходящая от эмиттера к коллектору, равна

$$I_{Kn} = I_{Э} - I_{Э\ рек} - I_{Эp} - I_{Б\ рек}.$$

Неуправляемая часть коллекторного тока ($I_{КБ\ обр}$) неосновных носителей зарядов — дырок — из коллектора в базу ($I_{Kp}$) и часть тока, созданного носителями зарядов, полученных в процессе генерации в коллекторе, базе и коллекторном переходе при обратном смещении ($I_{К\ ген}$), т.е. $I_{КБ\ обр} = I_{Kp} + I_{К\ ген}$.

В коллекторном переходе, так же как и во всей структуре транзистора, происходит генерация, при которой возникают два тока: ток дырок, который рекомбинируются с электронами основного потока, и ток электронов $I_{ген}$, поступающих в коллектор. Аналогичные пары потоков дырок и электронов создаются за счет генерации в объеме коллектора $I_{К\ ген}$ в процессе лавинного размножения, которая создает лавинный ток $I_{л}$ (рис. 3.23). Составляющую лавинного тока стараются уменьшить за счет уменьшения ширины базы.

Полный ток через коллекторный переход равен

$$I_{К} = I_{Kn} + I_{КБ\ обр} = I_{Kn} + I_{Kp} + I_{К\ ген}.$$

Эффективность работы коллектора оценивается коэффициентом умножения коллекторного тока, который равен отношению полного тока в переходе к току, созданному носителями заряда, достигшими коллекторного перехода от эмиттерного перехода. Коэффициент эффективности показывает, во сколько раз ток коллектора больше составляющей $I_{Kn}$:

$$\alpha_{К} = \frac{I_{К}}{I_{Kn}} = I_{Kn} I_{Kp} I_{К\ ген} \approx 1.$$

Эффективность работы транзистора, как усилительного элемента, оценивается статическим интегральным коэффициентом пере-

дачи эмиттерного тока. Он показывает, какая часть тока эмиттера замыкается через коллекторную цепь:

$$\alpha_и = \gamma_и \delta_п \alpha_К = \frac{I_{Эn}}{I_Э}\frac{I_{Кn}}{I_{Эn}}\frac{I_К}{I_{Кn}} = \frac{I_К}{I_Э}.$$

## 3.6. Физические параметры транзистора

Параметры транзисторов являются величинами, характеризующими их свойства. С помощью параметров можно сравнивать качество транзисторов, решать задачи, связанные с применением транзисторов в различных схемах, и рассчитывать эти схемы.

Для транзисторов предложено несколько различных систем параметров, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Все параметры можно разделить на физические (первичные, внутренние) и вторичные (внешние) параметры.

Физические параметры характеризуют свойства электронно-дырочных переходов и объема базы транзистора независимо от его схемы включения, а вторичные параметры для различных схем включения различны.

Рассмотрим физические параметры транзистора. Наилучшим образом структуру транзистора и происходящие в нем процессы представляет Т-образная эквивалентная схема с управляемым генератором тока (рис. 3.24). Этой схеме соответствует система физических и собственных параметров транзистора, характеризующих свойства самого транзистора, не зависящие от схемы его включения.

***Эмиттерный переход.*** Свойства эмиттерного перехода характеризуют дифференциальным коэффициентом передачи эмиттерного тока, дифференциальным сопротивлением и емкостями.

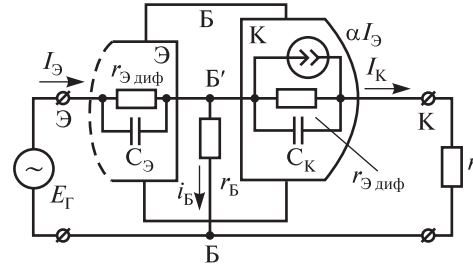



Рис. 3.24. Т-образная эквивалентная схема биполярного транзистора с управляемым генератором $E_Г$

Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода $r_{\text{Э диф}}$ для переменного тока представляет собой сопротивление эмиттерного перехода и эмиттерной области и определяется отношением приращения напряжения на эмиттерном переходе к приращению эмиттерного тока при коротком замыкании в цепи коллектора (по цепи переменного тока $U_{\text{К}} = 0$):

$$r_{\text{Э диф}} = \frac{\Delta U_{\text{ЭБ}}}{\Delta I_{\text{Э}}}\Bigg|_{U_{\text{К}} = \text{const}} \quad \text{(составляет десятки Ом)},$$

где $U_{\text{ЭБ}}$ — напряжение, приложенное к эмиттерному переходу, т.е. напряжение между клеммой эмиттера и внутренней точкой базы Б′ (см. рис. 3.24).

Емкость эмиттерного перехода ($C_{\text{Э}}$) состоит из барьерной емкости ($C_{\text{Э бар}}$) и диффузионной ($C_{\text{Э дифф}}$).

Барьерная емкость эмиттерного перехода шунтируется малым сопротивлением $r_{\text{Э диф}}$ и оказывает незначительное влияние на работу транзистора в диапазоне высоких частот.

Дифференциальный коэффициент передачи эмиттерного тока или коэффициент усиления транзистора по току определяется отношением приращения тока коллектора ($\Delta I_{\text{К}}$) к приращению тока эмиттера ($\Delta I_{\text{Э}}$) при постоянном напряжении на коллекторном переходе:

$$\alpha_{\text{д}} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Э}}}\Bigg|_{U_{\text{К}} = \text{const}} \quad \approx \text{от } 0{,}95 \text{ до } 0{,}995.$$

В транзисторах, включенных по схеме с ОЭ, входным током является ток базы $I_{\text{Б}}$, а выходным, так же как и в схеме с ОБ, ток коллектора $I_{\text{К}}$. Для схемы с ОЭ используется дифференциальный коэффициент передачи базового тока $\beta_{\text{д}} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}}\Big|_{U_{\text{К}} = \text{const}}$. Величина $\beta$ составляет несколько десятков или даже сотен единиц (от 10 до 1000).

***База.*** Объемное сопротивление базы ($r_{\text{Б}}$) определяется в основном сопротивлением ее активного участка, который заключен непосредственно между эмиттерным и коллекторным переходами и составляет 100—500 Ом.

Модуляция ширины базы $\omega_Б$ — изменение ширины (толщины) базы. Изменение происходит при увеличении напряжения на коллекторном переходе. В этом случае ширина базы уменьшается, что ведет к росту концентрации неосновных носителей зарядов в базе, усилению диффузионного процесса из эмиттера в базу и увеличению тока эмиттера.

Влияние изменения параметров выходной цепи (коллектора) на параметры входной цепи (эмиттера) называется обратной связью. Таким образом, в транзисторе существует внутренняя обратная связь, которая оценивается коэффициентом обратной связи по напряжению

$$\mu_{КЭ} = \frac{\Delta U_{КБ}}{\Delta U_{ЭБ}\Big|_{I_Э = \text{const}}}.$$

Коэффициент обратной связи показывает, какая доля выходного переменного напряжения передается на вход транзистора за счет внутренней обратной связи, и равен примерно $10^4$—$10^{-4}$, что указывает на очень слабое влияние $U_{КБ}$ на входную цепь транзистора, т.е. на ток $I_Э$ и, следовательно, на ток $I_К$.

***Коллекторный переход.*** Свойства коллекторного перехода характеризуются дифференциальным сопротивлением коллекторного перехода и емкостями.

Дифференциальное сопротивление коллекторного перехода определяется отношением приращения напряжения на коллекторном переходе к приращению коллекторного тока при холостом ходе в цепи эмиттера (по цепи переменного тока $I_Э = 0$):

$$r_{К\ диф} = \frac{\Delta U_{КБ}}{\Delta I_К}\Big|_{I_Э = \text{const}} \quad \text{(составляет сотни кОм)},$$

где $U_{КБ}$ — напряжение, приложенное к коллекторному переходу, т.е. напряжение между клеммой коллектора и внутренней точкой базы Б′ (см. рис. 3.24).

Емкость коллекторного перехода ($C_К$) состоит из барьерной ($C_{бар}$) и диффузионной емкости ($C_{дифф}$). Барьерная емкость составляет единицы — десятки пикофарад. Обычно емкость $C_{К\ бар} < C_{Э\ бар}$, однако она шунтирует большое сопротивление $r_{К\ диф}$, поэтому существенно влияет на работу транзистора.

Диффузионная емкость коллекторного перехода ($C_{\text{К дифф}} = \frac{\Delta Q_{\text{Б инж}}}{\Delta U_{\text{КБ}}}$) в активном режиме меньше барьерной ($C_{\text{К дифф}} << C_{\text{К бар}}$), так как изменение обратного напряжения на коллекторном переходе ($U_{\text{КП}}$) не изменяет количество инжектируемых носителей зарядов из эмиттера в базу, как это происходит в эмиттерном переходе. При исследовании транзисторов обычно учитывают шунтирующее действие лишь барьерной емкости $C_{\text{К бар}}$.

С физическими параметрами связаны системы других параметров, характеризующих работу транзистора как в статическом режиме, так и в динамическом. Эти параметры зависят от схем включения транзисторов и относятся к вторичным параметрам. Некоторые из физических параметров нельзя измерить непосредственно, поэтому на практике пользуются вторичными параметрами, которые рассмотрены ниже.

## 3.7. Особенности режимов включения транзистора

***Активный режим.*** В активном режиме включения транзистора, который называют также нормальным режимом, эмиттерный переход включен под напряжение прямого смещения, а коллекторный переход — под напряжение обратного смещения. При этом происходит инжекция носителей зарядов — электронов (для транзистора структуры *n-p-n*) из эмиттера в базу, и затем их экстракция в коллектор (см. рис. 3.23). Следовательно, возникает передача тока из управляющей эмиттерной цепи в управляемую коллекторную цепь. Подробно активный режим включения биполярного транзистора рассмотрен в разд. 3.5.

***Инверсный режим.*** В инверсном режиме включения транзистора эмиттерный переход включен под напряжение обратного смещения, а коллекторный переход — под напряжение прямого смещения. При этом происходит инжекция носителей зарядов — электронов (для транзистора структуры *n-p-n*) из коллектора в базу, а затем их экстракция в эмиттер (рис. 3.25, *а*). Следовательно, имеет место передача тока из управляющей коллекторной цепи в управляемую эмиттерную цепь.

Эффективность работы транзистора в этом случае оценивается статическим коэффициентом передачи электрического тока

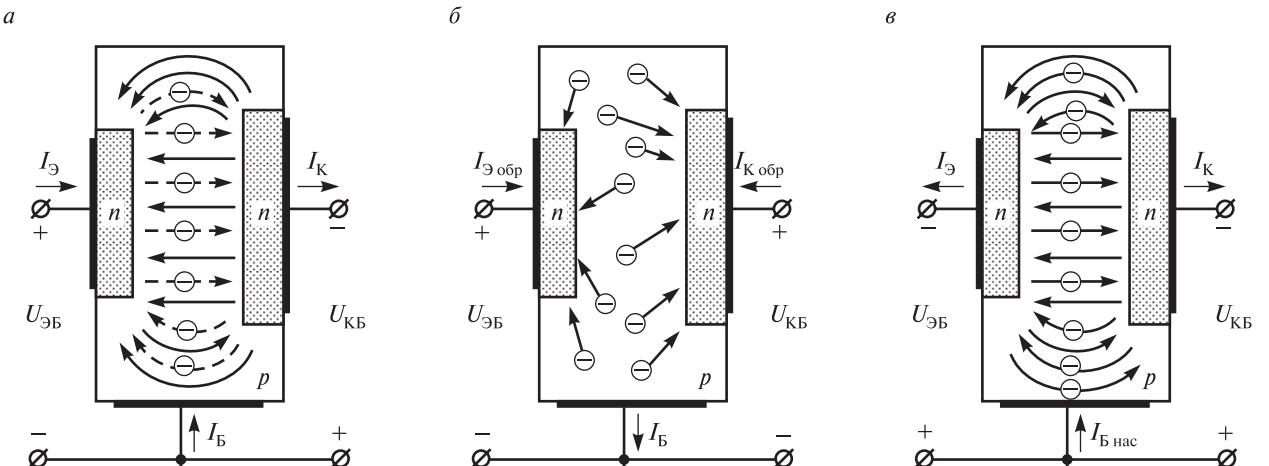



Рис. 3.25. Процессы в *n-p-n*-транзисторе при режимах: инверсном (*а*), отсечки (*б*) и насыщения (*в*)

$\alpha'_{и} = \frac{I_{Э}}{I_{К}}$, тогда как в активном режиме $\alpha_{и} = \frac{I_{К}}{I_{Э}}$. Для симметричного транзистора эти коэффициенты равны $\alpha'_{и} = \alpha_{и}$. Таким образом, работа симметричного транзистора при инверсном включении не отличается от его работы в нормальном режиме. Выводы эмиттера и коллектора в таком приборе можно менять местами.

Большинство транзисторов — несимметричные, площади их коллекторных переходов значительно превышают площади эмиттерных переходов. Это обеспечивает в активном режиме лучшую передачу носителей зарядов, инжектированных в эмиттерном переходе, в базовой области от эмиттера к коллектору и повышает коэффициент передачи электрического тока ($\alpha_{и}$).

При инверсном включении несимметричного транзистора неосновные носители зарядов базы, инжектированные из коллектора в базу, в большей степени рассеиваются в базе (сплошные линии на рис. 3.25, *а*). Рассеивание происходит за счет того, что площадь коллекторного перехода больше площади эмиттерного. Из-за большого рассеивания больше носителей зарядов рекомбинируют в базе и меньше носителей зарядов достигают эмиттерного перехода по сравнению с активным режимом. При этом коэффициент передачи электрического тока в несимметричных транзисторах в инверсном режиме резко снижается ($\alpha'_{и}$).

Однако многие параметры несимметричного транзистора улучшаются при инверсном включении. Так, возрастает выходное сопротивление транзистора, снижается падение напряжения на ключе в режиме насыщения и уменьшается ток в режиме отсечки. Инверсный режим включения применяют в аналоговых транзисторных ключах, фазочувствительных детекторах и активных элементах цифровых интегральных микросхем.

***Режим отсечки.*** В режиме отсечки оба перехода транзистора включены под напряжением обратного смещения. В эмиттерном и коллекторном переходах протекают малые обратные токи $I_{Э\ обр}$ и $I_{К\ обр}$, обусловленные экстракцией неосновных носителей зарядов через закрытые *p-n*-переходы (рис. 3.25, *б*). Экстрагируемые носители зарядов создают базовый ток $I_{Б} = I_{Э\ обр} + I_{К\ обр}$. Такой режим работы транзистора соответствует закрытому состоянию транзистора. В несимметричном транзисторе площадь эмиттерного перехода

меньше площади коллекторного перехода и поэтому $I_{э\ обр} < I_{к\ обр}$. Из-за малого тока $I_{Э\ j,h}$ по сравнению с $I_{К\ обр}$, базовый ток можно определить как $I_Б = I_{К\ обр}$.

***Режим насыщения.*** В режиме насыщения оба перехода транзистора включены под напряжение прямого смещения. Происходит встречная инжекция основных носителей зарядов из эмиттера и коллектора в базу (рис. 3.25, *в*), где они рекомбинируются, создавая большой базовый ток $I_Б = I_Э + I_К$. Дифференциальное сопротивление переходов ничтожно мало, как и общее сопротивление транзистора. В этом режиме падение напряжения на транзисторе составляет не более 0,1—0,5 В, что соответствует режиму открытого транзистора. При равенстве напряжений на переходах $U_Э = U_К$, равны и токи $I_Э = I_К$, а так как они встречные, то суммарный ток через транзистор равен нулю, а в базовой цепи — максимальный.

В табл. 3.1 показаны режимы работы биполярного транзистора и свойства каждого режима.

*Таблица 3.1*

| Режим работы | Напряжение смещения на переходах | Свойства режима |
|---|---|---|
| Нормальный режим (активный) | Эмиттерный переход — прямое<br>Коллекторный переход — обратное | Усиление слабых сигналов<br>Минимальное искажение усиливаемого сигнала<br>Максимальный — коэффициент передачи тока эмиттера $\alpha$ |
| Инверсный режим | Эмиттерный переход — обратное<br>Коллекторный переход — прямое | Применяется редко<br>Очень малый $\alpha$ |
| Режим насыщения | Эмиттерный переход — прямое<br>Коллекторный переход — прямое | Применяется для замыкания цепей передачи сигнала<br>Выходной ток максимальный и неуправляем |
| Режим отсечки | Эмиттерный переход — обратное<br>Коллекторный переход — обратное | Применяется для размыкания цепей передачи сигнала<br>Выходной ток приблизительно равен нулю |

Режимы отсечки и насыщения используются при построении ключевых схем в дискретном и интегральном исполнении.

## 3.8. Статические характеристики транзисторов

Расчет и анализ транзисторных схем значительно упрощаются, если используются характеристики транзистора. Характеристиками транзистора называют графическое представление зависимости между токами и напряжениями в его входных и выходных цепях, если характеристики отражают зависимость тока от приложенного напряжения (вольт-амперные характеристики).

Характеристики транзистора зависят от схем включения и режимов работы транзисторов. Различают схемы включения транзисторов с ОЭ, ОБ и ОК, а также статический и динамический режимы работы транзистора.

В статическом режиме включения транзистора на его электроды подано только напряжение на переходы от источника питания для создания смещения, а в динамическом режиме, кроме этих напряжений, во входной цепи транзистора включен источник сигнала, а в выходную цепь включена нагрузка.

В данном разделе рассматривается статический режим работы транзистора и соответственно статические характеристики.

Статические характеристики транзистора представляют собой зависимость тока (входного или выходного) от изменяющегося напряжения в одной и той же цепи при неизменном питающем напряжении или токе в другой цепи.

Несколько одноименных статических характеристик, снятых при различных значениях постоянных величин и построенных в одной системе координат, называются семейством статических характеристик.

Различают четыре вида семейства статических характеристик транзистора. Из них две основные:

$I_{вх} = \varphi(U_{вх})$ при $U_{вых} = \text{const}$ — входная характеристика,

$I_{вых} = \varphi(U_{вых})$ при $I_{вх} = \text{const}$ — выходная характеристика;

и две вспомогательные:

$I_{вых} = \varphi(I_{вх})$ при $U_{вых} = \text{const}$ — характеристика прямой передачи по току,

$U_{вх} = \varphi(U_{вых})$ при $I_{вх} = \text{const}$ — характеристика обратной связи по напряжению.

Семейства вспомогательных характеристик могут быть получены путем графического построения из основных характеристик.

Так как статические характеристики зависят от схем включения транзистора, то для каждой из трех схем включения транзистора (ОБ, ОЭ, ОК) существуют свои семейства характеристик, которые приводятся в справочной литературе. Пользуясь характеристиками, надо обращать внимание на то, к какой схеме включения транзистора они относятся.

### *3.8.1. Схема с общей базой*

Схема для снятия статических характеристик при включении транзистора с ОБ представлена на рис. 3.26. В этой схеме входными параметрами является ток эмиттера $I_Э$ и напряжение $U_{ЭБ}$, а выходными параметрами — ток коллектора $I_К$ и напряжение $U_{КБ}$.

Из этого следует, что входные характеристики отражают зависимость тока эмиттера от напряжения эмиттер—база при неизменном напряжении коллектор—база $I_Э = \varphi(U_{ЭБ})$ при $U_{КБ} = \text{const}$, а выходные — зависимость тока коллектора от напряжения коллектор—база при неизменном токе эмиттера

$$I_К = \varphi(U_{КБ}) \text{ при } I_Э = \text{const}.$$

*Входные характеристики:*

$$I_Э = \varphi(U_{ЭБ}) \text{ при } U_{КБ} = \text{const}.$$

Рассмотрим влияние напряжений $U_{ЭБ}$ и $U_{КБ}$ на характеристики. Установим $U_{КБ} = 0$. Это производится регулировкой потенциометра в цепи напряжения $U_{КБ}$, но только не отключением источника питания $U_{КБ}$. В результате коллекторный переход исключается из работы транзистора, а эмиттерный переход работает как *n-p*-переход

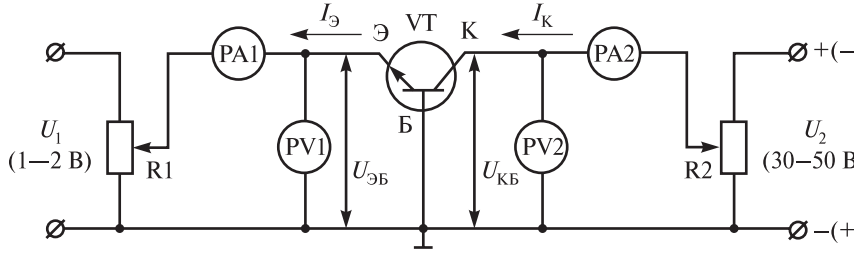



Рис. 3.26. Схема для снятия статических характеристик транзистора, включенного по схеме с ОБ

при прямом смещении. Таким образом, входная вольт-амперная характеристика транзистора при $U_{КБ} = 0$ аналогична вольт-амперной характеристике полупроводникового диода (рис. 3.27).

При обратном смещении коллекторного перехода ($U_{КБ} < 0$ — данное соотношение указывает на обратное смещение коллекторного перехода) увеличивается ширина потенциального барьера коллекторного перехода ($\ell'_К$), следовательно, уменьшается ширина базы ($\omega_Б$). В этом случае происходит изменение градиента концентрации неосновных носителей в базе, что представляет собой отношение изменения концентрации носителей заряда к расстоянию, на котором происходит это изменение (рис. 3.28),

$$\text{grad}N = \frac{\text{d}n}{\text{d}\omega_Б}, \qquad (3.1)$$

где d$n$ — изменение концентрации в базе; d$\omega_Б$ — изменение ширины базы транзистора.

Из рис. 3.28 и формулы (3.1) видно, что с уменьшением ширины базы градиент концентрации увеличивается. В результате этого ускоряется диффузионный процесс переноса неосновных носителей зарядов от эмиттерного перехода к коллекторному переходу — растет диффузионный ток базы и уменьшается рекомбинационный процесс в базовой области, т.е. уменьшается ток базы $I_Б$. В базовой

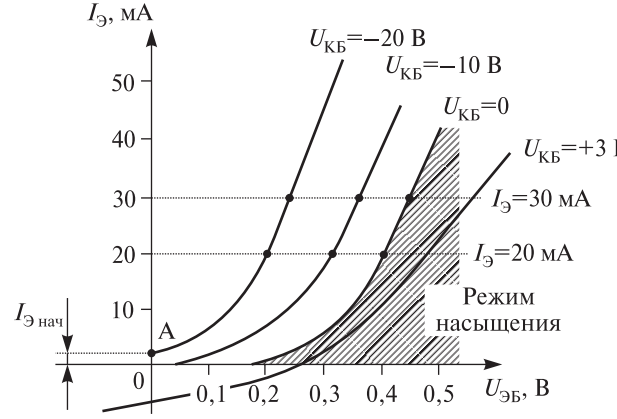



Рис. 3.27. Входные статические вольт-амперные характеристики транзистора в схеме с ОБ

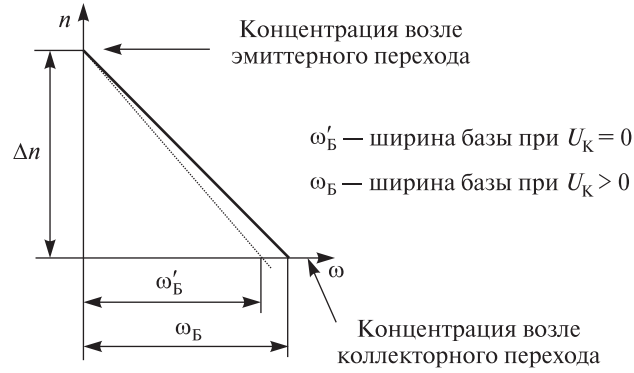



Рис. 3.28. График изменения концентрации неосновных зарядов в базе транзистора

области возле эмиттерного перехода происходит снижение концентрации неосновных носителей зарядов (для *n-p-n*-транзистора — электроны), что приводит к более интенсивному процессу инжекции в эмиттерном переходе и возрастанию тока $I_Э$ при неизменном напряжении на эмиттерном переходе $U_{ЭБ}$. В этом случае входная характеристика смещается ближе к оси токов. При напряжении на эмиттерном переходе, равном нулю ($U_{ЭБ} = 0$ — короткое замыкание выводов эмиттера и базы достигается регулировкой потенциометра), и $U_{КБ} < 0$, протекает малый обратный ток коллекторного перехода $I_{КБ\ обр}$ (рис. 3.29).

Этот ток создает на объемном сопротивлении базы $r_Б$ падение напряжения $I_{КБ\ обр} \cdot r_Б$, которое создает на эмиттерном переходе прямое смещение. В цепи эмиттера протекает очень малый начальный ток $I_{Э\ нач}$. Таким образом, начало характеристики смещается по оси токов (точка А). Для устранения этого тока на эмиттерный переход должно быть подано напряжение обратного смещения. При прямом смещении эмиттерного и коллекторного переходов, когда $U_{КБ} > 0$ и $U_{ЭБ} > 0$, транзистор находится в режиме на-

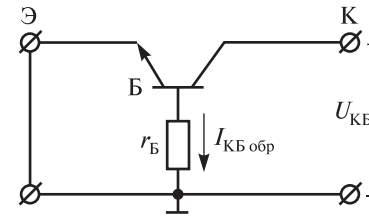



Рис. 3.29. Токи при коротком замыкании входной цепи эмиттер—база

сыщения. В этом режиме создается встречное движение носителей зарядов из эмиттера и коллектора в базу и результирующий ток эмиттера уменьшается. Это объясняется тем, что базовая область переполняется носителями заряда и повышается концентрация носителей зарядов в базе, что замедляет процесс проникновения носителей зарядов в заполненное пространство базы из эмиттера. Вольт-амперная характеристика при прямом смещении коллекторного перехода напряжением, равным $U_{КБ} = +3$ В, т.е. $U_{КБ} > 0$ (см. рис. 3.27), смещается вправо, что указывает на уменьшение эмиттерного тока транзистора. Таким образом, область насыщения транзистора лежит вправо от входной вольт-амперной характеристики, снятой при напряжении на коллекторном переходе $U_{КБ}=0$.

Влияние коллекторного перехода на процессы в эмиттерном переходе свидетельствует о существовании внутренней обратной связи между переходами транзистора.

*Выходные характеристики:*

$$I_К = \varphi(U_{КБ}) \text{ при } I_Э = \text{const}.$$

Несмотря на то что на коллекторном переходе имеется напряжение обратного смещения, выходные характеристики допускается изображать в первой четверти декартовой системы координат с указанием индекса напряжения смещения со знаком «минус», что указывает на обратное смещение.

Выходная характеристика при постоянном токе в эмиттерной цепи, равном $I_Э = 0$, представляет собой обычную вольт-амперную характеристику перехода при обратном смещении и проходит через начало координат, так как без тока $I_Э$ и при $U_{КБ} = 0$ не может быть коллекторного тока. В этом случае в коллекторном переходе протекает только тепловой ток, созданный неосновными носителями зарядов ($I_{КБ\ обр}$), образовавшимися при тепловой генерации. Условие $I_Э = 0$ соответствует разомкнутой цепи эмиттерного перехода, отключению источника смещения в переходе, а это означает, что включен только коллекторный переход, к которому приложено напряжение обратного смещения, и протекает ток $I_К = I_{КБ\ обр}$ (рис. 3.30). Значение этого тока определяется неосновными носителями зарядов в базовой и коллекторной областях при их встречном движении при обратном смещении перехода. Преобладающее значение имеет движение электронов из базы в коллектор для

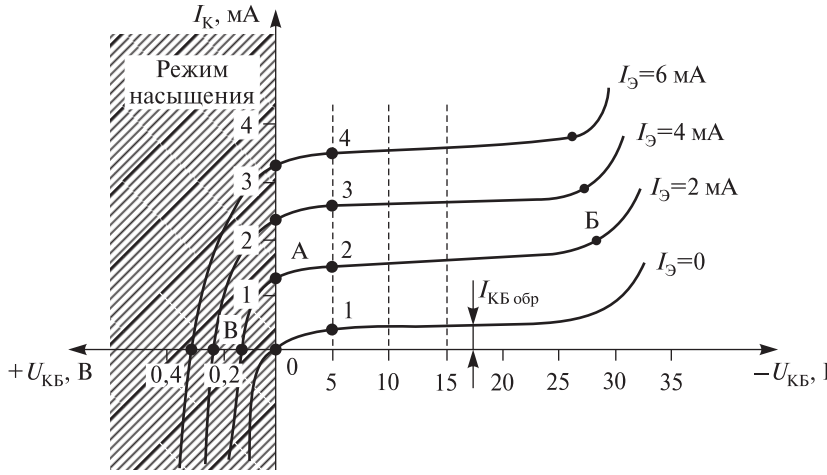



Рис. 3.30. Выходные характеристики транзистора по схеме с ОБ

транзистора структуры *n-p-n* и дырок для транзистора структуры *p-n-p*. В нормальных условиях обратный ток $I_{КБ\ обр}$ мал, но с повышением температуры заметно возрастает. При увеличении тока в эмиттерном переходе ($I_Э > 0$) увеличиваются инжекция носителей зарядов из эмиттера в базу и их экстракция из базы в коллектор и при $U_{КБ} = 0$ возникает ток коллектора ($I_К$). Это объясняется тем, что благодаря объемному сопротивлению базы $r_Б$ в данном режиме на коллекторном переходе есть некоторое напряжение, которое создано за счет падения напряжения от тока базы на резисторе $r_Б$ (см. рис. 3.29).

При напряжении на коллекторном переходе $U_{КБ} = 0$ (короткозамкнутый коллекторный переход) в коллекторном переходе действует некоторое электрическое поле контактной разности потенциалов (поле потенциального барьера). Будучи ускоряющим для неосновных носителей базы, оно втягивает их в область коллектора. Это и определяет начало характеристики с оси тока $I_К$ — точка А (рис. 3.30), а не с начала координат. Для снятия начальных участков выходных статических характеристик транзистора с ОБ при $I_К = 0$ (слева от начала координат) необходимо на коллекторный переход подать напряжение прямого смещения и тогда только производить измерения (на рис. 3.26 полярность напряжения для выполнения этого условия показана в скобках). В этом случае транзистор вклю-

чен в режиме насыщения, когда и в коллекторном переходе происходит разрушение потенциального барьера и процесс инжекции. При дальнейшем увеличении $I_Э$ возрастает начальный ток в коллекторном переходе $I_К$ при $U_{КБ} = 0$ и характеристики располагаются выше, чем характеристика при значении тока $I_Э = 0$.

Для многих транзисторов в схеме с ОБ выходные характеристики имеют вид прямых линий, начиная от $U_{КБ} = 0$, и малый наклон к оси абсцисс. Это указывает на зависимость между током и напряжением, так как прирост тока $I_К$ при неизменном токе $I_Э$ и увеличении $U_{КБ}$ происходит лишь за счет уменьшения рекомбинации неосновных носителей зарядов в базовой области, которая очень мала из-за конструктивных особенностей базы, и уменьшения ее ширины при $U_{КБ} > 0$.

Значительное увеличение напряжения обратного смещения свыше $U_{КБ\ max}$ ведет к лавинному, а затем и тепловому пробою коллекторного перехода (точка Б на рис. 3.30). Навстречу носителям заряда, инжектированным эмиттером в базу, также инжектируются носители заряда в базу из коллектора. Для транзистора структуры *n-p-n* это встречные инжекции электронов.

При увеличении напряжения прямого смещения на коллекторном переходе уменьшается процесс экстракции носителей зарядов из базы в коллектор (в *n-p-n*-структуре происходит уменьшение электронов), поступивших из эмиттера. Ток коллектора уменьшается. При равенстве инжектированных носителей зарядов из эмиттера и коллектора ($U_{ЭБ} = U_{КБ}$) ток $I_К = 0$ (точка В на рис. 3.30). Если напряжение прямого смещения на коллекторном переходе превышает напряжение прямого смещения на эмиттерном переходе ($U_{КБ} > U_{ЭБ}$), коллекторный ток $I_К$ изменяет свое направление (на рис. 3.30 ниже оси абсцисс) и начинает расти. Таким образом, на характеристике можно отметить область насыщения транзистора при $U_{КБ} > 0$, т.е левее оси коллекторного тока при $U_{ЭБ} = U_{КБ}$ (см. рис. 3.30).

*Характеристика прямой передачи тока:*

$$I_К = \varphi(I_Э) \text{ при } U_{КБ} = \text{const}.$$

Зависимость $I_К$ от $I_Э$ при постоянном напряжении $U_{КБ}$ можно исследовать по выходным характеристикам транзистора. Для этого необходимо на семействе выходных характеристик (рис. 3.30) выбрать значение $U_{КБ}$ и провести из этой точки перпендикуляр к оси

абсцисс. Затем отметить точки пересечения вертикальной линии со статическими характеристиками и для этих точек определить значение токов $I_К$ и $I_Э$ при выбранном значении $U_{КБ}$. По полученным значениям $I_К$ и $I_Э$ построить зависимость $I_К = \varphi(I_Э)$ при $U_{КБ} = \text{const}$ (рис. 3.31). Для разных значений $U_{КБ}$ эти характеристики располагаются очень близко друг к другу, что подчеркивает малое влияние $U_{КБ}$ на ток коллектора. При $I_Э = 0$ и $U_{КБ} > 0$ характеристика показывает тепловой ток $I_{КБ\ обр}$, который очень мал, так как создан за счет движения неосновных носителей зарядов в коллекторном переходе.

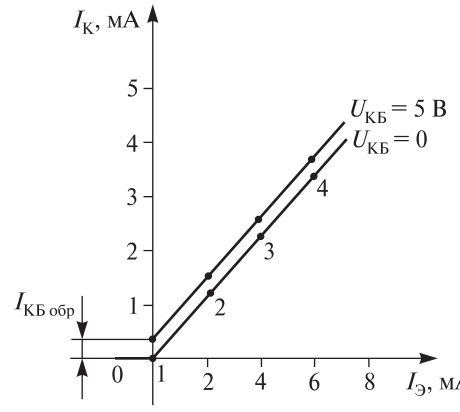



Рис. 3.31. Характеристики прямой передачи по схеме ОБ

*Характеристика обратной связи:*

$$U_{ЭБ} = \varphi(U_{КБ}) \text{ при } I_Э = \text{const}.$$

Зависимость $U_{ЭБ}$ от $U_{КБ}$ при постоянном эмиттерном токе $I_Э$ можно изучить по семейству входных характеристик транзистора. Для этого необходимо на семействе входных характеристик (см. рис. 3.31) выбрать значение $I_Э$ и провести в этих точках перпендикуляр к оси ординат. Затем отметить точки пересечения горизонтальных линий со статическими характеристиками и для них определить значения напряжений $U_{ЭБ}$ и $U_{КБ}$ при выбранном значении $I_Э$. По полученным значениям $U_{ЭБ}$ и $U_{КБ}$ построить зависимость $U_{ЭБ} = \varphi(U_{КБ})$ при $I_Э = \text{const}$ (рис. 3.32). Эти характеристики имеют небольшой

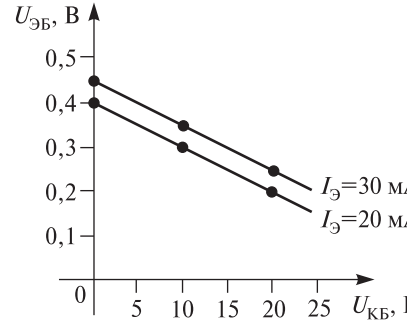



Рис. 3.32. Характеристики обратной связи транзистора в схеме с ОБ

наклон вниз к оси $U_{КБ}$, так как для сохранения постоянного значения тока $I_Э$ необходимо при увеличении $U_{КБ}$ несколько уменьшать напряжение $U_{ЭБ}$. Это объясняется тем, что при увеличении $U_{КБ}$ уменьшаются ширина базы и концентрация в ней носителей зарядов. В результате усиливается инжекция в эмиттерном переходе. Все это вместе еще раз указывает на глубокую внутреннюю обратную связь между коллекторным и эмиттерным переходами.

### *3.8.2. Схема с общим эмиттером*

Схема для снятия статических характеристик транзистора с ОЭ показана на рис. 3.33. В этой схеме входными параметрами являются ток базы $I_Б$ и напряжение $U_{БЭ}$, а выходными — коллекторный ток $I_К$ и напряжение $U_{КБ}$.

Входные статические характеристики транзистора в схеме с ОЭ представляют собой зависимость $I_Б = \varphi(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = \text{const}$, а выходные — зависимость $I_К = \varphi(U_{КЭ})$ при $I_Б = \text{const}$.

*Входные характеристики:*

$$I_Б = \varphi(U_{БЭ}) \text{ при } U_{КЭ} = \text{const}.$$

Рассмотрим влияние на характеристики напряжений $U_{БЭ}$ и $U_{КЭ}$. Характеристика при $U_{КЭ} = 0$ идет из начала координат, так как, если все напряжения равны нулю, т.е. и при $U_{БЭ} = 0$, ток $I_Б$ равен нулю ($I_Б = 0$) (на рис. 3.34 точка 0 — начало координат).

Напряжение $U_{КЭ} = 0$ устанавливается путем регулировки потенциометра, но не отключением источника напряжения $U_2$. В этом случае при увеличении напряжения смещения на эмиттерном переходе $U_{БЭ} > 0$ оба перехода находятся под напряжением прямого смещения

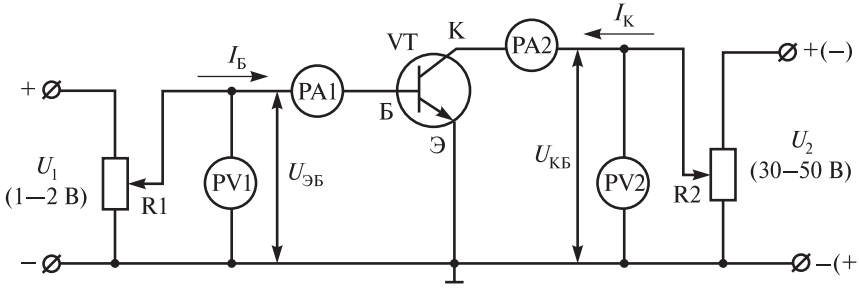



Рис. 3.33. Схема для снятия статических характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ

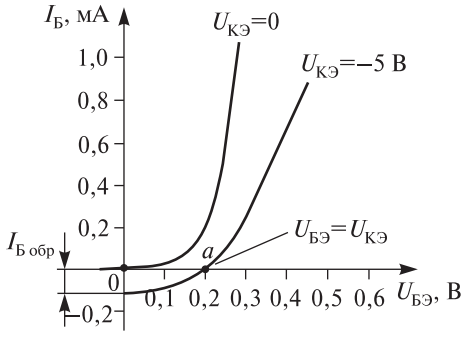



Рис. 3.34. Входные статические вольт-амперные характеристики транзистора в схеме с ОЭ

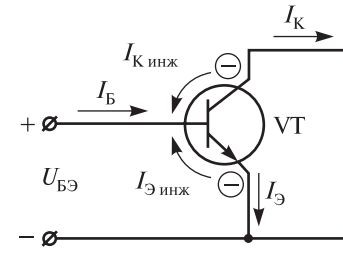



Рис. 3.35. Токи при коротком замыкании выходной цепи коллектор—эмиттер в схеме с ОЭ

(рис. 3.35). Ток базы в этом случае обусловлен рекомбинацией носителей зарядов, инжектированных в базу через два электронно-дырочных перехода, поэтому ток $I_Б$ существенно растет и характеристика идет практически вертикально (см. рис. 3.34).

При обратном смещении коллекторного перехода, когда $U_{КЭ} < 0$, расширяется потенциальный барьер коллекторного перехода и уменьшаются ширина базы и вероятность рекомбинации носителей зарядов в базе. Ток базы становится меньше при тех же значениях $U_{БЭ}$, что в характеристике при $U_{КЭ} = 0$. Таким образом, ток $I_Б$ растет медленнее и характеристика оказывается более пологой (на рис. 3.34 характеристика при $U_{КЭ} = -5$ В).

Рассмотрим начальный участок этой характеристики, когда $U_{БЭ} = 0$ и $U_{КЭ} < 0$. В этом случае источник смещения коллекторного напряжения $U_{КЭ}$ (рис. 3.36) создает обратный ток базы $I_{Б\ обр}$, равный обратному коллекторному току $I_{КБ\ обр} = I_{Б\ обр}$, и идет экстракция. Ток $I_{Б\ обр}$ имеет противоположное направление по сравнению с обычным током $I_Б$ при $U_{БЭ} > 0$ (см. рис. 3.33) и на характеристике это отмечено ее началом ниже оси абсцисс (см. рис. 3.34). При увеличении напряжения $U_{БЭ}$ это напряжение будет действовать встречно с напряжением

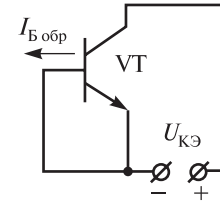



Рис. 3.36. Токи при коротком замыкании входной цепи база—эмиттер в схеме с ОЭ

$U_{КЭ}$ для коллекторного перехода, когда действие $U_{БЭ}$ уравновесит действие $U_{КЭ}$, ток $I_Б$ станет равным нулю (точка а на рис. 3.34).

Уравновешивание произойдет, когда инжекция носителей зарядов в эмиттерном переходе и рекомбинация этих носителей в базовой области уравновесит экстракцию в коллекторном переходе и рекомбинацию этих носителей зарядов в базе. Это происходит при соотношении напряжений $|U_{БЭ}| = |U_{КЭ}|$, так как инжекция — движение в *p-n*-переходе основных носителей зарядов в базу, и экстракция — движение в *p-n*-переходе неосновных носителей зарядов в базу, уравновесятся.

При дальнейшем увеличении $U_{БЭ}$ будет возрастать ток базы, составляющий часть тока эмиттера.

*Выходные характеристики:*

$$I_К = \varphi(U_{КЭ}) \text{ при } I_Б = \text{const}.$$

В активном режиме на коллекторный переход подают напряжение обратного смещения, а на эмиттерный переход — напряжение прямого смещения (см. рис. 3.33).

Рассмотрим выходную характеристику при нулевом токе базы ($I_Б = 0$). В этом случае цепь питания эмиттерного перехода должна быть разомкнута (рис. 3.37). В результате в коллекторном переходе происходит процесс экстракции и накопления электронов (для структуры *n-p-n*) в базе, так как они не могут уйти через внешний разомкнутый вывод базы. Увеличивается точечная компенсация неподвижных носителей зарядов потенциальных барьеров в базовой области, т.е. разрушение потенциальных барьеров эмиттерного и коллекторного переходов. При этих условиях резко возрастают сквозные эмиттерный и равный ему коллекторный токи $I_{КЭ\ обр} = I_{К\ обр} = I_Э = I_К$,

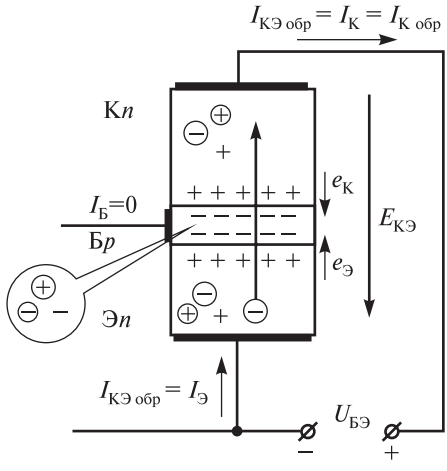



Рис. 3.37. Токи в биполярном транзисторе при разомкнутой цепи эмиттер—база в схеме с ОЭ

т.е. растут инжекция в эмиттерном и экстракция в коллекторных переходах. В базовой области, перенасыщенной носителями зарядов, усиливается рекомбинация и выделяется тепловая энергия.

Лавинный рост сквозного тока при обрыве входной цепи может привести к тепловому пробою коллекторного перехода и выходу транзистора из строя. Поэтому в схеме с ОЭ недопустимо разрывать входную цепь базы при наличии напряжения питания $U_{КЭ} < 0$, т.е. напряжения, которое создает косвенным методом обратное смещение коллекторного перехода и прямое смещение эмиттерного перехода.

Поэтому для снятия выходной характеристики при $I_Б = 0$ можно использовать режим короткого замыкания между базой и эмиттером, при котором выполнится условие $U_{БЭ} = 0$ (см. рис. 3.36). При этом условии $I_Б = 0$ и при $U_{КЭ} = 0$ в транзисторе отсутствует смещение переходов и ток $I_К = 0$, т.е. характеристики точка 0 (рис. 3.38).

Увеличение напряжения $U_{КЭ} < 0$ при коротком замыкании цепи база—эмиттер приводит к появлению коллекторного тока, т.е. тока экстракции в коллекторном переходе ($I_К = I_{КБ\ обр}$), который одновременно является и составляющей тока базы. Ток $I_{КБ\ обр}$, протекающий через коллекторный переход, возникает за счет элек-

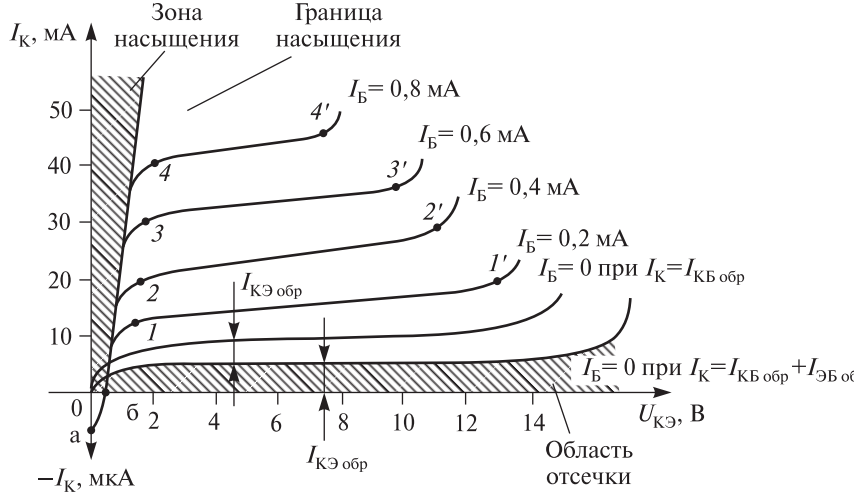



Рис. 3.38. Выходные характеристики транзистора по схеме с ОЭ

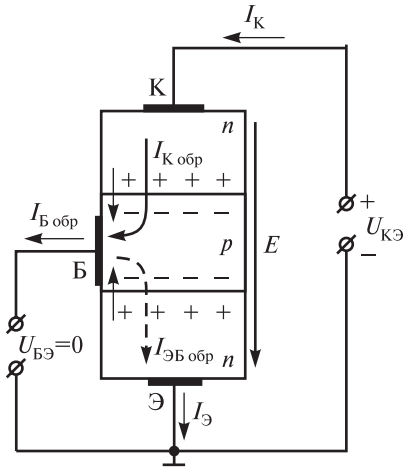



Рис. 3.39. Токи в биполярном транзисторе при замкнутой цепи эмиттер—база в схеме с ОЭ

трического поля внешнего источника смещения, создающего обратное смещение коллекторного перехода ($U_{КЭ}$), и повышенной концентрации носителей зарядов в базе, втекающих в базу. Этот ток является обратным током базы ($I_{Б\,обр}$) — составляющей общего тока базы. При короткозамкнутой цепи эмиттер — база в базе возникает и составляющая базового тока $I_{ЭБ\ обр}$, протекающего через эмиттерный переход за счет электрического поля внешнего источника смещения (косвенное смещение) $U_{КЭ}$ (рис. 3.39). Обратный ток базы $I_{КБ\ обр}$ и составляющая базового тока $I_{ЭБ\ обр}$, действующие встречно в базе через короткозамкнутую цепь эмиттер—база, являются составляющими общего тока базы $I_Б$. Таким образом, общий ток базы равен $I_Б = I_{КБ\ обр} - I_{ЭБ\ обр}$.

Если рассматривать общий ток коллектора в базовой структуре, то можно сделать вывод о том, что в базе транзистора при короткозамкнутой цепи эмиттер—база, как и в общей структуре транзистора К—Б—Э, коллекторный ток состоит из двух составляющих — тока экстракции $I_{КБ\ обр}$ и обратного базового тока $I_{ЭБ\,обр}$, действующих согласованно, и равен $I_К = I_{КБ\ обр} + I_{ЭБ\ обр}$ (рис. 3.39). Вольт-амперная характеристика при $I_Б = 0$ и $I_К = I_{КБ\ обр} + I_{ЭБ\ обр}$, показана на рис. 3.38.

Составляющие $I_{КБ\ обр}$ и $I_{ЭБ\ обр}$ можно считать приблизительно равными, особенно в симметричных структурах $I_{КБ\ обр} \approx I_{ЭБ\ обр}$, и в этом случае общий ток базы приблизительно равен нулю $I_Б \approx 0$.

При разрыве цепи база—эмиттер ток базы изменит свое значение, т.е. станет равным нулю, так как составляющая тока $I_{ЭБ\ обр}$ исчезнет, а составляющая $I_{КБ\ обр}$ замкнется через эмиттерный переход. Коллекторный ток в этом случае уменьшится и станет рав-

ным составляющей $I_{КБ\ обр} = I_К$. Вольт-амперная характеристика при $I_Б = 0$ и $I_К = I_{КБ\ обр}$ показана на рис. 3.38.

При дальнейшем увеличении напряжения $U_{КЭ}$ ток $I_К$ увеличивается незначительно, так как в процессе его образования не участвуют носители зарядов эмиттерного перехода. Характеристика при $U_{БЭ} = 0$ представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики обычного электронно-дырочного перехода (см. рис. 3.38), как в схеме включения с ОБ при $I_Э = 0$ (см. рис. 3.30). Рассмотренный случай ($U_{БЭ} = 0$) соответствует границе между режимом отсечки и активным режимом (нижняя кривая на рис. 3.38). Область выходных характеристик, лежащих ниже кривой $I_Б = 0$ при $I_К = I_{КБ\ обр}$, соответствует режиму отсечки.

Для снятия характеристики при $I_Б > 0$ необходимо увеличить напряжение на эмиттерном переходе $U_{БЭ}$. При этом при значении напряжения $U_{КЭ} = 0$ коллекторный и эмитерный переходы находятся под напряжением прямого смещения, т.е. в режиме насыщения. Ток коллектора в этом случае определяется разностью тока электронов (для транзистора структуры *n-p-n*-типа), инжектированных из коллектора в базу, и электронов, инжектируемых из эмиттера в базу, т.е. тока $I_Э$, поэтому ток коллектора мал.

В базовой области усиливается рекомбинация и растет ток $I_Б$. При условии $|U_{КЭ}| < |U_{БЭ}|$ начальный участок выходных характеристик находится ниже оси абсцисс (рис. 3.38), что соответствует прямому смещению коллекторного перехода. Таким образом, при $U_{КЭ} = 0$ и $I_Б > 0$ на обоих переходах имеется напряжение прямого смещения, а ток коллектора очень мал и имеет обратное направление ($I_К < 0$ точка а — обычно на характеристике не показывают).

С увеличением $U_{КЭ}$ уменьшается прямое смещение коллекторного перехода. Ток коллектора возрастает, а ток базы уменьшается, но для снятия характеристики ток базы ($I_Б$) необходимо поддерживать постоянным. Для этого необходимо при увеличении напряжения $U_{КЭ}$ повышать напряжение $U_{БЭ}$.

При напряжении $U_{КЭ} \approx 0{,}15—0{,}2$ В, которое частично компенсирует действие напряжения $U_{БЭ}$ ($U_{БЭ} > U_{КЭ}$), в коллекторном переходе прекращаются инжекция и протекание тока ($I_К = 0$) (на рис. 3.38 точка б). Это объясняется тем, что суммарное напряжение на коллекторном переходе $U_К = U_{БЭ} - U_{КЭ}$ недостаточно для разрушения его потенциального барьера.

При соотношении напряжений $U_{КЭ} > U_{БЭ}$ коллекторный переход оказывается под напряжением обратного смещения и ток коллектора меняет свое направление на обычное, т.е. его значения располагаются выше оси напряжений.

Выходные характеристики показывают, что при увеличении напряжения $U_{КЭ}$ от нуля до небольших значений (десятые доли вольта) ток коллектора резко возрастает (участок б—1, б—2 и т.д.), а при дальнейшем увеличении $U_{КЭ}$ характеристики идут с небольшим подъемом (участок 1—1′, 2—2′ и т.д.), что означает сравнительно малое влияние $U_{КЭ}$ на ток коллектора. Действительно, чтобы увеличить $I_К$ надо увеличить ток базы ($I_Б$). Но все же при повышении $U_{КЭ}$ происходит следующее. В результате уменьшения толщины базы уменьшается ток базы, а так как характеристики снимаются при условии $I_Б = \text{const}$, то для поддержания прежнего значения тока базы приходится увеличивать напряжение $U_{БЭ}$. За счет этого возрастает ток коллектора, так как увеличивается число инжектированных носителей зарядов в базу.

На семействе выходных характеристик видны характерные точки излома 1, 2, 3 и 4 характеристик, в которых $U_{КЭ} = U_{БЭ}$. При таком равенстве напряжений на коллекторном переходе напряжение равно нулю. Небольшое уменьшение $U_{КЭ}$ приведет к новому соотношению $|U_{КЭ}| < |U_{БЭ}|$, что является условием прямого смещения коллекторного и эмиттерного переходов и уменьшения тока коллектора.

Таким образом, при $U_{КЭ} = U_{БЭ}$ наступает режим насыщения транзистора, а точки 1, 2, 3 и 4 определяют границу режима насыщения в интервалах б—1, б—2, б—3, б—4 при разных значениях $I_Б$. Из сказанного можно сделать вывод, что зона насыщения ограничена промежутком от $U_{КЭ} = 0$ до $U_{КЭ} = U_{КЭ\ min}$, где $U_{КЭ\ min}$ равно значению в точках 1, 2, 3 и 4. На характеристике видно, что с уменьшением $U_{КЭ}$ от $U_{КЭ\ min}$ до 0 ток в коллекторном переходе ($I_К$) резко уменьшается.

Участок медленного роста тока выше границы насыщения (участок 1—1′, 2—2′, и т.д.) соответствует условию $|U_{КЭ}| > |U_{БЭ}|$, при котором коллекторный переход находится под напряжением обратного смещения, а эмиттерный — прямого смещения. Это соответствует активному режиму.

Область выходных характеристик, лежащая ниже кривой $I_К = I_{КБ\ обр}$, соответствует режиму отсечки, при котором на коллек-

торном переходе — обратное смещение, а на эмиттерном — смещение отсутствует или обратное смещение.

Итак, при $U_{КЭ} = U_{БЭ}$ происходит полное насыщение транзистора, и дальнейшее увеличение напряжения смещения на коллекторном переходе не приводит к увеличению коллекторного тока.

Все это обусловлено тем, что потенциальный барьер коллекторного перехода перекрыл область базы. Носители заряда, инжектированные из эмиттера, совершают экстракцию в коллектор. Такие процессы возможны только в схемах включения транзистора с ОЭ, так как в этом случае на коллекторный переход действует не одно напряжение, а совокупность двух напряжений, которые в результате совместного действия могут по-разному влиять на процессы в коллекторном переходе.

Если рассматривать коллекторный переход независимо от эмиттерного перехода, то окажется, что коллекторный переход находится под обратным смещением. Поскольку оба перехода взаимодействуют между собой, то этот процесс нужно рассматривать во взаимосвязи базы, коллектора и эмиттера.

Характеристика прямой передачи тока:

$$I_К = \varphi(I_К)\,\big|_{U_{КЭ} = \text{const}}.$$

Характеристики прямой передачи тока (рис. 3.40) можно построить так же, как и в схеме с ОБ по выходным характеристикам (см. рис. 3.38). Рассмотрим характеристики при $|U_{КЭ}| > 0$. Они приблизительно линейны, так как ток $I_К$ слабо зависит от тока $I_Б$. Изменения $U_{КЭ}$ также мало влияют на ток $I_К$, и поэтому характеристики близко расположены друг к другу.

При токе $I_Б = 0$ протекает некоторый сквозной ток $I_К = I_{КБ\ обр}$ за счет напряжения обратного смещения $U_{КЭ} < 0$. Из-за этого начало характеристики смещено по оси коллекторного тока (на

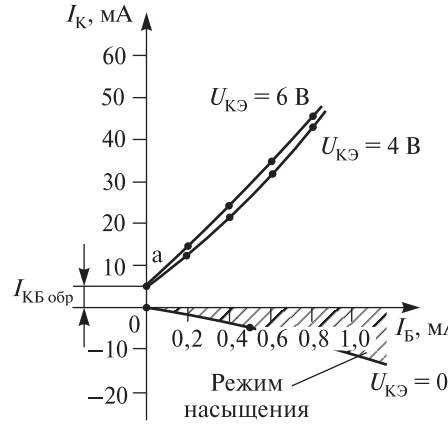



Рис. 3.40. Характеристики прямой передачи тока с общей базой в схеме с ОЭ

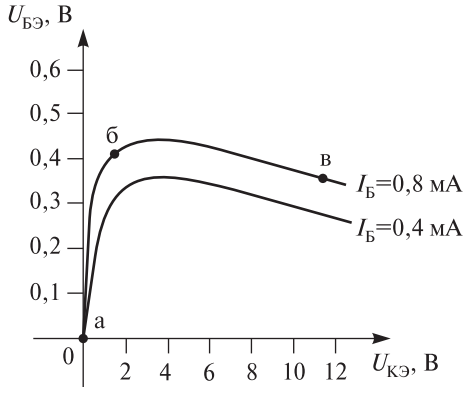



Рис. 3.41. Характеристики обратной связи в схеме с ОЭ

рис. 3.40 точка а). Характеристика при $U_{КЭ}=0$ расположена ниже оси тока $I_Б$, так как коллекторный переход в этом случае находится под напряжением прямого смещения и $I_К$ имеет противоположное значение.

*Характеристика обратной связи:*

$$U_{БЭ} = \varphi(U_{КЭ})\,\big|_{I_Б = \text{const}}.$$

Характеристики обратной связи (рис. 3.41) можно построить так же, как и в схеме с ОБ по входным характеристикам (см. рис. 3.34). Характеристики обратной связи показывают, как изменяется напряжение входа $U_{БЭ}$ под влиянием выходного напряжения $U_{КЭ}$ при условии, что входной ток $I_Б$ постоянный.

В режиме насыщения транзистора ($U_{БЭ} \geq U_{КЭ}$) возникает сильная взаимная связь между $U_{КЭ}$ и $U_{БЭ}$. Этому режиму соответствует круто восходящий участок характеристики обратной связи (на рис. 3.41 от точки а до точки б).

При $U_{КЭ} > U_{БЭ}$ в активном режиме транзистора обратная связь обусловлена двумя факторами — уменьшением ширины базы и увеличением воздействия напряжения $U_{КЭ}$ на эмиттерный переход — создание повышенной напряженности прямого смещения.

При увеличении прямого смещения на эмиттерном переходе в нем увеличивается инжекция, а соответственно и ток базы ($I_Б$), который необходимо поддерживать неизменным, что требует уменьшения напряжения $U_{БЭ}$.

Уменьшение $U_{БЭ}$ при увеличении $U_{КЭ}$ и постоянном токе базы ($I_Б$) приводит к наклону характеристики к оси $U_{КЭ}$ (на рис. 3.41 от точки б до точки в).

### *3.8.3. Схема с общим коллектором*

Схема для снятия статических характеристик транзистора с ОК представлена на рис. 3.42. В этой схеме входными параметрами

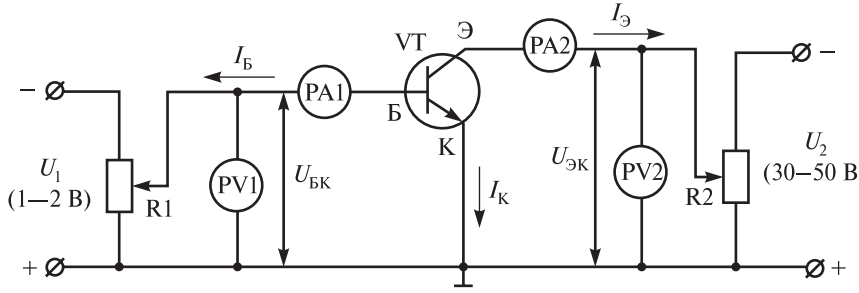



Рис. 3.42. Схема для снятия статических характеристик транзистора, включенного по схеме с ОК

являются ток базы $I_Б$ и напряжение $U_{БК}$, а выходными — ток эмиттера $I_Э$ и напряжение $U_{ЭК}$.

Особенность данной схемы состоит в том, что входная цепь — коллекторный переход, а выходная — эмиттерный переход. Напряжение смещения входной цепи $U_{БК}$ больше напряжения смещения выходной цепи $U_{БК}$ на величину падения напряжения на эмиттерном переходе.

*Входные характеристики:*

$$I_Б = \varphi(U_{БК})\,\big|_{U_{КЭ}=\text{const}}.$$

Рассмотрим влияние на характеристики напряжений $U_{БК}$ и $U_{ЭК}$. Характеристика при $U_{ЭК} = 0$ идет из начала координат, так как, если все напряжения равны нулю, т.е. и $U_{БК} = 0$, то и нет тока (рис. 3.43). Напряжение $U_{ЭК} = 0$ устанавливается путем вывода потенциометра, но не отключением.

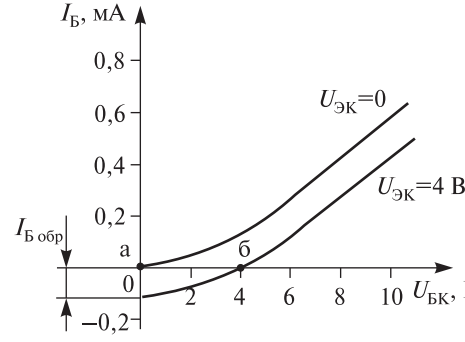



Рис. 3.43. Входные статические вольт-амперные характеристики транзистора в схеме с ОК

При увеличении напряжения смещения $U_{БК}$ на обоих переходах устанавливается напряжение обратного сме-

щения. За счет экстракции зарядов эмиттера и коллектора в базу в ней усиливается рекомбинация и протекает ток базы $I_Б$.

Если сравнить входные характеристики в схеме с ОЭ (см. рис. 3.34), где ток базы создан в результате рекомбинации инжектированных носителей зарядов из эмиттера и коллектора, можно сделать вывод, что ток базы ($I_Б$) в схеме с ОК значительно меньше, чем в схеме с ОЭ. Входная характеристика в схеме с ОК имеет больший наклон к оси напряжений, чем в схеме с ОЭ.

При увеличении напряжения смещения в выходной цепи $|U_{ЭК}| > 0$ уменьшается обратное смещение на эмиттерном переходе ($U_Э = U_{БК} - U_{ЭК}$) и снижается экстракция в эмиттерном переходе.

Начало характеристики определяется при условиях $|U_{ЭК}| > 0$ и $U_{БК} = 0$. В этом случае на эмиттерном переходе прямое смещение, а на коллекторном переходе — нет смещения. Дрейфовый ток коллекторного перехода и инжекционный ток эмиттерного перехода действуют встречно. Преобладающее значение имеет инжекционный ток $I_{Э\ инж} > I_{К\ дрейф}$. В результате направление базового тока определяется по направлению тока $I_{Э\ инж}$, т.е. ток $I_{Б\ обр}$ имеет обратное направление (на рис. 3.43 точка а).

Уравновешивание токов в переходах достигается путем увеличения $U_{БК}$, т.е. экстракции в коллекторном переходе. Базовый ток при этом равен $I_Б = I_{К\ экстр} + I_{Э\ инж}$. При равенстве токов в переходах ($I_{К\ экстр} = I_{Э\ инж}$) базовый ток равен нулю ($I_Б = 0$) (точка б на рис. 3.43).

Значение напряжения на переходах для этого варианта также удовлетворяет условию $U_{БК} > U_{ЭК}$. Это основано на том, что инжекционный процесс не требует большого напряжения, а экстракционный, наоборот, проходит при большом напряжении обратного смещения. В базовую область уменьшается приток экстрагированных носителей зарядов из эмиттера и уменьшается рекомбинация носителей зарядов в базе и в результате этого уменьшается базовый ток $I_Б$, созданный только носителями зарядов коллекторного перехода. Дальнейшее увеличение напряжения $U_{БК}$ повышает ток $I_Б$, но меньше, чем при напряжении $U_{ЭК} = 0$. В соответствии с этим характеристика располагается ниже, чем при $U_{ЭК} = 0$.

*Выходные характеристики:*

$$I_Э = \varphi(U_{ЭК})\Big|_{I_Б = \text{const}}.$$

Рассмотрим выходную характеристику при токе базы $I_Б = 0$. Это возможно при коротком замыкании между базой и коллектором (рис. 3.44). При этом условии ($I_Б = = 0$) и при $U_{ЭК} = 0$ в транзисторе отсутствует напряжение смещения на переходах и ток $I_Э = 0$, т.е. характеристика исходит из начала координат (на рис. 3.45 точка а). Увеличение напряжения смещения $U_{ЭК} > 0$ приведет к прямому смещению в эмиттерном переходе и росту тока $I_Э$. Одновременно с этим будет протекать дрейфовый ток в коллекторном переходе. Эти токи действуют встречно и результирующий ток равен $I_Э = I_{Э\ инж} - I_{К\ дрейф}$. Направление тока $I_Э$ совпадает с направлением тока $I_{Э\ инж}$, так как ток $I_Э$, созданный основными носителями зарядов, преобладает.

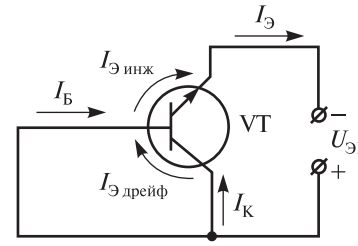



Рис. 3.44. Токи при коротком замыкании входной цепи коллектор—база в схеме с ОК

Эмиттерный ток незначителен, так как повышение инжекционного тока ($I_{Э\ инж}$) вызывает приток носителей зарядов в базу и пропорциональное увеличение дрейфового тока ($I_{К\ дрейф}$). В связи с этим характеристика располагается параллельно оси напряжений.

Выходные характеристики при $I_Б > 0$ ($|U_{БК}| > 0$) имеют начальный участок при $U_{ЭК} = 0$ ниже оси абсцисс (на рис. 3.45 точка б).

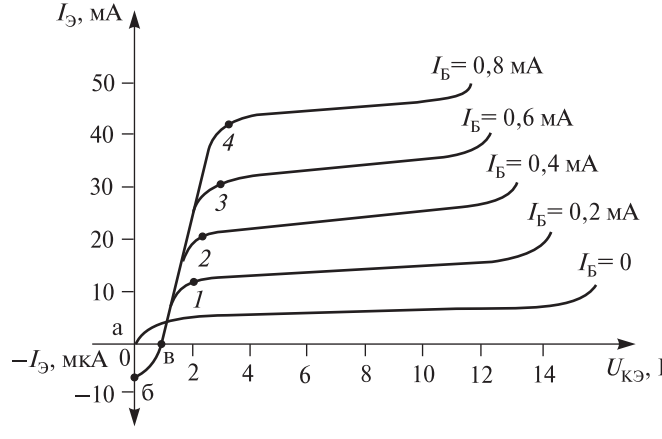



Рис. 3.45. Выходные характеристики транзистора по схеме с ОК

Значение тока в точке б соответствует обратному току в эмиттерном переходе, так как на него подано напряжение обратного смещения от источника $U_{БК}$.

Дальнейшее увеличение $U_{ЭК}$ приведет к уменьшению обратного смещения на эмиттерном переходе и обратный ток $I_Э$ снизится до нуля ($I_Э = 0$) (точка в на рис. 3.45). Это объясняется тем, что суммарное напряжение на эмиттерном переходе равно нулю $U_Э = U_{БК} - U_{ЭК} = 0$.

Когда $|U_{БК}| > |U_{ЭК}|$, транзистор работает в активном режиме. При этом эмиттерный ток меняет свое направление на обычное и показан выше оси напряжений. Ток $I_Э$ возрастает до определенного значения (точки *1, 2, 3* и *4* на рис. 3.45) и затем остается практически неизменным. Это объясняется встречными процессами инжекции в эмиттерном и экстракции в коллекторных переходах, которые были рассмотрены для характеристики при $I_Б = 0$.

Из сказанного можно сделать вывод, что входные и выходные характеристики в схеме с ОК подобны входным и выходным характеристикам в схеме с ОЭ. Действительно, токи $I_Э$ и $I_К$ при нормальном включении мало различаются между собой, а $U_{КЭ} \cong -U_{ЭК}$.

*Характеристика прямой передачи тока:*

$$I_Э = \varphi(I_Б)\Big|_{\text{при } U_{ЭК} = \text{const}}.$$

Характеристики прямой передачи тока линейны (рис. 3.46) как и в схеме с ОЭ, и лишь при больших токах $I_Б$ и $I_Э$ наклон их уменьшается из-за увеличения экстракции в коллекторном переходе и рекомбинации в базе, что уменьшает инжекцию в эмиттерном переходе. Начало характеристик смещено по оси $I_Э$ за счет прямого смещения эмиттерного перехода при короткозамкнутом коллекторном переходе ($U_{БК} = 0$). В транзисторе течет сквозной ток эмиттерного перехода и дрейфовый ток коллекторно-

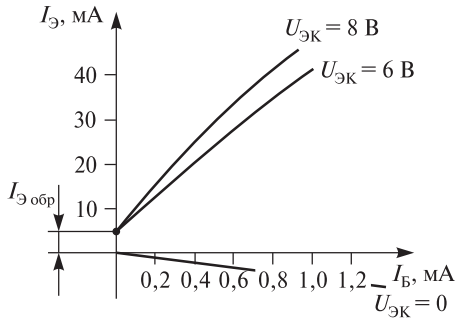



Рис. 3.46. Характеристика прямой передачи тока транзистора по схеме с ОК

го перехода ($I_{\text{ЭК обр}} = I_{\text{К дрейф}} + I_{\text{Э инж}}$).

*Характеристики обратной связи:*

$$U_{\text{БК}} = \varphi(U_{\text{ЭК}})\,\big|_{\text{при } U_{\text{Б}} = \text{const}}.$$

Характеристики обратной связи (рис. 3.47) можно построить так же, как и в схеме с ОЭ, по входным характеристикам (см. рис. 3.43). В схеме с ОК к эмиттерному переходу включены встречно напряжения входа $U_{\text{БК}}$ и выхода $U_{\text{ЭК}}$. Поэтому при изменении выходного напряжения резко изменяется ток $I_{\text{Б}}$ входной цепи. Это указывает на глубокую обратную связь в схеме включения транзистора с ОК.

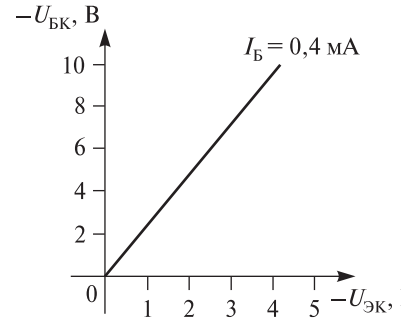



Рис. 3.47. Характеристика обратной связи транзистора в схеме с ОК

На основе рассмотренных статических характеристик транзистора при различных схемах включения можно проанализировать его работу в практических схемах.

## 3.9. Внешние малосигнальные статические параметры транзистора (*h*-параметры)

Не все физические параметры транзисторов (внутренние или первичные), рассмотренные выше, можно измерить непосредственно. В настоящее время широкое распространение получил метод расчета транзисторных схем, основанный на представлении транзистора в виде активного четырехполюсника, т.е. прибора, имеющего два входных и два выходных зажима (рис. 3.48, *а*).

Четырехполюсник называется активным, если он усиливает сигналы за счет энергии источника питания. В расчетах транзисторных узлов наряду с характеристиками широко применяются также характеристические (вторичные — внешние) параметры — величины, определяющие связь между изменениями токов и напряжений в приборе на внешних зажимах четырехполюсника.

Статические характеристики транзисторов иллюстрируют нелинейную зависимость в них токов от напряжений. Для более точного определения статических параметров транзисторов на участках ста-

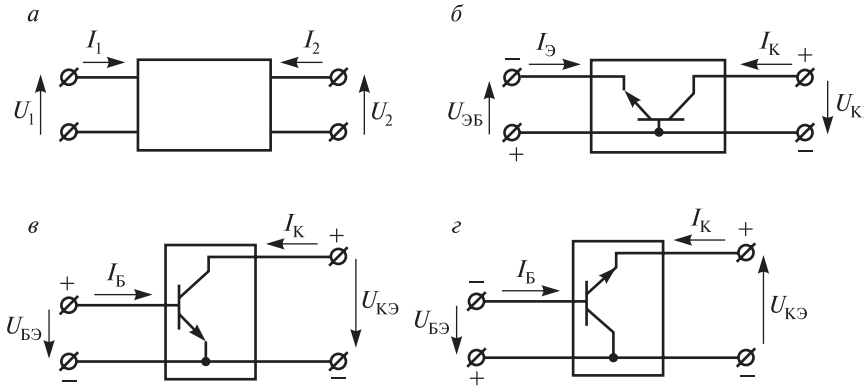



Рис. 3.48. Транзистор как четырехполюсник (*а*) при схемах включения с ОБ (*б*), с ОЭ (*в*) и с ОК (*г*)

тических характеристик выделяют малый отрезок, который можно приблизительно считать линейным. Параметры транзистора, которые определены только на малом промежутке статических характеристик, условно принимаемом за линейный участок, называют малосигнальными.

Из-за нелинейности характеристик транзистора при изменении его режима работы и при больших амплитудах вторичные параметры изменяются. Поэтому транзистор и рассматривается как активный линейный четырехполюсник, на вход которого приложено напряжение $U_1$ при токе входа $I_1$, а на выходе имеется напряжение $U_2$ и протекает ток $I_2$. Свойства четырехполюсника характеризуются четырьмя переменными $U_1$, $I_1$, $U_2$, $I_2$. В зависимости от схемы включения транзистора величинам $U_1$, $I_1$, $U_2$, $I_2$ соответствуют те или другие реальные напряжения и токи. Напряжения и токи четырехполюсника связаны между собой системами уравнений, что характерно и для связи этих величин при работе транзистора. Коэффициенты этих уравнений отражают свойства транзистора и являются его параметрами.

Функциональная связь между четырьмя переменными $U_1$, $I_1$, $U_2$, $I_2$ создает шесть вариантов выбора двух независимых и двух зависимых переменных.

Следовательно, можно получить шесть систем управления, коэффициенты которых образуют шесть систем параметров транзисторов (табл. 3.2).

*Таблица 3.2*

| Независимые переменные | $I_1$; $I_2$ | $U_1$; $U_2$ | $I_1$; $U_2$ | $U_1$; $I_2$ | $U_2$; $I_2$ | $U_1$; $I_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Зависимые переменные | $U_1$; $U_2$ | $I_1$; $I_2$ | $U_1$; $I_2$ | $I_1$; $U_2$ | $U_1$; $I_1$ | $U_2$; $I_2$ |
| Системы параметров | *Z* | *Y* | *h* | *C* | *B* | *A* |

Применяемые в транзисторной технике системы параметров должны соответствовать статическому и динамическому режимам малого сигнала, легко определяться экспериментально. Этим требованиям удовлетворяет система *h*-параметров, которая получила наибольшее практическое применение.

Систему *h*-параметров называют смешанной, или гибридной, так как в ней имеются безразмерные (относительные) и размерные величины (сопротивление и проводимость). Эти параметры транзистора можно определить из семейства входных и выходных характеристик транзистора, записывая мгновенные значения токов и напряжений через конечное приращение ($\Delta U$, $\Delta I$).

Обычно параметры имеют индексы 11, 12, 21, 22. Индексом 1 обозначают значение величины на входе, индексом 2 — на выходе. Например, параметр с индексом 21 определяет отношение выходной величины к входной величине, с индексом 12 — входной величины к выходной величине, с индексом 11 — во входной цепи, с индексом 22 — в выходной цепи. Индексы э, б, к определяют, какой схеме включения транзистора (ОЭ, ОБ, ОК) соответствует параметр.

В данном учебнике рассматривается только система *h*-параметров.

В системе *h*-параметров в качестве независимых переменных приняты ток $I_1$ и напряжение $U_2$. Тогда для зависимых переменных $I_2$ и $U_1$ можно написать зависимости

$$U_1 = f(I_1,\ U_2) \text{ и } I_2 = f(I_1,\ U_2).$$

Напряжение $U_1$ выбрано в системе *h*-параметров в качестве зависимой переменной, так как его действие во входной цепи зависит от действующего с ним совместно напряжения источника сигнала. Ток $I_2$ также зависит от величины и схемы включения нагрузки в выходной цепи.

Функция $U_1 = f(I_1, U_2)$ отражает зависимость входного напряжения от выходного напряжения и входного тока и подобна характеристике обратной связи транзистора.

Функция $I_2 = f(I_1, U_2)$ отражает зависимость выходного тока от выходного напряжения и входного тока и подобна входной характеристике транзистора.

На основании записанных зависимостей можно токи и напряжения связать системой уравнений

$$\Delta U_1 = h_{11}\Delta I_1 + h_{12}\Delta U_2, \tag{3.2}$$

$$\Delta I_2 = h_{21}\Delta I_1 + h_{22}\Delta U_2. \tag{3.3}$$

Запись уравнений сводится к определению зависимой величины через сумму независимых с введением коэффициентов *h*. Индексы коэффициентов отражают зависимость переменной от независимой величины, перед которой он записан. Коэффициенты схемы, т.е. *h*-параметры, не должны нарушать равенство в уравнениях.

Физический смысл этих коэффициентов можно определить, полагая поочередно в уравнениях $\Delta I_1 = 0$ и $\Delta U_2 = 0$, что соответствует режиму холостого хода на входе четырехполюсника и режиму короткого замыкания на его выходе.

Эти режимы легко исследовать экспериментально на схемах (рис. 3.49).

Решая систему уравнений при неизменном входном токе $\Delta I_1$ или выходном напряжении $\Delta U_2$, т.е. полагая $\Delta I_1 = 0$ или $\Delta U_2 = 0$, получим *h*-параметры.

Параметр $h_{11} = \dfrac{\Delta U_1}{\Delta I_1}\Big|_{U_2 = 0}$ представляет собой входное сопротивление транзистора и измеряется при короткозамкнутом входе (рис. 3.49, *а*), т.е. при $\Delta U_2 = 0$ из уравнения (3.2).

Параметр $h_{12} = \dfrac{\Delta U_1}{\Delta U_2}\Big|_{I_1 = 0}$ является коэффициентом обратной связи транзистора по напряжению; $h_{12}$ показывает, какая часть напряжения с выхода транзистора поступает на его вход, т.е. характеризует глубину обратной связи. Определяется при разомкнутой входной цепи — холостом ходе (рис. 3.49, *б*), т.е. при $\Delta I_1 = 0$ из уравнения (3.2).

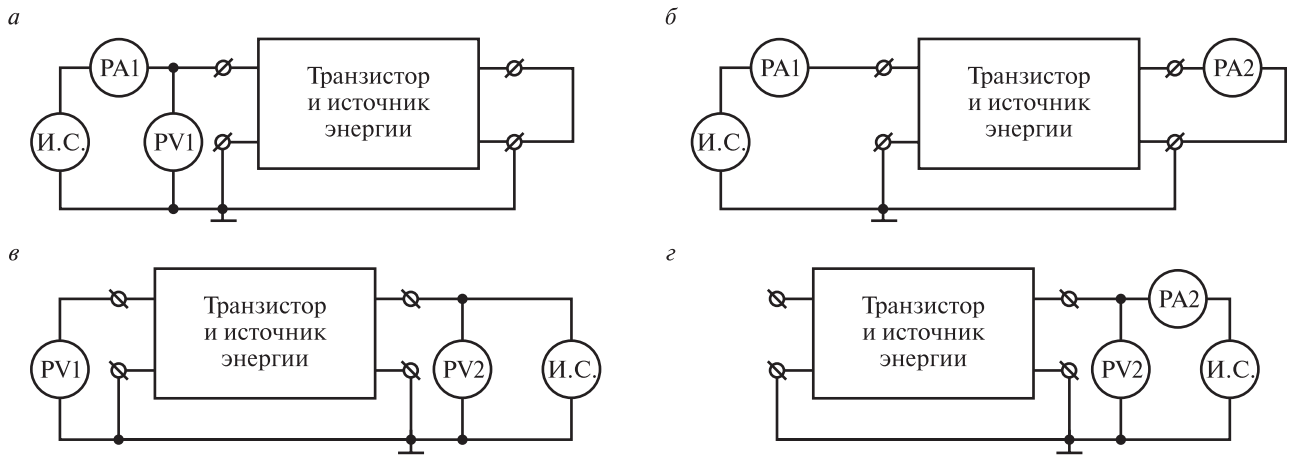



Рис. 3.49. Схема для определения $h$-параметров транзистора: $h_{11}$ (*а*), $h_{12}$ (*б*), $h_{21}$ (*в*), $h_{22}$ (*г*)

Параметр $h_{21} = \dfrac{\Delta I_2}{\Delta I_1}\Big|_{U_2 = 0}$ представляет собой коэффициент передачи (усиления) транзистора по току (отношение тока на выходе к входному току). Определяется при короткозамкнутом выходе (рис. 3.49, *в*), т.е. при $\Delta U_2 = 0$ из уравнения (3.3).

Параметр $h_{22} = \dfrac{\Delta I_2}{\Delta U_2}\Big|_{I_1 = 0}$ является выходной проводимостью (измеряется в микросименсах мкСм) и определяется как отношение выходного тока к выходному напряжению при разомкнутых входных зажимах — холостом ходе (рис. 3.49, *г*) при $\Delta I_1 = 0$ из уравнения (3.3).

Указанные условия измерения в режиме малых входных переменных сигналов (при $\Delta U_2 = 0$ — короткое замыкание на входе и $\Delta I_1 = 0$ — холостой ход на входе) обеспечиваются включением при измерении достаточно большой емкости параллельно выходу транзистора и последовательно в цепь эмиттера катушки достаточной индуктивности. Необходимые при этом соотношения $\dfrac{1}{\omega C} << R_{\text{вых}}$ и $\omega L >> R_{\text{вх}}$ практически легко выполняются, поскольку $R_{\text{вых}}$ очень велико, а $R_{\text{вх}}$ мало.

Малосигнальные *h*-параметры транзистора также можно с достаточной для практики точностью измерить без источника переменного напряжения (сигнала), используя схемы для снятия статических характеристик. В этом случае не нужно включать емкость на выходе и индуктивность на входе, так как режим короткого замыкания на выходе будет обеспечен при $U_2 = \text{const}$, а режим холостого хода на входе — при $I_1 = \text{const}$.

*h-параметры транзистора, включенного по схеме с ОБ*

Для схемы с ОБ ($I_1 = I_{\text{Э}}$; $I_2 = I_{\text{К}}$; $U_1 = U_{\text{ЭБ}}$; $U_2 = U_{\text{КБ}}$)

$h_{11_{\text{Б}}} = \dfrac{\Delta U_{\text{ЭБ}}}{\Delta I_{\text{Э}}}\Big|_{U_{\text{КБ}} = \text{const}}$ представляет собой сопротивление транзистора между эмиттером и базой, т.е. дифференциальное входное сопротивление $h_{11} = r_{\text{Э диф}}$ (дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода). Условие $U_{\text{КБ}} = \text{const}$ необходимо для того,

чтобы изменения $U_{КБ}$ не влияли на $\Delta I_Э$, а следовательно, и на $h_{11Б}$. Значение $h_{11Б}$ составляет единицы-десятки ом.

$h_{12Б} = \dfrac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta U_{КБ}\big|_{I_Э = \text{const}}}$ — коэффициент обратной связи по напряжению показывает, какому изменению напряжения на эмиттерном переходе равноценен по воздействию на ток эмиттера ($I_Э$) 1 В изменения напряжения на коллекторном переходе. Условие $I_Э$ = const означает, что приросты $\Delta U_{ЭБ}$ и $\Delta U_{КБ}$ вызывают одинаковые по величине и противоположные по знаку приросты тока эмиттера и поэтому $I_Э$ остается неизменным. Значение $h_{12Б}$ равно примерно $10^{-3}$—$10^{-4}$.

$h_{21Б} = \dfrac{\Delta I_К}{\Delta I_Э\big|_{U_{КБ} = \text{const}}}$ — коэффициент передачи тока эмиттера. Условие $U_{КБ}$ = const говорит о том, что увеличение тока коллектора возникло только за счет тока эмиттера. Параметр $h_{21Б}$ численно равен физическому параметру транзистора — дифференциальному коэффициенту передачи эмиттерного тока в схеме с ОБ ($\alpha_Д$). Его называют также коэффициентом усиления транзистора по току, но он имеет отрицательный знак: $h_{21Б} = -\alpha_Д$. Это объясняется тем, что токи $I_Э$ и $I_К$ имеют разные знаки, поскольку $I_Э$ «втекает» в транзистор, а $I_К$ «вытекает» из него, и тогда параметр $h_{21Э}$ имеет знак «минус». Значение $h_{21Б}$ находится в пределах 0,95—0,998.

$h_{22Б} = \dfrac{\Delta I_К}{\Delta U_{КБ}\big|_{I_Э = \text{const}}}$ — выходная проводимость. Условие $I_Э$ = = const указывает на то, что в данном случае прирост коллекторного тока $\Delta I_К$ обусловлен лишь изменением $\Delta U_{КБ}$ коллекторного напряжения. Значение $h_{22Б}$ составляет единицы микросименсов и менее (около $10^{-6}$—$10^{-7}$ См).

Зависимость параметра $h_{22Б} = \dfrac{1}{r_{К\ диф}}$ от физических величин определяет дифференциальное сопротивление коллекторного перехода. Значение $r_{К\ диф}$ составляет сотни килоом — единицы мегаом.

*h-параметры транзистора, включенного по схеме с ОЭ*

Для схемы с ОЭ ($I_1 = I_Б$; $I_2 = I_К$; $U_1 = U_{БЭ}$; $U_2 = U_{КЭ}$)

$h_{11_Э} = \left.\frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_Б}\right|_{U_{КЭ} = \text{const}}$ — входное дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода, т.е. $h_{11Э} = r_{Э\ диф}$. Отличается по величине от $h_{11Б}$, так как $\Delta I_Б$ значительно меньше, чем $\Delta I_Э$ при том же значении напряжения на эмиттерном переходе. Значение $h_{11Э}$ составляет сотни ом — единицы килоом.

$h_{12Э} = \left.\frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}}\right|_{I_Б = \text{const}}$ — коэффициент обратной связи по напряжению. По смыслу и величине аналогичен параметру $h_{12Б}$ для схемы с ОБ. Значение $h_{12Э}$ составляет примерно $10^{-3}$—$10^{-4}$.

$h_{21Э} = \left.\frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б}\right|_{U_{КЭ} = \text{const}}$ — коэффициент передачи тока базы. Один из важнейших параметров, характеризующих работу транзистора по схеме с ОЭ. Параметр $h_{21Э}$ равен физическому параметру $\beta_Д$ — дифференциальному коэффициенту передачи базового тока: $h_{21Э} = \beta_Д$. Значение $h_{21Э}$ составляет несколько десятков или даже сотен.

$h_{22Э} = \left.\frac{\Delta I_К}{\Delta U_{КЭ}}\right|_{I_Б = \text{const}}$ — выходная проводимость транзистора. По смыслу аналогична параметру $h_{22Б}$ для схемы с ОБ: отношение $\frac{1}{h_{22Э}} = r_{К\ диф}$ — дифференциальное сопротивление коллекторного перехода в схеме с ОЭ. Из-за большей зависимости тока $I_К$ от выходного напряжения, чем в схеме с ОБ, величина $h_{22Э}$ в десятки раз больше $h_{22Б}$ и составляет десятые и сотые доли миллисименса ($5 \cdot 10^{-5}$ См), а выходное сопротивление $\frac{1}{h_{22Э}} = r_{К\ диф}$ составляет от единиц до десятков килоом.

*h-параметры транзистора, включенного по схеме с ОК*

Для схемы с ОК ($I_1 = I_Б$; $I_2 = I_Э$; $U_1 = U_{БК}$; $U_2 = U_{ЭК}$)

$h_{11_К} = \left.\frac{\Delta U_{БК}}{\Delta I_Б}\right|_{U_{ЭК} = \text{const}}$ — входное дифференциальное сопротивление коллекторного перехода ($h_{11К} \approx h_{11Э}$).

$h_{12К} = \dfrac{\Delta U_{БК}}{\Delta U_{ЭК}\big|_{I_Б = \text{const}}}$ — коэффициент обратной связи по напряжению ($h_{12К} = 1$).

$h_{21К} = \dfrac{\Delta I_Э}{\Delta I_Б\big|_{U_{ЭК} = \text{const}}}$ — коэффициент передачи тока базы. Значение $h_{21К}$ примерно такое же, как и в схеме с ОЭ, так как $I_Э \approx I_К$ и, следовательно, $\Delta I_Э \approx \Delta I_К$, но имеет отрицательный знак, так как $I_Б$ «вытекает» из транзистора, а $I_Э$ «втекает» в него.

$h_{22К} = \dfrac{\Delta I_Э}{\Delta U_{ЭК}\big|_{I_Б = \text{const}}}$ — выходная проводимость транзистора, которая зависит от физического параметра — дифференциального сопротивления эмиттерного перехода и определяется по формуле $h_{22К} = \dfrac{1}{r_{Э\,диф}}$. Значение $h_{22К}$ то же, что и в схеме с ОЭ и составляет десятые и сотые доли миллисименса ($5 \cdot 10^{-5}$ См), а выходное сопротивление $r_{Э\,диф}$ составляет от единиц до десятков килоом.

Значения $h$-параметров приведены в табл. 3.3.

*Таблица 3.3*

| $h$-параметры | Схема с ОБ | Схема с ОЭ | Схема с ОК |
|---|---|---|---|
| $h_{11}$ | Единицы—десятки ом | Сотни ом — единицы килоом | Сотни—единицы килоом |
| $h_{12}$ | $10^{-3}$—$10^{-4}$ | $10^{-3}$—$10^{-4}$ | 1 |
| $h_{21}$ | 0,95—0,998 | Десятки—сотни | Десятки—сотни |
| $h_{22}$ | $10^{-6}$—$10^{-7}$ См | 5—$10^{-5}$ См | 5—$10^{-5}$ См |
| $\dfrac{1}{h_{22}}$ | Сотни килоом — единицы мегаом | Единицы — десятки килоом | Единицы — десятки килоом |

Между $h$-параметрами и физическими параметрами транзистора существует связь, позволяющая определить физические параметры по $h$-параметрам транзистора, так как $r_Э$, $r_Б$, $r_К$ в справочниках приводятся редко (табл. 3.4).

*Таблица 3.4*

**Формулы для определения физических параметров транзисторов через *h*-параметры**

| Физические параметры транзистора | Через *h*-параметры | | |
|---|---|---|---|
| | Схема с ОБ | Схема с ОЭ | Схема с ОК |
| $r_Б$ | $h_{11Б} - \frac{h_{12Б}}{h_{22Б}}(1+h_{21Б})$ | $h_{11К} = h_{11Э}$ | $\frac{1-h_{12К}}{h_{22К}}$ |
| $r_Б$ | $\frac{h_{12Б}}{h_{22Б}}$ | $h_{11Э} - \frac{h_{12Э}}{h_{11Э}}(1+h_{21Э})$ | $h_{11К} + \frac{h_{21К}}{h_{22К}}(1-h_{12К})$ |
| $r_Б$ | $\frac{1-h_{12Б}}{h_{22Б}} \approx \frac{1}{h_{22Б}}$ | $\frac{1+h_{21Э}}{h_{22Э}}$ | $-\frac{h_{21К}}{h_{22К}}$ |
| а | $-h_{21Б}$ | $\frac{h_{21Э}}{1+h_{21Э}}$ | $\frac{1+h_{21К}}{h_{21К}}$ |

Малосигнальные *h*-параметры одной схемы включения транзистора можно определить через *h*-параметры другой схемы включения транзистора (табл. 3.5).

*Таблица 3.5*

**Связь между *h*-параметрами транзисторов в различных схемах включения**

| Параметры | ОЭ через ОБ | ОК через ОЭ | ОБ через ОЭ |
|---|---|---|---|
| $h_{11}$ | $h_{11Э} = \frac{h_{11Б}}{1+h_{21Б}}$ | $h_{11К} = h_{11Э}$ | $h_{11Б} = \frac{h_{11Э}}{1+h_{21Э}}$ |
| $h_{11}$ | $h_{12Э} = \frac{h_{11Б}h_{22Б}}{1+h_{21Б}} - h_{21Б}$ | $h_{12К} = 1$ | $h_{12Б} = \frac{h_{11Э}h_{22Э}}{1+h_{21Э}} - h_{21Э}$ |
| $h_{11}$ | $h_{21Э} = -\frac{h_{21Б}}{1+h_{21Б}}$ | $h_{21К} = h_{21Э} + 1$ | $h_{21Б} = -\frac{h_{21Э}}{1+h_{21Э}}$ |
| $h_{22}$ | $h_{22Э} = \frac{h_{22Б}}{1+h_{21Б}}$ | $h_{11Б} = \frac{h_{11Б}}{1+h_{21Б}}$ | $h_{22Б} = \frac{h_{22Э}}{1+h_{21Э}}$ |

### *Определение h-параметров транзистора по статическим характеристикам*

Для определения *h*-параметров транзистора по его статическим характеристикам необходимо иметь не менее двух входных и выходных характеристик. В справочной литературе обычно приводятся две входные характеристики, а также семейство выходных характеристик для схемы включения с ОЭ.

Рассмотрим методику определения *h*-параметров транзистора на примере включения транзистора по схеме с ОЭ. В начале расчета необходимо выбрать рабочую точку, которая определяет необходимое напряжение смещения на переходах транзистора. Рабочая точка выбирается на любом участке входных статических характеристик, желательно на прямолинейном участке при неизменном и не равном нулю параметре постоянной величины статической характеристики, так как в этом случае повышается точность определения параметров транзисторов (точка *A* на рис. 3.50). Затем на семействах входных и выходных характеристик (рис. 3.50) необходимо выполнить графические построения.

Графическое построение начинается с того, что через рабочую точку проводятся две параллельные прямые относительно осей ко-

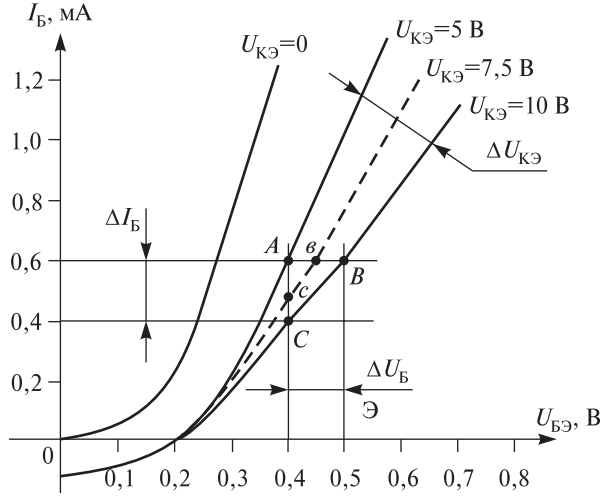



Рис. 3.50. Входные характеристики транзистора к определению *h*-параметров

ординат. Место пересечения линий, проведенных через рабочую точку, со статическими характеристиками обозначим точками *B* и *C* (рис. 3.50).

Построенный характеристический треугольник (*ABC*) необходимо проанализировать по его гипотенузе (отрезок *BC*). Гипотенуза должна выделять только прямолинейный участок статической характеристики, что соответствует минимальному приращению тока и напряжения ($\Delta I_{Б}$ и $\Delta U_{БЭ}$), т.е. малосигнальным параметрам.

Если гипотенуза ограничивает криволинейный участок, то необходимо в промежутке двух статических характеристик построить усредненную характеристику (на рис. 3.50 штриховая линия).

На усредненной характеристике отмечаются точки *в* и *с*, аналогично точкам *B* и *C*. Полученный треугольник *ABC* также проверяется на прямолинейность гипотенузы. Аналогичные графические построения производят до тех пор, пока гипотенуза будет ограничивать прямолинейный участок вольт-амперной характеристики (ВАХ).

В результате графических построений на семействе входных статических ВАХ получен характеристический треугольник, по которому можно определить

отрезок *AC*: $\Delta I_{Б} = I_{БA} - I_{БC}$ при $U_{БЭ} = U_{БЭA} = U_{БЭC} = \text{const}$,

отрезок *AB*: $\Delta U_{БЭ} = U_{БЭB} - U_{БЭA}$ при $I_{Б} = I_{БA} = I_{БB} = \text{const}$.

Значение $\Delta U_{КЭ}$ можно определить по формулам

$$\Delta U_{КЭ} = U_{КЭB} - U_{КЭA} \quad \text{при} \quad I_{Б} = I_{БA} = I_{БB} = \text{const},$$

$$\Delta U_{КЭ} = U_{КЭC} - U_{КЭA} \quad \text{при} \quad U_{БЭ} = U_{БЭC} = U_{БЭA} = \text{const}.$$

По данным характеристического треугольника (*ABC*) можно определить *h*-параметры $h_{11}$ и $h_{12}$ при выбранном положении рабочей точки *A*:

$$h_{11Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}}\Big|_{U_{КЭ}=\text{const}} = \frac{U_{БЭB} - U_{БЭC}}{I_{Бв} - I_{Бc}}\Big|_{U_{КЭA}=U_{КЭC}} = \frac{0{,}5 - 0{,}4}{(0{,}6 - 0{,}4)\cdot 10^{-3}}\Big|_{U_{КЭ}=10\ \text{В}} =$$

$$= \frac{0{,}1}{0{,}2\cdot 10^{-3}}\Big|_{U_{КЭ}=10\ \text{В}} = \frac{0{,}1\cdot 10^{-3}}{0{,}2}\Big|_{U_{КЭ}=10\ \text{В}} = 500\ \text{Ом};$$

$$h_{12Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}\big|_{I_Б = \text{const}}} = \frac{U_{БЭB} - U_{БЭA}}{U_{КЭB} - U_{КЭA}\big|_{I_{БA} = I_{БB}}} = \frac{0{,}5 - 0{,}4}{10 - 5}\Big|_{I_Б = 0{,}6\ мА} = \frac{0{,}1}{5} = 0{,}02.$$

Перейдем к определению $h$-параметров $h_{21}$ и $h_{22}$ по выходным статическим характеристикам (рис. 3.51). Для этого также проводят необходимые графические построения. Вначале надо определить координаты точек $A$, $B$ и $C$ характеристического треугольника на входных характеристиках (рис. 3.50):

точка $A$ $I_{БA} = 0{,}6$ мА; $U_{БЭA} = 0{,}4$ В; $U_{КЭA} = 5$ В;

точка $B$ $I_{БB} = 0{,}6$ мА; $U_{БЭB} = 0{,}6$ В; $U_{КЭB} = 10$ В;

точка $C$ $I_{БC} = 0{,}4$ мА; $U_{БЭC} = 0{,}4$ В; $U_{КЭC} = 10$ В.

По координатам точек $A$, $B$ и $C$ на входных характеристиках перенести их проекции на выходные характеристики и обозначить соответственно $A'$, $B'$ и $C'$ (рис. 3.51).

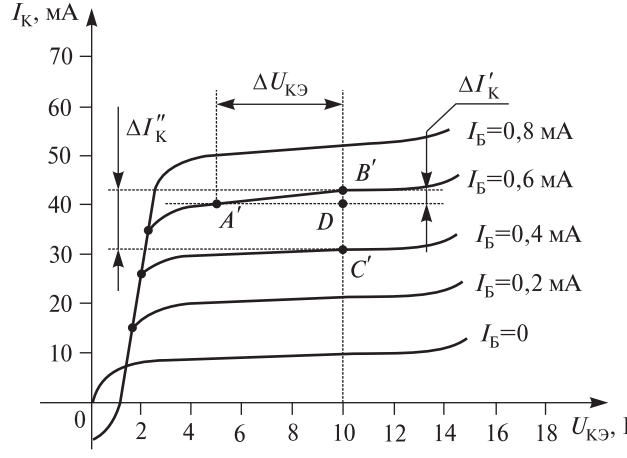



Рис. 3.51. Выходные характеристики транзистора к определению $h$-параметров

Через точку $A'$ проводим прямую параллельно оси абсцисс, а через точку $B'$ — прямую параллельно оси ординат. На пересечении этих прямых обозначим точку $D$. В результате этих построений на выходных статических вольт-амперных характеристиках получаем характеристический треугольник $A'B'D$, по которому можно определить:

$\Delta I'_{\text{К}} = I_{\text{К}в'} - I_{\text{К}A'}$ при $I_{\text{Б}} = I_{\text{Б}A'} = I_{\text{Б}в'}$ — (проекция отрезка $A'B'$ на ось ординат — отрезок $B'D$);

$\Delta U_{\text{КЭ}} = U_{\text{КЭ}в'} - U_{\text{КЭ}A'}$ при $I_{\text{Б}} = I_{\text{Б}A'} = I_{\text{Б}в'}$ — (проекция отрезка $A'B'$ на ось абсцисс — отрезок $A'D$).

Значения $\Delta I_{\text{Б}}, \Delta I_{\text{К}}$ при $U_{\text{КЭ}} = \text{const}$ можно определить:

$$\Delta I'_{\text{К}} = I_{\text{К}в'} - I_{\text{К}c'} \text{ при } U_{\text{КЭ}в'} = U_{\text{КЭ}c'};$$

$$\Delta I_{\text{Б}} = I_{\text{Б}в'} - I_{\text{Б}c'} \text{ при } U_{\text{КЭ}в'} = U_{\text{КЭ}c'}.$$

По данным графического построения на выходных характеристиках определяем $h$-параметры $h_{21}$ и $h_{22}$ при выбранном положении рабочей точки $A$:

$$h_{22\text{Э}} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta U_{\text{КЭ}}}\Big|_{I_{\text{Б}}=\text{const}} = \frac{I_{\text{К}в'} - I_{\text{К}A'}}{U_{\text{КЭ}в'} - U_{\text{КЭ}A'}}\Big|_{I_{\text{Б}A'}=I_{\text{Б}в'}} = \frac{(42-40)\cdot 10^{-3}}{10-5}\Big|_{I_{\text{Б}}=0{,}6\text{ мА}} =$$

$$= \frac{2\cdot 10^{-3}}{5} = 4\cdot 10^{-3}\text{ См};$$

$$h_{22\text{Э}} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}}\Big|_{U_{\text{КЭ}}=\text{const}} = \frac{I_{\text{К}в'} - I_{\text{К}c'}}{I_{\text{Б}в'} - I_{\text{Б}c'}}\Big|_{U_{\text{КЭ}c'}=U_{\text{КЭ}в'}} = \frac{(42-40)\cdot 10^{-3}}{(0{,}6-0{,}4)\cdot 10^{-3}}\Big|_{U_{\text{КЭ}}=10\text{ В}} = \frac{2}{0{,}2} = 10.$$

## 3.10. Динамические характеристики и параметры транзистора

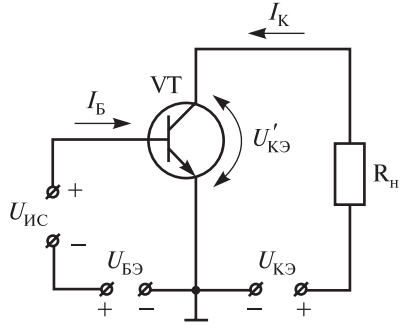



Рис. 3.52. Схема включения транзистора с ОЭ в динамическом режиме

В динамическом режиме работы транзистора во входную цепь включают источник смещения и источник сигнала, а в выходную цепь — источник смещения и нагрузку. Схемы включения рассмотрены выше в разд. 3.4.

Рассмотрим динамические характеристики для схемы включения транзистора с ОЭ на примере схемы, показанной на рис. 3.52, и статических характеристик для этой схемы, приведенных на рис. 3.53.

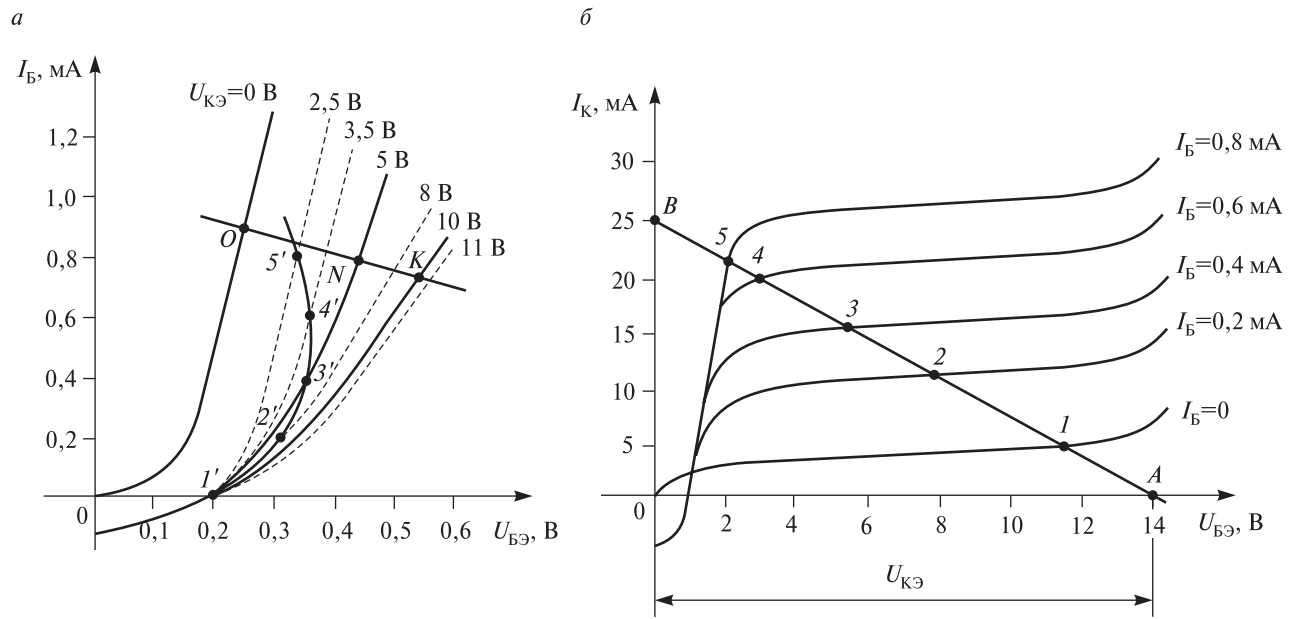



Рис. 3.53. Построение динамических характеристик транзистора по схеме включения с ОБ:
*а* — входные характеристики; *б* — выходные характеристики

Динамические входные и выходные характеристики строятся на семействе статических входных и выходных характеристик транзистора (рис. 3.53) и позволяют определить параметры, характеризующие работу транзистора в динамическом режиме.

*Выходная динамическая характеристика* представляет собой график изменения выходного тока от напряжения в выходной цепи в зависимости от тока во входной цепи.

Для выходной цепи транзистора запишем уравнение по второму закону Кирхгофа

$$U_{КЭ} = I_К R_Н + U'_{КЭ}, \qquad (3.4)$$

где $I_К$ — ток коллектора в выходной цепи; $R_Н$ — сопротивление нагрузки; $U'_{КЭ}$ — падение напряжения на транзисторе, состоящее из падения напряжения на отдельных участках, $r_{Э\ диф}$, $r_Б$, $r_{К\ диф}$.

Уравнение в координатах выходных характеристик $I_К = \varphi(U_{КЭ})$ (рис. 3.53) описывает прямую, не проходящую через начало координат. Характеристику можно построить по точкам ее пересечения с осями координат (рис. 3.53), которые находят следующим образом.

Точка *A* соответствует режиму холостого хода выходной цепи, т.е. $I_К = 0$. Решая уравнение (3.4), получим $U_{КЭ} = U'_{КЭ}$, т.е. все напряжение выходной цепи приложено к транзистору (статический режим). Координаты точки А: $I_К = 0$; $U_{КЭ} = U'_{КЭ}$.

Точка *B* соответствует режиму короткого замыкания в выходной цепи между выводами Э и К транзистора, т.е. $U'_{КЭ} = 0$. Решая уравнение (3.4), получим $I_К = \dfrac{U_{КЭ}}{R_н}$, т.е. все напряжение в выходной цепи приложено к нагрузке. Координаты точки *B*: $I_К = \dfrac{U_{КЭ}}{R_н} U'_{КЭ} = 0$.

Соединив точки *A* и *B* прямой, получаем динамическую характеристику выходной цепи.

Например, при заданных значениях $U_{КЭ} = 14$ В и $R_н = 580$ Ом точки *A* и *B* имеют координаты:

точка *A*: $I_К = 0$; $U_{КЭ} = U'_{КЭ} = 14$ В;

точка *B*: $U_{КЭ} = 0$; $I_К = \dfrac{U_{КЭ}}{R_н} = \dfrac{14}{580} = 0{,}025\ А = 25\ мА$.

Наклон динамической характеристики к оси напряжения зависит от заданных значений напряжения смещения в выходной цепи и нагрузки.

Входная динамическая характеристика транзистора строится следующим образом. На семействе выходных характеристик (рис. 3.53, *б*) отмечают точки пересечения динамической и статической характеристик (*1*, *2, 3, 4, 5*) и определяют их координаты. Для каждой точки характерны три координаты — $I_К$, $U_{КЭ}$, $I_Б$. По полученным координатам наносят эти точки *1′*, *2′*, *3′*, *4′*, *5′* на семействе входных характеристик. Для этого достаточно две координаты $I_Б$ и $U_{КЭ}$ (рис. 3.53, *а*).

Например: точка *1* — $I_Б = 0$ мА; $U_{КЭ} = 11$ В;
точка *2* — $I_Б = 0{,}2$ мА; $U_{КЭ} = 8$ В;
точка *3* — $I_Б = 0{,}4$ мА; $U_{КЭ} = 5$ В;
точка *4* — $I_Б = 0{,}6$ мА; $U_{КЭ} = 3{,}5$ В;
точка *5* — $I_Б = 0{,}8$ мА; $U_{КЭ} = 2{,}5$ В.

Недостающие характеристики для значений $U_{КЭ}$, равных 11 В, 8 В, 3,5 В и 2,5 В, строятся как промежуточные характеристики усредненным способом.

Для построения промежуточных характеристик необходимо:

– перпендикулярно прямолинейным участкам характеристик провести линию (линия *OK* на рис. 3.53, *а*);

– отметить пересечение линии со статическими характеристиками (точки *O, N, K*);

– отрезки между характеристиками (*ON* и *NK*) разделить на равные доли, соответствующие новым значениям $U_{КЭ}$ (в данном примере отрезок *ON* разделен на 10 долей и каждая доля соответствует $U_{КЭ} = 0{,}5$ В, а отрезок *NK* на 5 долей и каждая доля соответствует $U_{КЭ} = 1$ В);

– выбираем точки, соответствующие $U_{КЭ} = 2{,}5$ В (точка а), $U_{КЭ} = 3{,}5$ В (точка б) и т.д., и проводим приблизительные — усредненные (штриховые линии) — вольт-амперные характеристики аналогично заданным.

Наносим точки *1, 2, 3, 4* и *5* на статические входные вольт-амперные характеристики. Нанесенные точки соединяют плавной кривой и получают динамическую входную характеристику, которая имеет нелинейный вид.

Однако у многих транзисторов входные статические характеристики проходят на малых расстояниях друг от друга. Это затрудняет построение динамической входной характеристики. В качестве динамической входной характеристики упрощенно используют одну из его статических характеристик (без большой погрешности при расчете).

По нагрузочным характеристикам можно произвести расчет режима работы и найти параметры транзистора при работе в динамическом режиме и выбрать область неискаженного усиления. Также можно определить напряжение и ток смещения, допустимую амплитуду сигнала, входную и выходную мощности, коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности, фазовый сдвиг.

Параметры транзистора рассчитываются для определенного режима включения и определенной схемы включения транзистора, что определяется величиной нагрузки в выходной цепи ($R_{\text{н}}$), напряжением смещения в выходной цепи ($U_{\text{вых}}$) и тока в выходной цепи ($I_{\text{вых}}$).

***Параметры динамического (нагрузочного) режима.*** Параметрами динамического (нагрузочного) режима служат параметры, характеризующие работу транзистора с нагрузкой в выходной цепи.

Коэффициент усиления тока показывает, во сколько раз сила тока в выходной цепи больше силы тока во входной цепи:

$$K_I = \frac{I_{\text{вых max}}}{I_{\text{вх max}}}.$$

Коэффициент усиления напряжения показывает, во сколько раз напряжение в выходной цепи больше напряжения во входной цепи:

$$K_U = \frac{U_{\text{вых max}}}{U_{\text{вх max}}}.$$

Коэффициент усиления мощности показывает, во сколько раз мощность сигнала на выходе превышает мощность входного сигнала: $K_{\text{Р}} = \frac{P_{\text{вых max}}}{P_{\text{вх max}}} = \frac{I_{\text{вых max}} U_{\text{вых max}}}{I_{\text{вх max}} U_{\text{вх max}}} = K_I K_U$.

Мощность сигнала во входной цепи транзистора:

– по постоянному току $P_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} U_{\text{вх}}$;

– по переменному току

$$P_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} U_{\text{вх}} = \frac{I_{\text{вх max}}}{\sqrt{2}} \frac{U_{\text{вх max}}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{\text{вх max}} U_{\text{вх max}}}{2},$$

где $U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх max}}}{\sqrt{2}}$ — действующее значение напряжения; $I_{\text{вх}} = \frac{I_{\text{вх max}}}{\sqrt{2}}$ — действующее значение тока; $I_{\text{вх max}}$ — амплитудное значение тока; $U_{\text{вх max}}$ — амплитудное значение напряжения.

Мощность сигнала в выходной цепи транзистора:

– по постоянному току $P_{\text{вых}} = I_{\text{вых}} U_{\text{вых}}$;

– по переменному току $P_{\text{вых}} = \frac{I_{\text{вых max}} U_{\text{вых max}}}{2}$.

Входное сопротивление: $r_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх max}}}{I_{\text{вх max}}}$.

Выходное сопротивление: $r_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых max}}}{I_{\text{вых max}}}$.

Режим включения транзистора характеризует его как усилитель сигналов и выбирается по положению рабочей точки на статических и динамических характеристиках при их пересечении.

Для получения неискаженного усиления необходимо при выборе положения рабочей точки использовать только линейный участок статических характеристик при пересечении с динамическими характеристиками.

Рассмотрим пример графического анализа работы транзистора как усилительного элемента в динамическом режиме по схеме включения с ОЭ в активном режиме (см. рис. 3.52).

Эту задачу можно решить в следующей последовательности:

1. На заданных выходных статических характеристиках (рис. 3.54) определим рабочую область, ограниченную предельным параметром данного транзистора (определяется по справочнику).

$U_{\text{кэ max}}$ = 16 В — максимально допустимое значение напряжения коллектор—эмиттер;

$I_{\text{к max}}$ = 30 мА — максимально допустимый ток коллектора;

$P_{\text{к max}}$ = 480 мВт — максимально допустимая мощность рассеивания;

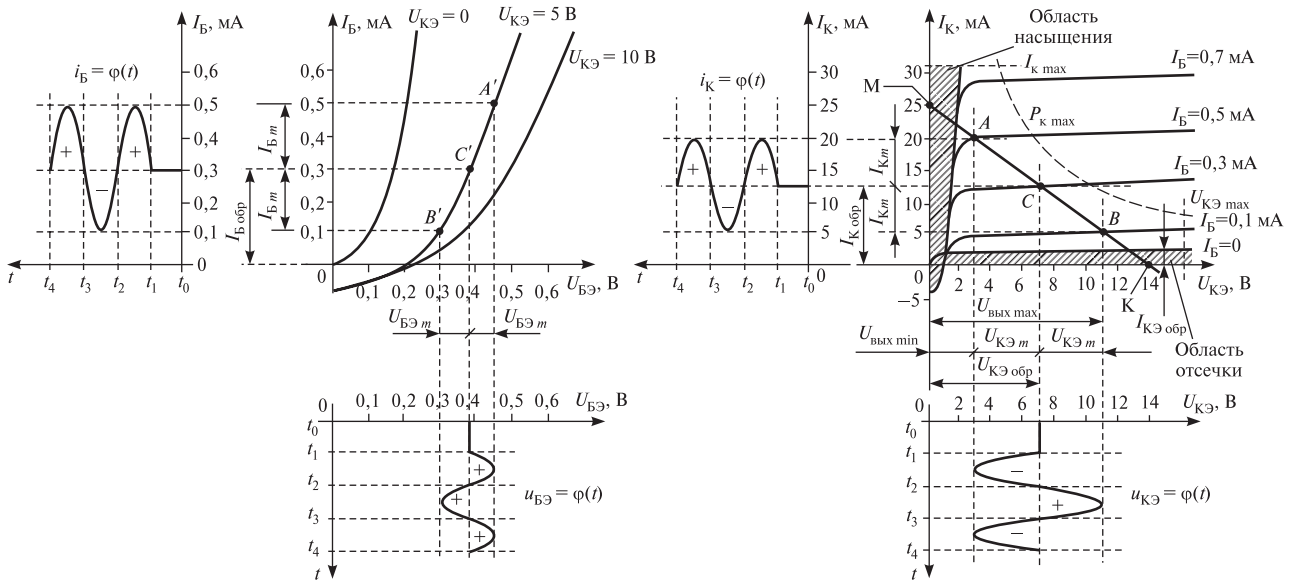



Рис. 3.54. Графоаналитический расчет режима работы и усиления транзистора с помощью входных и выходных характеристик

$I_{\text{кэ обр}}$ = 5 мА — сквозной ток в цепи коллектор—эмиттер при заданном обратном напряжении коллектор—эмиттер и разомкнутом выводе базы ($I_{\text{Б}} = 0$).

Для этого нанесем на выходные статические характеристики, ограничивающие прямые линии $U_{\text{кэ max}}$, $I_{\text{к max}}$ и параболическую линию $P_{\text{к max}}$ (штриховые линии).

Снизу рабочая область ограничивается характеристикой сквозного тока $I_{\text{КЭ обр}}$, снятой при $I_{\text{Б}} = 0$. Режим работы транзистора выбирается в рабочей области.

2. Строим выходную динамическую характеристику по допустимым параметрам работы транзистора (определяются по справочнику).

$U_{\text{КЭ}}$ = 14 В — допустимое постоянное напряжение между коллектором и эмиттером;

$I_{\text{К}}$ = 25 мА — допустимый ток коллектора;

$P_{\text{К ср max}}$ = 350 мВт — максимально допустимая средняя рассеиваемая мощность коллектора.

Последовательность расчета и построения выходной динамической характеристики показана выше на примере рис. 3.53. Определяем параметры точек пересечения динамической характеристики с осями координат:

точка К – $I_{\text{К}} = 0$; $U_{\text{КЭ}} = U'_{\text{КЭ}} = 14$ В; точка М – $U'_{\text{КЭ}} = 0$; $I_{\text{К}} = 25$ мА.

Также определяем допустимое наименьшее значение сопротивления нагрузки в выходной цепи:

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{КЭ}}}{I_{\text{К}}} = \frac{14}{25 \cdot 10^{-3}} = 560 \text{ Ом}.$$

Из расчета видно, что допустимых значений сопротивления нагрузки в выходной цепи не может быть меньше 560 Ом. Динамическая характеристика (линия КМ на рис. 3.54) не выходит за область, ограниченную предельными параметрами.

3. Выбираем рабочий участок на вольт-амперных характеристиках в пределах рабочей области, ограниченный точками, лежащими на пересечении прямолинейных участков статических характеристик с динамической характеристикой в пределах активного режима.

Такими точками являются точки с координатами:

– точка *А* $I_{\text{К А}} = 20$ мА; $U_{\text{КЭ }A} = 3$ В; $I_{\text{Б }A} = 0{,}3$ мА;

– точка $B$ $I_{К\ B} = 5$ мА; $U_{КЭ\ B} = 11$ В; $I_{Б\ B} = 0{,}1$ мА,

где $U_{КЭ\ A} = U_{вых\ min}$ — минимальное напряжение коллектор—эмиттер в режиме насыщения; $U_{КЭ\ B} = U_{вых\ max}$ — максимальное напряжение источника питания коллектор—эмиттер в режиме отсечки.

Эти точки выбраны для исключения нелинейных искажений выходного сигнала из-за попадания рабочей точки в область насыщения и отсечки. Статические характеристики в пределах этих точек на динамической характеристике прямолинейны. В пределах этих точек режим работы транзистора является установившимся, т.е. практически ток коллектора $I_К$ не изменяется, т.е. приращение тока равно нулю ($\Delta I_К \approx 0$).

4. Выбираем рабочую точку $C$ (рис. 3.54) на выходной нагрузочной на ее пересечении со статическими характеристиками посередине рабочего участка выходной динамической характеристики, т.е. между точками $A$ и $B$ (участок $AB$ делится пополам). Если точка $C$ не находится на статической характеристике, то через эту точку необходимо построить (провести) усредненную статическую характеристику. Координаты точки $C$ на выходных характеристиках:

– точка $C$ $I_{К\ C} = 12{,}5$ мА; $U_{КЭ\ C} = 7$ В; $I_{Б\ C} = 0{,}2$ мА.

По положению рабочей точки на выходных характеристиках определяем значение необходимого смещения в режиме покоя на коллекторный переход $U_{КЭ\ обр\ C} = U_{КЭ\ CМ} = 7$ В при постоянном коллекторном токе $I_{КC} = I_{К\ обр} = 12{,}5$ мА и мощности в режиме покоя $P_{вых} = I_{К\ обр} U_{КЭ\ обр\ C} = 12{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 7 = 87{,}5 \cdot 10^{-3}$ Вт при отсутствии сигнала на входе транзистора. На графике тока $i_К = \varphi(t)$ и напряжения $U_{КЭ} = \varphi(t)$ режим покоя обозначен в интервале времени $t_0 – t_1$ (рис. 3.54).

5. Точки, ограничивающие рабочий участок (от точки $A$ до точки $B$), и рабочую точку $C$ переносим по координатам на семейство входных характеристик — точки $A'$, $B'$ и $C'$ (рис. 3.54).

В качестве нагрузочной характеристики для упрощения построения можно выбрать одну из статических характеристик, т.е. для всех точек ($A'$, $B'$, $C'$) на входных статических характеристиках принимаем характеристику, имеющую значение напряжения $U_{КЭ} = 5$ В.

Необходимо отметить, что в случае выбора точки $B$ на выходных характеристиках ниже, чем при $I_Б = 0{,}1$ мА, точка $B'$ на входных статических характеристиках переместилась бы на криволинейный

участок, а на криволинейном участке транзистор работает с бóльшими искажениями входного сигнала.

Проверяем участок $A'C'B'$ на прямолинейность.

В данном примере точки $A'$, $B'$ и $C'$ расположены приблизительно на прямолинейном участке входных характеристик и рабочая точка $C'$ находится на середине рабочего участка.

Если участок $A'B'C'$ не удовлетворяет условию прямолинейности, то необходимо сместить одну из точек ($A$ или $B$) на выходных характеристиках ближе к середине и вновь разделить отрезок $AB$ на две равные части для определения положения рабочей точки $C$.

По положению рабочей точки $C'$ определяем напряжение смещения, которое необходимо включить между базой и эмиттером $U_{БЭ\,обр} = U_{БЭ\,C'} = U_{БЭ\,CM} = 0{,}375$ В при постоянном токе базы $I_{БC'} = I_{Б\,обр} = 0{,}3$ мА и мощности в режиме покоя $P_{вх} = I_{Б\,обр} U_{БЭ\,обр} = 0{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}375 = 11{,}25 \cdot 10^{-6}$ при отсутствии сигнала на входе транзистора. На графике тока $i_Б = \varphi(t)$ и напряжения $u_{БЭ} = \varphi(t)$ режим покоя обозначен в интервале времени $t_0$—$t_1$ (рис. 3.54).

6. По входным и выходным характеристикам определяем параметры входного и выходного сигнала — амплитуды допустимого входного и выходного переменного напряжения и тока соответственно $I_{Б\,m}$, $U_{БЭ\,m}$, $I_{К\,m}$, $U_{КЭ\,m}$ ($m$ — амплитудное значение переменных напряжения и тока):

$I_{Б\,m} = I_{Б\,A'} - I_{Б\,C'} = I_{Б\,C'} - I_{Б\,B'} = 0{,}5 - 0{,}3 = 0{,}3 - 0{,}1 = 0{,}2$ мА;

$U_{БЭ\,m} = U_{БЭ\,A'} - U_{БЭ\,C'} = U_{БЭ\,C'} - U_{БЭ\,B'} = 0{,}45 - 0{,}375 = 0{,}375 - 0{,}3 = 0{,}075$ В;

$I_{К\,m} = I_{К\,A} - I_{К\,C} = I_{К\,C} - I_{К\,B} = 20 - 12{,}5 = 12{,}5 - 5 = 7{,}5$ мА;

$U_{КЭ\,m} = U_{КЭ\,B} - U_{КЭ\,C} = U_{КЭ\,C} - U_{КЭ\,A} = 11 - 7 = 7 - 3 = 4$ В.

В этом режиме во входную цепь транзистора можно включить источник сигнала переменного синусоидального напряжения $u_{БЭ} = U_{БЭm}\sin\omega t = 0{,}075\sin\omega t$ и тока $i_Б = I_{Б\,m}\sin\omega t = 0{,}2\sin\omega t$ (интервал $t_1$—$t_4$ на рис. 3.54), тогда на входе транзистора к эмиттерному переходу будет приложено напряжение $U_{вх} = U_{БЭ\,C} + U_{БЭ\,m}\sin\omega t$. В фазе с изменением входного напряжения $U_{вх}$ будет изменяться управляющий входной ток $i_Б = I_{Б\,обр} + I_{Б\,m}\sin\omega t$.

В схеме с ОЭ увеличение тока $i_Б$ вызывает увеличение тока $i_К$ (графики $i_Б = \varphi(t)$ и $i_К = \varphi(t)$ в интервале $t_1—t_4$).

В выходной цепи ток $i_К$ на нагрузке создает напряжение $U_R = i_К R_н = I_{К\,обр} R_н + R_н I_{Кm} \sin\omega t = U_{R\,обр\,КЭ} + U_{Rm} \sin\omega t = U_{R\,обр} - U_{R\sim}$.

Напряжение на нагрузке изменяется в противофазе с током нагрузки в коллекторной цепи. С увеличением тока $i_К$ (ток $i_К$ действует в фазе с током $I_Б$ и напряжением $U_{БЭ}$ — положительный полупериод графика $i_К = \varphi(t)$ в интервале $t_1—t_2$) происходит уменьшение напряжения $U_К$ (график $u_{КЭ} = \varphi(t)$ — отрицательный полупериод в интервале $t_1—t_2$).

В результате выходное напряжение $U_{КЭ\ вых}$ изменяется в противофазе с напряжением сигнала на входе $U_{БЭ\ вх}$ (графики изменения тока $i_К = \varphi(t)$ и напряжения $u_{КЭ} = \varphi(t)$), т.е. в схеме с ОЭ происходит фазовый сдвиг напряжения на 180°.

7. Определение параметров динамического режима:

– коэффициент усиления по току:

$$K_{I_Э} = \frac{I_{вых\,m}}{I_{вх\,m}} = \frac{I_{Кm}}{I_{Эm}} = \frac{7{,}5\ мА}{0{,}2\ мА} = 37{,}5,$$

где $I_{Кm}$ и $I_{Эm}$ — амплитуды сигналов переменных составляющих соответственно коллекторного и эмиттерного токов; $K_{I_Э}$ — практически не отличается от дифференциального коэффициента передачи базового тока β (статического параметра), т.е. $K_{I_Э} \approx \beta$;

– коэффициент усиления по напряжению:

$$K_{U_Э} = \frac{U_{вых\,m}}{U_{вх\,m}} = \frac{U_{КЭm}}{U_{БЭm}} = \frac{4\ В}{0{,}075\ В} \approx 53{,}3,$$

где $U_{КЭm}$ и $U_{БЭm}$ — амплитуды сигналов переменных напряжений выходной и входной цепей;

– мощность сигнала во входной цепи: $P_{вх\ Э} = I_{вх} U_{вх} =$

$$= \frac{I_{вх\,m}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{вх\,m}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{вх\,m} U_{вх\,m}}{2} = \frac{I_{Бm} U_{БЭm}}{2} = \frac{0{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}075}{2} =$$

$$= \frac{0{,}015 \cdot 10^{-3}}{2} = 0{,}0075 \cdot 10^{-3}\ Вт;$$

– полезная выходная мощность, выделяемая в нагрузке:

$$P_{\text{вых Э}} = I_{\text{вых}} U_{\text{вых}} =$$

$$= \frac{I_{\text{вых}\,m}}{\sqrt{2}} \frac{U_{\text{вых}\,m}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{\text{вых}\,m} U_{\text{вых}\,m}}{2} = \frac{I_{\text{К}m} U_{\text{КЭ}m}}{2} = \frac{7{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 4}{2} =$$

$$= \frac{30 \cdot 10^{-3}}{2} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

– коэффициент усиления по мощности:

$$K_{P\text{Э}} = \frac{P_{\text{вых Э}}}{P_{\text{вх Э}}} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{7{,}5 \cdot 10^{-6}} = 2000 \text{ или}$$

$$K_{P\text{Э}} = K_{I_{\text{Э}}} \cdot K_{U_{\text{Э}}} = 37{,}5 \cdot 53{,}3 \approx 2000;$$

– входное сопротивление:

$$R_{\text{вхЭ}} = \frac{U_{\text{вх}\,m}}{I_{\text{вх}\,m}} = \frac{U_{\text{БЭ}m}}{I_{\text{Б}m}} = \frac{0{,}075}{2 \cdot 10^{-3}} = 375 \text{ Ом};$$

– выходное сопротивление:

$$R_{\text{выхЭ}} = \frac{U_{\text{вых}\,m}}{I_{\text{вых}\,m}} = \frac{U_{\text{КЭ}m}}{I_{\text{К}m}} = \frac{4}{7{,}5 \cdot 10^{-3}} = 533 \text{ Ом}.$$

Аналогично можно провести графический анализ и определить параметры в динамическом режиме при малом изменении токов и напряжений для транзисторных схем с ОБ и ОК.

Обобщенные данные о нагрузочных параметрах для схем включения транзистора с ОБ, ОЭ и ОК приведены в табл. 3.6

*Таблица 3.6*

| Параметры динамического режима | Схемы включения транзистора | | |
|---|---|---|---|
| | С общей базой (ОБ) | С общим эмиттером (ОЭ) | С общим коллектором (ОК) |
| $K_I$ | 0,9—0,999 | $10—10^3$ | $10—10^3$ |
| $K_U$ | $10—10^2$ | $10—10^2$ | 0,8—0,99 |
| $K_P$ | $10—10^2$ | $10^3—10^4$ | $10^2—10^3$ |
| $R_{\text{вх}}$, Ом | $1—10^2$ | $10^2—10^3$ | $10^4—10^5$ |
| $R_{\text{вых}}$, Ом | $10^5—10^6$ | $10^4—10^5$ | $10^2—10^3$ |
| Сдвиг фаз $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ | 0 | 180° | 0 |

Результаты, представленные в табл. 3.6, позволяют сделать общие выводы о сравнительных характеристиках различных схем включения:

1) $R_{\text{вх Б}} < R_{\text{вх Э}} < R_{\text{вх К}}$;
2) $R_{\text{вых Б}} > R_{\text{вых Э}} > R_{\text{вых К}}$;
3) $K_{U\,\text{Б}} \approx K_{U\,\text{Э}} >> K_{U\,\text{К}} < 1$;
4) $K_{I\,\text{Б}} < K_{I\,\text{Э}} \approx K_{I\,\text{К}}$;
5) $K_{P\,\text{Б}} << K_{P\,\text{Э}} > K_{P\,\text{К}}$.

## 3.11. Работа транзистора с импульсными сигналами

Биполярные транзисторы часто используются в импульсных переключающих схемах, которые представляют собой разновидность транзистора в динамическом режиме работы. В этих схемах во входной цепи вместе с источником смещения включен источник импульсного сигнала управления.

Импульсный сигнал характеризуется амплитудой и длительностью, которая мала по сравнению с временем ее наблюдения. Различают два режима работы транзистора с импульсами:

– импульсный — усиление импульса как большой, так и малой амплитуды;

– переключающий — импульс большой амплитуды скачком переводит транзистор из состояния отсечки (закрытое состояние) в состояние насыщения или, наоборот, из состояния насыщения в закрытое состояние.

Часто режим работы транзистора с импульсами в литературе называют режимом большого сигнала, так как в нем амплитуда входного сигнала изменяется в широких пределах — от отсечки до насыщения. Переключающий режим (его называют еще ключевым) имеет ряд особенностей, поэтому мы его рассмотрим ниже более подробно.

Рассмотрим схему транзистора в ключевом динамическом режиме (рис. 3.55, *а*). На схеме во входной цепи напряжение $U_{\text{БЭ}}$ создает обратное смещение на эмиттерном переходе, а напряжение $U_{\text{КЭ}}$ в выходной цепи — обратное смещение на коллекторном переходе. Во входной цепи отсутствует ток $I_{\text{Б}}$ и транзистор находится в режиме отсечки. При этом рабочая точка *C* находится на пересечении нагрузочной линии *AB* со статической характеристикой (рис. 3.55, *б*), снятой при токе базы $I_{\text{Б}} = -I_{\text{КБ обр}} = 0$. Ток в цепи коллектора

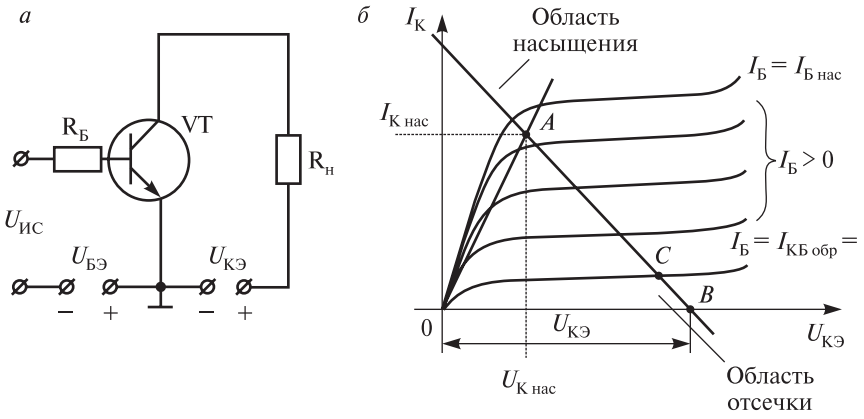



Рис. 3.55. Схема транзисторного ключа и положение рабочей точки на семействе выходных характеристик

мал $I_К = I_{КБ\,обр}$, а напряжение на коллекторном переходе $U_К = U_{КЭ} + U_{БЭ}$ (рис. 3.55, *б*). Таким образом, сопротивление транзистора велико, на что указывает малый ток $I_К$, следовательно, транзистор находится в закрытом состоянии (бесконтактный обрыв выходной цепи — разомкнутая электрическая цепь).

Если от источника сигнала подать импульс (рис. 3.56) с максимальной амплитудой $U_{ИСm}$, которая больше амплитуды источника обратного смещения $U_{БЭ}$ ($U_{ИСm} > U_{БЭ}$), и действующим прямым смещением на эмиттерный переход (момент времени $t_1$), то во входной цепи потечет базовый ток $I_{Б\,нас}$. В результате произойдет накопление носителей зарядов в базовой области и потечет коллекторный ток. Рабочая точка быстро переместится по нагрузочной прямой в

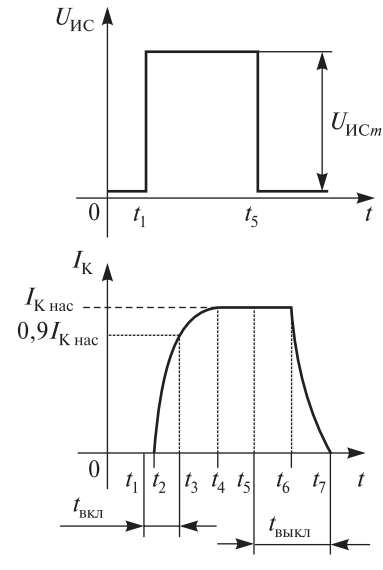



Рис. 3.56. Эпюры импульсного напряжения и коллекторного тока в ключевом режиме работы транзистора

область больших токов базы ($I_{\text{Б нас}}$) и коллектора ($I_{\text{К нас}}$) (точка $A$ на рис. 3.55). Транзистор, таким образом, переходит вначале в активный режим, а затем в режим насыщения. Скорость перемещения зависит от времени изменения сигнала от 0 до $U_{\text{ИС}\,m}$ и процессов в транзисторе. Рабочая точка $A$ соответствует большому току $I_{\text{К нас}}$ и малому падению напряжения на транзисторе $U_{\text{КЭ нас}}$, что указывает на малое выходное сопротивление схемы, и положению «ключ замкнут».

Все напряжение источника смещения $U_{\text{КЭ}}$ падает на нагрузке $R_{\text{н}}$, а на транзисторе имеется очень небольшое остаточное напряжение (десятые доли вольта), называемое напряжением насыщения $U_{\text{КЭ нас}} = U_{\text{КЭ}} - I_{\text{К}}R_{\text{н}}$.

При коллекторном токе $I_{\text{К нас}}$ потенциал коллектора $n$-$p$-$n$-транзистора становится отрицательным относительно базы, так как на коллекторном переходе действует напряжение прямого смещения ($U_{\text{КБ}}$) при условии $U_{\text{ИС}\,m} > U_{\text{КЭ}} + U_{\text{БЭ}}$.

В этом случае $U_{\text{КБ}} = U_{\text{ИС}\,m} - U_{\text{КЭ}} - U_{\text{БЭ}}$ и равно напряжению насыщения $U_{\text{КБ}} = U_{\text{БЭ нас}}$.

Конечно, если амплитуда импульса ($U_{\text{ИС}\,m}$) будет меньше, чем суммарное напряжение смещения ($U_{\text{КЭ}} + U_{\text{БЭ}}$), то и сила коллекторного тока ($I_{\text{К нас}}$) будет меньше.

При окончании действия импульса (на рис. 3.56 момент времени $t_5$) во входной цепи вновь создается обратное смещение эмиттерного перехода и транзисторный ключ переходит в режим отсечки (разомкнутая цепь).

Работу транзистора с импульсными сигналами в ключевом режиме характеризуют следующие параметры:

– $t_{\text{з вкл}}$ — время задержки включения ключа, затрачиваемое на диффузионное перемещение через базу инжектируемых носителей зарядов эмиттерного перехода (на диаграмме выходного тока $I_{\text{К}}$ на рис. 3.56 интервал времени $t_1$—$t_2$);

– $t_{\text{нр}}$ — время нарастания тока коллектора до 0,9 $I_{\text{К нас}}$, затраченное на накопление в базе достаточного количества инжектированных носителей зарядов для экстракции в коллекторном переходе (на диаграмме выходного тока $I_{\text{К}}$ на рис. 3.56 интервал времени $t_2$—$t_3$);

– $t_{\text{изб}}$ — время накопления избыточного заряда в базовой области ($t_3$—$t_4$) за счет действия напряжения прямого смещения на

коллекторном переходе ($U_{КБ}$), которое препятствует прохождению носителей зарядов в коллектор ($I_{К\ нас}$);

– $t_у$ — промежуток времени $t_1$—$t_4 = t_{з\ вкл} + t_{изб}$ называют временем установления, оно соответствует времени заряда диффузионной емкости эмиттерного перехода. Если при этом увеличить входной сигнал, то увеличиваются концентрация носителей зарядов в базе и их рекомбинация, но ток $I_К$ останется неизменным;

– $t_{з\ выкл}$ — время задержки на выключение, когда ток $I_К$ остается неизменным и максимальным после окончания входного сигнала ($U_{ИС}$); коллекторную цепь в течение этого промежутка времени ($t_5$—$t_6$) питает избыточный — нерассосавшийся — заряд, накопленный в базе;

– $t_{сп}$ — время спада коллекторного тока, которое определяется временем рассасывания неосновных носителей зарядов из базовой области ($t_6$—$t_7$) в эмиттер и коллектор за счет обратного смещения переходов.

Аналогично рассмотренной схеме с ОЭ работает в ключевом режиме и схема с ОБ. В схеме с ОБ все переходные процессы имеют длительность в несколько раз меньше, чем в схеме с ОЭ.

## 3.12. Зависимость параметров транзисторов от температуры и режима электропитания

***Влияние температуры.*** Изменение температуры окружающей среды влияет на температуру *p-n*-переходов транзистора. Температурная зависимость параметров и характеристик транзисторов обусловлена температурными изменениями свойств полупроводниковых материалов. При изменении температуры изменяется концентрация носителей зарядов, их подвижность, скорость диффузии, вероятность рекомбинации и другие процессы.

Значительное повышение температуры вызывает усиленную генерацию (ионизацию) пар носителей зарядов — электронов и дырок в каждом полупроводнике *p*- и *n*-типа. В частности, в области *p*-типа возрастает число свободных электронов — неосновных носителей зарядов, и они переходят в *n*-область, где компенсируют положительные неподвижные ионы донорной примеси. В результате резко снижается потенциальный барьер и возрастает прямой ток через *p-n*-переход.

Повышение температуры приводит к увеличению теплового коллекторного тока $I_{К\ обр}$, так как увеличивается число неосновных носителей зарядов в базе и коллекторе за счет процесса генерации. Этот ток незначителен по сравнению с током экстракции ($I_К$) в активном режиме и практически не изменяет коллекторный ток ($I_К$) при неизменном токе в эмиттерном переходе. Однако ток $I_{К\ обр}$ существенно влияет на ширину диапазона активного режима, уменьшая коэффициент усиления транзистора.

Понижение температуры окружающей среды ниже +5 °С существенно влияет на параметры и характеристики транзистора. В этом случае уменьшается подвижность носителей зарядов, а ширина потенциального барьера резко возрастает, что снижает процесс инжекции в эмиттерном переходе и экстракцию в коллекторном переходе.

***Влияние режима электропитания.*** Параметры транзистора сильно зависят от напряжения на коллекторном переходе и тока эмиттера.

Коэффициент передачи тока зависит от напряжения на коллекторном переходе. Чем больше $U_К$, тем тоньше база, и тем больше коэффициент переноса носителей зарядов от эмиттерного перехода к коллекторному в базе ($\delta_П$) и коэффициент передачи тока базы $h_{21}$. Увеличение тока эмиттера $I_Э$ также приводит к уменьшению коэффициента передачи тока базы, так как уменьшается коэффициент инжекции $\gamma_и$.

Дифференциальные сопротивления $r_{Э\ диф}$ и $r_{К\ диф}$ переходов обратно пропорциональны току $I_Э$. Сопротивление $r_{К\ диф}$ резко уменьшается при повышении $U_К$ из-за возникновения ударной ионизации в коллекторном переходе, а $r_{Э\ диф}$ практически не изменяется. При большом токе $I_Э$ растет концентрация неосновных носителей заряда в базе и уменьшается ее объемное сопротивление $r_Б$, а увеличение $U_К$ приводит к уменьшению толщины базы и ее сопротивления $r_Б$.

Диффузионная емкость эмиттерного перехода $C_{Э\ дифф}$ линейно возрастает при увеличении $I_Э$. Изменение $U_К$ также существенно влияет на $C_{Э\ дифф}$, так как изменяется ширина потенциального барьера коллекторного перехода. При увеличении $U_К$ диффузионная емкость $C_{Э\ дифф}$ уменьшается, так как снижается число основных носителей в базе.

## 3.13. Частотные свойства биполярного транзистора

С ростом частоты сигнала на входе транзистора изменяются основные свойства и параметры транзистора: растет сдвиг фаз между входным и выходным током, снижаются усилительные свойства транзистора. Это обусловлено двумя основными факторами: инерционностью физических процессов (диффузии, дрейфа, рекомбинации) и шунтирующим действием емкостей переходов на высоких частотах. Усилительная способность транзистора также снижается на высоких частотах.

Для того чтобы инжектированные в базу носители заряда достигли коллекторного перехода, требуется некоторое время. Если за это время происходит соответствующее изменение фазы переменной составляющей высокочастотного тока эмиттера, то носители зарядов не успевают достичь коллекторного перехода. Под действием изменившегося полупериода синусоидального напряжения потенциальный барьер в эмиттерном переходе увеличивается и уменьшается инжекция носителей зарядов и их концентрация возле перехода. При этом могут возникнуть обратное перемещение носителей зарядов (из базы в эмиттер) — экстракция, а также усиление рекомбинации этих носителей зарядов в базе.

Инерционность процессов в базе приводит к отставанию по фазе на высоких частотах переменной составляющей тока коллектора от переменной составляющей тока эмиттера. Кроме того, из-за рассеивания носителей зарядов на обратное перемещение и рекомбинацию уменьшается ток коллектора.

С увеличением частоты заметно снижаются реактивные сопротивления емкостей эмиттерного $C_Э$ и коллекторного $C_К$ переходов $\left( X_с = \frac{1}{2\pi f C} \right)$, что приводит к шунтированию этими емкостями дифференциальных сопротивлений ($r_{диф}$) эмиттерного и коллекторного переходов.

Конечный результат этих явлений — снижение усиления и ухудшение параметров, характеризующих эффективность работы транзисторов, как активных элементов электронных схем.

Частотные свойства транзисторов во многом зависят от их конструкции (технологии распределения примесей в объеме базовой области) и схемы включения транзисторов.

Хорошие частотные свойства имеют дрейфовые транзисторы с малой шириной базы и неравномерным распределением носителей зарядов. Частотные свойства транзисторов в схеме с ОЭ хуже, чем в схеме с ОБ.

При выборе транзистора необходимо учитывать предельно допустимую рабочую частоту (граничную) транзистора ($f_{гр}$), при которой свойства транзистора не изменяются, и при работе на предельной частоте использовать соответствующую схему включения.

## 3.14. Однопереходный транзистор

Однопереходный транзистор — это полупроводниковый прибор с одним $p$-$n$-переходом и тремя внешними выводами. Однопереходный транзистор часто называют двухбазовым диодом, обладающим вольт-амперной характеристикой с участком отрицательного дифференциального сопротивления.

Отрицательное дифференциальное сопротивление — сопротивление нелинейного прибора, в котором при увеличении подводимого напряжения и силы протекающего тока уменьшается падение напряжения на нелинейном приборе, и наоборот.

Однопереходный транзистор представляет собой пластину слаболегированного полупроводника кристалла кремния $n$-типа с двумя невыпрямляющими токоотводами базы Б1 и Б2 (рис. 3.57), в котором несимметрично относительно выводов Б1 и Б2 сформирована сильнолегированная $p^+$-область эмиттера (Э) (ближе к выводу Б2). На границе эмиттера с базой образуется один $p$-$n$-переход. Подадим напряжение на базовые выводы Б1 и Б2 транзистора ($U_Б$) при нулевом эмиттерном напряжении ($U_Э$). Вдоль базы течет ток $I_Б$ и создает падение напряжения на ее объемном сопротивлении.

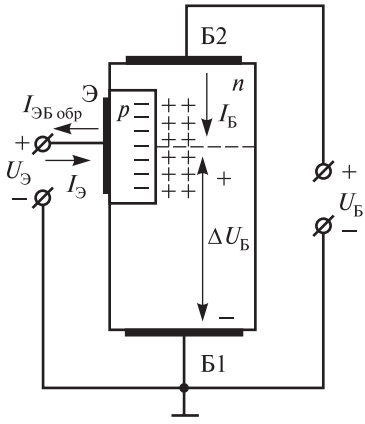



Рис. 3.57. Структура и схема включения однопереходного транзистора

Рассмотрим участок от эмиттера (Э) до вывода базы (Б1). При протекании тока $I_Б$ на этом участке создается падение напряжений, равное

$\Delta U_Б = I_Б R_{Б1}$, где $R_{Б1}$ — сопротивление кристалла между выводом Б1 и кристаллом эмиттера. Ток базы ($I_Б$) можно определить по формуле

$$I_Б = \frac{U_Б}{R_{Б1} + R_{Б2}},$$

где $R_Б$ — сопротивление кристалла между выводами Б2 и кристаллом эмиттера.

Отсюда $U_Б = \dfrac{U_Б R_{Б1}}{R_{Б1} + R_{Б2}}$.

Межбазовое сопротивление $R_Б = R_{Б1} + R_{Б2}$ составляет 1—10 кОм, а соотношение $\dfrac{R_{Б1}}{R_Б}$ изменяется в пределах 0,6—0,8.

В связи с этим такую структуру можно представить виде схемы, показанной на рис. 3.58. Сопротивление на участке Б2-Э (вывод эмиттера) ($R_{Б2}$) значительно меньше сопротивления на участке Б1-Э ($R_{Б1}$).

Внутреннее падение напряжения $U_{вн} = \Delta U_Б$ создает на $p$-$n$-переходе обратное смещение. Во входной цепи эмиттера течет небольшой обратный ток $I_{ЭБ\,обр}$ (рис. 3.59). С увеличением напряжения $U_Э$ ток $I_Б$ остается почти неизменным, пока $U_Э < U_{вн} < \Delta U_Б$ (учас-

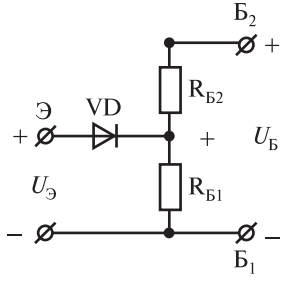



Рис. 3.58. Упрощенная эквивалентная схема однопереходного транзистора

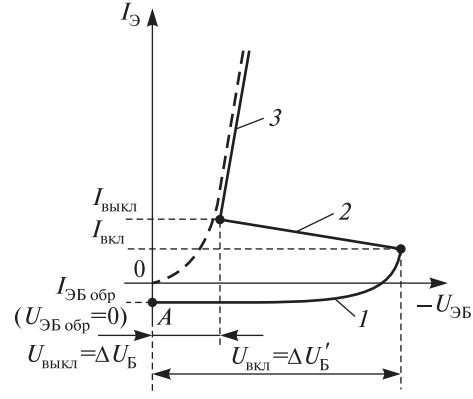



Рис. 3.59. Входная характеристика однопереходного транзистора

ток *1* на рис. 3.59), т.е. на переходе имеется обратное смещение $U_{СМ} = U_{ЭБ1} - \Delta U_{Б}$.

Как только напряжение эмиттера достигнет значения $U_{Э} > \Delta U_{Б}$, переход окажется включенным под прямое смещение и через него начинается инжекция дырок из эмиттера в базу и электронов из базы в эмиттер. В результате инжекции электронов из базы в эмиттер возникает ток эмиттера $I_{Э}$ и уменьшается протекание электронов на участке базы Э—Б1, из-за чего уменьшается падение напряжения $\Delta U_{Б}$. Это приведет к еще большему прямому смещению перехода $U_{ЭБ1} = U_{Э} - \Delta U_{б}$ и уменьшению обратного смещения $\Delta U_{Б}$.

На вольт-амперной характеристике появляется участок *2* (см. рис. 3.59) с отрицательным дифференциальным сопротивлением, т.е. увеличение тока $I_{Э}$ вызывает снижение падения напряжения от $\Delta U'_{Б}$ до $\Delta U_{Б}$ в результате уменьшения объемного сопротивление базы ($R_{Б1}$). Дальнейшее нарастание тока $I_{Э}$ соответствует характеристике *p-n*-перехода, включенного под прямое смещение (участок *3* на рис. 3.59). Штриховой линией показана характеристика обычного диода.

Напряжение, при котором в транзисторе начался рост тока, называется напряжением включения ($U_{вкл}$) при $U_{Э} > \Delta U'_{Б}$. Напряжение включения ($U_{вкл}$) весьма стабильно и мало зависит от температуры, что позволяет применять его в схемах, обеспечивая стабильность работы в диапазоне от –40 до +80 °С.

Таким образом, однопереходный транзистор может находиться в двух устойчивых состояниях — закрытом, которое характеризуется большим сопротивлением между выводами Э—Б1, и в открытом, которое характеризуется малым сопротивлением между выводами Э—Б2. В открытом состоянии однопереходный транзистор будет находиться до тех пор, пока инжекция носителей через переход будет поддерживать избыточную концентрацию носителей зарядов в базе для разрушения потенциального барьера, так как барьерный слой расположен в основном в базовой области. Это соответствует напряжению выключения ($U_{выкл}$) (рис. 3.59).

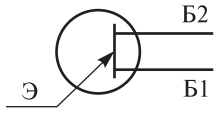



Рис. 3.60. Условное обозначение однопереходного транзистора

Условное обозначение однопереходного транзистора показано на рис. 3.60.

При изменении входного напряжения изменяются уровень инжекции и сопротивление базы, следовательно, и выходной ток, и на нагрузке появляется усиленное выходное напряжение. Таким образом, в открытом состоянии одноперехо́дный транзистор можно использовать в качестве усилительного элемента, способного обеспечивать усиление как напряжения, так и тока. Скачкообразный процесс перехода транзистора из закрытого состояния в открытое предопределяет его применение в качестве электронного ключа в схемах пороговых устройств и генераторов. Но по своим частотным свойствам он значительно уступает обычным биполярным транзисторам и является низкочастотным прибором (до 100—300 кГц). Это связано с относительно большим объемом базы и инерционностью процесса переключения, так как медленно происходит нарастание тока эмиттера ($I_Э$) до момента включения (от 0 до $U_{вкл}$).

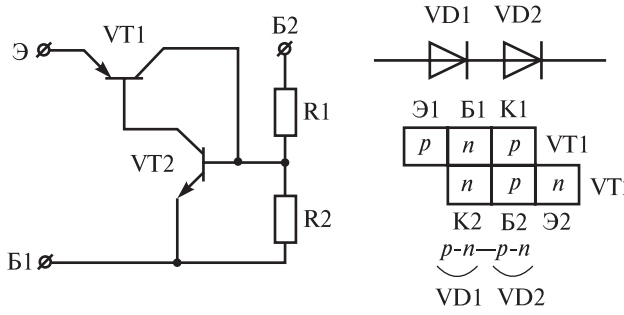



Рис. 3.61. Двухтранзисторный и двухдиодный аналог одноперехо́дного транзистора

Иногда в схемах вместо одноперехо́дного транзистора используют его аналог на двух биполярных транзисторах с разными типами электропроводности (рис. 3.61). В данной эквивалентной схеме транзисторы VT1 и VT2 представляют собой многослойную структуру переходов *p-n-p-n*, равноценную двум диодам, включенным последовательно (рис. 3.61). Такая структура имеет характеристику, аналогичную одноперехо́дному транзистору, но еще меньше зависит от изменения температуры. Подробно о многослойных структурах будет рассмотрено в следующих разделах.

# Глава 4. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

## 4.1. Общие сведения о полевых транзисторах

*Цели и задачи, определяющие необходимость создания полевых транзисторов.* Все задачи, которые решаются с помощью электронных приборов в практических схемах, по существу сводятся к управлению потоком носителей зарядов. Естественно, что при выборе того или иного прибора предпочтение отдается тому прибору, у которого при прочих равных условиях меньше затраты мощности для управления и меньше токи в цепи управления.

Биполярные транзисторы имеют сравнительно малое входное сопротивление в основных схемах включения транзистора с ОЭ и особенно в схеме с ОБ. В результате в цепи управления возникают сравнительно большие токи, особенно в схемах с ОБ, и требуется значительная мощность для управления потоком носителей зарядов. Поэтому возникла задача — создать полупроводниковый прибор с большим входным сопротивлением, минимальным потреблением тока и мощности на входе для управления потоком носителей заряда. Идею устройства этих приборов предложил еще в 1952 г. один из изобретателей биполярного транзистора У. Шокли. Напомним, что в биполярном транзисторе в активном режиме работы эмиттерный переход открыт, потенциальный барьер разрушен, входное сопротивление мало. Чтобы входное сопротивление было велико, чтобы не было тока в цепи управления, следовательно, и затрат мощности, необходимо, чтобы входной $p$-$n$-переход был закрыт, т.е. находился под напряжением обратного смещения. В биполярном транзисторе это соответствует режиму отсечки, в котором транзистор не поддается управлению, что исключает возможность применения такого транзистора в усилительных схемах. Эта задача, т.е. задача создания полупроводникового прибора с $p$-$n$-переходом на входе, работающим при обратном смещении, была решена с помощью полевых транзисторов.

Чтобы понять принцип работы полевого транзистора, рассмотрим модель биполярного транзистора, например типа *n-p-n*, включенного по определенной схеме (рис. 4.1). Процесс работы такой структуры моделируется следующим образом. К двум выводам от кристалла базы (продольного сечения базы) подключается источник напряжения $U_C$. Выводы от коллектора и эмиттера соединены между собой. Два *n-p*-перехода (коллекторный и эмиттерный) включены под напряжение обратного смещения ($U_З$) (рис. 4.1). Концентрация примесей в базе гораздо меньше, чем в эмиттере и коллекторе, поэтому потенциальный барьер в *n-p*-переходах в основном располагается в базе. При подаче напряжения обратного смещения ($U_З$) на переходы потенциальный барьер расширяется в направлении областей полупроводников с меньшей концентрацией примесей, т.е. в базу. Не занятая потенциальным барьером переходов область базы является токопроводящим каналом.

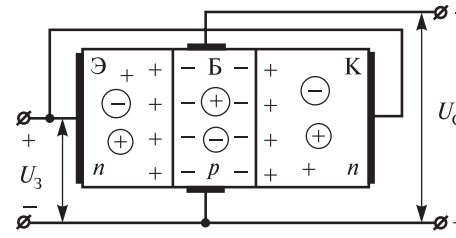


Рис. 4.1. Модель полевого транзистора на основе биполярного транзистора

Очевидно, что чем больше обратное смещение, приложенное к *n-p*-переходам, тем шире потенциальные барьеры, и, следовательно, меньше сечение токопроводящего канала базы, что увеличивает его сопротивление.

Таким образом, управление в данном приборе сводится к изменению обратного смещения, приложенного к *n-p*-переходам, в результате чего изменяются сопротивление токопроводящего слоя базы (т.е. канала) и, следовательно, его ток. В результате можно сделать вывод, что *n-p*-переходы выполняют задачу устройства, которое управляет шириной канала, — выполняет функцию затвора, а база — функцию канала. Напряжение, подключенное между затвором и каналом, называется затворным напряжением ($U_З$), а напряжение, подключенное к каналу (кристалл базы), называется стоковым напряжением ($U_C$), так как по каналу протекает (стекает) ток (рис. 4.1).

Благодаря тому, что входные *n-p*-переходы, на которые подаются сигналы управления, включены под обратное смещение, их сопротивление остается постоянно большим, т.е. для управления практически не требуется ток (если не считать незначительного обратного тока неосновных носителей зарядов *n-p*-перехода) и мощность.

***Основные определения.*** Из изложенного выше можно сделать вывод о том, что в канале (базе) движутся носители заряда одной полярности (дырки или электроны). Такая структура токопрохождения называется *униполярной*, в отличие от биполярной, где токопрохождение обусловлено встречным движением в переходах носителей зарядов двух полярностей. В соответствии с этим такие транзисторы называются *униполярными*. Такие транзисторы также называются *полевыми*, так как базовая область является полем полупроводника, где происходит движение носителей зарядов, и управление потоком основных носителей зарядов в канале осуществляется под действием перпендикулярно действующего электрического поля (относительно канала), создаваемого входным сигналом.

*Полевой (униполярный)* транзистор имеет три и более выводов — электродов. Электрод, через который носители зарядов втекают в канал, называется *истоком*. Электрод, через который носители зарядов из канала вытекают, называются *стоком*. Большинство полевых транзисторов симметричны, т.е. сохраняют свои электрические характеристики при взаимной замене в схеме включения выводов стока и истока. Электрод полевого транзистора, на который попадает электрический сигнал, называется *затвором*. Полевой транзистор может иметь один и более затворов.

## 4.2. Классификация полевых (униполярных) транзисторов

В зависимости от вида управляющего электрического поля различают:

– транзисторы с управляющим *p-n*-переходом, в которых для управления сопротивлением канала используется поле *p-n*-перехода;

– транзисторы с изолированным затвором, в котором для управления сопротивлением канала используется поле в диэлектрике между слоем полупроводника и металла.

По начальным буквам компонентов структуры транзисторов с изолированным затвором называют МДП-транзисторы типа ме-

талл—диэлектрик—полупроводник. В качестве диэлектрика можно использовать двуокись кремния ($SiO_2$). В этом случае используется термин МОП-транзисторы типа металл—окисел—полупроводник.

В зависимости от типа электропроводности канала различают:

– полевые транзисторы с каналом *n*-типа;

– полевые транзисторы с каналом *p*-типа.

Транзисторы с изолированным затвором различают по технологии создания канала:

– транзисторы с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом, в которых канал не создан технологически при изготовлении транзисторов, канал обеднен носителями зарядов;

– транзисторы с изолированным затвором от канала и встроенным каналом, в которых канал создан технологически при изготовлении транзистора, канал обогащен носителями зарядов.

По способу размещения канала между истоком и стоком:

– транзисторы с горизонтальным каналом, в которых выводы исток и сток находятся на одной плоскости кристалла полупроводника с выводом затвора;

– транзисторы с вертикальным каналом, в которых выводы исток и сток находятся на противоположных плоскостях кристалла, а вывод затвора на плоскостях, перпендикулярных выводам истока и стока.

Полевые транзисторы используются аналогично биполярным в трех схемах включения: с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС) и с общим затвором (ОЗ). Наибольшее распространение получила схема ОИ, которая рассмотрена ниже.

Условное обозначение полевых транзисторов приведено на рис. 4.2. Оно состоит из графического и символического (буквенно-числовой код) обозначения, установленного отраслевым стандартом и базируется на ряде классификационных признаков. Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения транзистора, классифицирующий транзисторы по определенным признакам в справочниках.

Графическое обозначение (рис. 4.2) состоит из обозначения отдельных элементов полевого транзистора. Канал обозначается отрезком линии для транзисторов с управляющим *p-n*-переходом и для транзисторов с изолированным затвором от канала и встроенным

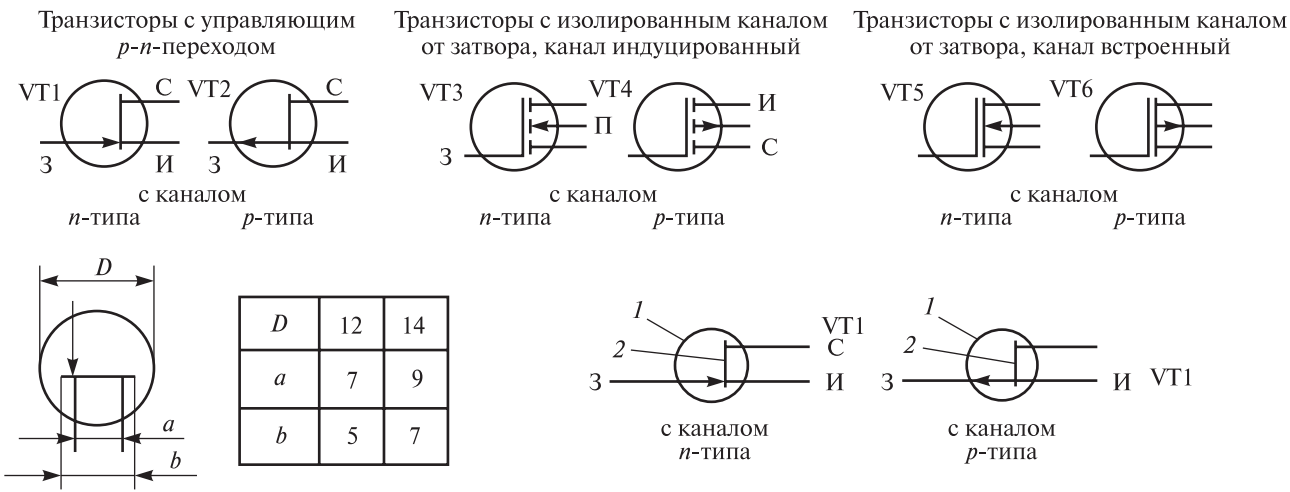



Рис. 4.2. Условное обозначение полевых транзисторов:
*1* — корпус; *2* — канал; З — затвор; И — исток; С — сток

каналом. Для транзисторов с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом канал обозначается штриховым отрезком длиной 6—8 мм (три штриха). Исток и сток обозначены линиями, как выводами от канала. Затвор на условно-графическом обозначении всегда расположен напротив истока. В условном графическом обозначении полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом затвор изображен стрелкой. Если стрелка направлена в сторону канала, то это указывает на то, что канал *n*-типа, а если стрелка на затворе направлена от канала, то это указывает, что канал *p*-типа.

В условном графическом обозначении полевого транзистора с изолированным затвором от канала затвор обозначается отрезком линии на расстоянии 1—1,5 мм от канала и показывается вывод под углом 90° к затвору. В условном графическом обозначении полевого транзистора с изолированным затвором от канала показывается линией вывод от подложки, расположенный между выводами истока и стока (средний штрих). Вывод подложки изображается со стрелкой. Если стрелка в обозначении подложки направлена в сторону канала, то это указывает на то, что канал *n*-типа, а если стрелка на затворе направлена от канала, то это указывает, что канал *p*-типа. Размеры графического обозначения полевого (униполярного) транзистора приведены на рис. 4.2.

В дискретной схемотехнике в обозначении транзистора добавляется корпус, изображенный в виде окружности, а в интегральной схемотехнике корпус не показывается.

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: VT1, где V — полупроводниковый прибор, T — триод, номер 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Буквенно-числовой код в системе обозначений полевых транзисторов, классифицирующий транзисторы по определенным признакам в справочниках, содержит определенную информацию о свойствах прибора и состоит из семи элементов, значение которых аналогично рассмотренным для биполярных транзисторов в разделе «Биполярные транзисторы».

## 4.3. Устройство и принцип действия полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

Простейший полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом представляет собой полупроводниковую структуру.

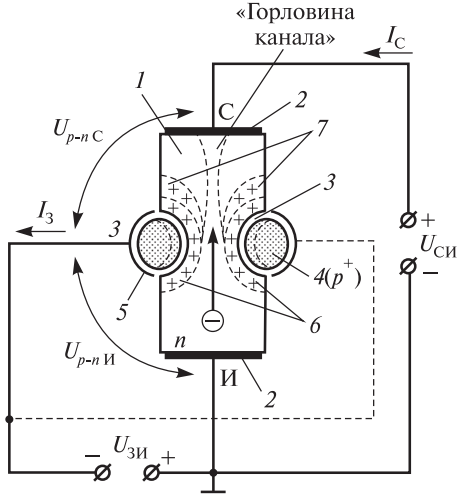



Рис. 4.3. Структура полевого транзистора и схема включения с ОИ:
*1* — стержень примесного полупроводника; *2* — металлизированные выводы истока (И) и стока (С); *3* — шейка; *4* — высоколегированный полупроводник $p^+$-типа; *5* — металлизированный вывод затвора (З); *6* — потенциальный барьер при $U_{ЗИ} = 0$; *7* — потенциальный барьер при $|U_{ЗИ}| > 0$

Рассмотрим структуру с вертикальным каналом. Основой являются стержень *1* примесного полупроводника (рис. 4.3), в данном примере *n*-типа, от которого выполнены металлизированные выводы *2* — истока И и стока С. На стержне имеется шейка *3*, в которой путем вплавления создан охватывающий все сечение по кольцу слой высоколегированного полупроводника с противоположной, чем у стержня проводимостью, затвор *4* (в данном примере $p^+$-типа), от которого выполнен металлизированный вывод *5* от затвора *4*. Объем кристалла полупроводника между истоком и стоком называется каналом, в котором при подключении напряжения ($U_C$) начнется движение основных носителей зарядов. Схематический разрез такого транзистора, показанный на рис. 4.4.

Предположим вначале, что ни один из выводов транзистора не подключен. Между *n*- и $p^+$-областями образуется потенциальный барьер *p*-*n*-перехода. Поскольку концентрация примесей в кристалле канала *n*-типа значительно меньше концентрации примесей в кристалле затвора *p*-типа, потенциальный барьер *p*-*n*-перехода сосредоточен в основном в *n*-области, т.е. в канале (показан штриховой линией на рис. 4.3).

Предположим теперь, что между истоком (И) и стоком (С) включено напряжение ($U_C$). По каналу (*n*-область) начнут двигаться электроны и протекать ток стока $I_C$. Электрод И, из которого «вытекают» носители заряда-электроны, называют истоком, а электрод С, куда «стекают» электроны, называется стоком. Ток $I_C$ называют

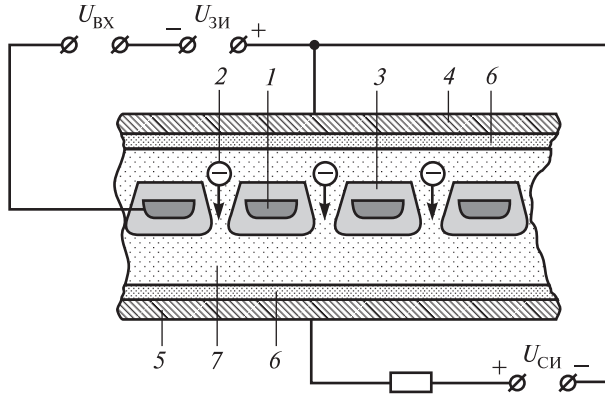



Рис. 4.4. Схематический разрез полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом и вертикальным каналом:
*1* — затвор; *2* — канал; *3* — область пространственного заряда; *4* — исток; *5* — сток; *6* — слой полупроводника с электропроводностью $n^+$-типа; *7* — слой полупроводника с электропроводностью *n*-типа

током стока. Значение этого тока определяется напряжением $U_С$ и сопротивлением канала, зависящим от его сечения. Рабочее сечение канала между выводами затвора, по которому могут проходить электроны от истока к стоку, получается меньше геометрического сечения, так как электроны не могут двигаться через запорный слой в канале, состоящий из неподвижных носителей зарядов потенциального барьера (*6*). В потенциальном барьере неподвижные положительные ионы притягивают электроны и тормозят их проход к стоку. Таким образом, ширина канала зависит от концентрации легирующих примесей материала, из которого изготовлен затвор.

Управлять шириной канала можно путем изменения ширины потенциального барьера. Для этого подключим напряжение между затвором и каналом, например между затвором и истоком ($U_{ЗИ}$) (рис. 4.3). Это напряжение должно создавать обратное смещение на переходе, чтобы выполнить основную цель создания полевого транзистора — высокое входное сопротивление. Затвор в данном транзисторе является управляющим — входным электродом. Напряжение $U_{ЗИ}$ указывает на то, что схема с общим истоком (ОИ), так как исток включен и во входную и в выходную цепь. Это определяет и напряжение на канале $U_С$ как напряжение $U_{СИ}$.

Рассмотрим теперь процессы в канале транзистора. При $U_{ЗИ} = 0$ в схеме с ОИ и повышении напряжения $U_{СИ}$ увеличиваются концентрация электронов в области стока и разность потенциалов между затвором и стоком. Вблизи стока напряжение на переходе равно $\left|U_{p\text{-}n\ C}\right| = \left|U_{ЗИ}\right| + \left|U_{СИ}\right|$, а вблизи истока — напряжение равно $\left|U_{p\text{-}n\ И}\right| = \left|U_{зи}\right|$ и создает обратное смещение. Это приводит к увеличению ширины потенциального барьера у стоковой области *7* (рис. 4.3).

Повышение напряжения обратного смещения ($U_{ЗИ}$) ведет к увеличению ширины потенциального барьера и перекрытию канала, в результате чего ток $I_C$ уменьшается до нуля. Необходимо отметить, что потенциальный барьер расширяется по всей окружности и сужает канал по всему объему, так как затвор выполнен в виде кольца. Это равносильно тому, что на плоскостной модели полевого транзистора на рис. 4.3 вывод затвора есть и от правой части шейки *3* (показан пунктиром). Если затвор не будет охватывать канал со всех сторон, то начнется поверхностная утечка зарядов по кристаллу канала (поверхностный ток) и канал перекрыть будет невозможно.

Обратный ток *p-n*-перехода — ток затвора — мал и слабо зависит от напряжения обратного смещения $U_{ЗИ}$, так как создан неосновными носителями зарядов.

Входное сопротивление полевого транзистора определяется сопротивлением *p-n*-перехода, включенного под обратное смещение, и составляет $10^6$—$10^8$ Ом.

### *4.3.1. Схемы включения полевого транзистора с управляющим p-n-переходом*

Статический режим работы транзистора обеспечивается только источниками питания, включенными во входной и выходной цепях транзистора. Входной цепью полевого транзистора является электрическая цепь, ограниченная выводами затвора и одного из выводов от канала (стока или истока) в зависимости от схем включения транзистора: с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ). В статическом режиме, например для схемы с ОИ (рис. 4.5, *а*), постоянное напряжение смещения $U_{СМ}$ (затвор-

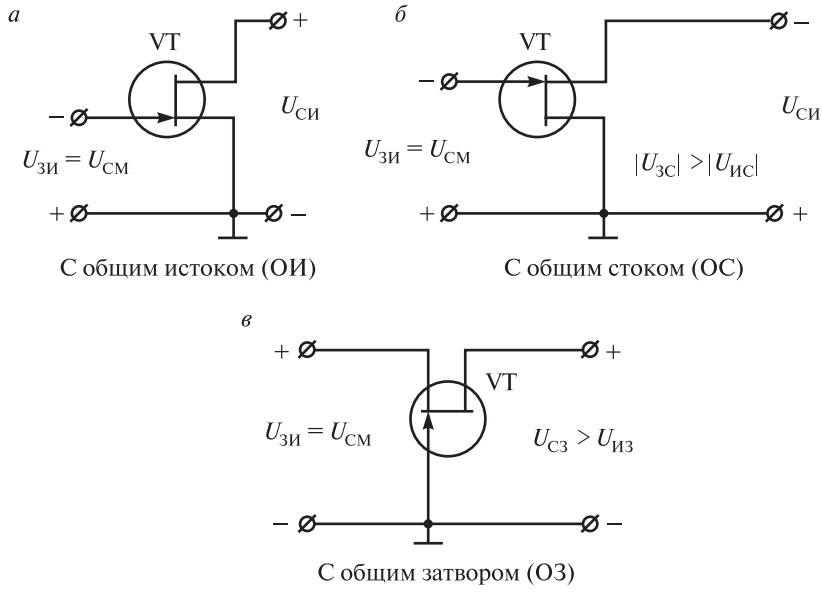



Рис. 4.5. Схемы включения полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом в статическом режиме

ное $U_{ЗИ}$) обеспечивает получение определенной ширины канала и сопротивления канала ($R_{СИ}$) и определенный ток стока $I_С = \dfrac{U_{СИ}}{R_{СИ}}$, на который также влияет напряжение на канале ($U_{СИ}$).

В зависимости от схем включения транзистора затворное напряжение обозначается $U_{ЗИ}$ (в схеме с ОИ), $U_{ЗС}$ (в схеме с ОС), $U_{ИЗ}$ (в схеме с ОЗ). Обозначение напряжения на канале ($U_С$) также зависит от схем включения транзистора, $U_{СИ}$ (в схеме с ОИ на рис. 4.5, *а*), $U_{ИС}$ (в схеме с ОС на рис. 4.5, *б*), $U_{СЗ}$ (в схеме с ОЗ на рис. 4.5, *в*). При включении полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом в схеме с ОС должно соблюдаться условие $\left|U_{ЗС}\right| > \left|U_{ИС}\right|$, в схеме с ОЗ — условие $U_{СЗ} > U_{ИЗ}$.

Динамический режим работы транзистора создается путем введения в схемы статического режима дополнительных элементов: во входную цепь включается источник входного сигнала ($U_{ИС}$), а в выходную цепь — нагрузка ($R_н$).

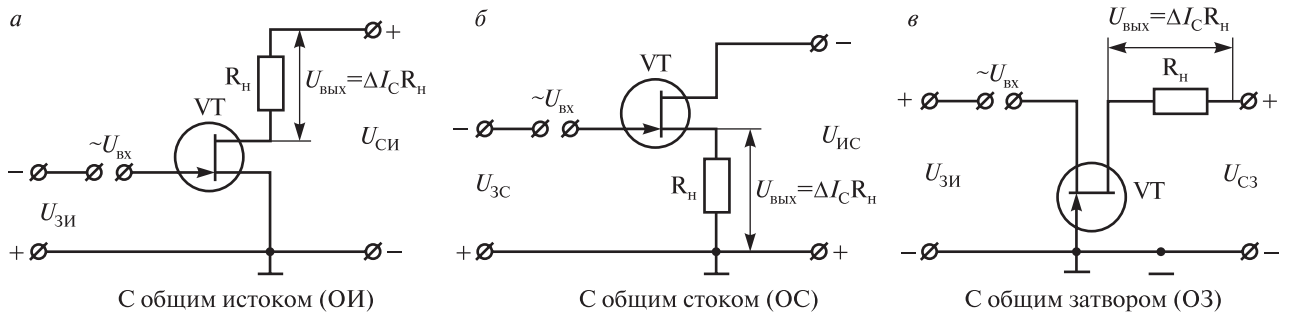



Рис. 4.6. Схемы включения полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом в динамическом режиме (режим с нагрузкой) с последовательным включением источника входного сигнала с источником смещения во входной цепи и последовательным включением нагрузки с транзистором в выходной цепи

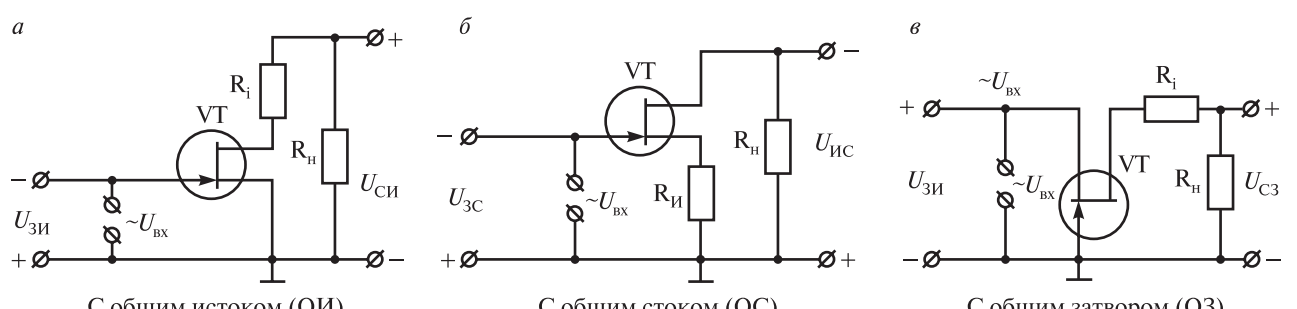



Рис. 4.7. Схемы включения полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом в динамическом режиме (режим с нагрузкой) с параллельным включением источника входного сигнала с источником смещения во входной цепи и параллельным включением нагрузки с транзистором в выходной цепи

Исследуя схемные включения транзистора в динамическом режиме, необходимо отметить, что во входной цепи транзистора действуют два источника (источник смещения и источник входного сигнала $U_{вх}$). Два источника могут быть включены последовательно (рис. 4.6) или параллельно между собой (рис. 4.7) и действовать согласованно или встречно. В выходной цепи транзистора действуют два элемента нагрузки — внутреннее сопротивление транзистора $R_i$ (сопротивление канала) и сопротивление внешней нагрузки $R_н$, которые могут быть включены последовательно, например на рис. 4.6, и параллельно рис. 4.7.

В динамическом режиме, так же как и в статическом режиме, напряжение смещения $U_{см}$ (затворное $U_{зи}$) обеспечивает получение определенной ширины канала и сопротивления канала ($R_{СИ}$) и определенный ток стока $I_С = \dfrac{U_{СИ}}{R_{СИ} + R_н}$.

Поэтому в динамическом режиме при подаче входного усиливаемого сигнала от источника сигнала $U_{ИС}$ потенциал затвора так же изменяется, как и при включении напряжения смещения $U_{СМ}$ (затворное $U_{ЗИ}$), соответственно изменяются токи стока и истока (в зависимости от схемы включения транзистора), а также и падение напряжения на резисторе нагрузки $R_н$. Приращение падения напряжения на резисторе $R_н$ с большим сопротивлением значительно больше приращения входного напряжения. За счет этого осуществляется усиление сигнала. При изменении типа электропроводности канала изменяются только полярность приложенных напряжений для создания статического режима работы транзистора и направление протекающих токов.

### *4.3.2. Статические характеристики полевого транзистора с управляющим p-n-переходом*

Статические вольт-амперные характеристики полевых транзисторов независимо от схем их включения (ОИ, ИС, ОЗ) имеют одинаковый вид. Рассмотрим статические вольт-амперные характеристики полевого транзистора, включенного по схеме с ОИ (наиболее часто применяемой).

Схема для снятия характеристик показана на рис. 4.8.

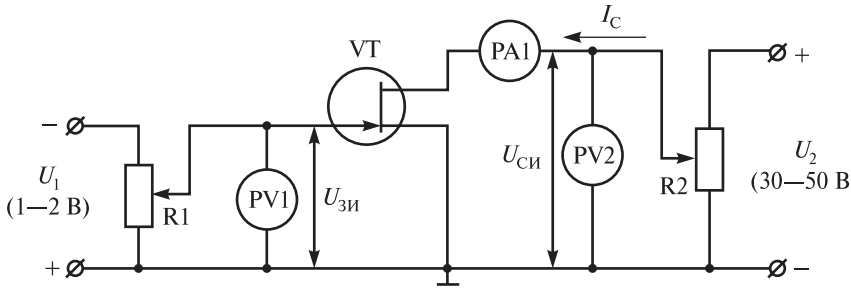



Рис. 4.8. Схема для снятия статических характеристик полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом, включенного по схеме с ОИ

Различают следующие функциональные зависимости между токами и напряжениями в схеме включения полевого транзистора:

$I_C = \varphi(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$ — выходная (стоковая) характеристика;

$I_C = \varphi(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$ — характеристика прямой передачи (стоко-затворная);

$I_З = \varphi(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$ — входная характеристика;

$I_З = \varphi(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$ — характеристика обратной передачи.

Практическое значение имеют лишь выходная характеристика и характеристика прямой передачи. Рассмотрим их более подробно на примере транзистора с каналом *n*-типа по схеме включения с ОИ.

*Выходная (стоковая) характеристика:*

$$I_C = \varphi(U_{СИ}) \text{ при } U_{ЗИ} = \text{const}.$$

Выходные характеристики (рис. 4.9) представляют собой зависимость тока в цепи стока $I_C$ от приложенного напряжения на канале $U_{СИ}$ при постоянном (фиксированном) напряжении на затворе $U_{ЗИ}$. При коротком замыкании затвора с истоком ($U_{ЗИ} = 0$) и малых значениях напряжения на канале $U_{СИ}$ ширина канала велика по сравнению с запирающим слоем *p-n*-перехода. Поэтому с увеличением напряжения $U_{СИ}$ ток стока возрастает почти линейно (участок от 0 до точки а). Наклон характеристики на этом участке прямо пропорционален проводимости канала. При дальнейшем росте напряжения $U_{СИ}$ резко увеличиваются скорость перемещения электронов

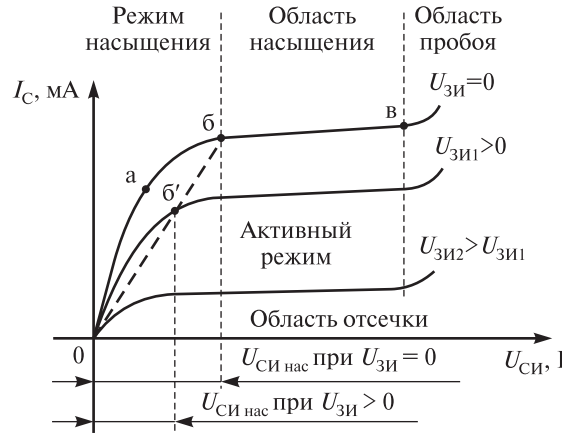



Рис. 4.9. Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

(в транзисторе с каналом *n*-типа) от истока к стоку и напряжение обратного смещения между стоком и затвором ($U_{p\text{-}n\,C}$) (см. рис. 4.3). В результате увеличения обратного смещения $U_{p\text{-}n\,C}$ возрастает потенциальный барьер *p-n*-перехода в сторону стока, следовательно, сужается сечение канала вблизи стока. Сопротивление канала возрастает, а скорость изменения тока ($I_C$) замедляется, характеристика становится более пологой (участок а—б на рис. 4.9).

При определенном значении тока стока ($I_C$) наступает так называемый режим насыщения (участок б—в на рис. 4.9), который характеризуется тем, что с увеличением напряжения $U_{СИ}$ ток $I_C$ изменяется незначительно. В точке в происходит максимальное сужение канала, которое условно называют перекрытием. Около стока остается очень узкий токопроводящий промежуток (его иногда называют горловиной, см. рис. 4.3). Наступает своеобразное динамическое равновесие, при котором увеличение $U_{СИ}$ и рост тока $I_C$ вызывают дальнейшее сужение канала и соответственно уменьшение тока $I_C$. В итоге ток $I_C$ остается почти постоянным. Напряжение $U_{СИ}$, при котором наступает перекрытие канала, называется напряжением насыщения ($U_{СИ\ нас}$), а так как ток $I_C$ при напряжении $U_{СИ\ нас}$ практически не изменяется, то и ток называется током насыщения($I_{C\ нас}$).

Рост сопротивления канала в режиме насыщения обусловлен двумя причинами — стягиванием в узкую горловину канала возле стока (см. рис. 4.3) и снижением подвижности носителей зарядов ($\mu$) при высокой напряженности электрического поля в канале (см. разд. «Электропроводность полупроводников»). Полное перекрытие канала получить нельзя, так как само сужение канала является следствием увеличения тока стока. В связи с этим в режиме насыщения при увеличении $U_{СИ} > U_{СИ\ нас}$ ток стока немного возрастает. При большом напряжении $U_{СИ}$ происходит лавинный пробой *p-n*-перехода (точка в на рис. 4.9). Пробой начинается у стока, где к переходу приложено наибольшее напряжение обратного смещения. При подаче на затвор управляющего напряжения $U_{ЗИ} > 0$, создающего обратное смещение на *p-n*-переходе, увеличивается потенциальный барьер перехода уменьшается поперечное сечение канала. Повышается сопротивление канала и снижается его проводимость. Насыщение транзистора начинается в этом случае при меньшем токе стока и меньшем напряжении $U_{СИ\ нас}$ (см. рис. 4.9). При меньшем напряжении стока начинается пробой.

С ростом напряжения $U_{ЗИ}$ ток стока уменьшается и канал может быть почти полностью перекрыт. Напряжение между затвором и истоком, при котором ток стока $I_С$ достигает очень малого значения, называют напряжением отсечки полевого транзистора $U_{ЗИ\ отс}$, а ток стока при $U_{ЗИ} > U_{ЗИ\ отс}$ — остаточным током стока.

Воздействие $U_{СИ}$ и $U_{ЗИ}$ на ширину канала у стока практически одинаково, так как они в цепи затвор—сток действуют согласованно, создавая обратное смещение *p-n*-перехода. Участок выходной характеристики 0—б на рис. 4.9 используют при работе транзистора как переменного сопротивления, управляемого напряжением, а участок в—г выходных характеристик соответствует основному рабочему режиму транзистора в качестве усилителя.

*Характеристика прямой передачи* (стоко-затворная):

$$I_С = \varphi(U_{ЗИ}) \text{ при } U_{СИ} = \text{const}.$$

Характеристика прямой передачи выражает зависимость тока стока $I_С$ от напряжения на затворе при постоянном (фиксированном) напряжении на канале $U_С$, ее еще называют передаточной характеристикой. Характеристика прямой передачи строится в первой или второй четверти декартовой системы координат. Если для

управления шириной канала на затвор подается положительный потенциал, что характерно для полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом и каналом *p*-типа, то характеристика располагается в первой четверти (рис. 4.10, *а*). При подаче отрицательного напряжения на затвор с каналом *n*-типа характеристика располагается во второй четверти (рис. 4.10, *б*). При $U_{ЗИ} = 0$ ток стока $I_С$ достигает максимального значения, так как в этом случае ширина канала максимальна, а сопротивление канала минимально (точка А на рис. 4.10).

С ростом напряжения обратного смещения на *p-n*-переходе $U_{ЗИ}$ при неизменном $U_{СИ1}$ уменьшается ток $I_С$. При $U_{ЗИ} = U_{ЗИ\ отс}$ канал перекрывается, ток $I_С$ становится близким к нулю (точка Б на рис. 4.10). При тех же значениях напряжения $U_{ЗИ}$, но при разных напряжениях $U_{СИ}$ ток $I_С$ изменяется мало, что объясняется тем, что напряжения $U_{СИ}$ подаются при максимальном токе насыщения $I_{С\ нас}$, когда $U_{ЗИ} = 0$, т.е. начала всех характеристик (точка А) почти совпадают.

Таким образом, передаточная характеристика определяет эффективность управления током $I_С$ с помощью изменения входного напряжения $U_{ЗИ}$. При этом видно, что в режиме насыщения изменения напряжения $U_{СИ}$ почти не влияют на ток $I_С$, однако незначительные изменения напряжения $U_{ЗИ}$ приводят к бóльшим изменениям тока $I_С$.

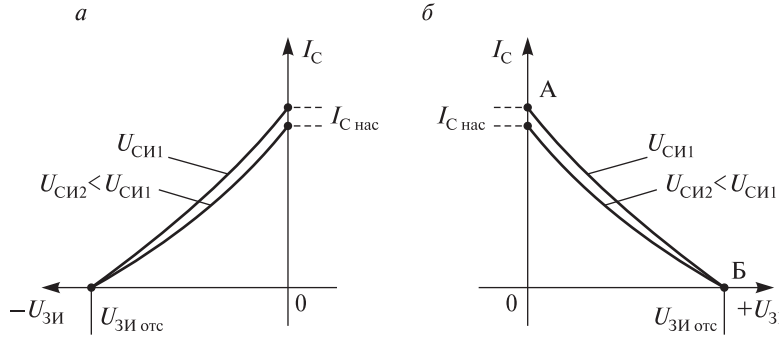



Рис. 4.10. Характеристики прямой передачи (стоко-затворные) полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом:
*а* — на затворе «минус», канал *n*-типа; *б* — на затворе «плюс», канал *p*-типа

Входная характеристика и характеристика обратной передачи представляют собой вольт-амперную характеристику *p-n*-перехода, включенного под напряжение обратного смещения. В результате возникает ток неосновных носителей зарядов $I_З$ (затворный). Хотя ток затвора изменяется при изменении $U_{ЗИ}$ и $U_{СИ}$, но имеет небольшое значение и в большинстве случаев им можно пренебречь. Чем меньше ток затвора, тем выше качество полевого транзистора.

## 4.4. Полевой транзистор с переходом Шоттки

Наряду с управляющим *p-n*-переходом в полевых транзисторах используется переход Шоттки. По конструктивно-технологическим особенностям полевой транзистор с переходом Шоттки является планарно-эпитаксиальным транзистором. Эти транзисторы, как правило, изготавливаются на основе арсенида галлия (GaAs) из-за большой дрейфовой скорости носителей заряда и высокой их подвижности, а также из-за металла используемого в качестве затвора для создания перехода (барьера) Шоттки. Полевые транзисторы с переходом Шоттки изготавливаются с горизонтальным каналом. Металлический затвор позволяет уменьшить длину канала $\ell_К$ до 0,5—1 мкм, следовательно, и время движения носителей зарядов от истока к стоку. Кроме того, при горизонтальной технологии не нужно располагать выводы сток и исток далеко друг от друга, чтобы предотвратило их смыкание. Затвор, полученный методом литографии с использованием ультрафиолетового излучения с последующим напылением металла в вакууме, можно выполнить очень узким ($l_З \le 0{,}5$ мкм), что также позволяет уменьшить длину канала. Арсенид галлия в качестве исходного материала также повышает скорость движения электронов в 3—4 раза, чем кремний. Эти два фактора позволяют резко повысить граничную частоту работы транзистора до 50—80 ГГц (при этом $f_{max} = 130$—$150$ ГГц), что гораздо выше максимальной граничной частоты работы биполярных транзисторов. В соответствии с этим полевые транзисторы с переходом Шоттки относят к транзисторам, работающим на сверхвысоких частотах (СВЧ) и их называют полевыми СВЧ-транзисторами.

На рис. 4.11, *а*, показана схема полевого СВЧ-транзистора с затвором, выполненным на основе барьера Шоттки, а на рис. 4.11, *б*, схема полевого СВЧ-транзистора с затвором, выполненным на основе барьера Шоттки с горизонтальным каналом. На примере

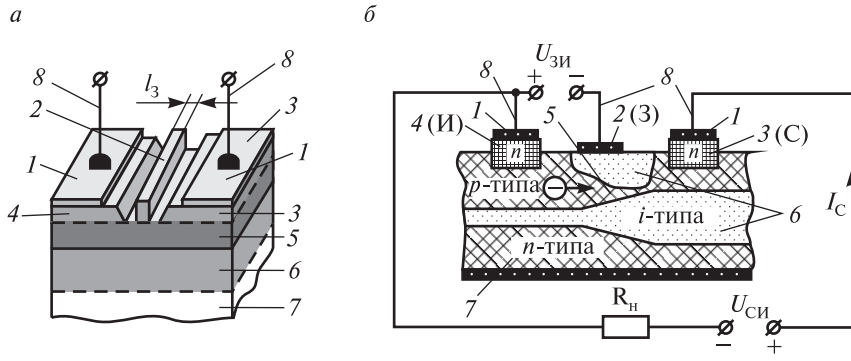



Рис. 4.11. Схема полевого транзистора:
*а* — схема полевого СВЧ-транзистора на основе барьера Шоттки; *б* — схема полевого транзистора с затвором на основе барьера Шоттки с горизонтальным каналом

этих схем рассмотрим процессы изготовления полевого СВЧ-транзистора.

При изготовлении полевого СВЧ-транзистора на поверхности исходной полупроводниковой пластины (подложки) из полуизолирующего арсенида галлия *7* создают эпитаксиальным наращиванием канал *5* с электропроводностью *n*-типа и нормальной концентрацией. Между каналом и подложкой выращивают высокоомный эпитаксиальный слой *6* (его называют буферным) собственного полупроводника *i*-типа, который препятствует проникновению дефектов подложки в канал и увеличивает подвижность носителей зарядов за счет отталкивающего действия от подложки (область пространственного заряда, обедненная подвижными носителями заряда). На эпитаксиальном слое *5* выращивают слои высоколегированных областей полупроводников электропроводности $n^+$-типа исток *4* и сток *3*, от которых сделаны металлические контакты *1* с выводами *8*. Между истоком и стоком расположен металлический затвор *2*, от которого также имеется вывод *8*. Материал затвора выбран так, чтобы по отношению к каналу создавался выпрямляющий переход Шоттки. Здесь необходимо отметить, что выпрямляющий переход у затвора с каналом получен в результате того, что работа выхода электронов из металла выше, чем в структуре полупроводника канала *n*-типа, и образуется потенциальный барьер. При изготовлении

выводов от истока и стока необходимо, чтобы работа выхода электронов была меньше, чем в структуре полупроводника, чтобы не было выпрямляющего перехода. Это достигается тем, что структура истока и стока выполнена из высоколегированного полупроводника $n^+$-типа, и образуется переход, не обладающий выпрямительными свойствами, т.е. простое контактное соединение с низким переходным сопротивлением.

Принцип действия полевого транзистора с затвором, выполненным на основе барьера Шоттки, тот же, что и полевого транзистора с управляющим $p$-$n$-переходом с вертикальным каналом. При изменении напряжения обратного смещения между затвором и каналом (стоком или истоком) изменяются ширина канала, его проводимость и ток стока ($I_C$).

Полевые транзисторы с переходом Шоттки можно включать также под напряжение прямого смещения между затвором и каналом. В этом случае уменьшается область пространственного заряда, а проводящее сечение канала увеличивается и возрастает $I_C$. Транзистор будет работать в режиме обогащенного канала (рис. 4.12) в отличие от режима обедненного канала при обратном смещении. Однако режим прямого смещения применять нецелесообразно, так как в работу по созданию тока $I_C$ вмешивается протекающий ток из затвора $I_З$. Изменение управляющего напряжения $U_З$ незначительно, так как потенциальный барьер составляет от 0,6 до 0,7 В, что указывает на слабое изменение тока $I_C$. При некотором напряжении обратного смещения происходит полное перекрытие канала и ток $I_C$ практически отсутствует. Этот режим называют режимом отсечки канала ($U_{\text{jnc}}$).

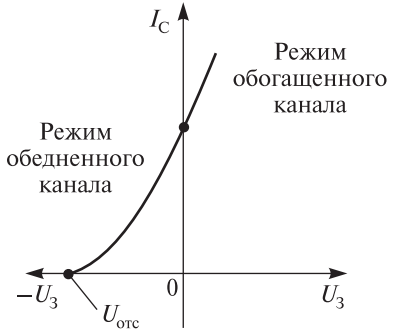



Рис. 4.12. Характеристика прямой передачи с переходом Шоттки

Таким образом, такие полевые транзисторы в основном применяются в режиме объединенного канала, что позволяет им работать в большом диапазоне управляющего напряжения ($U_З$).

## 4.5. Полевые транзисторы с изолированным затвором от канала

### *4.5.1. Общие положения*

В полевых транзисторах с управляющим *p*-*n*-переходом входное сопротивление достаточно велико. Однако есть возможность сделать его еще большим, если отделить затвор от канала диэлектриком. При этом уменьшатся входной ток и влияние температуры на него.

В полевых транзисторах с изолированным затвором от канала имеется один или несколько затворов, электрически изолированных от проводящего канала, расположенного в поверхностном слое полупроводника. Полевые транзисторы с изолированным затвором имеют структуру металл—диэлектрик—полупроводник (МДП). Данную структуру можно рассматривать как конденсатор, двумя пластинами которого служат металл и полупроводник. В качестве полупроводника используется кремний, и поэтому диэлектриком может служить слой двуокиси кремния $SiO_2$, который создается на поверхности кристалла путем высокотемпературного окисления. На слой диэлектрика наносится металлическая пленка — затвор. Такую структуру, где в качестве диэлектрика применяется двуокись кремния, называют также МОП-структурой (металл—окисел—полупроводник) (рис. 4.13).

Если подключить к металлическому затвору «плюс» источника электрического напряжения, а к полупроводнику *n*-типа «минус», то на затворе накопится положительный заряд, а на полупроводниковой пластине отрицательный заряд, скомпенсированный положительным зарядом. В полупроводнике *n*-типа отрицательные заряды (электроны) притягиваются к поверхности полупроводника на границе с диэлектриком. Чем больше положительный потенциал на затворе, тем больше электронов скапливается в верхнем слое *n*-полупроводника у диэлектрика, т.е. в этом слое электроны нескомпенсированы положитель-

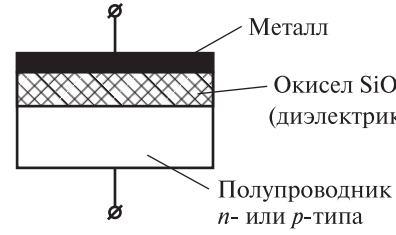



Рис. 4.13. Структура металл—окисел—полупроводник

ными зарядами (дырками) подложки. Таким образом, в структуре полупроводника *n*-типа (подложке) поверхностный слой обогащается электронами, а в нижнем слое полупроводника — значительно меньше электронов. Рост числа электронов, естественно, увеличивает электропроводность слоя у поверхности полупроводника на границе с диэлектриком. Если в данной структуре к металлическому затвору подключить «минус» источника электрического напряжения, а на полупроводник *n*-типа — «плюс», то на затворе накопится отрицательный заряд, а в полупроводнике произойдет рекомбинация основных зарядов — электронов — и их число уменьшится в поверхностном слое диэлектрика.

Это происходит из-за отталкивания электронов от поверхностного слоя вглубь кристалла и рекомбинации основных зарядов (электронов) с положительными ионами, поступающими от источника питания, и уменьшения их количества в поверхностном слое возле диэлектрика.

Таким образом, на поверхности полупроводника на границе с диэлектриком образуется слой, обедненный носителями заряда; электропроводность этого слоя уменьшается, а сопротивление увеличивается. Меняя значение и полярность напряжения управления, приложенного между затвором и полупроводником, разделенными диэлектриком, можно менять сопротивление и электропроводность слоя у поверхности полупроводника на границе с диэлектриком, который будет играть роль канала.

По физическим эффектам, лежащим в основе управления носителями зарядов, полевые транзисторы с изолированным затвором подразделяют:

– на полевые транзисторы с индуцированным каналом;
– полевые транзисторы со встроенным каналом;
– полевые транзисторы с плавающим затвором;
– полевые транзисторы с накоплением заряда в изолированном затворе.

### *4.5.2. МОП (МДП)-транзисторы с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом*

Основой полевого транзистора с индуцированным каналом, например *n*-типа, служит пластина *1* слаболегированного (с относительно малой концентрацией примесей) кремния *p*-типа (рис. 4.14, *а*),

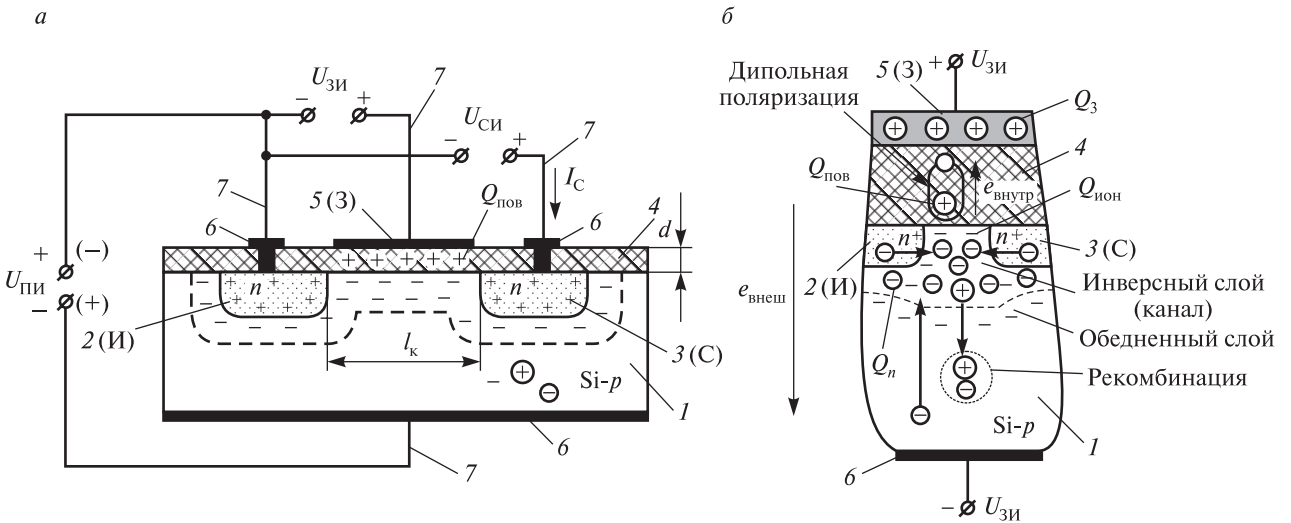



Рис. 4.14. МДП (МОП) — транзистор с индуцированным каналом *n*-типа:
*а* — структура при $|U_{ЗИ}| = 0$; *б* — распределение зарядов при $|U_{ЗИ}| > 0$;

которую называют подложкой, т.е. конструктивной основой транзистора. В подложке сформированы две сильнолегированные (высокая концентрация зарядов) области $n^+$-типа исток (И) *2* и сток (С) *3*, расположенные на близком расстоянии ($\ell_К = 5—10$ мкм) друг от друга. На них сделаны омические контакты *6* и от них выведены проводники *7*. Сформированные две сильнолегированные структуры $n^+$-типа создают в транзисторе данного вида канал *n*-типа. В процессе такого построения между истоком и стоком нет носителей зарядов — электронов (или их очень малое количество, так как основа подложки — полупроводник *p*-типа), т.е. канал отсутствует. Поверхность подложки покрыта слоем двуокиси кремния ($SiO_2$) *4* толщиной 0,1—0,2 мкм. Затвор (З) *5* представляет собой тонкую пленку металла $d = 0,1—0,2$ мкм (обычно алюминий), который наносится методом напыления на поверхность диэлектрика.

Рассмотрим физические процессы в МОП-транзисторе с каналом *n*-типа при различных соотношениях потенциалов затвора, истока и стока по схеме включения транзистора с общим истоком (рис. 4.14, *а*).

Если напряжения между всеми электродами равны нулю ($U_{СИ} = U_{ЗИ} = 0$), то области $n^+$-типа окружены *p-n*-переходами, причем, поскольку концентрация примесей в $n^+$-области значительно превышает концентрацию примесей в подложке, обедненный слой *p-n*-проходов (потенциальный барьер) сосредоточен в основном в подложке. На границе между подложкой и диэлектриком также возникает потенциальный барьер. Этот барьер образуется из-за того, что пленка диэлектрика $SiO_2$ всегда содержит донорные примеси, т.е. ее можно рассматривать как примесный полупроводник *n*-типа.

Атомы донорной примеси пленки диэлектрика располагаются обычно на границе с подложкой *p*-типа и отдают ей электроны, а в поверхностном слое диэлектрика на границе с подложкой остаются положительно заряженные неподвижные ионы ($Q_{пов}$). В поверхностном слое подложки на границе со слоем диэлектрика электроны, диффундируемые из диэлектрика, рекомбинируются с положительными ионами (дырками) подложки, оставляя в поверхностном слое подложки неподвижные отрицательные ионы. В результате в промежутке от истока до стока из-за диффузии электронов из слоя диэлектрика возникает контактная разность потенциалов между

металлом и полупроводником $U_к$ = 0,3—0,4 В — потенциальный барьер. В поверхностном слое подложки сосредоточенны неподвижные отрицательные ионы, а в диэлектрике — положительные. Поверхностный слой подложки, соединяющий исток и сток, обеднен свободными подвижными носителями заряда (электронами), (рис. 4.14, *а*), что указывает на отсутствие связи между истоком и стоком, т.е. отсутствие канала. Барьер располагается в области подложки.

При увеличении напряжения между истоком и стоком $U_{СИ}$ и при $U_{ЗИ} = 0$ на пути от истока к стоку имеются два потенциальных барьера *p-n*-переходов: исток—подложка и сток—подложка. При подключении «минуса» к истоку для структуры, показанной на рис. 4.14, *а*, потенциальный барьер *p-n*-перехода сток—подложка находится под напряжением обратного смещения, а разность потенциалов на *p-n*-переходе исток—подложка равна нулю, т.е. напряжение смещения отсутствует. Поскольку на переходе исток—подложка отсутствует смещение и отсутствуют подвижные носители зарядов (электроны) между истоком и стоком, между истоком и стоком ток не протекает. Ток стока $I_С$ обусловлен лишь чрезвычайно малым обратным током неосновных носителей зарядов перехода сток—подложка, находящегося под напряжением обратного смещения от источника $U_{СИ}$.

Если подать напряжение между подложкой и затвором $U_{ЗИ}$ так, чтобы «минус» был подключен к затвору (полярность напряжения $U_{ЗИ}$ на рис. 4.14, *а*, показана в скобках), то поверхностный слой подложки вблизи затвора обогатится основными положительными носителями заряда — дырками, и ток в цепи исток—сток практически не изменится при $U_{СИ} > 0$ и будет равен малому обратному току неосновных носителей зарядов перехода сток—подложка, находящегося под напряжением обратного смещения от источника $U_{СИ}$.

При подаче между подложкой и затвором напряжения $U_{ЗИ}$ (полярность напряжения $U_{ЗИ}$ на рис. 4.14, *а*, показана без скобок) обратного смещения при напряжении между истоком и подложкой $U_{ПИ}$, равном нулю (короткое замыкание клемм), создается внешнее электрическое поле $e_{внеш}$. На основании второго закона Кирхгофа можно утверждать, что порождаемое этим напряжением электрическое поле будет целиком сосредоточено в диэлектрике. Это поле вызовет дипольную поляризацию слоя диэлектрика $SiO_2$, за счет

чего образуется внутреннее поле диэлектрика ($e_{\text{внутр}}$) (рис. 4.14, *б*). При этом в области диэлектрика, непосредственно примыкающей к затвору, будут сосредоточены отрицательные электрические заряды, а в области, непосредственно примыкающей к подложке, — положительные.

Таким образом, в диэлектрике создается внутреннее электрическое поле, действующее навстречу полю внешнего источника $U_{\text{ЗИ}}$. За счет силы внутреннего поля диэлектрика дырки уходят из поверхностного слоя подложки между истоком и стоком, и в нем остается обедненная основными носителями зарядов (дырками) область с отрицательными неподвижными ионами акцепторной примеси $Q_{\text{ион}}$. Одновременно с этим в поверхностный слой подложки за счет сил внешнего электрического поля притягиваются неосновные носители зарядов из глубины подложки — электроны $Q_n$ для структуры транзистора, показанной на рис. 4.14, *б*. При встречном движении потоков — дырок из верхнего слоя подложки в нижний и электронов из нижнего слоя подложки в верхний, рекомбинация дырки рекомбинируются с электронами и образуются нейтральные атомы. Таким образом, концентрация дырок в поверхностном слое подложки снижается, а электронов — растет, т.е. происходит *обогащение* токопроводящего канала между истоком и стоком. Соответственно изменяется электропроводность поверхностного слоя подложки между истоком и стоком. По мере увеличения $U_{\text{ЗИ}}$ она из дырочной при $n = p$ становится собственной, а затем, когда $n > p$, электронной (рис. 4.14, *б*), т.е. противоположной электропроводности подложки. Процесс изменения типа электропроводности подложки в поверхностном слое называется *инверсией*, а слой *n*-типа, образовавшийся на границе с диэлектриком в *p*-области, называется *инверсным слоем*.

Таким образом, в верхнем слое подложки между истоком и стоком структуры *n*-типа образовался токопроводящий канал той же электропроводности *n*-типа, что электропроводность структур истока и стока, толщиной в несколько тысячных микрона (рис. 4.14, *б*). Электроны, накапливаемые каналом между стоком и истоком, поступают в него не только из подложки *p*-типа, где их мало, но и из слоев *n*-типа истока и стока. Концентрация электронов в структурах истока и стока практически неограниченна, а напряженность внешнего поля достаточно велика благодаря действию напряжения прямого смещения на *p*-*n*-переходы затвор—исток и затвор—сток

от источника напряжения $U_{ЗИ}$ при $|U_{ЗИ}| > |U_{СИ}|$, что и способствует переходу электронов в канал.

Так как канал образовался в результате действия электрического поля (электростатической индукции), он называется индуцированным каналом. Этот канал отделен от основного объема полупроводника (подложки) слоем, обедненным подвижными носителями зарядов. В обедненном слое очень мало неосновных подвижных носителей зарядов (электронов) и отсутствуют основные носители зарядов — дырки, а находятся лишь неподвижные отрицательные ионы акцепторной примеси подложки *p*-типа.

Обеднение слоя, отделяющего подложку от канала, подвижными носителями зарядов произошло из-за того, что электроны перешли в поверхностный слой между истоком и стоком, а дырки рекомбинировались с электронами источника, поступающими от внешнего напряжения $U_{ЗИ}$ (рис. 4.14, *б*). В результате канал отделен от остального объема полупроводника *p*-типа (подложки) неподвижными отрицательными ионами акцепторной примеси. Поэтому, если в одной подложке сформировать несколько транзисторов МОП (МДП)-структур, взаимное влияние между ними будут весьма незначительным за счет их разделения обедненными слоями.

Минимальное напряжение между затвором и истоком, при котором появляется проводимость канала, называется пороговым ($U_{ЗИ\ пор}$).

В результате создания канала при $|U_{ЗИ}| > |U_{ЗИ\ пор}|$ и подачи напряжения между стоком и истоком $|U_{СИ}| > 0$ («плюсом» к стоку, а «минусом» к истоку) (рис. 4.14, *а*), то в канале появится продольное электрическое поле и возникнет дрейфовое движение электронов от истока к стоку. Этот ток можно регулировать, изменяя напряжение $U_{ЗИ}$, следовательно, и концентрацию электронов в канале, а также изменяя напряжение $U_{СИ}$. При изменении $U_{СИ}$ будет изменяться не только дрейфовая скорость движения электронов в канале и значение тока $I_C$, но и структура — конфигурация канала. Изменение структуры канала обсудим при рассмотрении выходных характеристик.

В связи с тем что затвор отделен от подложки диэлектрическим слоем, ток в цепи затвора ничтожно мал, мала мощность, потребляемая от источника напряжения (сигнала) в цепи затвора и необходимая для управления относительно большим током стока, и мала мощность сигнала в выходной цепи.

**Статический режим включения полевого транзистора с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом**

Статический режим включения транзистора обеспечивает также работу транзистора в статическом режиме. Для создания статического режима работы транзистора необходимо во входную и выходную цепи транзистора включить источники питания.

Входной цепью в схеме включения полевого транзистора является электрическая цепь, ограниченная выводом от затвора и выводом от подложки, который может быть соединен с одним из выводов от канала (стока или истока) или с выводом от затвора в зависимости от схем включения транзистора (ОИ, ОС, ОЗ).

На подложку можно подавать потенциал относительно выводов от истока, стока или затвора в зависимости от схем включения полевого транзистора. Для этого необходимо включать напряжение между выводами: подложка—исток — при схеме включения с ОИ (рис. 4.15, *а*), подложка—сток — при схеме включения с ОС (рис. 4.15, *б*), подложка—затвор — при схеме включения с ОЗ

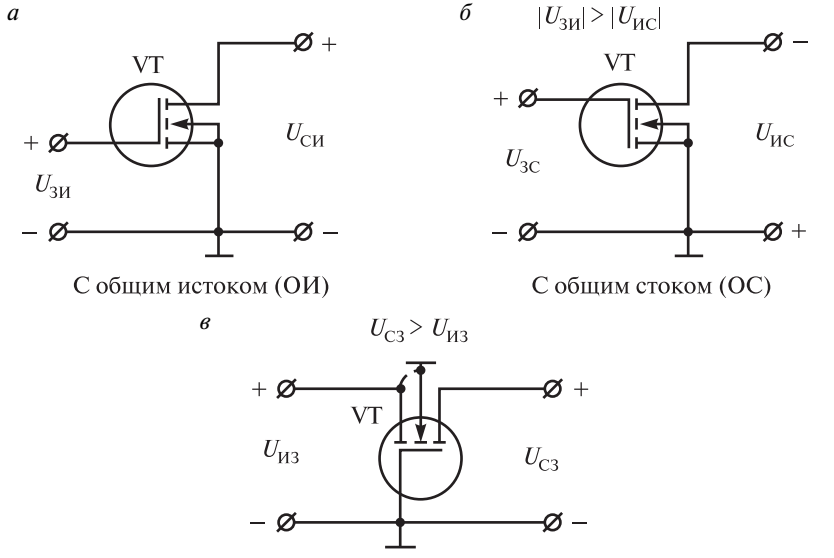



Рис. 4.15. Схемы включения полевого транзистора с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом в статическом режиме

(рис. 4.15, *в*). Тогда подложка будет выполнять задачу дополнительного управляющего электрода, т.е. дополнительного затвора.

В этих схемах между подложкой и затвором действует электрическое поле, которое может при указанной разности потенциалов создавать — индуцировать — канал. При таких способах включения подложки происходит наиболее интенсивный процесс создания канала и защитного (буферного) слоя между каналом и глубоким слоем подложки.

Схема с ОИ при таком включении подложки наиболее предпочтительна, так как возле истока накопившиеся заряды создают быстрее ток в канале при $U_{СИ} > 0$. В схеме с ОС на подложку можно подавать напряжение и относительно истока, но в этом случае подложка будет действовать как дополнительный «нижний» затвор (управляющий электрод) только при условии $|U_{ЗС}| > |U_{ИС}|$.

Однако подложку можно и не использовать как управляющий дополнительный электрод. Этот вариант показан на рис. 4.15, *в*, в схеме с ОЗ, где вывод подложки соединен с затвором. При такой схеме включения подложки отсутствует электрическое поле между подложкой и затвором, что не способствует образованию защитного (буферного) слоя и замедляет процесс образования канала. Для ускорения процесса создания канала в схеме включения транзистора с ОЗ необходимо вывод подложки соединить с истоком (на рис. 4.15, *в*, показано штрих-пунктирами). При таком включении напряжения в схеме с ОЗ между выводами подложки и затвора действует электрическое поле, которое при указанной разности потенциалов может создавать — индуцировать — канал, что способствует наиболее интенсивному процессу создания канала и защитного (буферного) слоя между каналом и глубоким слоем подложки.

В любом варианте включения подложки в схеме с ОЗ должно выполняться соотношение напряжений $|U_{СЗ}| > |U_{ИЗ}|$. В любой из схем включения полевого транзистора (ОИ, ОС, ОЗ) данного типа можно применять любой способ подключения подложки для управления работой транзистора как дополнительным электродом, но при этом необходимо учитывать соотношение напряжений затворного ($U_З$) и стокового, т.е. на канале ($U_С$).

Выходной цепью полевого транзистора является электрическая цепь, ограниченная выводами исток—сток в схеме с ОИ (рис. 4.15, *а*), сток—исток — в схеме с ОС (рис. 4.15, *б*), сток—затвор — в схеме с ОЗ (рис. 4.15, *в*).

В статическом режиме в любой схеме включения транзистора (ОИ, ОС, ОЗ) постоянное напряжение смещения $U_{см}$ (затворное $U_З$) обеспечивает получение определенной ширины канала и сопротивления канала ($R_i$), а также определенного тока стока $I_С = \frac{U_С}{R_i}$, на величину которого также влияет напряжение на канале $U_С$. Например, для схемы с ОИ (рис. 4.15, *а*) напряжение смещения $U_{СМ}$ (затворное $U_{ЗИ}$) обеспечивает получение определенной ширины и сопротивления канала ($R_{СИ}$) и тока стока $I_С = \frac{U_{СИ}}{R_{СИ}}$. Минимальное затворное напряжение, при котором возникает канал, называют пороговым напряжением, например в схеме с ОИ это напряжение $U_{ЗИ\ пор}$.

В зависимости от схемы включения транзистора затворное напряжение обозначается $U_{ЗИ}$ (в схеме с ОИ), $U_{ЗС}$ (в схеме с ОС), $U_{ИЗ}$ (в схеме с ОЗ). Обозначение напряжения на канале ($U_С$) также зависит от схемы включения транзистора $U_{СИ}$ в схеме с ОИ (рис. 4.15, *а*), $U_{ИС}$ — в схеме с ОС (рис. 4.15, *б*), $U_{СЗ}$ — в схеме с ОЗ (рис. 4.15, *в*).

При изменении типа электропроводности канала и подложки изменяются только полярность приложенных напряжений и направление тока $I_С$.

Основными принципами построения схем включения транзистора с индуцированным каналом являются условия создания канала при включении напряжения $U_З$: это напряжение должно способствовать обогащению поверхностного слоя подложки между истоком и стоком носителями зарядов, равнозначными областям истока и стока (в схемах на рис. 4.15 носители зарядов — электроны, так как транзистор с каналом *n*-типа). Это обеспечивается при данной структуре транзистора подачей на затвор положительного потенциала.

### Динамический режим включения полевого транзистора с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом

Для создания динамического режима включения транзисторов необходимо в схемах статического режима во входную цепь включить источник входного сигнала, а в выходную цепь включить нагрузку.

Входное напряжение может быть любого рода — постоянное, переменное или импульсное.

Исследуя варианты включения источника входного сигнала $U_{\text{ВХ}}$ с источником смещения $U_{\text{СМ}}$ (затворное $U_{\text{З}}$), можно выделить два варианта включения источников напряжения: последовательное (рис. 4.16) и параллельное включение (рис. 4.17). По способу действия двух источников напряжения в одной электрической цепи (входная цепь) различают также два варианта: согласованное и встречное. Когда говорят о способах действия источников напряжения между собой, подразумевается рассмотрение источников постоянного или импульсного напряжения, а при рассмотрении источника входного сигнала, как источника переменного напряжения, совместное действие в каждый из полупериодов переменного напряжения будет изменяться.

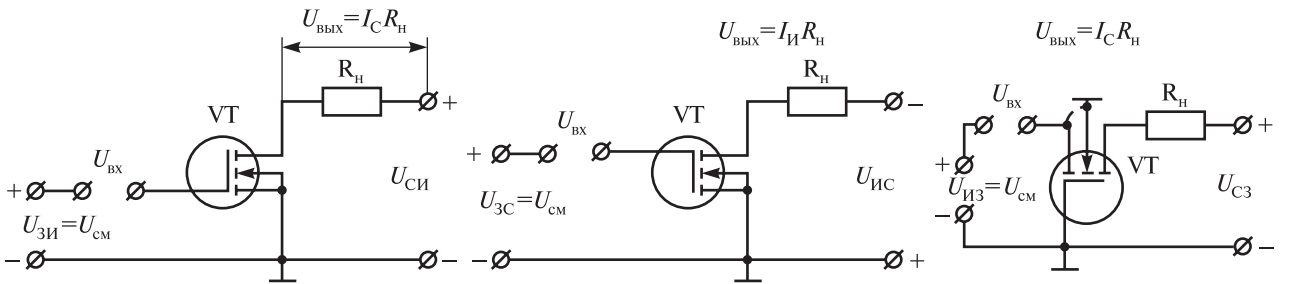
Любой из вариантов включения источников напряжения и их действие между собой могут быть использованы в различных схемах включения транзистора (ОИ, ОС, ОЗ) и в различных сочетаниях входной и выходной цепей.

В выходной цепи транзистора действуют два элемента нагрузки — внутреннее сопротивление транзистора $R_i$ (сопротивление канала) и сопротивление внешней нагрузки $R_{\text{н}}$, которые могут быть включены последовательно (рис. 4.16) и параллельно (рис. 4.17). При параллельном включении нагрузки с транзистором в с схемах с ОИ и ОС добавляется резистор конструктивной нагрузки — соответственно в цепь стока $\text{R}_{\text{С}}$ и цепь истока $\text{R}_{\text{И}}$, а для схемы с ОЗ параллельное включение нагрузки с транзистором не выполняется.

В динамическом режиме постоянное смещение $U_{\text{см}}$ (затворное $U_{\text{З}}$) должно превышать пороговое напряжение $U_{\text{З пор}}$. В противном случае канал не образуется и транзистор будет заперт.

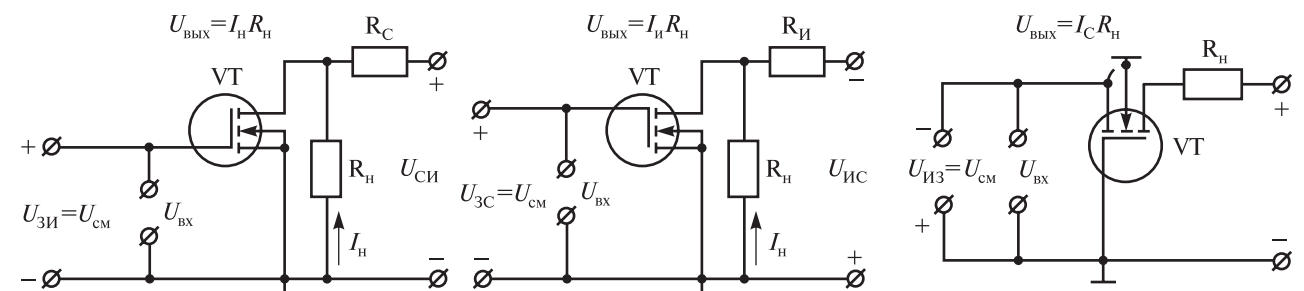
### Статические характеристики полевого транзистора с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом

*Выходные (стоковые) характеристики* $I_{\text{С}} = \varphi(U_{\text{СИ}})$ при $U_{\text{ЗИ}} =$ $=$ const для МДП (МОП)-транзисторов с индуцированным каналом, снятые по схеме с ОИ (рис. 4.18), имеют примерно одинаковый характер изменения тока стока $I_{\text{С}}$, как и для аналогичных характеристик транзисторов с управляющим *p-n*-переходом. В этих транзисторах также можно управлять током $I_{\text{С}}$, изменяя напряжения,




С общим истоком (ОИ) С общим стоком (ОС) С общим затвором (ОЗ)

Рис. 4.16. Схемы включения полевого транзистора с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом в динамическом режиме (режим с нагрузкой) с последовательным включением источника входного сигнала с источником смещения во входной цепи и последовательным включением нагрузки с транзистором в выходной цепи




С общим истоком (ОИ) С общим стоком (ОС) С общим затвором (ОЗ)

Рис. 4.17. Схемы включения полевого транзистора с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом в динамическом режиме (режим с нагрузкой) с параллельным включением источника входного сигнала с источником смещения во входной цепи и параллельным включением нагрузки с транзистором в выходной цепи

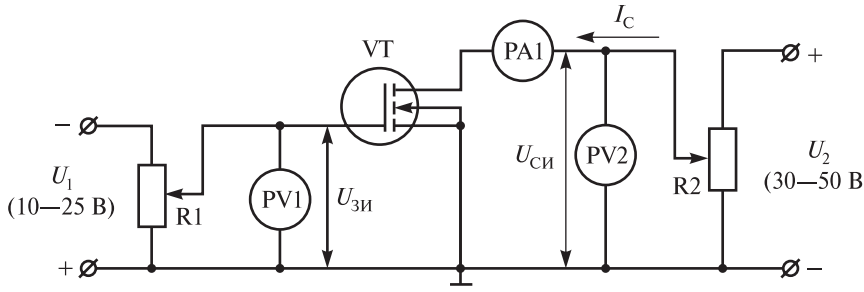



Рис. 4.18. Схема для снятия статических характеристик полевого транзистора с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом включенного по схеме с ОИ

приложенные между электродами — затвором, подложкой, истоком и стоком.

Затвор — основной управляющий электрод МДП (МОП)-транзистора. При изменении его потенциала резко изменяются концентрации носителей зарядов в канале и соответственно ток стока. Причем МОП (МДП)-транзисторы с индуцированным каналом работают только при одной полярности напряжения между затвором и любым другим электродом транзистора, при которой канал обогащается носителями заряда того же вида, что и основные заряды областей стока и истока.

Канал можно формировать, используя подложку как дополнительный управляющий электрод. Подложку иногда называют нижним затвором и в схеме с общим истоком (ОИ) соединяют с истоком. В этом случае при напряжении обратного смещения между затвором и подложкой $U_{ЗИ}$ быстрее происходит обеднение поверхностного слоя подложки между истоком и стоком основными носителями (дырками), которые будут стекать к выводу подложки, а поверхностный слой подложки обогащается неосновными носителями (электронами), т.е. транзистор работает в режиме обогащения.

При напряжении $U_{ЗИ}$, равном нулю, в транзисторе отсутствует канал и при подключении напряжения $U_{СИ}$ $p$-$n$-переход на границе сток—подложка оказывается под напряжением обратного смещения, а на границе исток—подложка отсутствует напряжение смещения $U_{ПИ} = 0$ (рис. 4.18). В результате запирающий слой у стокового перехода растет, а ток стока $I_C$ практически равен нулю (рис. 4.19). Характеристика, снятая при $U_{ЗИ} = 0$, отсутствует, так как инверсия

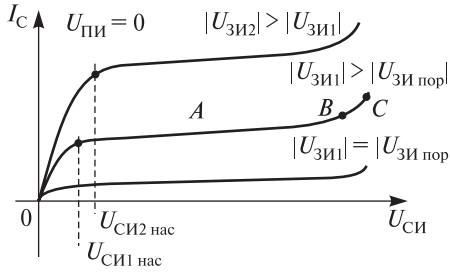



Рис. 4.19. Выходные (стоковые) характеристики полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом при $U_{ЗИ}$ = const

(индуцирование) канала происходит при определенных значениях затворного напряжения $|U_{ЗИ}| > 0$.

При напряжении $|U_{ЗИ}| > 0$, когда между подложкой и затвором создается напряжение обратного смещения, а между истоком и затвором — напряжение прямого смещения, за счет напряжения обратного смещения на участке затвор—подложка канал насыщается неосновными носителями зарядов — электронами. Потенциальный барьер между истоком и затвором постепенно снижается за счет прямого смещения. Теперь при увеличении напряжения $U_{СИ}$ начинает расти ток стока $I_C$, если $|U_{ЗИ}| > |U_{ЗИ\ пор}|$. Зависимость тока $I_C$ подчиняется действию нескольких факторов.

Во-первых, под действием $U_{СИ}$, когда $U_{СИ}| < |U_{СИ\ нас}|$, увеличивается ток стока почти прямо пропорционально $I_C = U_{СИ}/r_{СИ}$, где $r_{СИ}$ — сопротивление канала. Этому режиму соответствует крутой участок ОА выходной характеристики (рис. 4.19), при этом происходит постепенное сужение канала от истока к стоку (рис. 4.20, *а*). Нелинейность восходящей части характеристики объясняется уменьшением (сужение) сечения канала около стока с увеличением напряжения $U_{СИ}$.

Во-вторых, по мере увеличения $U_{СИ}$ уменьшается разность потенциалов между затвором и стоком, так как напряжения $U_{ЗИ}$ и $U_{СИ}$ действуют встречно, при этом увеличивается падение напряжения в самом канале, что также ведет к сужению канала.

В-третьих, при увеличении напряжения $U_{СИ}$, когда $|U_{СИ}| = |U_{СИ\,нас}|$, возрастает напряжение обратного смещения на переходе сток—подложка. Запирающий слой (потенциальный барьер) стокового перехода между подложкой и стоком расширяется, увеличивается объемный заряд неподвижных отрицательных ионов акцепторной примеси в подложке и электроны частично выталкиваются из канала у его стокового конца. Канал в этой области сужается и у стокового вывода стягивается в узкую полоску (рис. 4.20, *б*),

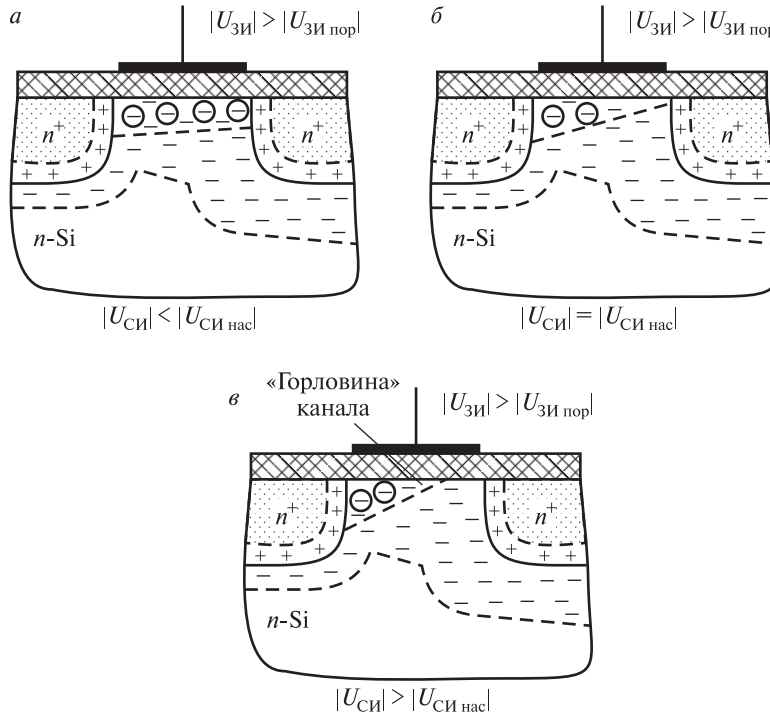



Рис. 4.20. Рабочая область полевого транзистора с индуцированным каналом при различных напряжениях $U_{СИ}$

при этом сопротивление канала растет. Ток стока практически не растет, так как транзистор переходит в режим насыщения, характеризуемый очень слабой зависимостью тока $I_C$ от напряжения $|U_{СИ}|$ (пологий участок *AB* выходных (стоковых) характеристик на рис. 4.19). При дальнейшем увеличении напряжения $|U_{СИ}|$, когда $|U_{СИ}| > |U_{СИ\ нас}|$, начало «горловины» канала смещается к истоку (рис. 4.20, *в*) и сопротивление канала продолжает увеличиваться. Так как сопротивление канала растет не строго пропорционально повышению напряжения $|U_{СИ}|$, то ток стока $I_C$ увеличивается незначительно, т.е. характеристики имеют небольшой наклон к оси напряжения $U_{СИ}$. При большом напряжении $U_{СИ}$, когда $|U_{СИ}| + |U_{ЗИ}| > |U_{СИ\ проб}|$, произойдет пробой *p-n*-перехода (сток—затвор) или пробой диэлектрика под затвором (лавинное умножение заря-

дов) и резко возрастает ток стока $I_С$ (участки *BC* выходных характеристик на рис. 4.19).

При повышении напряжения $|U_{ЗИ}|$ увеличивается число носителей зарядов в канале и требуется значительно большее напряжение для создания режима насыщения $|U_{СИ\ нас}|$, необходимое для стабилизации тока $I_С$ (рис. 4.19). Таким образом, при $|U_{ЗИ2}| > |U_{ЗИ1}|$ требуется большее значение напряжения $|U_{СИ}|$, т.е. $|U_{СИ\ 2\ нас}| > |U_{СИ\ 1\ нас}|$. В соответствии с этим ток стока $I_С$ будет значительно больше при тех же значениях напряжения на канале $U_{СИ}$, если увеличить затворное напряжение $U_{ЗИ}$. Характеристика при $U_{ЗИ\ 2}$ будет располагаться выше, чем при $U_{ЗИ\ 1}$ (рис. 4.19).

Выше уже говорилось, что подложку можно использовать как дополнительный «нижний» управляющий электрод. При таком варианте управления затворное напряжение $U_{ЗИ}$ создает канал, а с помощью напряжения $U_{ПИ}$ между подложкой и истоком в схеме с ОИ управляется канал, при неизменном напряжении $U_{ЗИ}$. Таким образом, характеристики, определяющие зависимость $I_С = \varphi(U_{СИ})$ при $|U_{ЗИ}| > |U_{ЗИ\ пор}|$ и $U_{ПИ} = \text{const}$, получены при включении транзистора в схеме для снятия вольт-амперных характеристик (рис. 4.21), когда подложка не соединена с истоком, как на рис. 4.18, а находится под отрицательным относительно истока потенциалом $|U_{ПИ}| > 0$. Полярность напряжения $U_{ПИ}$ показана также и на рис. 4.14 для структуры транзистора с индуцированным каналом *n*-типа. Механизм управления током $I_С$ в этом случае такой же, как и в полевом транзисторе с управляющим *p-n*-переходом. Под действием электрического поля, созданного напряжением $U_{ПИ}$, все больше основных зарядов подложки (дырок) рекомбинируются с электронами. При этом расширяется обедненный слой и растет объемный заряд отрицательных ионов акцепторной примеси, отделяющий канал от остального объема подложки, и часть электронов выталкивается из канала. Сопротивление канала растет, и ток $I_С$ уменьшается. Эта зависимость $I_С = \varphi(U_{СИ})$ при $|U_{ЗИ}| > |U_{ЗИ\ пор}|$ и $U_{ПИ} = \text{const}$ показана на рис. 4.22. Таким образом, при увеличении напряжения между истоком и подложкой ($U_{ПИ} > 0$) при неизменном напряжении $|U_{ЗИ}| > |U_{ЗИ\ пор}|$ характеристики располагаются ниже, чем при напряжении $U_{ПИ} = 0$ (рис. 4.22). Однако при подаче напряжения $U_{ПИ}$ прямого смещения («плюс» на подложке на рис. 4.14 и 4.21) переход исток—подложка находится под прямым смещением

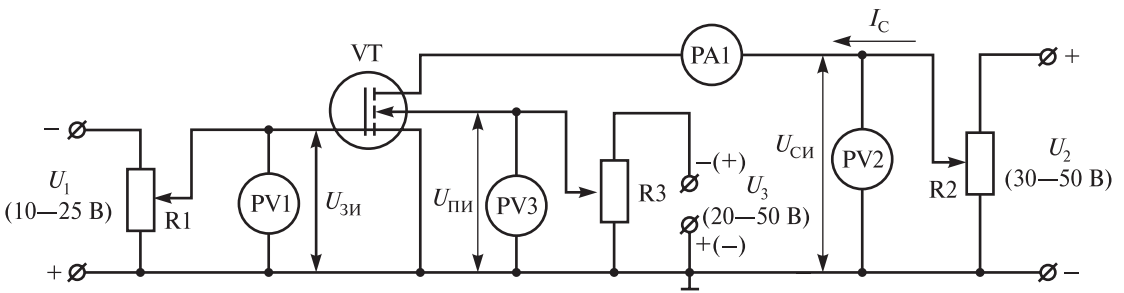



Рис. 4.21. Схема для снятия статических характеристик полевого транзистора с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом включенного по схеме с ОИ при изменении напряжения между подложкой и истоком и постоянном затворном напряжении $|U_{ЗИ}| > |U_{ЗИ\ пор}|$ и $|U_{ПИ}| = \text{const}$

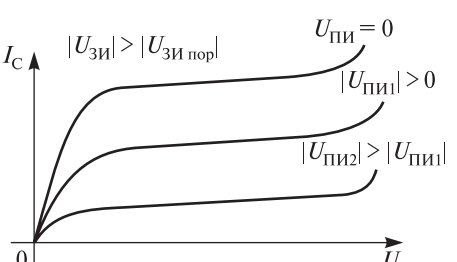



Рис. 4.22. Выходные (стоковые) характеристика полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом при $U_{ПИ} = \text{const}$

и транзистор не управляется, т.е. выходит из рабочего состояния. Такое включение подложки недопустимо.

*Характеристики прямой передачи (стоко—затворная)* $I_C = \varphi(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$ (рис. 4.23) берут начало на оси абсцисс при определенном затворном напряжении $U_{ЗИ} \geq U_{ЗИ\ пор}$ и напряжении $U_{ПИ} = 0$, когда начинает формироваться канал за счет инверсии. Чем больше по абсолютной величине напряжение $U_{ЗИ}$, тем больше носителей заряда (электронов для структуры канала *n*-типа) будет втягиваться в канал, и ток стока $I_C$ буде расти при $U_{СИ} > 0$. При увеличении напряжения $U_{СИ}$ характеристика проходит выше, так как в режиме насыщения ток стока $I_C$ изменяется очень мало. Характеристика при $U_{СИ} = 0$ не существует. При подключении напряжения обратного смещения (см. рис. 4.21) между истоком и подложкой ($|U_{ПИ}| > 0$) стоко-затворные характеристики смещаются в сторону более отрицательного затворного напряжения ($U_{ЗИ}$), чем характеристики при напряжении между истоком и подложкой, равном нулю ($U_{ПИ} = 0$), так как канал в этом случае формируется при больших значениях затворного напряжения (рис. 4.23). Характеристика прямой передачи при ($|U_{ПИ}| > 0$) показана на рис. 4.23 штрихами.

Характеристика прямой передачи строится в первой или второй четверти декартовой системы координат. Если для управления ши-

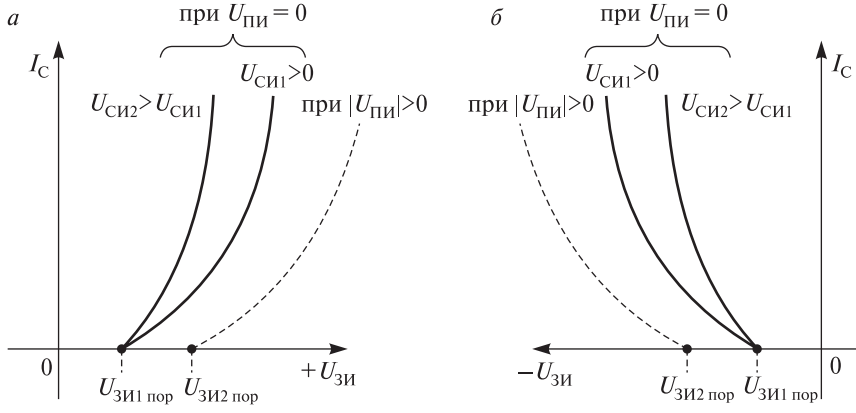



Рис. 4.23. Характеристики прямой передачи (стоко-затворная) полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом:
*а* — на затворе «плюс», канал *n*-типа; *б* — на затворе «минус», канал *p*-типа

риной канала на затвор подается положительный потенциал, что характерно для полевых транзисторов с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом *n*-типа, то характеристика располагается в первой четверти (рис. 4.23, *а*). При подключении «минуса» затворного напряжения к затвору, канал *p*-типа, характеристика располагается во второй четверти (рис. 4.23, *б*).

### *4.5.3. МОП (МДП)-транзисторы с изолированным затвором от канала и встроенным каналом*

Принцип изготовления МОП (МДП)-транзисторов со встроенным каналом аналогичен изготовлению МОП (МДП)-транзисторов с индуцированным каналом. Отличительной особенностью таких транзисторов является то, что в них между истоком и стоком технологическим путем при изготовлении транзистора формируется токопроводящий канал в виде тонкого слаболегированного слоя полупроводника *n*- или *p*-типа, чаще всего *n*-типа. Тип электропроводности канала, соединяющего области истока и стока, должен совпадать с типом электропроводности истока и стока (рис. 4.24).

В таком типе транзисторов (например, с каналом *n*-типа) при отсутствии затворного напряжения, например в схеме с ОИ, где $U_{ЗИ} = 0$, и при напряжении на канале $U_{СИ} > 0$ между истоком и

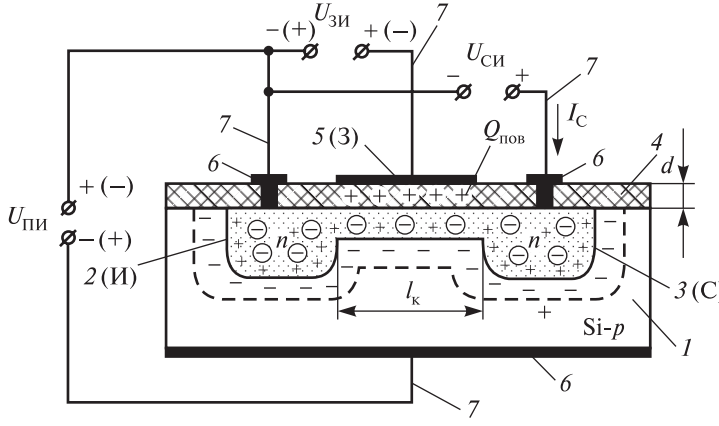



Рис. 4.24. Структура МДП (МОП)-транзистора с встроенным каналом *n*-типа при $|U_{ЗИ}| = 0$:
*1* — подложка; *2* — исток; *3* — сток; *4* — диэлектрик; *5* — затвор; *6* — омический контакт; *7* — выводы

стоком протекает стоковый ток $I_C$, определяемый сопротивлением канала. Канал может обедняться или обогащаться неосновными носителями подложки (для подложки *p*-типа — электронами) при изменении полярности затворного напряжения относительно истока или стока, что зависит от схемы включения транзистора. Принцип управления плотностью носителей зарядов и изменением поперечного сечения канала основан на явлении электростатической индукции, так же как и в транзисторах с индуцированным каналом.

Рассмотрим процесс обогащения канала на примере МОП-транзистора с встроенным каналом *n*-типа, включенного по схеме с ОИ (рис. 4.25, *а*) при $U_{ПИ} = 0$. Полярность напряжения $U_{ЗИ}$ показана на рис. 4.25, *а*, и соответствует полярности напряжения $U_{ЗИ}$ на рис. 4.24 без скобок. При положительном потенциале на затворе (для канала *n*-типа) относительно истока электроны будут втягиваться в канал (из слоев истока и стока основные носители зарядов и неосновные носители зарядов из подложки), произойдет обогащение канала электронами. Электропроводность канала увеличивается, а его сопротивление уменьшается, при этом ток стока $I_C$ растет при увеличении напряжения $U_{СИ}$.

Обогащение канала электронами для транзистора с каналом *n*-типа можно разделить на три процесса:

– во-первых, из истоковой области электроны переходят в поверхностный слой за счет внешнего поля, которое создано напряжением $U_{ЗИ}$ и действует в направлении от затвора к истоку, создавая прямое смещение. При включении источника $U_{СИ}$, когда $|U_{ЗИ}| > |U_{СИ}|$ и $U_{ПИ} = 0$, такое же поле действует от затвора к стоку, перемещая электроны в поверхностный слой подложки из истока и стока и обогащая канал (рис. 4.25, *а*);

– во-вторых, при соединении подложки с истоковой областью подложка действует как дополнительный затвор — управляющий электрод. В этом случае *p-n*-переходы исток—подложка и сток—подложка тоже оказываются включенными под напряжение прямого смещения от источника затворного напряжения $U_{ЗИ}$, когда $|U_{ЗИ}| > |U_{СИ}|$ и $U_{ПИ} = 0$. Потенциальные барьеры этих переходов разрушаются, и за счет инжекции в этих переходах, поверхностный слой подложки также обогащается электронами, поступающими из слоев истока и стока;

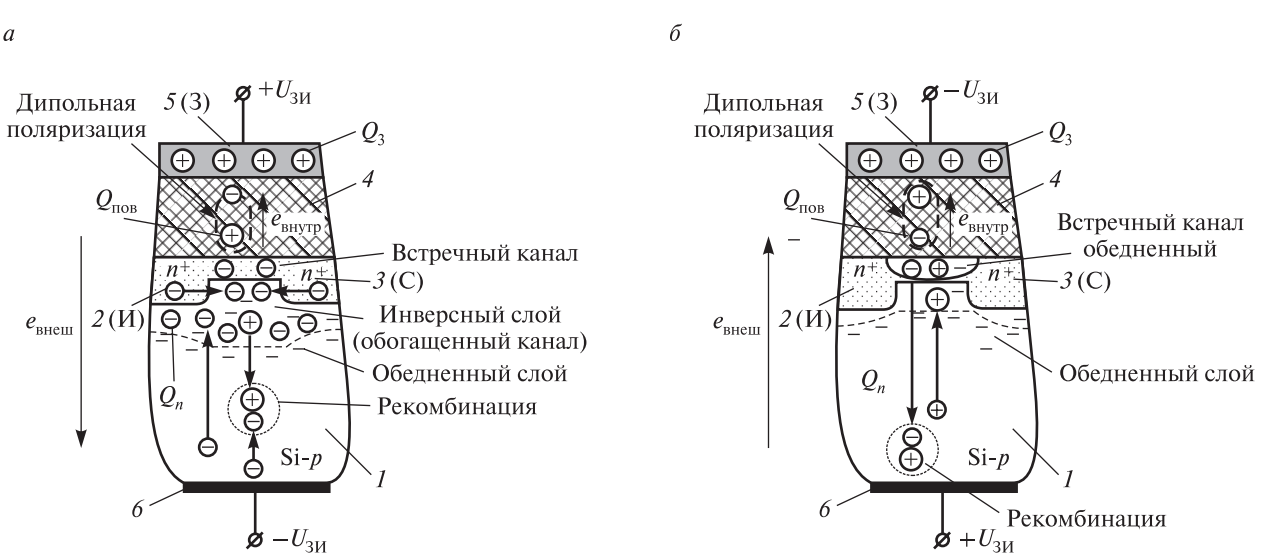



Рис. 4.25. Распределение зарядов в структуре МДП (МОП)-транзистора с встроенным каналом *n*-типа при $|U_{ЗИ}| > 0$ и $U_{СИ} = 0$ (подложка соединена с истоком):
*а* — в режиме обогащения; *б* — в режиме обеднения; *1* — подложка; *2* — исток; *3* — сток; *4* — диэлектрик; *5* — затвор; *6* — омический контакт; *7* — выводы

– в-третьих, процессу обогащения канала электронами способствует также обеднение поверхностного слоя подложки основными носителями зарядов — дырками, которые уходят в глубину подложки и рекомбинируются с электронами, поступающими от источника затворного напряжения $U_{ЗИ}$ (рис. 4.25, *а*).

Процесс обеднения канала электронами в МОП-транзисторе с встроенным каналом *n*-типа, включенном по схеме с ОИ (рис. 4.25, *б*), происходит при отрицательном потенциале на затворе относительно истока. Полярность напряжения $U_{ЗИ}$ показана на рис. 4.25, *б*, и соответствует полярности напряжения $U_{ЗИ}$ на рис. 4.24 в скобках. В результате действия электрического поля, созданного напряжением $U_{ЗИ}$, когда $|U_{ЗИ}| > |U_{СИ}|$ и $U_{ПИ} = 0$, на *p-n*-переходах затвор—исток и затвор—сток создается обратное смещение и прекращается приток электронов из истока и стока в поверхностный слой подложки — канал. За счет напряжения обратного смещения между затвором и подложкой, если подложка соединена с истоком, электроны будут выталкиваться из канала вглубь подложки (рис. 4.25, *б*). Одновременно из глубины подложки в канал будут притягиваться положительные ионы, которые частично рекомбинируются с электронами. В *p-n*-переходах (подложка—исток и подложка—сток), действующее напряжение обратного смещения расширяет потенциальный барьер вглубь подложки, обедняющий поверхностный слой между истоком и стоком электронами, и сопротивление канала растет. При некотором затворном напряжении $U_{ЗИ\ отс}$ область канала изменяет свою электропроводимость с электронной на дырочную и $I_C = 0$.

Таким образом, в отличие от полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом и МДП (МОП)-транзисторов с индуцированным каналом, полевые транзисторы с изолированным затвором и встроенным каналом могут работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения канала, т.е. при разной полярности управляющего входного сигнала (в статическом режиме это затворное напряжение, действующее на переходах затвор—исток и исток—подложка). Все остальные процессы в МОП-транзисторе с встроенным каналом аналогичны рассмотренным выше процессам в МОП-транзисторе с индуцированным каналом.

Поскольку затвор отделен от подложки диэлектрическим слоем, ток в цепи затвора ничтожно мал, так же как и в транзисторе с индуцированным каналом. Мала и мощность, потребляемая от источника напряжения (сигнала) в цепи затвора, необходимая для

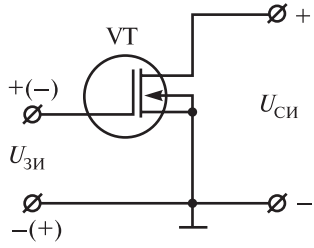
управления относительно большим током стока и мощностью сигнала в выходной цепи.

### Статический режим включения полевого транзистора с изолированным затвором от канала и встроенным каналом

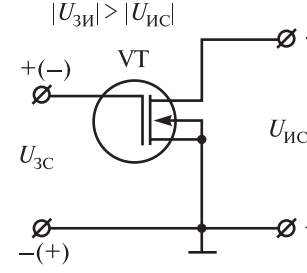
Статический режим включения транзистора обеспечивает работу транзистора в статическом режиме. Для создания статического режима работы транзистора необходимо во входной и выходной цепях транзистора включить источники питания.

Входной цепью в схеме включения полевого транзистора является электрическая цепь, ограниченная выводом от затвора и выводом от подложки, который может быть соединен с одним из выводов от канала (стока или истока) или с выводом от затвора в зависимости от схем включения транзистора (ОИ, ОС, ОЗ).

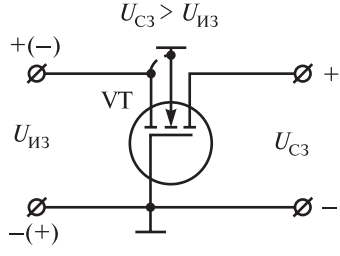
На подложку можно подавать потенциал относительно выводов от истока, стока или затвора в зависимости от схем включения полевого транзистора. Для этого необходимо включать напряжение между выводами подложка—исток при схеме включения с ОИ (рис. 4.26, *а*), подложка—сток — при схеме включения с ОС




С общим истоком (ОИ)




С общим стоком (ОС)




С общим затвором (ОЗ)

Рис. 4.26. Схемы включения полевого транзистора с изолированным затвором от канала и встроенным каналом в статическом режим ($U_{ЗИ}$ — полярность без скобок — обогащение канала, $U_{ЗИ}$ — полярность в скобках — обеднение канала)

(рис. 4.26, *б*), подложка—затвор — при схеме включения с ОЗ (рис. 4.26, *в*), и подложка будет выполнять задачу дополнительного управляющего электрода, т.е. дополнительного затвора.

В этих схемах между подложкой и затвором действует электрическое поле, которое может при определенной полярности затворного напряжения обогащать или обеднять канал (рис. 4.26).

При таких способах включения подложки происходит наиболее интенсивный процесс создания канала и защитного (буферного) слоя между каналом и глубоким слоем подложки.

В схеме с ОС на подложку можно подавать напряжение и относительно истока, но в этом случае подложка будет действовать как дополнительный «нижний» затвор (управляющий электрод) только при условии $|U_{ЗС}| > |U_{ИС}|$ как в режиме обогащения канала, так и в режиме обеднения канала.

Однако подложку можно и не использовать как управляющий дополнительный электрод. Этот вариант показан на рис. 4.26, *в*, в схеме с ОЗ, где вывод подложки соединен с затвором. При такой схеме включения подложки отсутствует электрическое поле между подложкой и затвором, что не способствует изменению ширины защитного (буферного) слоя и изменению канала.

Для ускорения процесса обогащения или обеднения канала в схеме включения транзистора с ОЗ необходимо вывод подложки соединить с истоком (на рис. 4.26, *в*, показано штрихами). При таком включении напряжения в схеме с ОЗ между выводами подложки и затвора действует электрическое поле, которое при указанной разности потенциалов затворного напряжения обогащает или обедняет канал, что способствует наиболее интенсивному процессу преобразования канала и защитного (буферного) слоя между каналом и глубоким слоем подложки.

В любом варианте включения подложки в схеме с ОЗ должно выполняться соотношение напряжений $|U_{СЗ}| > |U_{ИЗ}|$. В любой из схем включения полевого транзистора (ОИ, ОС, ОЗ) данного типа можно применять любой способ подключения подложки для управления работой транзистора как дополнительным электродом, но при этом необходимо учитывать соотношение напряжений затворного $U_З$ и стокового $U_С$.

Выходной цепью полевого транзистора является электрическая цепь, ограниченная выводами исток—сток в схеме с ОИ (рис. 4.26, *а*), сток—исток — в схеме с ОС (рис. 4.26, *б*), сток—затвор — в схеме с ОЗ (рис. 4.26, *в*).

В статическом режиме в любой схеме включения транзистора (ОИ, ОС, ОЗ) постоянное напряжения смещения $U_{СМ}$ (затворное $U_З$) обеспечивает получение определенной ширины канала и сопротивления канала ($R_i$), а также определенного тока стока $I_С = \frac{U_С}{R_i}$, на который влияет напряжение на канале $U_С$. Например, в схеме с ОИ (рис. 4.26, *а*) напряжение смещения $U_{см}$ (затворное $U_{ЗИ}$) обеспечивает получение определенной ширины и сопротивления канала ($R_{СИ}$), а также тока стока $I_С = \frac{U_{СИ}}{R_{СИ}}$. Минимальное затворное напряжение, при котором возникает канал, называют пороговым напряжением, например в схеме с ОИ это напряжение $U_{ЗИ\ пор}$.

В зависимости от схем включения транзистора затворное напряжение обозначается $U_{ЗИ}$ (в схеме с ОИ), $U_{ЗС}$ (в схеме с ОС), $U_{ИЗ}$ (в схеме с ОЗ). Обозначение напряжения на канале $U_С$ также зависит от схем включения транзистора: $U_{СИ}$ в схеме с ОИ (рис. 4.26, *а*), $U_{ИС}$ в схеме с ОС (рис. 4.26, *б*), $U_{СЗ}$ в схеме с ОЗ (рис. 4.26, *в*).

При изменении типа электропроводности канала и подложки меняются только полярность приложенных напряжений и направление тока $I_С$ (рис. 4.26). Необходимо учесть, что полярность затворного напряжения ($U_{ЗИ}$ для схемы с ОИ) при изменении типа канала также изменится для создания процессов обогащения и обеднения канала в транзисторе.

Основными принципами построения схем включения транзистора с встроенным каналом являются условия, способствующие управлению каналом. Управление каналом возможно в режиме обогащения или обеднения канала при включении затворного напряжения $U_З$ так, чтобы это напряжение способствовало или обогащению поверхностного слоя подложки между истоком и стоком носителями зарядов, равнозначными областям истока и стока (в данных схемах на рис. 4.26 электронами, так как транзистор с каналом *n*-типа), или обеднению.

### Динамический режим включения полевого транзистора с изолированным затвором от канала и встроенным каналом

Особенностью включения и работы данного вида полевого транзистора в динамическом режиме заключается в том, что в режиме обеднения канала происходит уменьшение носителей зарядов в

канале и повышение его сопротивления. В динамическом режиме можно соответственно изменить рабочий режим, что влияет на выходный ток и сигнал.

Для создания динамического режима включения транзисторов необходимо в схемах статического режима во входную цепь включить источник входного сигнала, а в выходную цепь — нагрузку (рис. 4.27 и 4.28). Входное напряжение может быть любого рода — постоянное, переменное или импульсное.

Исследуя варианты включения источника входного сигнала $U_{вх}$ с источником смещения $U_{см}$ (затворное $U_З$), можно выделить два варианта включения источников напряжения: последовательное (рис. 4.27) и параллельное включение (рис. 4.28). По способу действия двух источников напряжения в одной электрической цепи (входная цепь) также различают два варианта — согласованное и встречное. Когда говорят о способах действия источников напряжения между собой, подразумевают рассмотрение источников постоянного или импульсного напряжения, а при рассмотрении источника входного сигнала как источника переменного напряжения, совместное действие в каждый из полупериодов переменного напряжения будет изменяться.

В выходной цепи транзистора действуют два элемента нагрузки — внутреннее сопротивление транзистора $R_i$ (сопротивление канала) и сопротивление внешней нагрузки $R_н$, которые могут быть включены последовательно (рис. 4.27) и параллельно (рис. 4.28). При параллельном включении нагрузки с транзистором в схемах с ОИ и ОС добавляется резистор конструктивной нагрузки соответственно в цепь стока ($R_С$) и цепь истока ($R_И$), а для схемы с ОЗ параллельное включение нагрузки с транзистором не выполняется.

Любой из вариантов включения источников напряжения и их действие между собой во входной цепи и варианты включения нагрузки в выходной цепи могут быть использованы в различных схемах включения транзистора (ОИ, ОС, ОЗ) и в различных сочетаниях для входной и выходной цепей.

На подложку потенциал можно подавать относительно истока или стока, тогда в любой схеме подложка будет выполнять роль дополнительного управляющего электрода — дополнительного затвора — и способствовать управлению каналом (обеднение или обогащение). Так, в приведенных схемах с ОИ на рис. 4.27, *а*, и 4.28, *а*, на подложку подано напряжение относительно стока, в схеме ОС — отно-

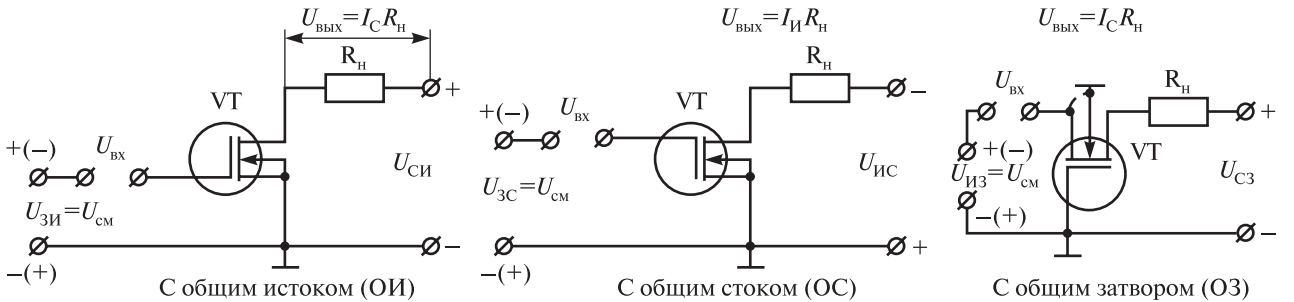



Рис. 4.27. Схемы включения полевого транзистора с изолированным затвором от канала и встроенным каналом в динамическом режиме (режим с нагрузкой) с последовательным включением источника входного сигнала с источником смещения во входной цепи и последовательным включением нагрузки с транзистором в выходной цепи ($U_{ЗИ}$ с полярностью без скобок — обогащение канала, $U_{ЗИ}$ с полярностью в скобках — обеднение канала)

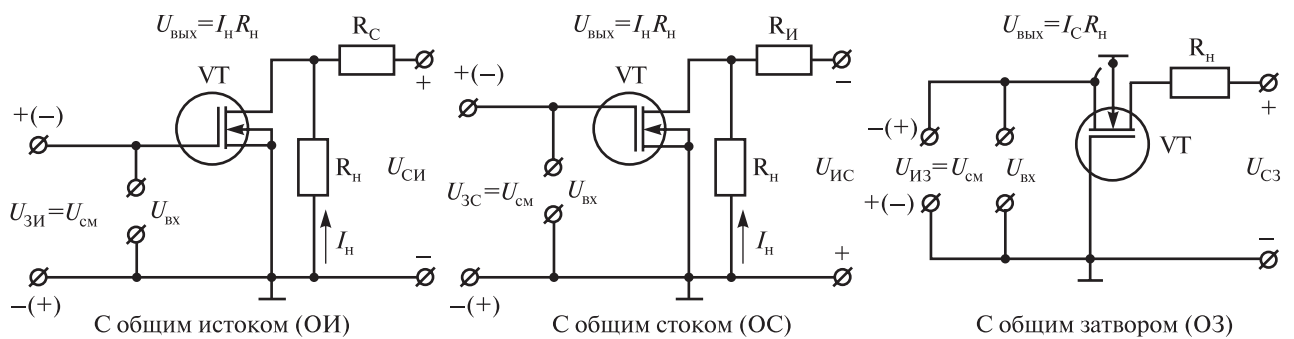



Рис. 4.28. Схемы включения полевого транзистора с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом в динамическом режиме (режим с нагрузкой) с параллельным включением источника входного сигнала с источником смещения во входной цепи и параллельным включением нагрузки с транзистором в выходной цепи ($U_{ЗИ}$ с полярностью без скобок — обогащение канала, $U_{ЗИ}$ с полярностью в скобках — обеднение канала)

сительно истока (рис. 4.27, *б*, и 4.28, *б*). Однако можно и не использовать подложку в процессе управления каналом и не подавать на нее напряжение относительно других выводов. В качестве примера это показано на рис. 4.27, *в*, и 4.28, *в*, при включении транзистора с ОЗ. Из приведенных примеров видно, что в схемах с ОИ и ОС существует разность потенциалов между подложкой и затвором, что способствует управлению каналом через подложку и созданию защитного (буферного) слоя.

В схеме с ОЗ может и не быть разности потенциалов на подложке с затвором, что не способствует изменению канала. В каждой из схем можно изменять включение подложки в разных вариантах, что соответственно будет изменять влияние подложки на работу транзистора.

Наилучшим управляющим свойством подложка обладает в том случае, когда на нее подано напряжение относительно стока, т.е. подложка соединена с истоком в схеме с ОИ. В этом случае в режиме обеднения канала заряды быстрее уходят от истока и из канала, а в режиме обогащения канала быстрее накапливаются в истоковой области и канале. Так как исток—источник зарядов, то это и способствует быстродействию транзистора и созданию тока в канале $I_C$ при $U_{СИ} > 0$.

### Статические характеристики полевого транзистора с изолированным затвором от канала и встроенным каналом

*Выходные (стоковые) статические характеристики* $I_C = \varphi(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$ МДП-транзистора с встроенным каналом сняты по схеме включения транзистора с ОИ (рис. 4.29). Общий характер изменения тока $I_C$ при изменении напряжения $U_{СИ}$ и постоянном $U_{ЗИ}$ (рис. 4.30) остается таким же, как и в других типах полевых транзисторов по схеме включения с ОИ. Существенное отличие заключается в том, что характеристики, снятые в режиме обогащения канала, располагаются выше характеристики, снятой при $U_{ЗИ} = 0$, а в режиме обеднения — ниже. Остальные процессы — сужение канала в сторону стока, перекрытие канала в режиме насыщения — такие же, как и для рассмотренного транзистора с индуцированным каналом.

*Характеристика прямой передачи (стоко-затворная)* $I_C = \varphi(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$ (рис. 4.31).

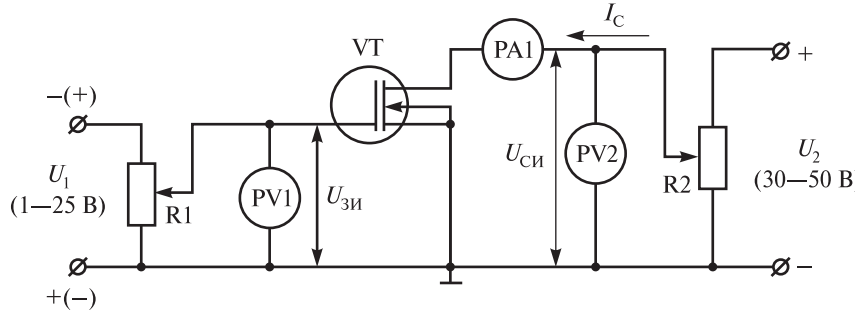



Рис. 4.29. Схема для снятия статических характеристик полевого транзистора с изолированным затвором от канала и индуцированным каналом, включенного по схеме с ОИ

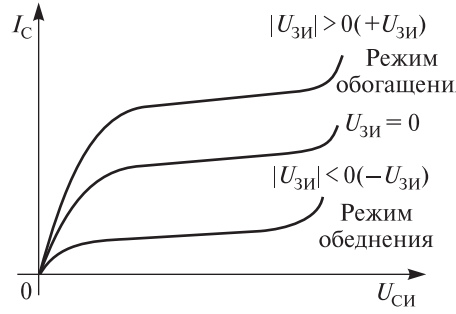



Рис. 4.30. Выходные статические характеристики полевого транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом

При затворном напряжении $U_{ЗИ} = 0$ существует какое-то начальное значение тока стока $I_C$ при $|U_{СИ}| > 0$, так как в данном типе транзистора уже существует канал, выполненный технологическим путем (рис. 4.31, точка а).

При постоянном напряжении $U_{СИ}$ в режиме обогащения канала с повышением $U_{ЗИ}$ ток стока $I_C$ увеличивается, так как увеличивается электропроводность канала (на рис. 4.31 участок а—б). В режиме обеднения канала происходит обратный процесс (на рис. 4.31 участок а—в). При достижении порогового значения напряжения $U_{ЗИ\ пор} = U_{ЗИ\ отс}$, когда полностью отсутствует канал, ток стока $I_C$ становится равным нулю (точка в) и это соответствует режиму отсечки.

В характеристиках прямой передачи для полевых транзисторов с изолированным затвором от канала и встроенным каналом участок характеристики в режиме обогащения канала находится в первой или второй четверти декартовой системы координат. Если для обогащения канала на затвор подается положительный потенциал, что

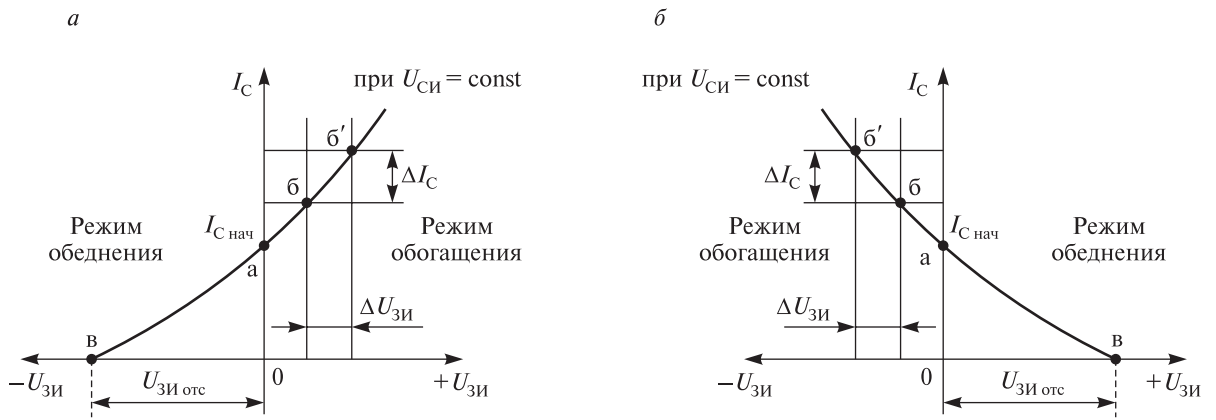



Рис. 4.31. Характеристика прямой передачи полевого транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом:
*а* — в режиме обогащения на затворе «плюс», канал *n*-типа; *б* — в режиме обогащения на затворе «минус», канал *p*-типа

характерно для полевых транзисторов с изолированным затвором от канала и встроенным каналом *n*-типа, то участок характеристики режима обогащения располагается в первой четверти (рис. 4.31, *а*). При обогащении канала за счет подключении «минуса» к затвору (канал *p*-типа) участок характеристики режима обогащения располагается во второй четверти (рис. 4.31, *б*).

Все рассмотренные статические характеристики сняты при условии, что напряжение между подложкой и истоком $U_{\text{ПИ}} = 0$.

## 4.6. Основные параметры полевых транзисторов и их ориентировочные значения

Основные свойства и электрические параметры полевых транзисторов практически аналогичны независимо от вида управляющего поля и схемы включения, но отличаются только количественными показателями.

Так, на ток $I_{\text{С}}$ в канале влияют изменения двух напряжений: затворного напряжения $U_{\text{З}}$ и напряжения на канале $U_{\text{С}}$. Приращение каждого из этих напряжений при неизменном другом напряжении вызывает соответствующее изменение тока стока $I_{\text{С}}$. Отношение этих приращений отражает наиболее существенные свойства полевых транзисторов, выражаемые их параметрами в различных схемах включения транзисторов.

Рассмотрим основные параметры для схемы с ОИ, которые в основном приводятся в справочной литературе.

Полевые транзисторы характеризуются следующими дифференциальными параметрами, соответствующими режиму насыщения.

*Статическая крутизна S* характеристики прямой передачи определяется по семейству характеристик прямой передачи (рис. 4.31), характеризует управляющее действие входного напряжения $U_{\text{ЗИ}}$ и равна отношению изменения тока к изменению затворного напряжения $U_{\text{ЗИ}}$:

$$S = \mathrm{d}I_{\text{С}}/\mathrm{d}U_{\text{ЗИ}} \text{ при } U_{\text{СИ}} = \text{const}, \; U_{\text{ПИ}} = \text{const}.$$

Однако для каждого участка характеристики с небольшим приближением можно найти усредненное значение крутизны, заменив производную отношением соответствующих приращений. При малых приращениях это вполне допустимо: $S = \dfrac{\Delta I_{\text{С}}}{\Delta U_{\text{ЗИ}}}$ при $U_{\text{СИ}} = \text{const}$, $U_{\text{ПИ}} = \text{const}$ (рис. 4.31).

Крутизна, выражаемая числом, показывает, на сколько изменяется ток стока $I_C$ при изменении затворного напряжения $U_{ЗИ}$ на 1 В, и определяет наклон статической стокозатворной характеристики в заданной точке. Чем больше крутизна, тем эффективнее процесс управления, так как при одном и том же приращении входного напряжения $U_{ЗИ}$ можно получить большее приращение тока стока $\Delta I_C$. Крутизна зависит от сопротивления канала. Чем меньше сопротивление канала, тем большее приращение тока $I_C$ можно получить при том же изменении напряжения $U_{ЗИ}$.

В транзисторе МДП (МОП)-структуры на крутизну $S$ влияет также толщина слоя диэлектрика ($SiO_2$). Крутизна может иметь значение в пределах $S$ = 0,1—500 мА/В и наибольшее значение — в транзисторах с изолированным затвором и каналом *n*-типа.

*Входное сопротивление* $R_{вх}$ характеризует влияние изменения затворного напряжения $U_{ЗИ}$ на ток затвора $I_З$:

$$R_{вх} = \frac{\mathrm{d}U_{ЗИ}}{\mathrm{d}I_З} \text{ или } R_{вх} = \frac{\Delta U_{ЗИ}}{\Delta I_З} \text{ при } U_{СИ} = \text{const}, \; U_{ПИ} = \text{const}.$$

Входное сопротивление полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом определяется сопротивлением *p-n*-перехода, включенным под обратное смещение, и составляет $10^6$—$10^8$ Ом. В транзисторах МДП (МОП)-структуры входное сопротивление определяется сопротивлением изоляционного слоя $SiO_2$, значительно больше, чем у полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом, и составляет $10^{12}$—$10^{14}$ Ом.

Важным фактором является то, что $R_{вх}$ МДП (МОП)-транзисторов остается неизменным при подаче на вход напряжения любой полярности в отличие от транзистора с управляющим *p-n*-переходом из-за изоляционного слоя, который имеет постоянное сопротивление. В полевых транзисторах с управляющим *p-n*-переходом при подаче напряжения прямого смещения $U_{ЗИ}$ входное сопротивление стремится к нулю, а в транзисторе с изолированным затвором от канала входное сопротивление не изменяется.

Таким образом, полевые транзисторы имеют гораздо большее входное сопротивление $R_{вх}$, чем биполярные транзисторы, что облегчает согласование схем на полевых транзисторах между собой.

*Выходное (внутреннее) сопротивление* $R_{вых}$ ($R_i$) характеризует влияние изменения напряжения $U_{СИ}$ на ток $I_C$ при неизменном напряжении $U_{ЗИ}$:

$$R_{\text{вых}} = R_i = \frac{\mathrm{d}U_{\text{СИ}}}{\mathrm{d}I_{\text{С}}} \text{ или } R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{СИ}}}{\Delta I_{\text{С}}} \text{ при } U_{\text{ЗИ}} = \text{const},\ U_{\text{ПИ}} = \text{const}.$$

В режиме насыщения изменение напряжения $U_{\text{СИ}}$ незначительно изменяет ток $I_{\text{С}}$, поэтому сопротивление очень велико и составляет $10^4$—$10^6$Ом.

*Коэффициент усиления* μ показывает, во сколько раз затворное напряжение $U_{\text{ЗИ}}$ сильнее влияет на изменение тока $I_{\text{С}}$, чем напряжение на канале $U_{\text{СИ}}$:

$$\mu = \frac{\mathrm{d}U_{\text{СИ}}}{\mathrm{d}U_{\text{ЗИ}}} \text{ или } \mu = \frac{\Delta U_{\text{СИ}}}{\Delta U_{\text{ЗИ}}} \text{ при } I_{\text{С}} = \text{const}.$$

Количественно μ выражается числом, которое показывает, на сколько нужно изменить напряжение $U_{\text{ЗИ}}$ при изменении напряжения $U_{\text{ЗИ}}$ на 1 В, чтобы при этом ток $I_{\text{С}}$ остался неизменным. В режиме насыщения μ велико, так как обычно изменение напряжения незначительно влияет на ток $I_{\text{С}}$, а напряжение $U_{\text{ЗИ}}$ влияет существенно.

Значение μ составляет 10—100 единиц. Параметры $S$, $R_i$ и μ полевого транзистора связаны между собой уравнением $\mu = R_i S$.

Действительно, $\mu = \dfrac{\mathrm{d}U_{\text{СИ}}}{\mathrm{d}I_{\text{С}}} \dfrac{\mathrm{d}I_{\text{С}}}{\mathrm{d}U_{\text{ЗИ}}} = \dfrac{\mathrm{d}U_{\text{СИ}}}{\mathrm{d}U_{\text{ЗИ}}}$.

Параметры $S$, $R_i$ можно определить по выходным (стоковым характеристикам) (рис. 4.32). Для определения $R_{\text{вых}}$ строим треугольник со сторонами $\Delta I'_{\text{С}}$ и $\Delta U_{\text{СИ}}$ в режиме насыщения. Построение треугольника начинается с выбора положения рабочей точки на прямолинейном участке одной из статических характеристик в режиме насыщения, например точка $A$ на рис. 4.32 характеристики со зна-

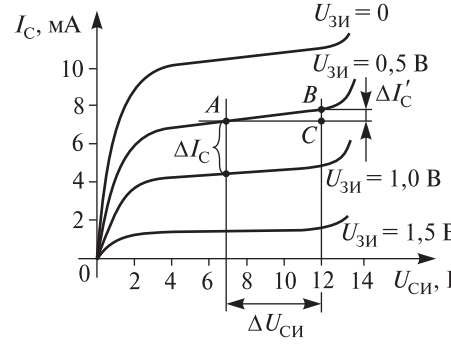



Рис. 4.32. Выходные характеристики полевого транзистора

чением затворного напряжения $U_{ЗИ} = 0{,}5$ В. Рабочая точка *A* имеет параметры: $U_{ЗИ} = 0{,}5$ В, $I_C = 7$ мА, $U_{СИ} = 7$ В. Выбираем приращение напряжения $\Delta U_{СИ}$ в пределах прямолинейного участка в режиме насыщения, допустимое для данного типа транзистора, например $\Delta U_{СИ} = 5$ В в пределах от $U_{СИ} = 7$ В до $U_{СИ} = 12$ В. На оси абсцисс со значением $U_{СИ} = 12$ В восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с ВАХ, имеющей значение $U_{ЗИ} = 0{,}5$ В получаем точку *B*. Из точки *A* проводим линию, параллельную оси напряжения $U_{СИ}$ до пресечения с перпендикуляром к оси напряжения, и место пересечения обозначаем точкой *C*. По полученному треугольнику *ABC* определяем значения величин: $\Delta I'_C = 0{,}5$ мА и $\Delta U_{СИ} =$ $= 5$ В, по которым определяем по формуле $R_{вых} = \Delta U_{СИ} / \Delta I'_C$ при $U_{ЗИ} =$ = const. Получаем $R_{вых} = 5/0{,}5 \cdot 10^{-3} = 10$ кОм. Для определения крутизны находим приращение $\Delta I_C$ между двумя соседними характеристиками, снятыми при разных напряжениях $U_{ЗИ}$ (например, $U_{ЗИ} = 1{,}0$ и $0{,}5$ В). При этом $\Delta U_{ЗИ} = -0{,}5$ В $- (-1$ В$) = 0{,}5$ В.

Получаем $S = \Delta I_C / \Delta U_{ЗИ}$ при $U_{СИ} =$ const. При $\Delta U_{ЗИ} = 0{,}5$ В и $\Delta I_C = 2{,}5$ мА $S = 2{,}5/0{,}5 = 5$ мА/В при $U_{СИ} =$ const.

Начальный ток стока $I_{C\ нач}$ — это ток стока при нулевом напряжении $U_{ЗИ}$. Для транзисторов с управляющим *p-n*-переходом $I_{C\ нач} = 0{,}2$—$600$ мА; для транзисторов с технологически встроенным каналом $I_{C\ нач} = 0{,}1$—$100$ мА; с индуцированным каналом $I_{C\ нач} = 0{,}01$—$0{,}5$ мкА.

Напряжение отсечки $U_{ЗИ\ отс} = 0{,}2$—$10$ В.

Пороговое напряжение $U_{ЗИ\ пор} = 1$—$6$ В — минимальное напряжение, необходимое для создания канала.

Сопротивление исток—сток в открытом состоянии $R_{СИ\ отк} =$ $= 2$—$300$ Ом.

Остаточный ток стока $I_{C\ ост}$ — ток стока при напряжении $U_{ЗИ\ ост} = 0$ составляет $0{,}001$—$10$ мА.

Максимальный постоянный ток стока $I_{C\ max} = 10$ мА—$0{,}7$ А.

Немаловажными параметрами являются междуэлектродные емкости: входная (затвор—исток) $C_{ЗИ}$, проходная (затвор—сток) $C_{ЗС}$ и выходная (сток—исток) $C_{СИ,}$ которые зависят от размеров электродов, расстояния между ними и степени перекрытия канала затвором. Значение емкостей составляет 2—5 пФ.

Основные параметры во многом зависят от схемы включения генераторов. Параметры, которые характерны для различных схем включения, приведены в табл. 4.1.

*Таблица 4.1*

| Параметры | Схемы включения транзистора | | |
|---|---|---|---|
| | С общим истоком (ОИ) | С общим стоком (ОС) | С общим затвором (ОЗ) |
| $K_U$ — коэффициент усиления по напряжению | 10—100 | 0,8—0,85 | 10—100 |
| $R_{вх}$Ом | $10^6$—$10^5$ | $10^5$—$10^{10}$ | $10^2$—$10^3$ |
| $R_{вых}$, Ом | $10^4$—$10^6$ | $10^2$—$10^3$ | $10^7$—$10^8$ |
| Сдвиг фаз между входным и выходным напряжением ($U_{вх}$ и $U_{вых}$) | 180° | 0 | 0 |

Из табл. 4.1 видно, что схема с ОС обладает низкими усилительными свойствами, т.е. ее можно использовать как повторитель напряжения.

Параметры полевых транзисторов во многом зависят также от частоты усиливаемого сигнала. Частотные свойства полевого транзистора характеризуются временем пролета носителей зарядов по каналу и процессом перезаряда емкости затвора через сопротивление канала. Полевые транзисторы работают с сигналами, частоты которых составляют единицы—десятки мегагерц. По частотным свойствам полевые транзисторы уступают биполярным. Система обозначения полевых транзисторов аналогична системе обозначения биполярных транзисторов, только вместо буквы Т ставят букву П, например КП103А, КП105Б и т.д.

## 4.7. МДП(МОП)-структуры специального назначения

Кроме рассмотренных полевых транзисторов, которые выпускаются в виде самостоятельных компонентов, применяется ряд МОП-структур со специфическими свойствами. Они являются основным элементом отдельных микросхем, т.е. выполняются в интегральной схемотехнике.

### *4.7.1. Структура металл—нитрид—оксид—полупроводник (МНОП-структура)*

В структурах типа МНОП, в отличие от МОП-структуры, алюминиевый затвор отделен от подложки двойным слоем диэлектрика. Двойной слой состоит из тонкого слоя двуокиси кремния

$SiO_2$ толщиной 2—5 нм и толстого слоя нитрида кремния $Si_3N_4$ толщиной 0,05—1 мкм, напыленного на слой двуокиси кремния (рис. 4.33). На границе этих двух слоев диэлектрика, а также в слое нитрида кремния $Si_3N_4$ имеются дефекты кристаллической решетки, где остаются незаполненные парные ковалентные связи, которые способны захватывать недостающие электроны. Эти дефекты называются «ловушками» электронов. Транзисторы МНОП-структуры могут работать в двух режимах: в нормальном режиме записи-считывания.

Все происходящие процессы в МНОП-стуктурах можно объяснить с точки зрения положения зарядов при различных значениях напряжения $U_{ЗИ}$.

В нормальном режиме работы МНОП-транзистора номинальное пороговое напряжение находится в пределах $U_{ЗИ\ пор} = 1—6$ В, что достаточно для насыщения поверхностного слоя подложки между истоком и стоком неосновными носителями зарядов, т.е. для создания канала. Каждый МНОП-транзистор имеет свое значение порогового напряжения $U_{ЗИ\ пор}$. Процессы, происходящие в МНОП-транзисторах, в этом режиме аналогичны процессам в МОП-транзисторе с индуцированным каналом, когда для обеспечения прохождения тока требуется определенное значение затворного напряжения $U_{ЗИ\ пор}$. В нормальном режиме не используются свойства накопления зарядов из-за дефектов кристаллической решетки в двойном диэлектрическом слое. Стоко-затворная характеристика такого транзистора аналогична характеристике МОП-транзистора с индуцированным каналом (кривая *1* на рис. 4.34).

В режиме записи-считывания используются специфические свойства МНОП-структуры: накопление электрических зарядов в тонком слое $Si_3N_4$ у границы раздела двух диэлектриков из-за различия диэлектрических проницаемостей $Si_3N_4$ ($\varepsilon \approx 7$) и $SiO_2$ ($\varepsilon \approx 4{,}5$), захват носителей зарядов «ловушками» в объеме $Si_3N_4$ и рассасывание накопленных зарядов. Накопленные заряды сохраняются при малых потенциалах на затворе в течение тысячи часов и даже при отключении напряжения питания, так как слой $SiO_2$ предотвращает какой-либо перенос заряда в отсутствие электрического поля достаточно большой напряженности. Процесс накопления зарядов называют режимом записи, а процесс рассасывания — считыванием.

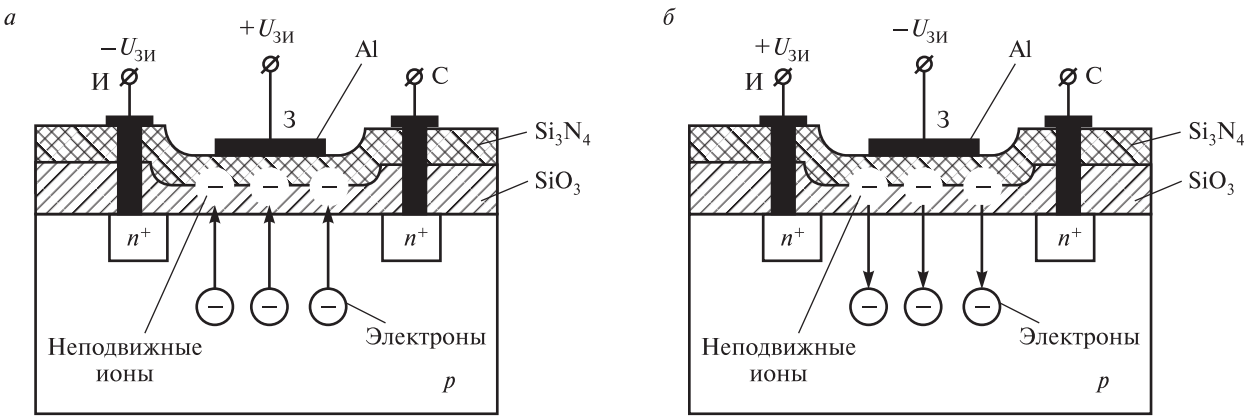



Рис. 4.33. МНОП-структура:
*а* — в режиме записи; *б* — в режиме стирания информации

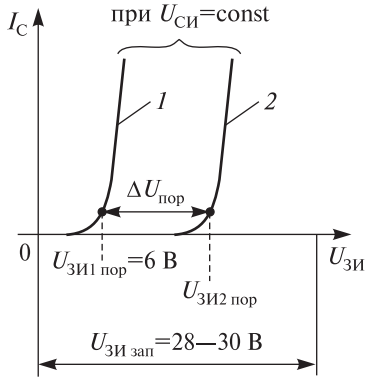



Рис. 4.34. Вольт-амперная сто-ко-затворная характеристика МНОП-структуры:
*1* — при записи; *2* — при считывании (стирании) информации

Процесс накопления зарядов (электронов), т.е. работа МНОП-транзистора в режиме записи, на границе нитридного и оксидного слоев происходит при подаче достаточно большого напряжения обратного смещения между истоком и затвором («плюс» на затворе для канала *n*-типа), равном $U_{ЗИ}$ = 28—30 В, что во много раз больше напряжения, необходимого для создания канала. В этом случае электроны из подложки туннелируют через тонкий слой $SiO_2$ и захватываются «ловушками» граничного слоя $Si_3N_4$ с $SiO_2$ и рекомбинируются. В граничном слое диэлектриков накапливаются неподвижные отрицательные ионы за счет рекомбинации (см. рис. 4.33, *а*). Пороговое напряжение $U_{ЗИ}$, при котором происходит накопление зарядов, т.е. режим записи, называют напряжением записи ($U_{ЗИ\ зап}$). В поверхностном слое подложки между истоком и стоком резко уменьшается число неосновных носителей зарядов, которые являются необходимым составляющим для создания канала, что приводит к увеличению сопротивления канала и уменьшению проводимости канала и тока стока $I_C$. Созданный заряд неподвижных отрицательных ионов повышает пороговое напряжение со значения $U_{ЗИ\ пор2}$ до значения $U_{ЗИ\ пор\ 2}$ = 15—20 В, т.е. напряжение, при котором вновь может быть создан канал (кривая *2* на рис. 4.34). Увеличение порогового напряжения, необходимого для создания канала, с величины $U_{ЗИ\ пор1}$ до $U_{ЗИ\ пор2}$ вызвано тем, что неосновные носители зарядов подложки будут вытягиваться в поверхностный слой подложки из ее глубины.

Однако электроны (подложка структуры *p*-типа), вытянутые из глубины подложки, не будут туннелировать в слой диэлектрика, так как процесс туннелирования происходит при более высоком пороговом напряжении, и в канале при $U_{СИ} > 0$ потечет ток $I_C$ (кривая *2* на рис. 4.34). Разность между пороговыми напряжениями $U_{ЗИ\ пор1}$ и $U_{ЗИ\ пор2}$ называют межпороговой зоной и она равна $\Delta U_{пор} \approx 12$ В.

При подаче напряжения прямого смещения между затвором и истоком («минус» на затворе) $U_{ЗИ}$ = 28—30 В накопленные заряды — электроны в нитридном ($Si_3N_4$) и граничном слое двух диэлектриков рассасываются (см. рис. 4.33, *б*). Электроны перемещаются в подложку, обогащая ее. Это обогащение электронами приводит к тому, что теперь пороговое напряжение, необходимое для обогащения поверхностного слоя подложки (канала) электронами, существенно снизится со значения $U_{ЗИ\ пор2}$=15—20 В до значения $U_{ЗИ\ пор1}$=1—6 В.

Это состояние МНОП-структуры используется как режим считывания (стирание) информации из запоминающего элемента при $U_{ЗИ\ счит}$ = 28—30 В. Рассмотренные режимы записи и считывания информации отличаются только полярностью приложенного напряжения $|U_{ЗИ\ зап}| = |U_{ЗИ\ счит}|$.

Таким образом, при одинаковом пороговом напряжении $U_{ЗИ\ пор}$ (при разности порядка 3—5 В) число носителей зарядов в слое на границе двух диэлектриков определяет сопротивление канала транзистора. В состоянии обогащения двойного слоя диэлектрика зарядами (запись) сопротивление канала большое, а в состоянии обеднения зарядами (считывание) — сопротивление канала низкое. Это свойство можно использовать для определения информации. При подключении напряжения к каналу $U_{СИ}$ ток стока $I_C$ в состоянии записи будет равен нулю, т.е. ноль (0) информации, а в состоянии считывания ток стока $I_C$ будет максимальным, т.е. есть информация, которую можно обозначить за единицу 1. В структуре подложки *n*-типа и канале *p*-типа процессы те же самые, только накопление электронов в слое диэлектрика равнозначно записи единицы 1, а рассасывание зарядов равнозначно записи нуля 0.

Однако проверить наличие записанной информации можно, не применяя состояние считывания, а используя свойства, определяющие величину порогового срабатывания $U_{ЗИ\ пор}$. Состояние низкого порогового напряжения ($U_{ЗИ\ пор1}$) МНОП-элемента может быть принято за единицу 1, а высокого порогового напряжения $U_{ЗИ\ пор2}$ — за ноль 0 при одном и том же напряжении на канале $U_{СИ}$.

На основе МНОП-структуры изготовляются запоминающие элементы, которые выполняют функцию записи информации при определенном напряжении записи ($U_{ЗИ\ зап}$ = 28—30 В) и хранят

заряд — информацию на границе нитридного и оксидного слоев, а канал между истоком и стоком отсутствует.

### *4.7.2. МОП-структуры с плавающим затвором*

МОП-структуры с плавающим затвором и лавинной инжекцией (рис. 4.35) имеют подложку *1*, в данном случае выполненную из полупроводника *n*-типа, и две области полупроводника *p*-типа, представляющие собой исток (И) и сток (С) с металлическими выводами — электродами — *2*. Промежуток между истоком и стоком покрыт тонким (толщиной примерно 0,1 мкм) слоем *3* двуокиси кремния $SiO_2$, затем располагаются затвор *4*, выполненный в данном случае из кремния Si, и снова слой двуокиси кремния $SiO_2$ *5* (закрывающий весь затвор) толщиной 1 мкм. Таким образом, затвор полностью изолирован и не имеет электрических связей с другими частями структуры.

В обычном состоянии участок исток—сток транзистора не проводит электрический ток из-за отсутствия канала. Канал можно создать двумя способами — подключением высокого напряжения (примерно 80 В) между истоком (стоком) и затвором или между истоком и стоком.

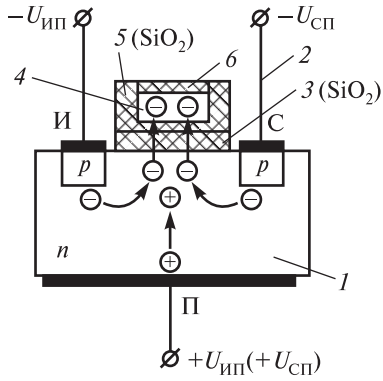



Рис. 4.35. Схематическое изображение структуры МОП-транзистора с плавающим затвором при накоплении заряда в затворе при $U_{ИП}$ или $U_{СП}$ (окно закрыто)

При подаче высокого напряжения обратного смещения, между истоком (стоком) и подложкой ($U_{ИП}$ или $U_{СП}$) возникнет лавинный пробой одного из *p*-*n*-перехода, образованного между истоком и подложкой или стоком и подложкой. При этом электроны подложки и истока (стока) приобретают достаточно большую энергию, позволяющую им проникнуть в изолирующий слой и достигнуть затвора (рис. 4.35). Затвор накапливает отрицательный заряд из поверхностного слоя подложки, в котором остаются нескомпенсированные неосновные подвижные положительные ионы. Последние обеспечивают высокую электропро-

водность канала *p*-типа. После снятия напряжения электроны сохраняются в затворе благодаря высоким изолирующим свойствам диэлектрика, отделяющего затвор от подложки (уменьшается на 25 % за 10 лет).

Напряжение пробоя выбирают таким, которое обеспечит создание канала между истоком и стоком и его электропроводность при достаточном накоплении зарядов в затворе. В результате лавинного пробоя поверхностный слой подложки обедняется подвижными неосновными носителями зарядов (для структуры подложки *p*-типа — это электроны), т.е. в поверхностном слое канала между истоком и стоком остаются только основные подвижные носители зарядов — дырки, и создается канал.

При подаче высокого напряжения между истоком и стоком ($U_{СИ}$) процессы происходят аналогичным образом, единственным отличием является только то, что переход исток—подложка будет находиться под напряжением прямого смещения, а сток—подложка — под напряжением обратного смещения. В этом случае в поверхностном слое подложки положительные ионы будут быстрее накапливаться за счет инжекции из истока в подложку (рис. 4.36).

Такие процессы накопления зарядов в затворе при любом из способов подачи напряжения называют зарядом через влияние, так как напряжение между затвором и любым другим электродом не подключено непосредственно.

Такой транзистор можно использовать как запоминающее устройство. Действительно, режим накопления зарядов можно считать записью информации, и если подать напряжение $U_{СИ}$ значительно меньше напряжения пробоя, то по каналу потечет ток $I_C$. Этот ток можно считать информацией и принять за 1.

Чтобы стереть записанную информацию, необходимо снять электрический заряд с затвора. Для этого область затвора подвергают воздействию уль-

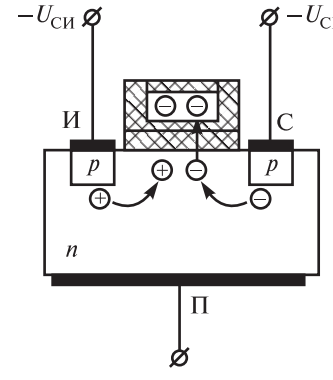



Рис. 4.36. Схематическое изображение структуры МОП-транзистора с плавающим затвором при накоплении заряда в затворе от напряжения $U_{СИ}$ (окно закрыто)

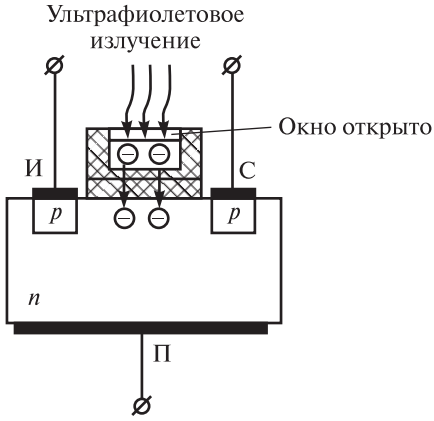



Рис. 4.37. Схематическое изображение структуры МОП-транзистора с плавающим затвором при воздействии ультрафиолетового излучения

трафиолетового или ионизирующего излучения (рис. 4.37). Мощность излучения должна быть достаточной для ионизации и возникновения в цепи затвор—подложка фототока. В результате электроны рекомбинируются с дырками подложки и отрицательный заряд затвора и положительный заряд подложки исчезают. Облучение проводят через специальное окно *6* (см. рис. 4.35) из кварцевого стекла в корпусе транзистора, которое открывается для прохода ультрафиолетового излучения (рис. 4.37) и закрыто при записи информации (см. рис. 4.35 и 4.36). Канал при стирании отсутствует, ток $I_C = 0$, что равнозначно отсутствию информации — ноль (0).

Такие транзисторные структуры называются транзисторами с «плавающим» затвором, так как затвор практически как бы растворен в структуре диэлектрика и в зависимости от условий может иметь заряд — электрически виден, или может быть нейтрален — электрически не виден.

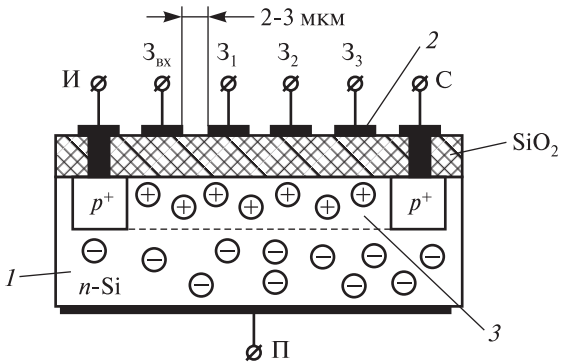
Данные МОП-структуры используются при создании микросхем памяти для цифровых устройств. При записи информации, осуществляемой рассмотренными способами, транзистор становится электропроводным, а при отсутствии записи информации — неэлектропроводным. Записанную информацию также можно стирать (удалять).

### *4.7.3. Приборы с зарядовой связью*

Приборы с зарядовой связью (ПЗС), или, как их часто называют, приборы с переносом заряда, представляют собой структуру МДП (МОП)-транзистора с встроенным каналом и несколькими затворами (рис. 4.38). Однако принцип действия ПЗС во многом отличается от работы МДП-транзистора. Он заключается в накоп-

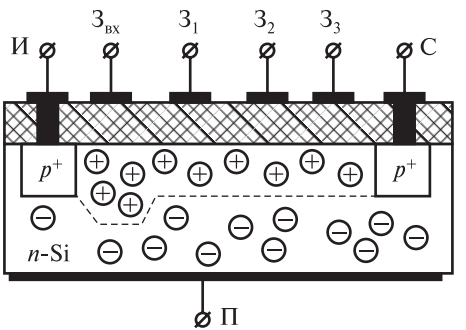
*а*

$|-U_{З\,вх}| = |-U_{31}| = |-U_{32}| = |-U_{33}|$




*б*

$|-U_{З\,вх}| > |-U_{31}| = |-U_{32}| = |-U_{33}|$




*в*

$|-U_{31}| > |-U_{З\,вх}| > |-U_{32}| = |-U_{33}|$

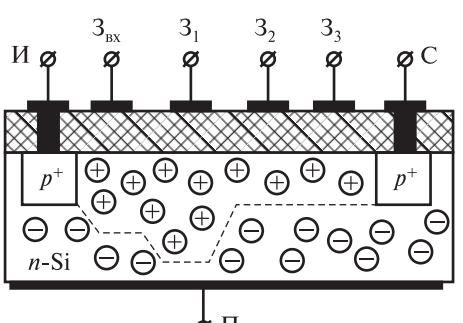



Рис. 4.38. Прибор с зарядовой связью и распределение объемных зарядов: *а* — в режиме покоя; *б* — в режиме хранения; *в* — в режиме записи

лении и хранении под затворами МДП-структур объемных зарядов неосновных носителей подложки и их перемещение от одного затвора к другому при изменении напряжения на затворах структуры. В этом основное отличие в работе ПЗС от МДП-транзисторов, в которых основным назначением является создание канала и обеспечение токопрохождения от истока к стоку.

Основой ПЗС является подложка *1* (рис. 4.38, *а*). В рассматриваемой структуре подложка — слаболегированная пластина кремния *n*-типа, в которой сформированы две сильнолегированные $p^+$-области, имеющие выводы и выполняющие функции истока — входа (И), и стока — выхода (С). Поверхность подложки покрыта слоем диэлектрика ($SiO_2$) толщиной 0,15 мкм. Поверх диэлектрического слоя расположены металлические площадки 10—15 мкм, выполняющие функции затворов *2*, промежуток между затворами составляет 2—4 мкм. Крайний затвор возле истока называется входным $З_{вх}$. Между истоком и стоком в поверхностном слое подложки сформирован слаболегированный канал *3* (встроенный) из неосновных носителей зарядов — дырок, предназначенный для переноса зарядов между затворами. Возможно построение структуры с индуцированным каналом. В этом случае в поверхностном слое между истоком и стоком отсутствуют неосновные носители зарядов — дырки, и канал переноса может быть создан только при определенном потенциале на затворе. В ПЗС-структурах с встроенным каналом эффект переноса зарядов улучшается, и такие структуры называют ПЗС с объемным каналом переноса. Структуру между затвором и истоком можно рассматривать как МДП-конденсатор, одной из обкладок которого является $p^+$-слой, другой — слой металлического затвора, а диэлектриком слой диоксида кремния ($SiO_2$). Таким образом, в структуре ПЗС с четырьмя затворами (рис. 4.38, *а*) можно рассматривать как четыре МДП-конденсатора, которые сформированы в общей полупроводниковой подложке так близко, что могут взаимодействовать между собой.

Процесс накопления зарядов под затворами ПЗС-структуры основан на принципе обогащения поверхностного слоя подложки под соответствующим затвором неосновными носителями зарядов. Этот процесс подобен принципу создания канала в транзисторах с изолированным затвором от канала. Принцип перемещения зарядов от одного затвора к другому основан на поочередном изменении

управляющего потенциала на затворах, в результате чего создается перемещающееся электрическое поле в подложке от затвора к затвору, которое и перемещает заряды. Этот процесс напоминает последовательную передачу заряда от одного МДП-конденсатора к другому, т.е. зарядовую связь между конденсаторами.

При отсутствии напряжения $U_З$ в поверхностном слое подложки находится небольшое число неосновных носителей зарядов, создающих слабый канал переноса, т.е. канал имеет очень большое сопротивление. Такое построение ПЗС аналогично созданию полевого транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом, но с несколькими затворами (в нашем случае четыре затвора).

Рассмотрим работу ПЗС-структуры при различных вариантах включения затворных напряжений ($U_З$), которые могут подаваться между выводами исток — затвор или подложка — затвор в режиме обогащения, т.е. при подложке *n*-типа на затвор необходимо подключать отрицательный потенциал.

Если рабочие напряжения $U_З$ ПЗС выше пороговых значений $U_{З\ пор}$, то под затворами возникают области, обедненные основными носителями зарядов. В них концентрируются заряды неосновных носителей — дырок, увлекаемых в эти области полем каждого затвора. Из-за малых расстояний между затворами (2-3 мкм) обедненные основными носителями области сливаются в единый слой, «рельеф» которого соответствует распределению напряжений на затворах. Если напряжения на всех затворах одинаковы (рис. 4.38, *а*), обедненный слой *1* вдоль всей поверхности имеет одну и ту же глубину, дырки распределяются в нем равномерно $U_{З\ вх} = U_{З1} = U_{З2} = U_{З3} > U_{З\ пор}$.

Если одно из напряжений $U_З$ больше других, например $U_{З\ вх}$, то его поле удерживает больший положительный потенциал в поверхностном слое подложки под этим затвором (рис. 4.38, *б*). Объемный заряд дырок (зарядовый пакет) может сохраняться под этим затвором сравнительно долго, так как в поверхностном слое нет электронов $U_{З\ вх} >> U_{З\ пор}$, с которыми дырки могли бы рекомбинироваться. Такой режим работы ПЗС называют режимом хранения, а напряжение $U_{З\ вх}$ — напряжением хранения. Напряжение хранения $U_З$ составляет 10—15 В, что выше порогового в 2—3 раза. Максимальное время хранения зависит от допустимого изменения заряда дырок за время хранения при напряжении $U_З$. При допусти-

мом изменении заряда на 1 % время хранения составляет 10—20 мс. При отключении напряжения $U_З$ информация не сохраняется.

Сохраненный заряд можно перемещать от одного затвора к другому. Рассмотрим этот процесс перемещения. Если напряжение $U_{З1}$ больше $U_{З\ вх}$, то на границе двух затворов возникает электрическое поле, ускоряющее в сторону затвора $З_1$ и способствующее перемещению дырок в области под затвором $З_1$ (рис. 4.38, *в*). Дырочный пакет, хранившийся под затвором $З_{вх}$, переходит под затвор $З_1$ и остается там, поскольку на границе со следующим затвором $З_2$ действует тормозящее поле, так как $U_{З1} > U_{З2}$.

Ввод объемного заряда под затвор называется режимом записи информации, а напряжение, при котором это происходит, напряжением записи.

В рабочей схеме ПЗС первичным источником записи информации служит входной *p-n*-переход между входным затвором $З_{вх}$ и подложкой (рис. 4.39). Переходы *p-n*-типа между выводами исток—подложка, входной затвор — подложка и исток — входной затвор включены под прямое смещение от источника $U_{ЗП} = U_{ИП}$, в качестве которого может быть источник входного сигнала. При таком включении информация записывается под входным затвором. Резистор нагрузки подключен к выходному *p-n*-переходу сток—подложка, смещенному в обратном направлении источником питания $U_{СИ}$.

Записанная информации может перемещаться от входной цепи к выходной. Процесс перемещения зарядового пакета основан на последовательном включении и отключении затворных напряжений $U_{З1}$, $U_{З2}$, $U_{З3}$.

Процесс перемещения зарядового пакета от одного затвора к другому поясняется на рис. 4.39. При $U_{З\ вх} > 0$ и $U_{З1} = U_{З2} = U_{З3} = 0$ (рис. 4.39, *а*) происходит запись, т.е. ввод объемного заряда под затвор $З_{З\ вх}$. В момент равенства затворных напряжений $U_{З\ вх} = U_{З1} > 0$ и $U_{З2} = U_{З3} = 0$ (рис. 4.39, *б*) объемный заряд равномерно распределяется под затворами $З_{З\ вх}$ и $З_{З1}$. При $U_{З1} > U_{З\ вх} > 0$ и $U_{З2} = U_{З3} = 0$ (рис. 4.39, *в*) большая часть зарядов переходит под затвор $З_{З1}$. Наконец в момент, когда затворное напряжение $U_{З\ вх} = 0$, а $U_{З1} > 0$ и $U_{З2} = U_{З3} = 0$ (рис. 4.39, *г*) объемный заряд полностью переходит под затвор $З_{З1}$. Аналогично происходит перенос зарядового пакета от затвора $З_1$ к затвору $З_2$ (рис. 4.39, *д*, *е*) и т.д. через все элементы ПЗС до выходного *p-n*-перехода между стоком и

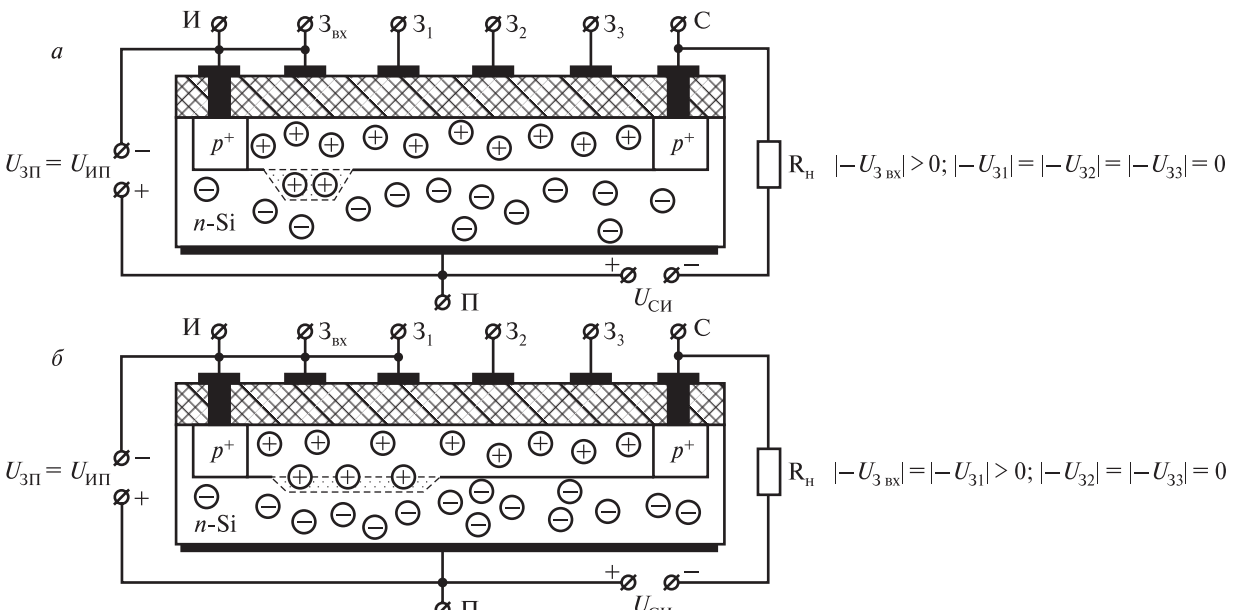



Рис. 4.39 (начало). Процесс распределения зарядов в приборе с зарядовой связью при переносе зарядов

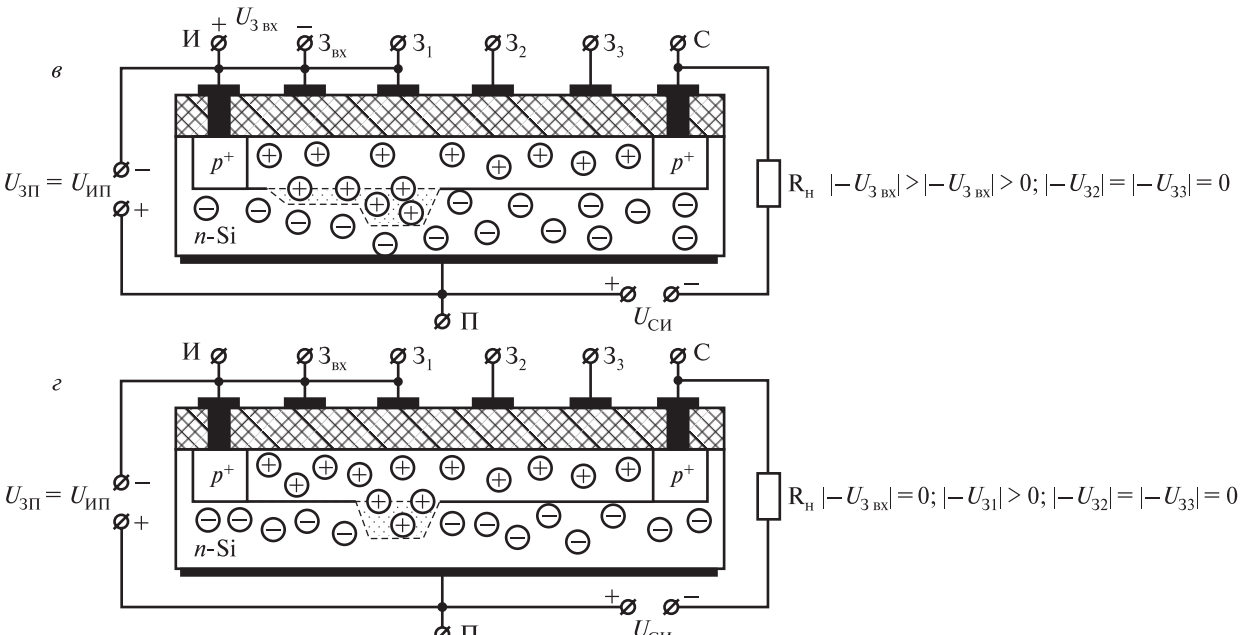



Рис. 4.39 (продолжение)

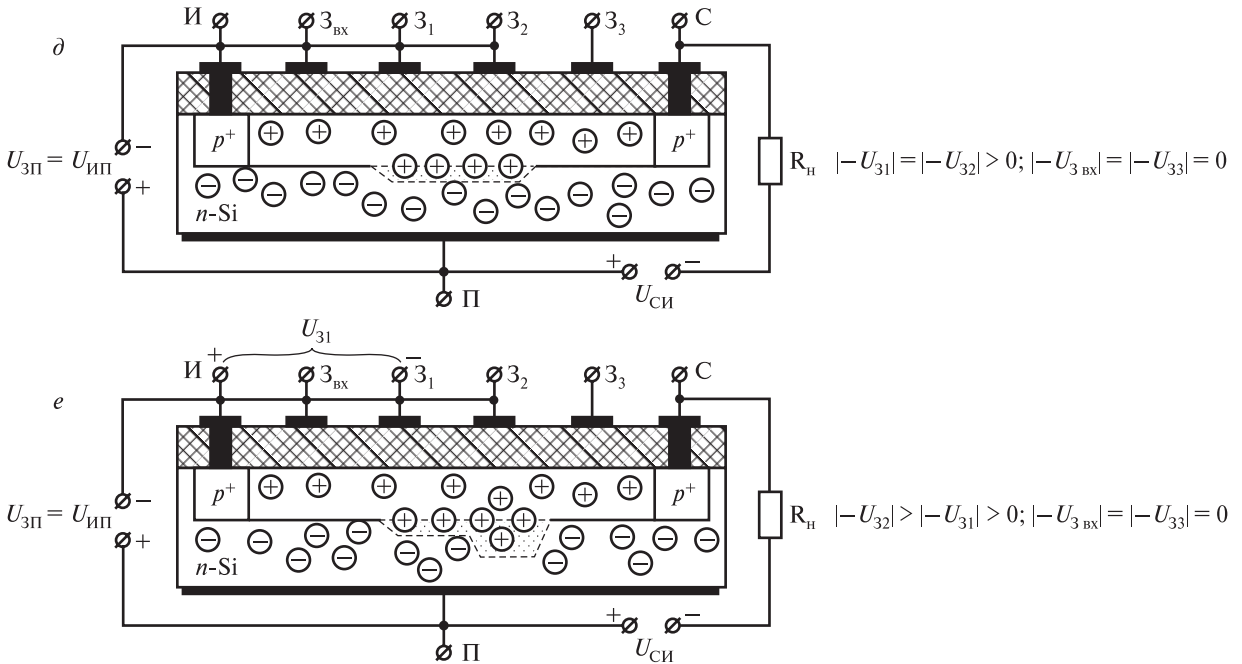



Рис. 4.39 (окончание)

последним затвором, включенным под обратное смещение. Заряды (дырки), приходящие к последнему затвору, захватываются полем *p-n*-перехода сток—затвор и создают импульс в выходной цепи.

Такой процесс последовательного перемещения информации от входной цепи к выходной называется считыванием информации. Время передачи информации от входа к выходу зависит от времени действия напряжений $U_{З1}$, $U_{З2}$, $U_{З3}$.

Величина сигнала на выходе зависит от записанного сигнала, т.е. величины аналогового сигнала на входе ($U_{вх}$). Это связано с тем, что значение объемного заряда под затвором зависит от напряжения на входном затворе.

В процессе перемещения зарядового пакета происходят потери заряда, обусловленные перехватом некоторых дырок приповерхностными ловушками, а также и тем, что часть дырок не успевают перейти от одного затвора к другому за время действия напряжения записи. Напряжение записи $U_{З\ зап}$ равно 20—25 В. Время записи составляет 20—50 нс. Время записи снижается при уменьшении расстояния между затворами, росте подвижности носителей зарядов и повышении напряжения записи.

Уникальная функция ПЗС состоит в том, что носители зарядов можно накапливать под затвором — записывать не только через открытые входные *p-n*-переходы, но и путем локального освещения поверхности подложки под затвором. В этом случае под каждым затвором произойдут генерация носителей зарядов в соответствии с силой светового потока и накопление соответствующего количества зарядов. Подавая в соответствующей последовательности напряжение $U_З$, можно получить на выходе последовательность перемещенных зарядов от каждого затвора. Такое действие ПЗС основано на принципах внутреннего фотоэффекта.

Эти особенности ПЗС определяют основные области их применения — формирователи видеосигналов, запоминающие устройства, схемы обработки аналоговой информации, линий задержки и т.д.

# Глава 5. ТИРИСТОРЫ

## 5.1. Общие сведения и классификация

Тиристоры представляют собой полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, который может переключаться из закрытого состояния в открытое, и наоборот. Его название происходит от греч. thyra (тира), означающего «дверь», «вход», и слова «резистор». Тиристор, подобно двери, открывается, пропуская электрический ток, и закрывается, преграждая путь току. Тиристор является электропреобразовательным полупроводниковым прибором, в вольт-амперной характеристике которого имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Известно много различных типов тиристоров, которые в основном подразделяют по числу электродов и способу управления.

Диодные тиристоры, или динисторы, имеют два основных внешних вывода. Включение (переход прибора из закрытого состояния в открытое) и выключение (переход прибора из открытого состояния в закрытое) динисторов осуществляются за счет изменения величины и полярности питающего напряжения на основных внешних выводах динистора, поэтому динисторы относят к неуправляемым приборам.

Триодные тиристоры, или тринисторы, кроме двух основных внешних выводов, как у динистора, имеют дополнительный управляющий вывод, т.е. имеют три внешних вывода. Включение и выключение тринисторов могут осуществляться как изменением величины и полярности питающего напряжения на основных выходах, так и на управляющем выводе, поэтому их относят к управляемым приборам.

Независимо от конструктивного исполнения основа тиристора представляет собой четырехслойную полупроводниковую структуру с тремя электронно-дырочными переходами, в которой тип элек-

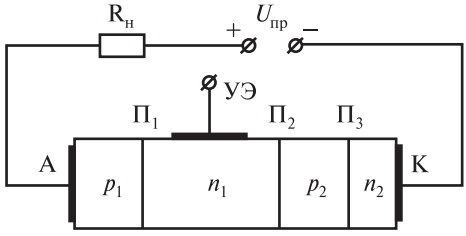



Рис. 5.1. Структура тиристора

тропроводности слоев последовательно чередуется, например *p-n-p-n* или *n-p-n-p* (рис. 5.1), которая обладает свойствами электрического вентиля.

Внешний вывод от *n*-структуры называется катодом (К), от *p*-структуры — анодом (А). Эти электроды, к которым подключают напряжение и нагрузку, называются основными, а токи и напряжения в их цепях — основными токами и напряжениями тиристора. Кроме этого, в тиристорах могут быть дополнительные электроды, которые создаются от одной из промежуточных областей (структуры). Эти электроды, а также их токи и напряжения называются управляющими.

Со временем были разработаны приборы с пятислойной структурой *p-n-p-n-p*-диодных и триодных симметричных тиристоров с четырьмя электронно-дырочными переходами, которые могут переключаться (включаться и выключаться) как в одном, так и в другом направлении пропускания тока. Триодный симметричный тиристор включается в обоих направлениях при подаче сигнала на управляющий электрод.

В зависимости от конструктивных особенностей и свойств тиристоры классифицируются по следующим параметрам.

• Число электродов:

– *диодный тиристор* (динистор) имеет только два основных электрода — анод и катод;

– *триодный тиристор* (тринистор), кроме анода и катода, имеет управляющий электрод — управляющий вывод от одной из средней области;

– *тетродный тиристор* имеет управляющий вывод от двух средних областей;

• Управление:

– *неуправляемые* — динистор, процесс открытия неуправляем;

– *управляемые* — тринистор и тетродный тиристор, процесс открытия управляем;

• Режим работы:

– *диодный тиристор* (динистор):

проводящий, незапираемый в обратном направлении, т.е. работающий в режиме лавинного пробоя, имеет четырехслойную структуру *p-n-p-n*;

запираемый в обратном направлении, т.е. не проводящий ток при обратном смещении, имеет четырехслойную структуру;

симметричный (диак), проводящий ток в двух направлениях, имеет пятислойную структуру *n-p-n-p-n*, которая работает в каждом направлении как четырехслойная структура (симистор);

– *триодный тиристор* (тринистор):

незапираемый с управлением по катоду или аноду, при прямом смещении на управляющем электроде пропускает ток — открывается, после снятия управляющего напряжения остается в открытом состоянии, т.е. не запирается: запирание достигается уменьшением напряжения или изменением его полярности; при обратном смещении возможен ток только в режиме лавинного пробоя как в динисторе при обратном смещении в цепи управляющего электрода;

запираемый с управлением по катоду или аноду, открывает и закрывает при подаче на управляющий электрод сигналов соответствующей полярности;

– *симметричный триодный тиристор (триак),* незапираемый прибор, имеющий один или два управляющих электрода (чаще с одним управляющим электродом), при подаче сигнала на управляющий электрод включается как в прямом, так и в обратном направлении; заменяет два обычных тиристора — тринистора, включенных встречно-параллельно;

– *тетродный тиристор* — запираемый прибор, включается и выключается при изменении напряжения на управляющих электродах.

## 5.2. Условное обозначение тиристоров

В основу системы обозначений полупроводниковых тиристоров, так же как и всех полупроводниковых приборов, положено два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 5.2. Графическое обозначение тиристоров содержит: эмиттер (анод) представлен равносторонним треугольником, обозначающим полупроводниковую структуру *p*-типа, база (катод) обозначена отрезком линии к углу треугольника. Под углом 90° к базе через все элементы (база и эмиттер) проведена линия выводов базы и эмиттера.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида — буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код тиристоров, классифицирующий тиристоры по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением приводится буквенно-символическое обозначение — символы: VS1, где V — полупроводниковый прибор, S — диод, номер 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Буквенно-числовой код в системе обозначений полупроводниковых диодов, классифицирующий полупроводниковые диоды по определенным признакам в справочниках и содержащий определенную информацию о свойствах прибора, состоит из шести элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81.

*Первый элемент* (буква — для приборов широкого применения, цифра — для приборов специального применения) указывает, на основе какого исходного полупроводникового материала выполнен диод: Г или 1 — германий и его соединения, К или 2 — кремний и его соединения, А или 3 — соединения галлия, И или 4 — соединения индия.

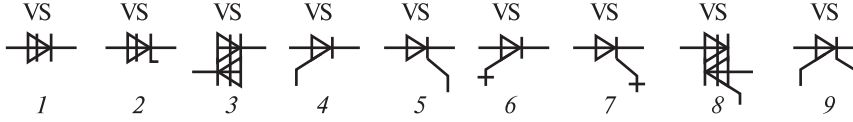



Рис. 5.2. Условное графическое обозначение тиристоров:
*1* — диодный, неуправляемый, запираемый в обратном направлении (динистор); *2* — диодный, управляемый, проводящий (незапираемый) в обратном направлении (динистор) в режиме лавинного пробоя; *3* — диодный симметричный (диак) — симистор; *4* — триодный, управляемый, незапираемый с управлением по аноду; *5* — триодный, управляемый, незапираемый с управлением по катоду; *6* — триодный, управляемый, запираемый с управлением по аноду; *7* — триодный, управляемый, незапираемый с управлением по катоду; *8* — триодный, симметричный (триак); *9* — тетродный, запираемый в обратном направлении

*Второй элемент* — буква, обозначающая подкласс или группу тиристоров: Н — диодный тиристор, У — триодный тиристор.

*Третий элемент* — цифра, определяющая основные функциональные возможности (признаки) тиристора (назначение или принцип действия).

Для обозначения наиболее характерных признаков прибора (их функциональные возможности) используются следующие цифры применительно к различным подклассам тиристоров.

Диодные тиристоры (подкласс Н):

1 — тиристоры с максимально допустимым прямым током не более 0,3 А;

2 — тиристоры с максимально допустимым прямым током от 0,3 до 10 А.

Триодные тиристоры (подкласс У):

Незапираемые:

1 — тиристоры с максимально допустимым прямым током не более 0,3 А и импульсным током до 15 А;

2 — тиристоры с максимально допустимым прямым током от 0,3 до 10 А и импульсным током от 15 до 100 А.

7 — тиристоры с максимально допустимым прямым током более 10 А и импульсным током более 100 А.

Запираемые:

3 — тиристоры с максимально допустимым прямым током не более 0,3 А и импульсным током до 15 А;

4 — тиристоры с максимально допустимым прямым током от 0,3 до 10 А и импульсным током от 15 до 100 А;

8 — тиристоры с максимально допустимым прямым током более 10 А и импульсным током более 100 А.

Симметричные:

5 — тиристоры с максимально допустимым прямым током не более 0,3 А и импульсным током до 15 А;

6 — тиристоры с максимально допустимым прямым током от 0,3 до 10 А и импульсным током от 15 до 100 А;

9 — тиристоры с максимально допустимым прямым током более 10 А и импульсным током более 100 А.

*Четвертый элемент* — число, определяющее порядковый номер разработки (двузначное число от 01 до 99 или при увеличении количества разработок — трехзначное число от 001 до 999).

*Пятый элемент* — буква, условно определяющая классификацию (разработка по параметрам) приборов, изготовленных по одной технологии. В качестве букв используются буквы русского алфавита за исключением з, о, ч, ы, ш, щ, ю, я, ь, ъ, э.

*Шестой элемент* — цифра 1—9, обозначающая модификацию с изменением конструкции и электрических параметров и показывающая деление технологического типа на группы по параметрам.

Буква С после второго элемента обозначает сборку однотипных тиристоров, соединенных или не соединенных между собой в одном корпусе.

Все основные параметры полупроводниковых диодов и их назначение приведены в справочной литературе.

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* Тиристор КУ202Е: К — кремниевый, У — триодный тиристор, 2 — незапираемый тиристор с максимально допустимым прямым током от 0,3 до 10 А и импульсным током от 15 до 100 А, 02 — порядковый номер разработки, Е — в металлостеклянном корпусе с жесткими выводами.

## 5.3. Устройство тиристора

Один из возможных вариантов устройства тиристора показан на рис. 5.3, *а*, а его схематические изображения приведены на рис. 5.3, *б* и *в*. Основой большинства тиристоров служит монокристалл полупроводника многослойной структуры типа $p_1$-$n_1$-$p_2$-$n_2$ (рис. 5.3, *б*). При этом в основном используют диффузионную и сплавную технологии. Многослойная структура чаще всего создается в кремниевых монокристаллических пластинах *n*-типа толщиной 70—600 мкм (в зависимости от типа тиристора). Вначале методом диффузии акцепторной примеси с обеих сторон пластины $n_1$ (рис. 5.3, *б*) создают транзисторную структуру типа $p_1$-$n_1$-$p_2$. Слои $p_1$ и $p_2$ имеют одинаковую толщину, но меньше по толщине, чем слой $n_1$. Затем после локальной обработки поверхности $p_2$-слоя вносят донорную примесь в $p_2$-слой для получения четвертого $n_2$-слоя, который должен быть самым тонким слоем примесного полупроводника. Готовую многослойную структуру закрепляют в кристаллодержателе *1* (рис. 5.3, *а*). Для присоединения прибора к электрической цепи создают невыпрямляющие никелевые контактные пластины *2* от слоя $p_1$ и *3* — от слоя $n_2$, к которым подсоединены ме-

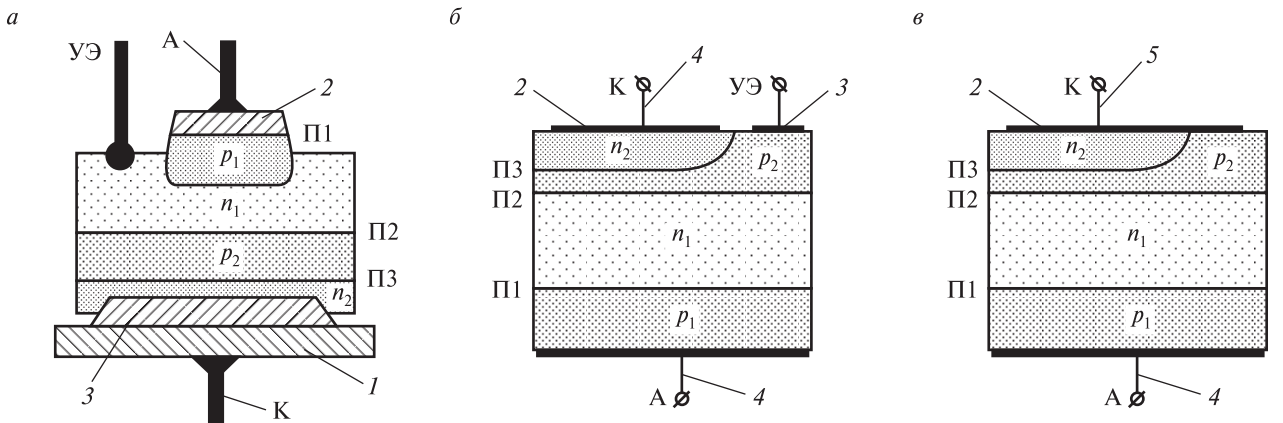



Рис. 5.3. Устройство триодного тиристора (*а*) и полупроводниковая структура триодного тиристора (*б*); полупроводниковая структура диодного тиристора (*в*):
*1* — кристаллодержатель; *2* и *3* — контактные пластины; *4* и *5* — выводы

таллические проводники — выводы, соответственно от анода *4* и от катода *5* (рис. 5.3, *б*), используемые для подсоединения прибора в схему. Металлический вывод сделан также от структуры $n_1$, выполняющий роль управляющего электрода.

Толщина слоев ($h$, мкм) и концентрация основных носителей ($N$, см$^3$) в них различны. Слои $p_1$ и $p_2$ имеют толщину примерно 50 мкм с концентрацией дырок около $10^{17}$ см$^{-3}$. Концентрация электронов в слое $n_1$, имеющем толщину около 120—150 мкм, составляет $10^{15}$ см$^{-3}$. Наружный слой $n_2$ с концентрацией электронов примерно $10^{19}$ см$^{-3}$ имеет толщину 10—12 мкм.

Таким образом, концентрация основных носителей зарядов в слоях ($N$, см$^3$) находится в соотношениях $N_{n1} < N_{p1} = N_{p2} < N_{n2}$, а толщина слоев — в соотношениях $h_{n1} > h_{p1} = h_{p2} > h_{n2}$.

По характеру внутренней структуры динисторы отличаются от транзисторов тем, что вместо трех имеют четыре слоя примесных полупроводников $p_1$-$n_1$-$p_2$-$n_2$, а симисторы пять слоев $p_1$-$n_1$-$p_2$-$n_2$-$p_3$, которые чередуются и между ними образуются три и более электронно-дырочных перехода П1, П2 и П3 (рис. 5.3).

## 5.4. Физические процессы в динисторе

Действие диодного тиристора обусловлено физическими процессами в $p$-$n$-переходах структуры $p_1$-$n_1$-$p_2$-$n_2$ и взаимодействием между этими переходами.

Подадим на тиристор напряжение ($U_{\text{а пр}}$) «плюсом» к аноду, а «минусом» к катоду (рис. 5.4). Нетрудно увидеть по направлению действия внешнего электрического поля и внутренних полей $p$-$n$-переходов, что при такой полярности включения внешнего напряжения на крайние переходы П1 и П3 действует прямое смещение, а на средний П2 — обратное смещение. Таким образом, происходит чередование переходов с прямым и обратным смещением. Из этого можно сделать вывод, что такую структуру можно представить в виде со-

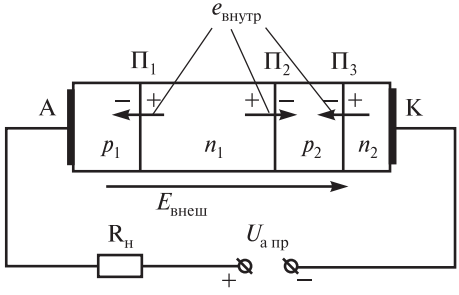



Рис. 5.4. Схема включения динистора

четания двух биполярных транзисторов типа $p_1$-$n_1$-$p_2$ и $n_1$-$p_2$-$n_2$ (рис. 5.5). Из-за того что переходы П1 и П3 находятся под прямым смещением, из крайних слоев $p_1$ и $n_2$ через эти переходы происходит инжекция основных носителей зарядов в средние слои: электронов — из $n_2$ в $p_2$ и дырок — из $p_1$ в $n_1$. Отсюда следует, что крайние слои $p_1$ и $n_2$ выполняют функции эмиттерных структур $Э_1$ и $Э_2$, а средние функции — баз $Б_1$ и $Б_2$ по аналогии с биполярным транзистором. В этом случае переходы П1 и П3 (рис. 5.4) являются эмиттерными переходами ЭП1 и ЭП2 (рис. 5.5). Переход П2 в структуре сочетания двух биполярных транзисторов (рис. 5.5), находящийся под обратным смещением, является коллекторным переходом КП для двух структур $p_1$-$n_1$-$p_2$ и $n_1$-$p_2$-$n_2$. В этом случае база $n_1$ транзистора $p_1$-$n_1$-$p_2$ является коллектором транзистора $n_1$-$p_2$-$n_2$ ($К_1$) и база $p_2$ транзистора $n_1$-$p_2$-$n_2$ является коллектором транзистора $p_1$-$n_1$-$p_2$ ($К_2$). При этом полярность напряжений на переходах соответствует той, которая требуется для работы обоих сочетающихся транзисторов в усилительном режиме: эмиттерные переходы имеют прямое смещение, а коллекторные — обратное смещение.

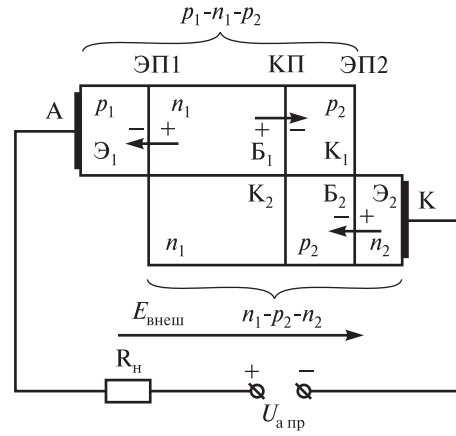



Рис. 5.5. Структура динистора, представленная в виде двух эквивалентных транзисторов

Через динистор при этом проходят два встречно направленных потока носителей зарядов: дырок — из слоя $p_1$ через базу $n_1$ в слой $p_2$, и электронов — из слоя $n_2$ через базу $p_2$ в слой $n_1$. В базах эти носители частично рекомбинируются, и в коллекторный переход (КП) входит лишь часть носителей зарядов этих потоков, определяемая коэффициентами передачи тока инжекции через базы $\alpha_1$ (базы $Б_1$) и $\alpha_2$ (базы $Б_2$), которые экстрагируют в коллекторном переходе. Так как два потока зарядов направлены встречно, то общий ток в структуре тиристора в этом случае равен сумме электронной и дырочной составляющих.

Следует отметить, что через переходы ЭП1 и ЭП2, кроме потоков, инжектируемых в базы основных носителей, будут проходить также встречные потоки неосновных носителей зарядов: электронов — из базы $n_1$ в эмиттер $p_1$ и дырок — из слоя $p_2$ в эмиттер $n_2$. Но так как концентрация основных носителей зарядов в эмиттерных слоях в сотни раз выше концентрации основных носителей в базах ($N_{n1} < N_{p1}$ и $N_{p2} < N_{n2}$), эти встречные потоки настолько малы, что ими можно пренебречь (на рис. 5.6 не показаны).

Таким образом, в транзисторной структуре $p_1$-$n_1$-$p_2$ с коэффициентом передачи $\alpha_1$ в эмиттерном переходе $p_1$-$n_1$ протекает ток $I_{Э1}$, а в транзисторной структуре $n_1$-$p_2$-$n_2$ с коэффициентом передачи $\alpha_2$ протекает ток $I_{Э2}$. Учитывая, что не все инжектируемые носители зарядов в базовые структуры достигают коллекторного перехода, эмиттерные токи в базах разделяются на составляющие. Составляющие эмиттерного тока $I_{Э1}$: $I_{Б1} = (1 - \alpha_1)I_{Э1}$ — ток базы $Б_1$ и $I_{К1} = \alpha_1 I_{Э1}$ — ток коллекторного перехода транзистора структуры

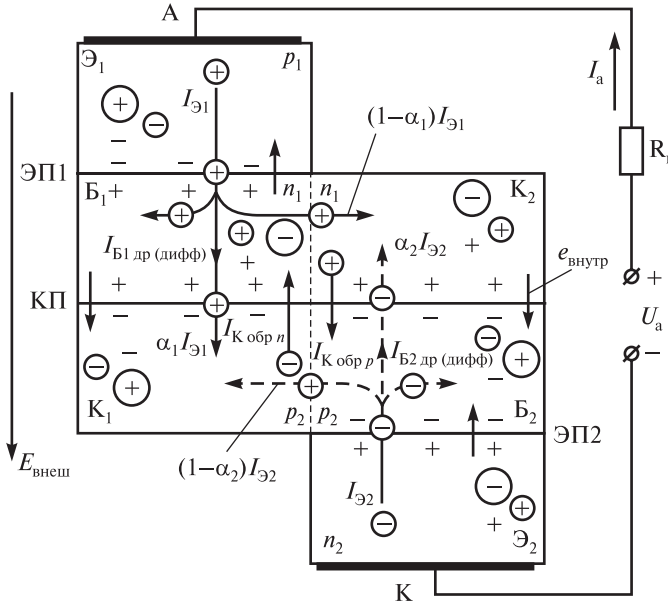



Рис. 5.6. Составляющие токов в динисторе при прямом смещении эмиттерных переходов в эквивалентной схеме в виде двух транзисторов

$p_1$-$n_1$-$p_2$, а составляющие эмиттерного тока $I_{Э2}$: $I_{Б2} = (1 - \alpha_2)I_{Э2}$ — ток базы $Б_2$ и $I_{К2} = \alpha_2 I_{Э2}$ — ток коллекторного перехода транзистора структуры $n_1$-$p_2$-$n_2$. Токи транзистора $p_1$-$n_1$-$p_2$ обусловлены в основном движением дырок через базу $n_1$ (сплошные стрелки на рис. 5.6), а токи транзистора $n_1$-$p_2$-$n_2$ — движением электронов (штриховые стрелки на рис. 5.6). Составляющие коллекторного тока каждой из транзисторных структур и определяют ток коллекторного перехода $\alpha_1 I_{Э1}$ и $\alpha_2 I_{Э2}$, однако, кроме составляющих тока, создаваемого инжектируемыми носителями зарядов, через коллекторный переход КП проходит также ток $I_{К0}$ неосновных носителей, представляющий собой обратный ток $p$-$n$-перехода при обратном смещении. Тепловой ток $I_{К0}$ состоит из электронной ($I_{К0n}$) и дырочной ($I_{К0p}$) составляющих обратного тока коллекторного перехода в результате процесса дрейфа неосновных носителей зарядов под действием внутреннего поля потенциального барьера коллекторного перехода. Электронная составляющая $I_{К\,обр\,n}$ создана дрейфом электронов из $p_2$-области в $n_1$-область, а дырочная составляющая $I_{К\,обр\,p}$ создана дрейфом дырок из $n_1$-области в $p_2$-область, и суммарный ток равен $\overline{I}_{К\,обр} = \overline{I}_{К\,обр\,n} + \overline{I}_{К\,обр\,p}$.

В результате суммарный коллекторный ток, проходящий через коллекторный переход, равен

$$I_К = \alpha_1 I_{Э1} + \alpha_2 I_{Э2} + I_{К\,обр}.$$

Так как рассматриваемый участок структуры динистора не имеет разветвлений, то токи в любом его сечении, т.е. токи каждого перехода, должны быть равны току $I_а$ во внешней цепи

$$I_а = I_{Э1} = I_{Э2} = I_К,$$

следовательно,

$$I_а = \alpha_1 I_{Э1} + \alpha_2 I_{Э2} + I_{К\,обр}$$

или

$$I_а = I_{К\,обр}/[1-(\alpha_1-\alpha_2)].$$

Следует отметить, что электронная составляющая тока основных носителе $\alpha_2 I_{Э2}$ в эмиттерном переходе ЭП2 существенно больше дырочной составляющей $\alpha_1 I_{Э1}$ в эмиттерном переходе ЭП1. Это объясняется тем, что подвижность электронов выше, так как дви-

жение электронов реально, а подвижность дырок ниже, так как движение дырок фиктивно. В результате коэффициент передачи эмиттерного тока $\alpha_2$ больше, чем $\alpha_1$. Кроме того, вероятность рекомбинации носителей зарядов в широкой базе $n_1$ выше, чем в базе $p_2$. В связи с этим $n_1$-базу часто называют толстой базой, а $p_2$-базу — тонкой.

В соответствии с приведенными выше рассуждениями работу тиристора можно рассматривать, используя положения и выводы из теории работы биполярного транзистора.

Рассмотрим процессы, происходящие при подключении к динистору внешнего напряжения — к аноду $p_1$ — «плюс», а к катоду $n_2$ — «минус». При этом на эмиттерные переходы будет подано прямое смещение, а коллекторный переход — обратное смещение.

1. Под действием прямого смещения, приложенного к эмиттерным переходам, потенциальный барьер разрушается и происходит инжекция основных носителей зарядов из эмиттеров $p_1$ и $n_2$ (рис. 5.6). В структуре транзистора $n_2$-$p_2$-$n_1$ электроны из эмиттера $n_2$ инжектируют в базу $p_2$, где становятся неосновными носителями зарядов, а в структуре $p_1$-$n_1$-$p_2$ инжектируют дырки и через эти переходы протекают токи инжекции $I_{Э2}$ и $I_{Э1}$.

2. Под действием диффузии или дрейфа заряды, инжектированные в базовые области, перемещаются к коллекторным переходам, создавая диффузионный или дрейфовый токи баз ($I_{Б\ дрейф}$ или $I_{Б\ дифф}$). Небольшая часть носителей зарядов на этом пути в базе рекомбинируется.

3. В коллекторном переходе неосновные носители зарядов базовых областей (в основном инжектированные из эмиттеров) ускоряются совместным действием внутреннего поля перехода и внешнего смещения и экстрагируют в коллектор. Электроны экстрагируют из области $p_2$ в область $n_1$, а дырки экстрагируют из $n_1$-области в $p_2$, создавая токи экстракции в коллекторном переходе $I_{К1}$ и $I_{К2}$.

4. Экстрагируемые электроны из $p_2$-области в $n_1$-область являются в области $n_1$ основными носителями зарядов, которых в области $n_1$ становится избыточное число, что затрудняет их дальнейший проход к эмиттерному переходу ЭП1, и электроны скапливаются в потенциальном барьере коллекторного перехода в структуре $n_1$. Невозможность свободного прохода электронов от коллекторного перехода к эмиттерному переходу ЭП1 в базовой области Б1 объяс-

няется тем, что ширина базовой области Б1 в тиристорной структуре значительно больше диффузионной длины свободного пробега электрона, в отличие от толщины базы в биполярных транзисторах, а также по закону Кулона — одноименные заряды отталкиваются. Экстрагированные электроны из $p_2$-области в $n_1$-область являются основными зарядами (электронами) $n_1$-области одноименными зарядами. Электроны $n_1$-области, как основные заряды, отталкивают экстрагированные электроны из $p_2$-области, заставляя их оставаться и скапливаться в потенциальном барьере коллекторного перехода со стороны слоя $n_1$. Аналогично можно рассмотреть такой же процесс скопления фиктивно подвижных дырок в потенциальном барьере коллекторного перехода в структуре $p_2$.

Таким образом, в коллекторном переходе на границе двух областей $n_1$ и $p_2$ в каждой из структур $n_1$ и $p_2$ происходит скопление разноименных зарядов. В $n_1$-области находятся неподвижные положительные ионы потенциального барьера и экстрагированные отрицательные подвижные электроны, а в $p_2$-области неподвижные отрицательные ионы потенциального барьера и экстрагированные фиктивно подвижные положительные ионы (дырки). По закону Кулона разноименные заряды притягиваются, и происходит точечная компенсация зарядов потенциального барьера, снижающая напряженность внутреннего электрического поля коллекторного перехода.

*Необходимо напомнить, что в потенциальном барьере не может происходить рекомбинация, например, электронов, так как в неподвижных ионах, образующих потенциальный барьер, все парные ковалентные связи заполнены.*

Таким образом, можно говорить о частичном разрушении потенциального барьера в коллекторном переходе.

5. При дальнейшем увеличении внешнего напряжения возрастает прямое смещение на эмиттерных переходах и большее число подвижных носителей зарядов переходит к коллекторному переходу и в структуре динистора наступает регенеративный процесс и лавинное умножение числа носителей зарядов в базовых структурах. Это способствует полному разрушению потенциального барьера коллекторного перехода и резкому возрастанию тока и резкому падению сопротивления динистора и динистор открывается, начинается перераспределение напряжения внешнего источника на элементах электрической цепи.

## 5.5. Вольт-амперная характеристика динистора

Вольт-амперная характеристика динистора представляет собой зависимость результирующего анодного тока $I_а$ от изменения анодного напряжения, приложенного между анодом и катодом $I_а = \varphi(U_а)$ (рис. 5.7).

Рассмотрим вольт-амперную характеристику динистора при прямом смещении эмиттерных переходов, когда к аноду подключен «плюс» напряжения $U_а$, а к катоду — «минус», т.е. $I_{а\,пр} = \varphi(U_{а\,пр})$. Схема для снятия вольт-амперной характеристики динистора показана на рис. 5.7.

На участке характеристики $0A$ (рис. 5.8), соответствующем малым значениям напряжения $U_а$, результирующий ток $I_а$ мал. Коэффициенты $\alpha_1$ и $\alpha_2$ близки к нулю. Близки к нулю составляющие токов $\alpha_1 I_{Э1}$ и $\alpha_2 I_{Э2}$ коллекторного перехода. В этом режиме динистор можно считать закрытым. Это объясняется тем, что коллекторный переход КП находится под малым внешним напряжением обратного смещения и имеет большое сопротивление. На сопротивление коллекторного перехода КП влияют два взаимно противоположных процесса. С одной стороны, повышение внешнего напряжения $U_{А\,пр}$, действующего как обратное смещение на коллекторный переход, увеличивает его сопротивление, так как под влиянием обратного смещения расширяется потенциальный барьер. Но, с другой стороны, повышение внешнего напряжения усиливает прямое смещение на эмиттерных переходах ЭП1 и ЭП2 (см. рис. 5.6) и процесс инжекции зарядов, которые подходят к коллекторному переходу и частично экстрагируют в нем. В результате экстракции происходит частичная точечная компенсация неподвижных зарядов потенци-

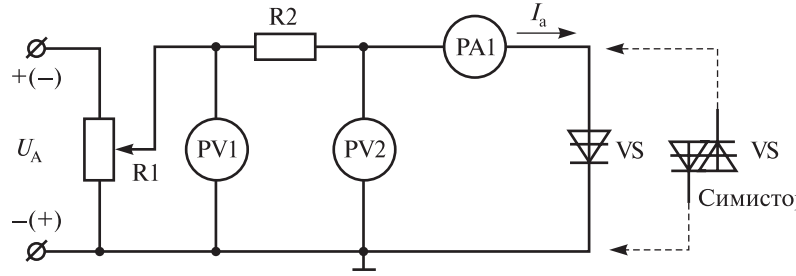



Рис. 5.7. Схема для снятия вольт-амперной характеристики динистора

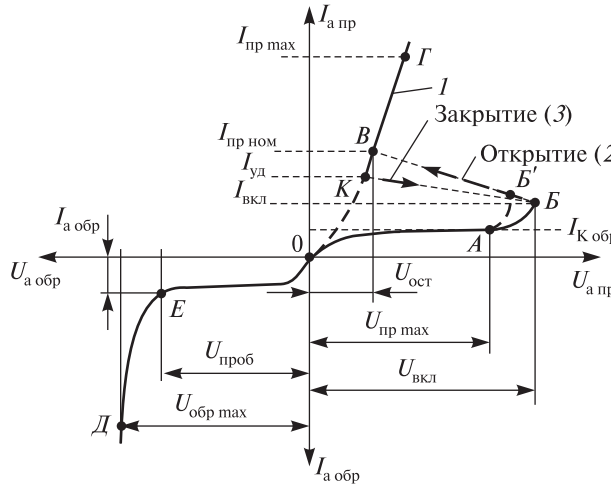



Рис. 5.8. Вольт-амперная характеристика динистора

ального барьера коллекторного перехода, т.е. частично сужается потенциальный барьер и уменьшается его сопротивление.

На участке 0*A* вольтамперной характеристики до точки *A* преобладает первый процесс, который практически отражает зависимость обратного (теплового) тока коллекторного перехода $I_{К\,обр}$ от напряжения обратного смещения на этом переходе и напоминает вольт-амперную характеристику полупроводникового диода при обратном смещении, т.е. тепловой ток $I_{К\,обр}$, созданный за счет движения неосновных носителей зарядов, которых в базе очень мало. Ток $I_{К\,обр}$ мал и практически постоянный. Действительно, небольшое число зарядов под действием малого напряжения $U_{А\,пр}$ подходит к эмиттерным переходам, где часть их расходуется на разрушение потенциальных барьеров в переходах ЭП1 и ЭП2 и оставшаяся часть зарядов инжектирует в базы, где они в основном рекомбинируются в структурах баз $Б_1$ и $Б_2$ (см. рис. 5.6). Таким образом, зарядов, перемещенных к коллекторному переходу, мало, их число практически равно нулю, а экстракция в коллекторном переходе происходит в основном за счет неосновных носителей зарядов собственной структуры базовых областей. Это доказывает, что в базы нет притока неосновных носителей и в коллекторном *p*-*n*-переходе течет слабый ток неосновных носителей.

Дальнейшее повышение напряжения $U_A$ свыше $U_{пр\ max}$ приведет к усилению процесса инжекции в переходах ЭП1 и ЭП2 и слабому повышению тока (участок *АБ* на рис. 5.8) в коллекторном переходе, следовательно, и в динисторе. Нарастание тока объясняется взаимным влиянием эмиттерных переходов на коллекторный переход, которое ведет к лавинному умножению носителей зарядов возле коллекторного перехода за счет повышения коэффициентов $\alpha_1$ и $\alpha_2$. С некоторого значения тока динистора $I_a$ увеличиваются составляющие токов $\alpha_1 I_{Э1}$ и $\alpha_2 I_{Э2}$, протекающие через коллекторный переход. Из-за того, что повышение напряжения $U_a$ приводит к увеличению коллекторного тока $I_K$, а также составляющих $\alpha_1 I_{Э1}$ и $\alpha_2 I_{Э2}$, на вольт-амперной характеристике появляется участок *АБ* с более сильной зависимостью тока $I_a$ от $U_a$.

Ток $I_a$ определяется по формуле

$$I_a = I_{K\,обр}/[1 - (\alpha_1 - \alpha_2)],$$

по которой можно подтвердить стабильность тока $I_a$ на участках $0A$ и возрастание тока на участке *АБ* вольт-амперной характеристики. При малых значениях напряжения $U_a$ (участок $0A$) сумма коэффициентов $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 0$, а ток динистора $I_a \approx I_{K\,обр}$. На участке *АБ* ток $I_a$ возрастает за счет увеличения тока $I_{K\,обр}$ и суммы $\alpha_1 + \alpha_2 > 0$, которая, однако, не достигает единицы на этом участке.

Точка Б является граничной, в которой создаются условия для отпирания тиристора. Напряжение на динисторе в точке Б называется напряжением включения $U_{вкл}$. Около точки Б при некотором напряжении (десятки или сотни вольт), называемым напряжением включения $U_{вкл}$, влияние обоих процессов уравновешивается, но преобладает второй процесс. Если теперь незначительно увеличить внешнее напряжение $U > U_{вкл}$, то это вызовет увеличение потока экстрагируемых электронов в базу $n_1$ и дырок в базу $p_2$ (см. рис. 5.6) и соответственно появлению в потенциальном барьере коллекторного перехода избыточных носителей заряда, снижающих потенциальный барьер коллекторного перехода. Все три перехода оказываются под прямым смещением. Одновременно с этим снижаются потенциальные барьеры эмиттерных переходов ЭП1 и ЭП2, вызывая дополнительную инжекцию носителей зарядов. Это приводит к еще большему возрастанию коэффициентов передачи тока и их суммы $\alpha_1 + \alpha_2$ и увеличению в коллекторном переходе

концентрации носителей зарядов, что приводит к ударной генерации и генерации пар носителей зарядов. Благодаря увеличению числа носителей зарядов и отсутствию потенциальных барьеров ток резко, скачком, возрастает (участок *БВ* на рис. 5.8).

Отсутствие потенциальных барьеров уменьшает общее дифференциальное сопротивление динистора, что обеспечивает еще большее прямое смещение эмиттерных переходов ЭП1 и ЭП2 (см. рис. 5.6) и инжекцию носителей зарядов в них. Это в свою очередь приводит к еще большему возрастанию тока и уменьшению сопротивления (точка *В*), что соответствует открытому состоянию тиристора (участок *2* на рис. 5.8). В точке В падение напряжения на коллекторном переходе равно нулю, ток $I_{\text{К обр}} = 0$, сумма коэффициентов $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, а ток через переход КП равен сумме составляющих токов $\alpha_1 I_{Э1}$ и $\alpha_2 I_{Э2}$.

В результате устанавливается режим, напоминающий режим насыщения транзистора, — большой ток при малом падении напряжения на динисторе. Ток в этом режиме, когда прибор открыт, определяется главным образом сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$, включенной последовательно с динистором. В открытом состоянии зависимость $I_{\text{а пр}} = \varphi(U_{\text{а пр}})$ в динисторе подобна вольт-амперной характеристике обычных диодов, снятой при прямом смещении. В связи с этим можно сделать вывод о малом сопротивлении динистора при открытии. Полное падение напряжения на тиристоре в открытом состоянии складывается из падений напряжения на трех переходах, находящихся под прямым смещением, и падения напряжения на четырех структурах тиристора $p_1$-$n_1$-$p_2$-$n_2$. Так как каждое из этих напряжений обычно не превышает десятых долей вольта, остаточное падение напряжения на самом динисторе $U_{\text{ост}}$ в открытом состоянии при заданном токе нагрузки составляет 1-2 В. Наибольшая часть напряжения внешнего источника оказывается приложенной к нагрузке, включаемой последовательно с динистором.

Дальнейшее увеличение внешнего напряжения $U_{\text{а}}$ приводит к возрастанию тока через динистор (участок *ВГ*), что обусловлено увеличением коэффициентов передачи тока, а также их суммы ($\alpha_1 + \alpha_2 > 1$). В этом случае коллекторный переход под действием избыточных зарядов, создаваемых потоками носителей зарядов в структурах составляющих транзисторов $p_1$-$n_1$-$p_2$ и $n_1$-$p_2$-$n_2$, переводится в

проводящее состояние, обеспечивая встречную инжекцию носителей зарядов и ток $I_{К\,обр}$ теперь уже не является обратным током коллекторного перехода. Поскольку падения напряжения на переходах ЭП1 и ЭП2 (см. рис. 5.6) противоположны по знаку падению напряжения на переходе КП, общее падение напряжения определяется по падению напряжения на коллекторном переходе (как в диоде). Некоторое увеличение падения напряжения на динисторе от точки *В* до точки *Г* объясняется нестабильностью дифференциальных сопротивлений переходов и слоев структур тиристора. Нестабильность дифференциальных сопротивлений переходов объясняется частичным восстановлением потенциальных барьеров в переходах при движении через них зарядов, а сопротивления слоев структур повышается за счет увеличения в них концентрации носителей зарядов и в связи с этим уменьшения их подвижности.

При номинальном токе $I_{пр\,ном}$ тиристор может находиться в устойчивом открытом состоянии. При уменьшении тока ниже номинального значения (участок *ВК*) тиристор переходит в неустойчивое открытое состояние.

В неустойчивом состоянии динистор может находиться при изменении тока от номинального значения ($I_{пр\,ном}$) до значения тока удержания ($I_{уд}$), и любое изменение внешних факторов может перевести его в закрытое или открытое состояние.

Если ток открытого динистора уменьшить ниже значения $I_{уд}$, произойдет скачок в закрытое состояние (участок *КБ*).

Диодный тиристор характеризуется максимально допустимым значением прямого тока $I_{пр\,max}$ (точка *Г*), при котором возникнет устойчивый режим (*1*) работы, и на динисторе будет небольшое падение напряжения.

Для перевода динистора из открытого состояния в закрытое необходимо временно снять внешнее напряжение $U_А$ или уменьшить ток через динистор, увеличив сопротивление во внешней цепи. В этом случае ток снизится до величины $I_а \le I_{уд}$ (точка *К*), в тиристоре вновь восстанавливается потенциальный барьер коллекторного перехода КП и динистор закроется (участок *3*).

Из вышеизложенного видно, что динистор переходит из закрытого состояния в открытое, если приложенное к нему анодное напряжение прямого смещения превышает напряжение включения, т.е. при $U_{а\,пр} \ge U_{вкл}$.

При изготовлении динисторов стремятся создать такую четырехслойную структуру, в которой скачкообразный переход на участке *БВ* вольт-амперной характеристики был бы как можно круче, т.е. разность значений напряжения в точках *А* (напряжение начала разрушения (открытие) потенциального барьера коллекторного перехода $U_{от}$) и *Б* (напряжение полного разрушения (включения) потенциального барьера коллекторного перехода $U_{вкл}$) была приблизительно равна нулю ($U_{от} - U_{вкл} \approx 0$). При этом получается так называемая жесткая вольт-амперная характеристика, для которой характерно то, что снижен коэффициент передачи тока ($\alpha$) в одном из эмиттерных переходов, а сумма $\alpha_1 + \alpha_2$ лишь ненамного превышает единицу. Жесткую характеристику динистора можно получить в структуре, где часть носителей зарядов может обтекать эмиттерный переход, т.е. поступать в область базы непосредственно от источника внешнего напряжения. Это достигается методом частичного шунтирования эмиттерного перехода металлической контактной пластиной токоотвода. На рис. 5.3, *в*, показана структура динистора, в которой $p_2$- и $n_2$-слои зашунтированы контактной пластиной токоотвода вывода А. В такой структуре при подключении напряжения $U_a$ «плюсом» к аноду, а «минусом» к катоду часть электронов будет непосредственно поступать в $p_1$-слой, исключая переход *1*. При этом уменьшится коэффициент $\alpha_1$ приблизительно до значения 0,1—0,2, что не создаст значительного увеличения суммы коэффициентов передачи больше единицы и позволит выполнить условие $\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1$.

Рассмотрим теперь обратную ветвь вольт-амперной характеристики тиристора при обратном смещении эмиттерных переходов и прямом смещении коллекторного перехода $I_{обр} = \varphi(U_{а\ обр})$ (рис. 5.9), снятую по схеме, показанной на рис. 5.7, при полярности напряжения $U_a$, показанной в скобках. При таком включении внешнего напряжения в коллекторном переходе по-

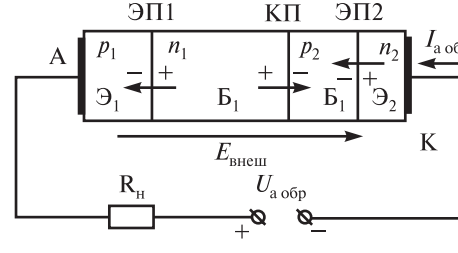



Рис. 5.9. Включение динистора при обратном смещении эмиттерных переходов и прямом смещении коллекторного перехода

тенциальный барьер разрушается и все напряжение распределяется по эмиттерным переходам ЭП1 и ЭП2 (см. рис. 5.6).

Ток динистора обусловлен процессами экстракции неосновных носителей зарядов в переходах ЭП1 и ЭП2. Значение тока очень мало и ток аналогичен протеканию обратного тока в диоде (участок $0E$ на рис. 5.8). Это объясняется числом основных носителей зарядов в базовых областях, влияющих на процесс инжекции в коллекторном переходе. В базовых областях $Б_1$ и $Б_2$ число основных носителей, поступивших в результате экстракции из эмиттеров $Э_1$ и $Э_2$, мало, а собственная концентрация носителей зарядов в базах также мала. В результате инжекционный процесс в коллекторном переходе очень слабый.

Если напряжение $U_{а\ обр}$ достигнет напряжения пробоя $U_{проб}$ (точка $E$ на рис. 5.8), начинается лавинный пробой переходов ЭП1 и ЭП2, ток динистора резко возрастает (участок *ЕД*). При обратном смещении большем, чем напряжение в точке *Д* ($U_{а\ обр} \geq U_{обр\ max}$) развивается процесс термогенерации и может наступить необратимый процесс теплового пробоя. Режим обратного смещения для обычных динисторов недопустим, но используется в специальных управляемых динисторах, не запираемых в обратном направлении. Такие динисторы могут пропускать ток в обратном направлении, но не обладают низким сопротивлением, как это происходило бы при прямом смещении. Другой вид специальных динисторов — симметричные динисторы (диаки). Эти приборы способны переключаться как в прямом, так и в обратном направлениях.

Динисторам присущи два недостатка. Они реализуют переключение тока нагрузки только в одном направлении, это ограничивает их применение в цепях управления переменного напряжения. Напряжение включения нерегулируемо. Первый недостаток устранен в симметричном динисторе, а второй — в триодных тиристорах.

## 5.6. Симметричный диодный тиристор (диак-симистор)

Динисторы, рассмотренные выше, могут коммутировать токи, протекающие лишь в одном направлении. Кроме таких однонаправленных приборов, имеются также двунаправленные полупроводниковые приборы, основанные на многослойных электронно-дырочных структурах. При воздействии напряжений различной полярности прибор способен переключаться как в прямом, так и в обрат-

ном направлении. При каждом направлении включения внешнего напряжения такие приборы могут находиться в двух устойчивых состояниях — запертом (с высоким внутренним сопротивлением) и открытом (с малым внутреннем сопротивлением). Таким образом, при любой полярности внешнего напряжения выполняются условия, соответствующие прямой ветви вольт-амперной характеристики любого тиристора (динистора). Такие приборы называются симисторами (симметричные динисторы).

Симистор (рис. 5.10, *а*) представляет собой пятислойную *n-p-n-p-n*-структуру с четырьмя *p-n*-переходами, причем области $n_1$ и $p_1$ подключены к аноду, а области $p_2$ и $n_3$ — катоду с помощью контактирующих пластин, т.е. применен метод частичного шунтирования по аналогии с динистором. Пятислойную структуру симметричного тиристора (симистора) можно представить как две совмещенные структуры динистора VS1 и VS2, включенные параллельно (рис. 5.10, *б*). Рассматривая токопрохождение в этих структурах при полярности напряжения $U_a$, показанной в скобках на рис. 5.10, *а*, видим, что работает (включается) левая половина прибора (направление движения электронов показано стрелкой). При изменении полярности напряжения, (полярность напряжения $U_a$ без скобок) движение электронов осуществляется через правую половину прибора. Таким образом, для левой половины прибора эмиттерными переходами являются переходы *1* и *3*, а коллектор-

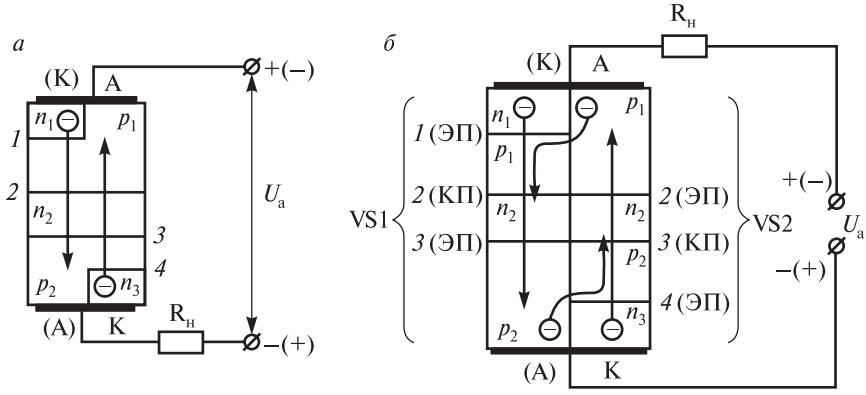



Рис. 5.10. Симметричный тиристор (симистор):
*а* — структура симистора; *б* — замена симистора двумя динисторами

ным — переход *2*. Для правой половины эмиттерными переходами являются переходы *4* и *2*, а коллекторным — переход *3*.

При работе левой половины симистора эмиттерный переход *4* правой структуры не работает, как и переход *1* при работе правой структуры симистора. Структура тиристора, показанная на рис. 5.10, позволяет частично зашунтировать эмиттерные переходы *1* и *4* контактирующими пластинами, подключаемыми непосредственно к областям: пластина анода — к $n_1$ и $p_1$, пластина катода — к $n_3$ и $p_2$. Это позволяет снизить коэффициент инжекции (около 0,1-0,2) в эмиттерных переходах, которые участвуют в токопрохождении при соответствующей полярности внешнего напряжения, и уменьшить напряжение включения симистора $U_a$. Такой метод называется методом шунтирования.

При подключении напряжения $U_A$ полярностью, показанной без скобок, переходы *2* и *4* находятся под прямым смещением, а *1* и *3* — под обратным смещением. Однако переход *1*, находящийся под обратным смещением, зашунтирован контактной пластиной анодного вывода и не оказывает никакого влияния. Поэтому практически весь ток проходит через структуру $p_1$-$n_2$-$p_2$-$n_3$, которая, как четырехслойная структура динистора, открывается в направлении от анода к катоду (от $p_1$ к $n_3$). Если напряжение $U_A$ мало, через структуру протекает небольшой ток. Основная часть тока течет параллельно переходу *4*, стремясь достичь вывода катода по пути наименьшего сопротивления в обход перехода *4*, несмотря на то, что и переход практически имеет малое сопротивление при прямом смещении.

Таким образом, из-за частичного шунтирования перехода *4*, находящегося под напряжением прямого смещения, бóльшая часть зарядов (электронов) непосредственно поступает в область $p_2$ от катода, огибая переход *4*, и тем самым исключает частично проход зарядов (электронов) через переход *4*, что ускоряет начало процесса экстракции в переходе *3*. В результате ускоряется процесс накопления зарядов возле перехода *3*, а следовательно, усиливается ударная генерация (участок *АБ'* вольт-амперной характеристики на рис. 5.11) и открытие тиристора. Схема для снятия вольт-амперной характеристики симистора аналогична схеме для снятия вольт-амперной зависимости динистора (см. рис. 5.7), на которой вместо динистора необходимо включить симистор (показан дополнитель-

но). Характеристика симистора при шунтировании имеет более жесткий (крутой) вид участка *АБ′* на рис. 5.11, чем аналогичный участок *АБ* на рис. 5.11 (показан штрихами) без шунтирования, что также показано на рис. 5.8 для динистора. В остальном в структуре симистора будут наблюдаться те же процессы, что и в структуре динистора.

При противоположной полярности напряжения $U_A$, приложенного между анодом и катодом (полярность показана в скобках на рис. 5.10), происходит включение структуры $p_2$-$n_2$-$p_1$-$n_1$.

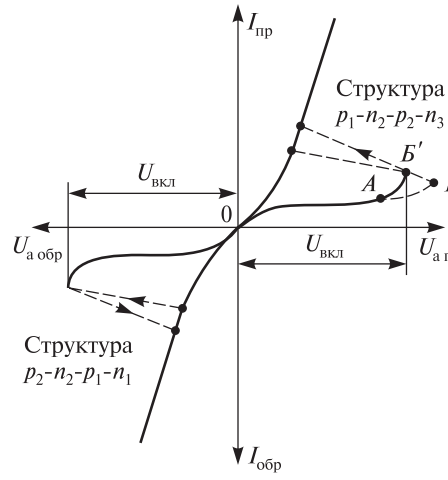



Рис. 5.11. Вольт-амперная характеристика симистора

Вольт-амперная характеристика симисторов представляет собой две почти симметричные (относительно начала координат) ветви, аналогичные прямой ветви динистора (рис. 5.11). Таким образом, анод и катод в такой структуре не имеют физического смысла.

## 5.7. Триодный тиристор (тринистор)

Существенным недостатком динисторов является невозможность перевода их в открытое состояние при анодном напряжении, меньшем напряжения включения $U_а < U_{вкл}$, которое должно быть очень большим. Значительно лучшими схемными возможностями обладают тиристоры, в которых имеется, в отличие от динисторов, третий — управляющий электрод. В качестве управляющего электрода используют вывод от одной из баз, обычно от самой тонкой базы структуры *p*-типа, хотя создаются конструкции с управляющим электродом и от базы структуры *n*-типа. Такие тиристоры являются трехэлектродными и называются тринисторами. Таким образом, в тринисторах увеличение общего тока достигается за счет увеличения тока только в одной из эквивалентных структур составляющих транзисторов путем подачи дополнительного управляющего напряжения $U_у$ на один из эмиттерных переходов.

Управляющее напряжение может быть включено между управляющим электродом и анодом, или управляющим электродом и катодом и создавать дополнительное прямое смещение на эмиттерном переходе. Тринисторы с инжектирующим управляющим электродом *p*-типа называются тиристорами с управлением по катоду, а тиристоры с инжектирующим управляющим электродом *n*-типа — тиристорами с управлением по аноду.

Рассмотрим работу триодного тиристора по схеме с управлением по катоду (рис. 5.12, *а*). В этой структуре в качестве управляющего электрода используется переход ЭП2, в котором наибольшая концентрация носителей зарядов в областях $p_2$ и $n_2$ по сравнению с областями $p_1$ и $n_1$ перехода ЭП1, следовательно, и наименьшая ширина потенциального барьера. Эта особенность потенциального барьера позволяет управлять включением тринистора напряжением управления $U_у$, которое меньше, чем при управлении по аноду через переход ЭП1.

Так как в тринисторах напряжением включения управляют дополнительным напряжением прямого смещения на один из эмиттерных переходов (в рассматриваемом примере с управлением по катоду), то и процессы, происходящие в тринисторах при прямом смещении переходов ЭП1 и ЭП2, будем рассматривать при различных значениях управляющего напряжения ($U_у = 0$ и $U_у > 0$), при которых управляющий ток $I_у = 0$ и $I_у > 0$ соответственно. Схема для снятия вольт-амперной характеристики тринистора показана рис. 5.13. Процессы, происходящие в тринисторе, описываются зависимостью $I_{а\,пр} = \varphi(U_{а\,пр})$ при $I_у = \text{const}$ на вольт-амперной характеристике (рис. 5.14).

При управляющем напряжении, равном нулю ($U_у = 0$), и токе управляющего электрода $I_у = 0$ тринистор может работать в режиме динистора при наличии напряжения $U_а$, и прямая ветвь характеристики совпадает с вольт-амперной характеристикой аналогичного динистора при $U_у = 0$ (рис. 5.14).

Если напряжение управления больше нуля ($U_у > 0$), в работу тринистора добавляются прямое смещение перехода ЭП2 и ток инжекции в цепи управления перехода ЭП2, т.е. управляющий ток $I_у > 0$. В результате ток в переходе ЭП2 состоит из составляющих $I_{Э2}$ и $I_у$. Из соотношения составляющих катодного тока для динистора ($I_а = I_{Э1} = I_{Э2} = I_К$), которое справедливо и для тринистора,

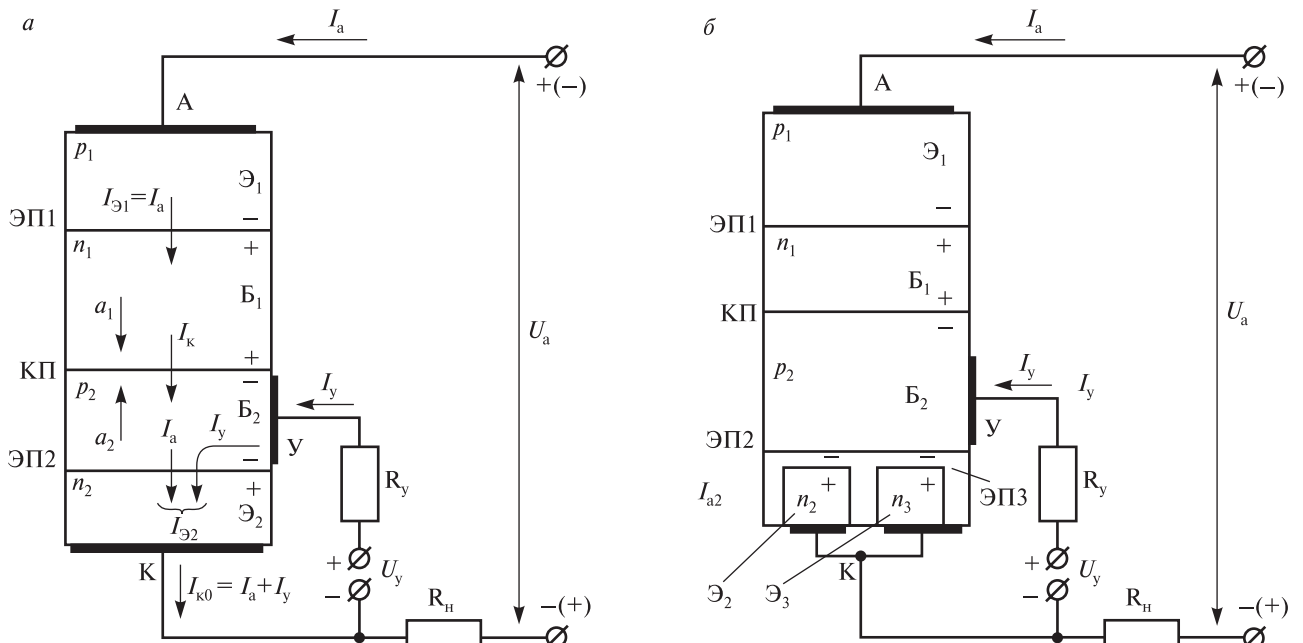



Рис. 5.12. Структура и токопрохождение в тринисторе при управлении по катоду (*а*) и структура тринистора при упралении по катоду с жесткой ВАХ (*б*)

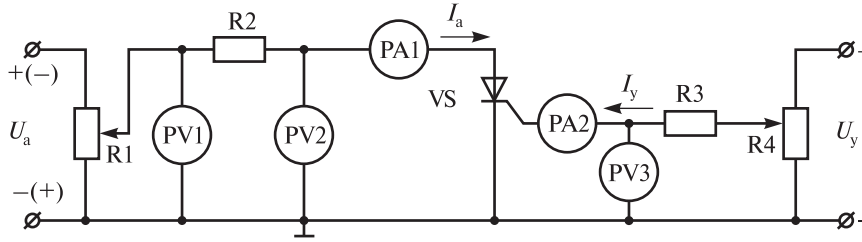



Рис. 5.13. Схема для снятия вольт-амперной характеристики тиристора

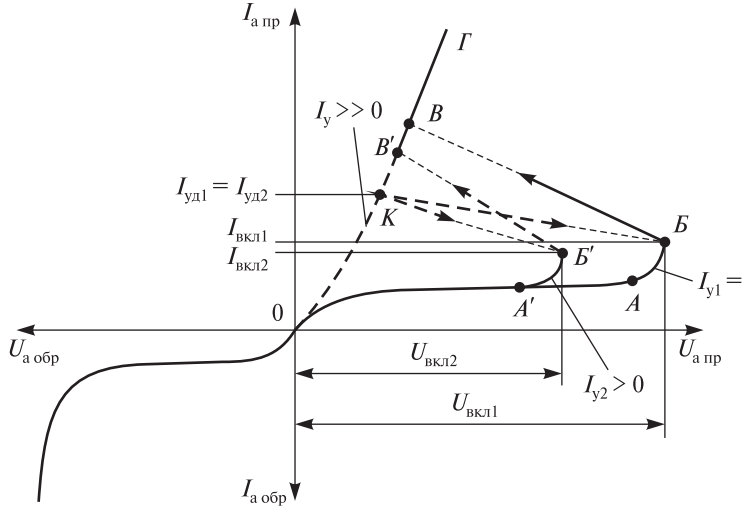



Рис. 5.14. Вольт-амперная характеристика тринистора

определяем ток коллекторного перехода, учитывая, что в составляющую тока $I_{Э2}$ будет входить $I_y$, поэтому $I_{Э2} = I_a + I_y$. С учетом приведенных соотношений значение анодного тока $I_a$ будет вычисляться по формуле

$$I_a = (I_{K\,обр} + \alpha_2 I_y)/[1 - (\alpha_1 - \alpha_2)].$$

В соответствии с этой формулой ток управления приводит к более крутому нарастанию анодного тока. Это связано, во-первых, с наличием в числителе формулы составляющей $\alpha_2 I_y$ и, во-вторых,

с тем, что при дополнительном прямом смещении управляющим напряжением на переходе ЭП2 ускоряется инжекция электронов из эмиттера $n_2$ в базу $p_2$, растет коэффициент передачи тока $\alpha_2$ из-за возрастания тока $I_{Э2}$ на величину тока управления и тем самым ускоряется процесс разрушения потенциального барьера коллекторного перехода. При этом в базе $p_2$ увеличивается число электронов — неосновных носителей зарядов, которые под действием анодного напряжения $U_a$ экстрагируют в базу $n_1$.

Приток дополнительных электронов через переход КП в базу $n_1$ ускоряет процесс снижения потенциального барьера перехода ЭП1, компенсируя неподвижные положительные ионы в приконтактном слое в области базы $n_1$ подвижными электронами. Из-за этого ускоряется инжекция дырок в переходе ЭП1 и увеличивается коэффициент передачи тока $\alpha_1$. Благодаря увеличению коэффициентов передачи тока $\alpha_1$ и $\alpha_2$ ускоряется процесс перемещения зарядов к переходу КП и снижается ширина потенциального барьера КП. Напряжение включения $U_{вкл}$ для процесса экстракции в коллекторном переходе в этом случае меньше, чем при $I_у = 0$, так как за счет усиления инжекции в переходе ЭП2 резко увеличилось число неосновных носителей зарядов в базе $p_2$ (см. рис. 5.12, *а*). В соответствии с этими рассуждениями ток управления $I_у > 0$ приводит к более крутому нарастанию анодного тока при меньшем напряжении включения ($U_{вкл2} < U_{вкл1}$) (рис. 5.14), когда во всех переходах разрушены потенциальные барьеры и течет прямой ток $I_{а\ пр}$ при $\alpha_1 + \alpha_1 \geq 1$. Из этого следует, что тринистор представляет собой управляемый ключевой прибор. Изменяя ток $I_у$, можно управлять процессом перехода тринистора из закрытого состояния в открытое. Влияние тока $I_у$ на вольт-амперную характеристику тринистора иллюстрируют участки кривых 0*АБ* и 0А′Б′ на рис. 5.14, показанные для двух значений тока управления $I_у = 0$ и $I_у > 0$. При достаточно большом значении тока управляющего электрода $I_у >> 0$, прямая ветвь вольт-амперной характеристики тиристора становится аналогичной прямой ветви вольт-амперной характеристики полупроводникового диода (рис. 5.14), когда участок закрытого состояния тринистора на прямой ветви вольт-амперной характеристики исчезает (участок 0*КВ* на рис. 5.14). Наблюдается так называемое спрямление характеристики. Значение тока $I_у$, при котором происходит спрямление характеристики, определяет ток управления спрямления $I_{у\ спр}$.

Для управления включением требуются незначительные ток и напряжение, т.е. управление производится с очень небольшой затратой мощности, но при этом в анодной цепи могут протекать токи в десятки и сотни ампер при напряжениях в тысячи вольт.

При изготовлении тринисторов так же, как и динисторов, стремятся создать структуру с жесткой вольт-амперной характеристикой. Для этого в структуре создают дополнительный инжектирующий $p$-$n$-переход для управления и так же, как и в динисторной структуре, применяют метод частичного шунтирования одного из эмиттерных переходов, у которого в базовой структуре создан дополнительный инжектирующий $p$-$n$-переход. На рис. 5.12, *б*, показана структура тиристора, в которой дополнительные $p_2$- и $n_3$-слои зашунтированы контактной пластиной токоотвода вывода К, а $n_3$-слой образует с $p_2$-слоем управляющий $n_3$-$p_2$-переход ЭП3. От $p_2$-слоя имеется вывод управляющего электрода (УЭ). В такой структуре тиристора управляющее напряжение $U_{\text{у}}$ подключается относительно катода (т.е. с управлением по катоду) для создания прямого смещения на переходах ЭП2 и ЭП3. Это способствует ускорению процесса поступления зарядов (электронов) в $p_2$-слой совместно с электронами, непосредственно поступающими в $p_2$-слой, исключая переход ЭП3. При этом принцип работы такого тринистора аналогичен принципу работы тиристора рассмотренной выше структуры.

После открытия тринистора управляющий электрод теряет свои управляющие свойства. Изменение тока $I_{\text{у}}$ не влияет на анодный ток открытого тринистора, так как его области $n_1$ и $p_2$ заполнены большим числом неосновных носителей зарядов в переходах ЭП1 и ЭП2 за счет инжекции, и в переходе КП через разрушенный потенциальный барьер происходит диффузионное перемещение этих зарядов.

Такие структуры тринисторов называются незапираемыми тринисторами. Перевод таких тринисторов в закрытое состояние происходит при уменьшении анодного тока ($I_{\text{а}} = I_{\text{а пр}}$) до значения, меньшего тока удержания ($I_{\text{а пр}} < I_{\text{уд}}$), при подаче анодного напряжения противоположной полярности включения или при размыкании цепи включения.

Запираемый тринистор может не только открываться, но и закрываться при подаче управляющего напряжения соответствующей полярности, которое называют запирающим. Запираемые тринисто-

ры отличаются от незапираемых только концентрацией носителей зарядов в примесных полупроводниковых структурах. Для запирания такого тринистора необходимо подать в цепь управляющего электрода напряжение, полярность которого противоположна полярности напряжения открытия. В этом случае эмиттерный переход окажется под обратным смещением и прекратится инжекция. Источник запирающего напряжения должен действовать в течение интервала времени, пока ток в тринисторе снизится ниже значения $I_{уд}$ ($I_{а\ пр} < I_{уд}$). Запираемые тринисторы обеспечивают отключение нагрузки.

Тринисторы, рассмотренные выше, могут коммутировать токи, протекающие лишь в одном направлении. Они называются однонаправленными. Кроме таких однонаправленных приборов имеются двунаправленные приборы, которые при напряжениях различной полярности могут переключать и пропускать ток в двух направлениях, как в симметричном динисторе. Такие приборы называются симметричными тринисторами, или управляемыми симисторами.

## 5.8. Симметричный триодный тиристор (триак)

Симметричные триодные тиристоры (триаки) — это пятислойные *n-p-n-p-n*-структуры, имеющие один или два управляющих электрода. Триак с двумя управляющими электродами имеет управляющие электроды от двух базовых областей, т.е. имеет управление и по аноду, и по катоду. Приборы с одним управляющим электродом имеют управление по катоду или по аноду. Преимущественное распространение получили приборы с одним управляющим электродом. При подаче сигнала на управляющий электрод симметричный тиристор может открываться как в прямом, так и в обратном направлении.

Структура симметричного триодного тиристора с двухполярным управлением (рис. 5.15) имеет, по сравнению с симметричным диодным тиристором (см. рис. 5.10), дополнительную область $n_4$, сформированную в слое $p_1$.

Управляющий электрод может иметь вывод и от слоя $p_1$ или от дополнительного (как было рассмотрено в триодном тиристоре (рис. 5.12, *б*) слоя $n_4$ с инжектирующим управляющим $n_4$-$p_1$-переходом. Выводы анода и катода в симметричном тиристоре смысла не имеют, так как структура одинаково включается и проводит ток

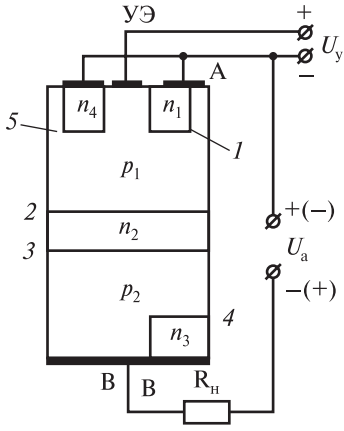



Рис. 5.15. Структура триодного тиристора (триака) с управляющим электродом от базы $p_4$-слоя с дополнительной областью $n_4$ в $p_1$-слое

в двух направлениях, поэтому выводы для подключения внешнего напряжения на многослойную структуру обозначены А и В.

Для получения жесткой (крутой) вольт-амперной характеристики чаще применяют структуру по методу шунтирования *p-n*-переходов (эмиттерных и управляющего).

На рис. 5.15 показана структура с управляющим электродом от слоя $p_1$ и шунтирующими эмиттерными переходами *1* и *4*. В такой структуре на управляющий электрод относительно вывода А должен подключаться «плюс» независимо от полярности напряжения между выводами А и В, т.е. $U_а$. При другой полярности управляющего напряжения тиристор не включается.

На рис. 5.16 показана структура с управляющим электродом от дополнительной области $n_4$ с инжектирующим *p-n*-переходом *5* и его частичным шунтированием и частичным шунтированием эмиттерных переходов *1* и *4*. В такой структуре на управляющий электрод можно подключить любой потенциал относительно вывода А при любой полярности напряжения $U_а$. Такая структура позволяет использовать тиристор в цепях переменного напряжения.

Принцип действия симметричного триодного тиристора рассмотрим на примере структуры с управляющим электродом от дополнительной области $n_4$ с инжектирующим переходом *5* и шунтированием переходов *1*, *4* и *5* (рис. 5.16).

Рассмотрим принцип действия симметричного триодного тиристора на примере структуры с управляющим электродом от дополнительной области $n_4$ с инжектирующим переходом *5* ($n_4$-$p_1$) и его шунтированием (рис. 5.16). При отсутствии управляющего напряжения $U_у$ и напряжении $U_а < U_{вкл}$ тиристор закрыт. При повышении внешнего напряжения, когда «минус» подключен к выводу В, а «плюс» к выводу А, переходы *2* и *4* находятся под прямым смещением, а переход *3* под обратным смещением, поэтому все напря-

жение приложено к переходу *3*. Переход *1* также находится под обратным смещением, но процессы в этом переходе не оказывают влияния на работу структуры тринистора, так как этот переход зашунтирован контактной пластиной от вывода А между структурой $n_1$ и структурой $p_1$ (аналогично рассмотренному выше, симметричному динистору на рис. 5.10, *а*).

В переходах *2* и *4* при $U_а < U_{вкл}$ разрушается потенциальный барьер и инжектируются заряды: в переходе *2* — электроны из $n_2$-области в $p_1$-область и дырки из $p_1$-области в $n_2$-область, и в переходе *4* — электроны из $n_3$-области в $p_2$-область и дырки из $p_2$-области в $n_3$-область. В переходе *3* происходит экстракция зарядов: электронов из $p_2$-области в $n_2$-область и дырок из $n_2$-области в $p_2$-область. Таким образом, при такой полярности внешнего напряжения $U_а$ ток должен протекать в структуре $p_1$-$n_2$-$p_2$-$n_3$, но поскольку $U_а < U_{вкл}$, число инжектирующих зарядов очень мало и соответственно мала экстракция в переходе *3*, которая соответствует протеканию малого тока, созданного неосновными носителями зарядов, т.е. теплового тока в переходе *3*. Это доказывает, что через тринисторную структуру $p_1$-$n_2$-$p_2$-$n_3$ протекает между выводами А и В небольшой ток *I* в направлении от вывода А к выводу В (участок 0А вольт-амперной характеристики в первой четверти системы координат на рис. 5.17).

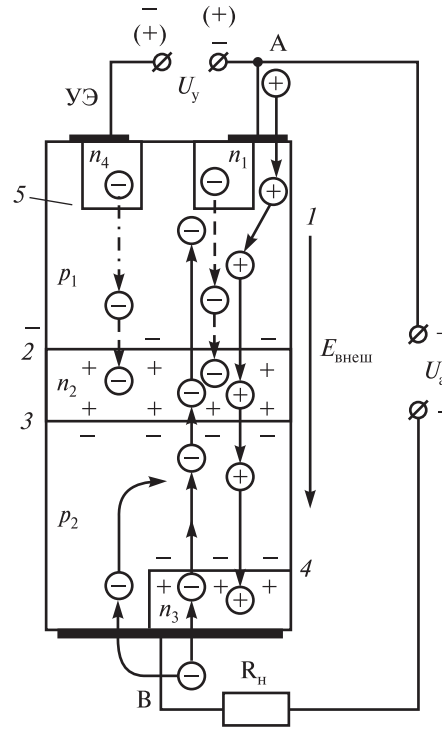



Рис. 5.16. Структура триодного тиристора (триака) с управляющим электродом от базы $p_4$-слоя с дополнительной областью $n_4$ в $p_1$-слое при токопрохождении в структуре $p_1$-$n_2$-$p_2$-$n_3$ с двухполярным управлением

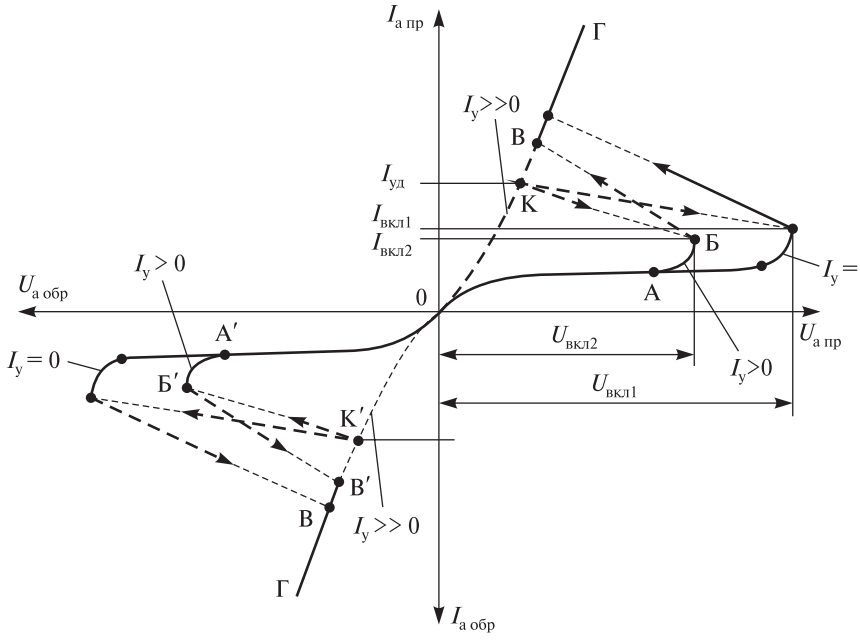



Рис. 5.17. Вольт-амперная характеристика симметричного триодного тиристора (триака)

При подаче на управляющий электрод отрицательного потенциала относительно вывода А переход *5* получает прямое смещение и под действием напряжения $U_у$ начинается инжекция электронов из области $n_4$ через переход *5* ($n_4$-$p_1$) в область $p_1$ и их диффузия по области $p_1$ к переходу *2* (штрихпунктирная линия на рис. 5.16). В переходе *2* электроны частично захватываются внутренним полем потенциального барьера перехода и частично дрейфуют из области $p_1$ в область $n_2$, так как электроны в области $p_1$ являются неосновными носителями зарядов.

Одновременно с этим на электроны области $p_1$ в переходе *2*, который находится под прямым смещением, действует ускоряющее поле напряжения прямого смещения $U_а$, под действием которого электроны инжектируют также в область $n_2$. В приконтактном слое перехода *2* области $n_2$ происходят накопление электронов и точечная компенсация поступившими электронами неподвижных поло-

жительных носителей зарядов (ионов) потенциального барьера, т.е. разрушение потенциального барьера в переходе *2*. Таким образом, за счет управляющего напряжения $U_y$ разрушается потенциальный барьер перехода *2*, что позволяет произвести включение тринистора при более низком внешнем напряжении $U_a$, так как в этом случае в структуре $p_1$-$n_2$-$p_2$-$n_3$ напряжение $U_a$ будет расходоваться только на потенциальные барьеры *p-n*-переходов *3* и *4*.

Прохождение тока в структуре тринистора $p_1$-$n_2$-$p_2$-$n_3$ с точки зрения движения электронов под действием внешнего напряжения смещения $U_a$ необходимо рассматривать от вывода В к выводу А. В этом случае в области $n_3$ увеличивается приток электронов от внешнего источника $U_a$ и в переходе *4* под действием прямого смещения происходит инжекция электронов из $n_3$-области в $p_2$-область. Одновременно с этим за счет шунтирования областей $p_2$ и $n_3$ между собой часть электронов поступает непосредственно в $p_2$-область от внешнего источника $U_a$, исключая переход *4*, что позволяет резко увеличить число электронов в $p_2$-области. Таким образом, инжектированные электроны через переход *4* в $p_2$-область, и электроны, поступившие непосредственно в $p_2$-область от источника внешнего напряжения, путем диффузии проходят слой $p_2$ по направлению к переходу *3* и под действием ускоряющего поля на переходе *3*, созданного внешним источником напряжения $U_a$, экстрагируют в $n_2$-слой.

В приконтактном слое перехода *3* $n_2$-области происходит накопление электронов и точечная компенсация поступившими электронами неподвижных положительных носителей зарядов (ионов) потенциального барьера перехода *3*, т.е. разрушение потенциального барьера в переходе *3* со стороны $n_2$-слоя, что ведет к дальнейшему притоку электронов в $n_2$-слой. Этот лавинообразный приток электронов в $n_2$-слой способствует лавинообразному процессу инжекции электронов через переход *2*, в котором под действием управляющего напряжения $U_y$ разрушен потенциальный барьер, что не требует дополнительного повышения внешнего напряжения $U_a$. Инжектируемые электроны в переходе *2* в $p_1$-область рекомбинируются с основными положительными ионами (дырками), создавая тем самым замкнутый процесс прохождения электронов от вывода В к выводу А.

Аналогично можно рассмотреть процесс фиктивного движения дырок в противоположном направлении от вывода А к выводу В в тринисторной структуре $p_1$-$n_2$-$p_2$-$n_3$. При разрушении потенциального барьера в переходе *2* под действием управляющего напряжения $U_y$ происходит дополнительная инжекция дырок через переход *2* из $p_1$-области в $n_2$-область. Эти дырки диффундируют в $n_2$-области до перехода *3*, находящегося под обратным смещением, и экстрагируют в область $p_2$. В приконтактном слое $p_2$ перехода *3* повышается концентрация основных носителей зарядов (дырок) и уменьшение ширины потенциального барьера в переходе *3*, т.е. разрушается потенциальный барьер со стороны слоя $p_2$. Аналогично разрушение потенциального барьера перехода *3* со стороны слоя $n_2$ было рассмотрено при движении электронов. Таким образом, встречное движение электронов и дырок через переход *3*, находящийся под обратным смещением, приводит к уменьшению потенциального барьера в этом переходе и дальнейшему росту тока (участок АБ на рис. 5.17).

Разрушение потенциальных барьеров в переходах *3* и *4* происходило при значительно меньшем напряжении $U_a$, так как это напряжение не затрачивалось на разрушение потенциального барьера перехода *2*. За счет напряжения $U_y$ развивался инжекционный процесс в переходе *5* и увеличивался дрейф электронов в переходе *2* из $p_1$-области в $n_2$-область, что способствовало снижению ширины потенциального барьера перехода *2* в области $n_2$, т.е. его разрушению. Таким образом, напряжение $U_a$ не влияет на разрушение потенциального барьера в переходе *2* и воздействует только на переход *3*, находящийся под обратным смещением, и переход *4* — под прямым смещением. При полном разрушении потенциального барьера перехода *3*, когда сумма коэффициентов передачи тока $\alpha_1$ и $\alpha_2$ (где $\alpha_1$ — коэффициент передачи в $n_2$-слое, а $\alpha_2$ — коэффициент передачи в $p_2$-слое), будет равна единице ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$), произойдет включение тринистора (участок БВ на рис. 5.17). Дальнейшее повышение напряжения $U_a$ приведет к возрастанию тока тринистора (участок ВГ на рис. 5.17).

Следовательно, напряжение $U_a$ для включения тринистора имеет меньшее значение, чем при $U_y = 0$, т.е. по сравнению со схемой диодного тиристора, прямая ветвь вольт-амперной характеристики которого показана на рис. 5.17 при $I_y = 0$. Прямая ветвь вольт-

амперной характеристики триодного тиристора, описывающая зависимость $I_{пр} = \varphi(U_{а\ пр})$ при $I_у > 0$ ($U_у > 0$), показана на рис. 5.17 при $I_у > 0$.

Управляемый симистор может работать и при изменении полярности управляющего напряжения. При положительном потенциале на управляющем электроде относительно анода переход *5* (см. рис. 5.16) закрыт. Напряжение $U_у$ приложено также между областями $p_1$ и $n_1$ и способствует прямому смещению перехода *1*, что вызывает инжекцию электронов из $n_1$-области в $p_1$-область (штриховая стрелка на рис. 5.16). Это аналогично рассмотренному процессу при прямом смещении перехода *5* и все дальнейшие процессы в переходах *2*, *3* и *4* также аналогичны процессам, рассмотренным выше при отрицательном потенциале на управляющем электроде относительно анода, и описываются прямой ветвью вольт-амперной характеристики $I_{пр} = \varphi(U_{а\ пр})$ при $I_у > 0$ и $U_у > 0$ (рис. 5.17).

Симметричный триодный тиристор (триак) может работать также при изменении полярности внешнего напряжения $U_а$, подключенного к пятислойной структуре.

Рассмотрим принцип действия симметричного триодного тиристора на примере структуры $n_1$-$p_1$-$n_2$-$p_2$-$n_3$ с управляющим электродом от дополнительной области $n_4$ с инжектирующим переходом *5* ($n_4$-$p_1$) и его шунтированием при полярности включения внешнего напряжения, когда «минус» подключен к выводу А от структуры $n_1$-$p_1$, а «плюс» к выводу В от структуры $p_2$-$n_3$ (рис. 5.18).

При такой полярности напряжения $U_а$ ток будет протекать в структуре $n_1$-$p_1$-$n_2$-$p_2$. Это объясняется тем, что под действием напряжения $U_а$ переходы *3* и *1* находятся под прямым смещением, переход *2* — под обратным, а переход *4*, находящийся под обратным смещением, не оказывает влияние на ток, так как зашунтирован металлическим токоотводом от структуры $n_3$ к структуре $p_2$.

При $U_у = 0$ и напряжении $U_а << U_{вкл}$ тиристор закрыт. При повышении внешнего напряжения $U_а$ до значения $U_а < U_{вкл}$ в переходах *1* и *3* разрушается потенциальный барьер и происходит инжекция зарядов: в переходе *1* — электронов из $n_1$-области в $p_1$-область и дырок из $p_1$-области в $n_1$-область и в переходе *3* — электронов из $n_2$-области в $p_2$-область и дырок из $p_2$-области в $n_2$-область. В переходе *2* происходит экстракция зарядов: электронов из $p_1$-области в $n_2$-область и дырок из $n_2$-области в $p_1$-область. Таким образом, при

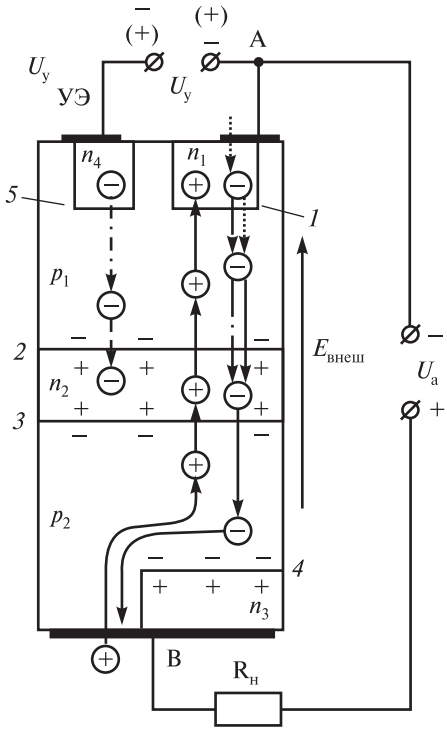



Рис. 5.18. Структура триодного тиристора (триака) с управляющим электродом от базы $p_4$-слоя с дополнительной областью $n_4$ в $p_1$-слое при токопрохождении в структуре $n_1$-$p_1$-$n_2$-$p_2$ с двухполярным управлением

такой полярности внешнего напряжения $U_а$ ток должен протекать в структуре $n_1$-$p_1$-$n_2$-$p_2$, но поскольку $U_а < U_{вкл}$, число инжектирующих зарядов очень мало и соответственно мала экстракция в переходе *2*, которая соответствует протеканию малого тока, созданного неосновными носителями зарядов, т.е. теплового тока в переходе *2*. Экстрагированные электроны путем диффузии в $n_2$-области движутся к переходу *3* и за счет прямого смещения на переходе инжектируют в $p_2$-область, где рекомбинируются с основными зарядами — дырками, создавая тем самым замкнутый процесс движения электронов от вывода А к выводу В. Это доказывает, что через тринисторную структуру $n_1$-$p_1$-$n_2$-$p_2$ между выводами А и В протекает небольшой ток $I$, равный току экстракции в переходе *2* в направлении от вывода В к выводу А (участок $0A'$ обратной ветви вольт-амперной характеристики в третьей четверти системы координат на рис. 5.17).

При включении управляющего напряжения ($U_у \neq 0$) отрицательным потенциалом на управляющем электроде относительно вывода А (рис. 5.18), когда $U_а < U_{вкл}$, под действием напряжения $U_у$ переход *5* находится под прямым смещением и в нем происходит инжекция электронов из слоя $n_4$ в слой $p_1$ (штриховая стрелка на рис. 5.18). В $p_1$-области резко увеличивается число инжектированных электронов, которые диффундируют к переходу *2*, и под действием внутреннего поля этого перехода и электрического поля внешнего

источника $U_a$ дрейфуют и экстрагируют в область $n_2$. Таким образом, при $U_a < U_{вкл}$ происходит нарастание процесса экстракции в переходе *2* за счет дополнительной инжекции электронов в переходе *5* в $p_1$-область при малом числе инжектируемых электронов в переходе *1*.

В приконтактном слое перехода *2* в области $n_2$ повышается концентрация основных носителей зарядов (электронов) и происходит точечная компенсация неподвижных положительных ионов, т.е. начинается разрушение потенциального барьера со стороны слоя $n_2$.

Аналогично с процессом движения электронов происходит встречное фиктивное движение дырок: инжекция в переходе *3* и экстракция в переходе *2*. В результате дрейфа положительных зарядов (дырок) в область $p_1$ в ней повышается число основных носителей зарядов в приконтактном слое перехода *2*, что ведет к точечной компенсации неподвижных отрицательных ионов в потенциальном барьере перехода *2* со стороны области $p_1$, т.е. начинается разрушение потенциального барьера со стороны слоя $p_1$. Экстрагированные дырки путем диффузии в $p_1$-области движутся к переходу *1* и за счет прямого смещения на переходе инжектируют в $n_1$-область, где рекомбинируются с основными зарядами — электронами, создавая тем самым замкнутый процесс движения дырок от вывода В к выводу А.

Электронная составляющая тока через переход *2* существенно больше дырочной составляющей, что обусловлено в основном большей подвижностью электронов по сравнению с дырками. Таким образом, в переходе *2* потенциальный барьер разрушается как со стороны слоя $n_2$, так и со стороны слоя $p_1$, что способствует возрастанию процесса экстракции в переходе *2* и общего тока тринистора (участок А′—Б′ обратной ветви вольт-амперной характеристики в третьей четверти системы координат на рис. 5.17).

При полном разрушении потенциального барьера перехода *2*, когда сумма коэффициентов передачи тока $\alpha_1$ и $\alpha_2$ (где $\alpha_1$ — коэффициент передачи в $p_1$-слое, а $\alpha_2$ — коэффициент передачи в $n_2$-слое) будет равна единице ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$), произойдет включение тринистора (участок Б′—В′ на рис. 5.17). Дальнейшее повышение напряжения $U_a$ приведет к возрастанию тока тринистора (участок В′—Г′ на рис. 5.17). Таким образом, симметричная тиристорная структура открывается и при обратном внешнем напряжении при значительно меньшем напряжении включения тринистора, т.е. прак-

тически так же, как и при прямом внешнем напряжении $U_а$ при $I_у > 0$ ($U_у > 0$).

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики триодного тиристора, описывающая зависимость $I_{обр} = \varphi(U_{а\ обр})$ при $I_у > 0$ ($U_у > 0$), показана на рис. 5.17 при $I_у > 0$.

Управление триодным симистором при полярности напряжения $U_а$, когда на выводе А «минус», а на выводе В «плюс», возможно и при изменении полярности управляющего напряжения при подключении на управляющий электрод «плюса» относительно вывода А. При такой полярности управляющего напряжения $U_у$ переход *5* находится под обратным смещением, т.е. закрыт. Однако напряжение $U_у$ приложено к переходу *1*, в котором создается прямое смещение, что вызывает дополнительную инжекцию электронов в область $p_1$ (штрихпунктирная стрелка на рис. 5.18).

Таким образом, переход *1* оказывается под двойным напряжением прямого смещения — по напряжениям $U_у$ и $U_а$, что способствует увеличению процесса инжекции в переходе *1*. Процессы в переходах *2* и *3* аналогичны процессам, рассмотренным выше при противоположной полярности управляющего напряжения $U_у$. В данном случае также видно, что напряжение $U_у$ способствует открытию тиристора, когда внешнее напряжение $U_а$ ниже напряжения включения $U_{вкл}$ ($U_а < U_{вкл}$).

После включения тиристора управляющий электрод теряет свои управляющие свойства. Изменение тока $I_у$ не влияет на протекающий ток через структуру тиристора, так как структуры, примыкающие к переходу, находящемуся под обратным смещением, заполнены неосновными носителями, обеспечивающими разрушение в нем потенциального барьера и инжекцию в переходах с прямым смещением. Симметричные тиристоры можно выключить, уменьшая силу тока через тиристорную структуру (меньше тока удержания $I_{уд}$), разомкнув внешнюю цепочку, или специальным схемным решением.

Из изложенного выше видно, что триак является незапираемым тиристором, так как изменение полярности управляющего напряжения не приводит к закрытию тиристора, и заменяет два параллельно включенных тринистора. Таким образом, триак требует меньшей защиты от перенапряжений, так как проводит ток в двух направлениях и управляется напряжением на управляющем электроде любой полярности.

Принцип действия триодного симистора со структурой управляющего электрода от области $p_1$ (см. рис. 5.15) аналогичен принципу дейстия рассмотренной выше структуры. Отличительной особенностью является то, что в этой структуре нельзя изменять полярность управляющего напряжения $U_у$.

*Тетродные тиристоры* — это четырехслойные *p-n-p-n*-приборы, имеющие выводы от всех четырех областей структуры (рис. 5.19). Тетродный тиристор можно включать и выключать, изменяя напряжение на одном из двух управляющих электродов (УЭ1, УЭ2), т.е. это запираемый прибор, что расширяет функциональные возможности прибора по сравнению с динистором и тринистором.

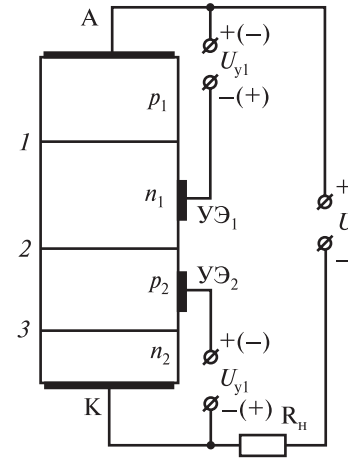



Рис. 5.19. Структура и схема включения тетродного тиристора

При подаче напряжения $U_{у1}$ или $U_{у2}$ так, чтобы соответственно на переходах *1* и *3* было обратное смещение, можно ускорить рассасывание зарядов из базовых областей $n_1$ и $p_2$ при закрытии и повысить быстродействие тиристора. В остальном тетродный тиристор работает аналогично триодному тиристору с одним управляющим электродом.

## 5.9. Основные параметры тиристоров

Различают параметры тиристоров, характеризующие их электрофизические свойства, и максимально допустимые параметры. К первым относятся показатели, соответствующие основным точкам статической вольт-амперной характеристики, и показатели быстродействия тиристора, как переключающего элемента. Из вольт-амперной характеристики диодного тиристора (см. рис. 5.8) определяют такие параметры, как напряжение включения $U_{вкл}$ — остаточное напряжение в точке включения тиристора; ток включения $I_{вкл}$ — основной ток в точке включения; удерживающий ток $I_{уд}$ — минимальный основной ток, необходимый для поддержания тиристора в открытом состоянии; напряжение в открытом состоянии тиристора $U_{откр} = U_{ост}$; обратный ток тиристора $I_{обр}$.

К основным статическим параметрам запираемого тиристора относятся также импульсный запирающий ток управляющего электрода $I_{УЗ}$, при котором тиристор переключается из открытого состояния в закрытое; импульсное запирающее напряжение на управляющем электроде $U_{УЗ}$, обеспечивающее значение запирающего тока управляющего электрода.

Для триодного тиристора дополнительно вводятся параметры:

$I_{у\,от}$ — постоянный отпирающий ток управляющего электрода, который обеспечивает переключение тиристора из закрытого состояния в открытое;

$U_{у\,от}$ — постоянное отпирающее напряжение на управляющем электроде;

$U_{у\,неотп}$ — постоянное неотпирающее напряжение на управляющем электроде, которое не вызывает переключение тиристора.

К параметрам, характеризующим быстродействие тиристоров относятся:

$t_{вкл}$ — время включения, определяемое с момента подачи управляющего напряжения до момента, когда напряжение на тиристоре ($U_{ОСТ}$) уменьшится до 0,1 своего начального значения;

$t_{выкл}$ — время выключения, определяемое с момента подачи запирающего напряжения до момента, когда напряжение на тиристоре возрастет до $U_{пр\,max}$.

К максимально допустимым параметрам относят максимально допустимую рассеиваемую мощность тиристора $P_{ср\,max}$, при которой обеспечивается заданная надежность, максимально допустимую импульсную рассеиваемую мощность $P_{и\,max}$, максимально допустимую среднюю и импульсную мощность на управляющем электроде $P_{у\,ср\,max}$ и $P_{у\,и\,max}$, максимально допустимые постоянный и импульсный токи в открытом состоянии тиристора $I_{откр\,ср}$ и $I_{откр\,и}$.

Свойства тиристоров как управляемых, так и неуправляемых ключей используют в различных устройствах железнодорожной автоматики. Это бесконтактные выключатели, коммутаторы и электронные реле; регулируемые выпрямители, преобразователи постоянного тока в переменный, преобразователи фаз и частоты; импульсные регуляторы, генераторы импульсов и другие устройства.

# Глава 6. НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

## 6.1. Терморезистор

Полупроводниковый резистор, электрическое сопротивление которого изменяется при изменении температуры или каких-либо других физических величин, функционально связанных с ней, называют терморезистором или термистором. Как уже известно, проводимость полупроводников сильно увеличивается с ростом температуры.

Различают терморезисторы с отрицательным и положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Температурный коэффициент сопротивления характеризует относительное обратимое изменение сопротивления терморезистора при изменении температуры на один градус. Для терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления при увеличении температуры сопротивление уменьшается, а с положительным ТКС — увеличивается. Наибольшее распространение получили терморезисторы с отрицательным ТКС, изготовленные на основе поликристаллов оксидов переходных металлов.

В зависимости от способа управления температурой полупроводникового элемента термисторы подразделяются на три группы:

– приборы, реагирующие на изменение температуры окружающей среды (термисторы с внешним прямым подогревом);

– приборы, нагреваемые проходящим через них током (термисторы с внутренним прямым подогревом);

– приборы, нагреваемые от изолированного подогревателя (термисторы с внутренним косвенным подогревом).

В приборах с прямым подогревом изменяется собственное сопротивление под влиянием тепла, выделяющегося в них при прохождении электрического тока, или в результате изменения температуры окружающей среды. В терморезисторах косвенного нагрева имеется подогреватель, который служит дополнительным источником тепла.

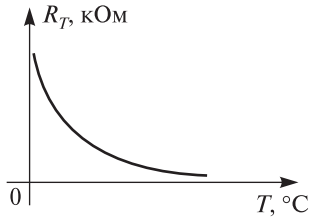



Рис. 6.1. Зависимость сопротивления терморезистора от температуры

Свойства термисторов с внешним прямым подогревом характеризует зависимость сопротивления прибора $R_T$ от температуры $T$, т.е. температурная характеристика $R_T = \varphi(T\,°\text{C})$ (рис. 6.1). Из характеристики видно, что при увеличении температуры сопротивление уменьшается по нелинейному — экспоненциальному закону. Это явление можно объяснить на основе теории электропроводности полупроводников.

При повышении температуры наступает интенсивная тепловая ионизация, при которой увеличиваются число подвижных носителей зарядов и их подвижность. Благодаря этому растет проводимость и снижается сопротивление прибора.

Свойства термисторов с внутренним прямым подогревом оцениваются вольт-амперной характеристикой, отражающей зависимость падения напряжения на терморезисторе от проходящего через него тока в условиях теплового равновесия между окружающей средой и терморезистором $U = \varphi(I)$ (рис. 6.2).

Рассмотрим вольт-амперную характеристику терморезистора с отрицательным участком (кривая *1* на рис. 6.2). На начальном участке *а—в* при малых токах мощность, выделяемая в терморезисторе, недостаточна для его разогрева, а температура и сопротивление не изменяются, следовательно, и падение напряжения изменяется прямо пропорционально изменению тока. На этом участке почти полностью соблюдается закон Ома.

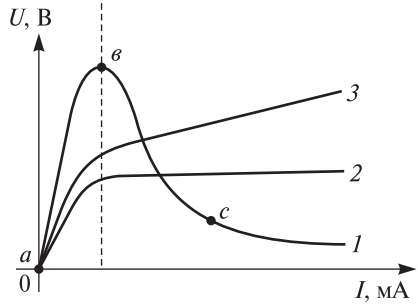



Рис. 6.2. Статические вольт-амперные характеристики терморезисторов

При дальнейшем повышении тока сопротивление терморезистора падает, следовательно, снижается падение напряжения на нем. Поэтому характеристика отклоняется вправо (участок *в—с*) от начальной прямолинейной части. Снижение сопротивления можно объяснить, используя теорию электропроводности полу-

проводников. Нагрев термистора происходит за счет того, что при повышении силы тока в полупроводниках возникает ударная генерация носителей зарядов и в дальнейшем их рекомбинация. В процессе рекомбинации выделяется тепловая энергия, которая поглощается окружающей средой не полностью, а воздействует на полупроводник, увеличивая число носителей зарядов и электропроводность полупроводника. Терморезисторы с характеристикой, имеющей отрицательный участок, применяются для автоматического управления, и нелинейный участок характеристики, имеющий резкий напряжения при повышении тока, является рабочим. Терморезисторы, используемые для стабилизации напряжения, в рабочей области имеют весьма пологие характеристики (кривая *2* на рис. 6.2). В измерительных схемах применяются терморезисторы, у которых с ростом тока напряжение увеличивается (кривая *3* на рис. 6.2).

В конструкции термисторов с внутренним косвенным подогревом содержится специальная обмотка подогрева, внутри которой помещается полупроводниковая пластина — терморезистор.

При изменении мощности нагрева обмотки выделяется разная тепловая энергия, которая изменяет его сопротивление. Таким образом, работа такого термистора аналогична работе термистора с внешним прямым подогревом.

К основным параметрам термисторов относятся:

– номинальное сопротивление $R_T$ при $T = 20$ °С;

– температурный коэффициент сопротивления (ТКС) в пределах от –0,008 до –0,06 °С;

– максимально допустимая температура нагрева $T_{max}$;

– максимальная мощность рассеивания при нагреве $P_{max}$.

Рассмотренные терморезисторы имеют отрицательный ТКС и используются в различных электрических и телеметрических устройствах железнодорожного транспорта для измерения и регулирования температуры, для термокомпенсации элементов и в других схемах.

## 6.2. Варисторы

Варистор — полупроводниковый резистор, сопротивление которого изменяется при изменении приложенного напряжения, в результате чего его вольт-амперная характеристика оказывается нелинейной. Он состоит из кристаллов карбида кремния или окисла

цинка, скрепленных связующим веществом (глина, жидкое стекло, лаки, смолы).

Нелинейность ВАХ варистора обусловлена увеличением электропроводности оксидных пленок на поверхности кристаллов в сильных электрических полях, замыканием точечных контактов между отдельными кристаллами из-за разогрева и пробоя оксидных поверхностных пленок отдельных кристалликов. Каждый кристаллик из карбида кремния или окисла цинка покрыт оксидной пленкой и между ними возникает потенциальный барьер, в котором при воздействии внешнего напряжения возникает туннельный эффект, не зависящий от полярности приложенного напряжения. Чем меньше величина отдельных кристалликов, входящих в общую структуру, тем меньше зависимость от полярности приложенного напряжения, т.е. можно использовать в электрических цепях переменного напряжения.

При включении напряжения ток вначале протекает через небольшие участки соприкосновения отдельных кристалликов. С увеличением напряжения возрастает туннельный эффект за счет смыкания контактирующих поверхностей и уменьшения зазоров. Происходит перекрытие энергетических уровней кристалликов и оксидных пленок. В результате эффективное сечение, по которому протекает ток, возрастает, а сопротивление уменьшается. Вольт-амперная характеристика варистора представляет собой зависимость $I = \varphi(U)$ при $T = \text{const}$ (рис. 6.3).

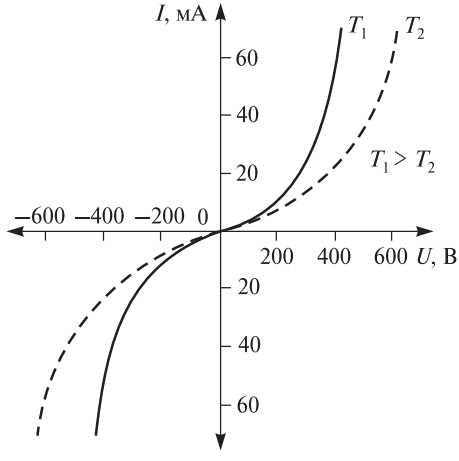



Рис. 6.3. Вольт-амперная характеристика варистора

При повышении температуры проводимость варистора возрастает, т.е. его ТКС — отрицательный, а с понижением температуры проводимость увеличивается. Варисторы работают в диапазоне температур от –40 до +85 °С.

К основным параметрам варистора относятся: номи-

нальные ток и напряжение; рассеиваемая мощность; коэффициент нелинейности; дифференциальное сопротивление.

Основное назначение варисторов — защита элементов электрической цепи от перенапряжения и контактов реле от разрушения. Варисторы также применяются в маломощных стабилизаторах напряжения, схемах преобразования, схемах искрогашения и др.

## 6.3. Позисторы

Полупроводниковый резистор, имеющий положительный ТКС, называется позистором. Исходным материалом для изготовления позисторов является титанат бария, легированный примесями редкоземельных элементов, которые относятся к сегнетоэлектрикам. При увеличении температуры в определенных пределах сопротивление позистора возрастает.

Свойства позистора оцениваются аналогичными характеристиками и параметрами, что и свойства терморезисторов с отрицательным ТКС.

Температурная характеристика позисторов $R_П = \varphi(T)$ нелинейна (рис. 6.4) и имеет сложный характер. В области малых температур сопротивление позистора несколько уменьшается с повышением температуры, в диапазоне температур от 100 до +190 °С с повышением температуры сопровождается резким ростом сопротивления, при температуре более +200 °С сопротивление позистора вновь уменьшается.

Статическая ВАХ позистора $U = \varphi(I)$ (рис. 6.5) при работе с малым током соответствует небольшому отрицательному ТКС (участок *а—в* на рис. 6.5). По мере увеличения напряжения и мощности рас-

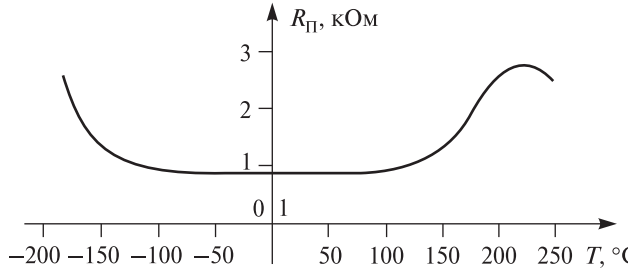



Рис. 6.4. Температурная характеристика позистора

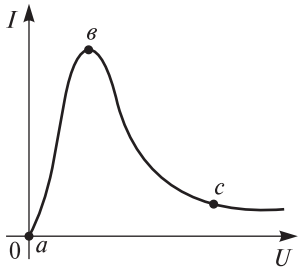



Рис. 6.5. Статическая вольт-амперная характеристика позистора

сеивания сопротивление позистора возрастает, а ток снижается (участок *в*—*с*).

Параметры позисторов аналогичны в основном параметрам терморезисторов. Температурный коэффициент сопротивления позисторов имеет значительно большее значение — от 2 до 10 %/°С.

Позисторы широко применяются в регуляторах температуры, для ограничения и стабилизации тока, в схемах термокомпенсации, защиты приборов и устройств от перегрева.

## 6.4. Условное обозначение нелинейных полупроводниковых приборов

Основой системы обозначений нелинейных полупроводниковых приборов, так же как и всех полупроводниковых приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 6.6. Графическое обозначение нелинейных полупроводниковых приборов содержит:

– общее обозначение: базовый символ резистора (прямоугольник 4×10 мм) и знак нелинейного саморегулирования (⟋) — на-

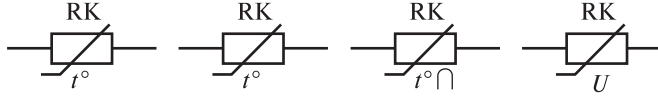



Рис. 6.6. Условное графическое обозначение нелинейных полупроводниковых приборов:
*а* — терморезистор с внешним или внутренним прямым подогревом и положительным ТКС (позистор); *б* — терморезистор с внешним или внутренним прямым подогревом и отрицательным ТКС (термистор); *в* — терморезистор с внутренним косвенным подогревом; *г* — нелинейные саморегулирующиеся резисторы (варисторы)

клонная линия под углом 45° с горизонтальным отрезком поперек базового символа резистора);

– дополнительные символы, как отличительные особенности отдельных видов нелинейных полупроводниковых приборов, возле знака нелинейного саморегулирования:

$t°$ — прибор с отрицательным температурным коэффициентом, символ $t$ со знаком «минус» (ТКС);

$t°$ — прибор с положительным температурным коэффициентом, символ $t$ без знака (ТКС);

$U$ — прибор — варистор (латинская буква);

∩ — символ подогревателя косвенного подогрева.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код тиристоров. Классифицирующий тиристоры по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: RK1, где RK1 — терморезистор или позистор, номер 1 — порядковый номер прибора в схеме, и RU1, где RU — варистор, номер 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Буквенно-числовой код в системе обозначений нелинейных полупроводниковых приборов, классифицирующий нелинейные полупроводниковые приборы по определенным признакам в справочниках, содержит определенную информацию о свойствах прибора и состоит из шести элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81.

*Первый элемент* — буквы, обозначающие вид и подклассы нелинейных полупроводниковых приборов, полупроводниковый материала из которого выполнен прибор или конструктивное исполнение: КМ — кобальто-марганцевые; ММ — меднозакисные; С — сопротивление; Н — нелинейное сопротивление (варистор); Т(ТР) — терморезистор с отрицательным ТКС; ТРП — терморезистор с положительным ТКС (позистор); КП — косвенного подогрева; Б — болометр; П — полупроводниковый; К — карбит кремния; ВР — варистор постоянный; ВРП — варистор переменный. Сочетания обозначают:

КМТ — кобальто-марганцевый терморезистор; ММТ — меднозакисный терморезистор; СТ — терморезистор с прямым подогревом (позистор); ТКП — терморезисторы с косвенным подогревом; СН — стержневой нелинейный прибор (варистор); БП — болометр; КВ — карбит-кремниевый варистор.

*Второй элемент* — цифра, которая указывает для варисторов код исходного полупроводникового материала, если материал не указан в буквенном обозначении первого элемента: 1 — карбит кремния; 2 — селен или окись цинка; если материал указан в первом элементе, то второй элемент в обозначении отсутствует, т.е. следующий элемент можно считать третьим; терморезисторов цифра, так же как для варисторов, указывает код исходного полупроводникового материала, если материал не указан в буквенном обозначении первого элемента: 3 — медно-кобальто-марганцевые; 4 — никель-кобальт-марганцевые; 5 — титанат бария; 6 — легированные твердые растворы на основе окиси ванадия и ряда поликристаллических твердых растворов; 9 — двуокись ванадия; 10 — на полупроводниковой основе, легированной цезием; для терморезисторов с косвенным подогревом цифра обозначает сопротивление в омах.

*Третий элемент* — цифра или буква, определяющая конструкцию прибора: 1 — стержневые; 2 — дисковые; А — со штуцером, если не указана конструкция в первом элементе обозначения.

*Четвертый элемент* — число, определяющее габаритный размер токопроводящего элемента прибора терморезистора и позистора; цифра (через дефис), обозначающая порядковый номер разработки варисторов.

*Пятый элемент* — буква, условно определяющая классификационное напряжение и величину его отклонения.

Все основные параметры полупроводниковых диодов и их назначение приведены в справочной литературе.

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* Терморезистор КМТ-17а: КМ — кобальто-марганцевый, Т — терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом (ТКС), 17 — габаритный размер токопроводящего элемента терморезистора, который определяется по справочнику, а — классификационное напряжение и величина его отклонения, которые определяются по справочнику.

## 6.5. Болометры

Болометр (от греч. bole — луч и metreo — измеряю) — прибор, предназначенный для обнаружения и измерения энергии электромагнитного излучения (главным образом, в инфракрасном (ИК) диапазоне). Работа болометра основана на изменении электри-

ческого сопротивления полупроводникового терморезистора. Для спектрального измерения излучения применяют компенсационные полупроводниковые болометры, состоящие из двух терморезисторов, включенных по мостовой схеме.

Конструктивно (рис. 6.7) болометр состоит из корпуса *2*, держателя линзы *3*, линзы *5*, основания *7*, изолятора *8*, цоколя *10*. Внутри корпуса болометра размещены основной (чувствительный) *4* и компенсационный (нагрузочный) *6* терморезисторные элементы.

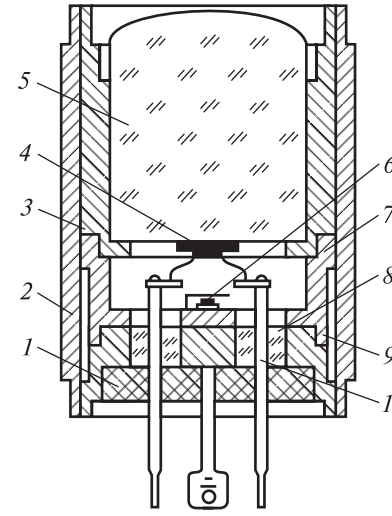



Рис. 6.7. Устройство болометра БП1-2:
*1* — компаунд; *2* — корпус; *3* — держатель линзы; *4* — активный терморезисторный элемент; *5* — линзы; *6* — компенсационный терморезисторный элемент; *7* — основание; *8* — изолятор; *9* — цоколь; *10* — выводы

Линза болометра выполнена из германия, пропускающего инфракрасное излучение с длиной волны $\lambda = 1{,}7—15$ мкм, и углом обзора до 120°. Для увеличения поглощения рабочая поверхность линзы зачернена. Линза впаяна в держатель, который крепится к основанию с помощью тугой посадки. Таким же образом крепится основание в цоколе. Держатель линзы, основание и цоколь установлены в цилиндрическом корпусе из ковара. Торцы держателя линзы и цоколя соединяются с корпусом с помощью сварки, чем обеспечивается герметичность внутренней части болометра.

Терморезисторы изготовлены из смеси оксидов марганца и никеля или поликристаллической смеси оксидов никеля, марганца и кобальта с электрическим сопротивлением в пределах 1—10 МОм.

Чувствительный (активный $RK_A$) элемент *4* размещается в фокусе линзы, где концентрируется измеряемое излучение, и находится с ней в оптическом контакте.

Теплоемкость линзы немного превышает теплоемкость чувствительного терморезистора, что способствует быстрому поглощению падающего излучения, проникновению тепла в фокус линзы и теп-

лоотдаче на терморезистор. Поскольку площадь рабочей поверхности терморезистора значительно меньше, чем у линзы, происходит лучше теплообмен и выше чувствительность терморезистора.

Контактное непосредственное соединение линзы и терморезистора создает основное свойства конструкции. При соединении материалов с разной теплопроводностью на их поверхностях при тепловом воздействии возникает разность потенциалов, что способствует более сильному процессу теплообмена. Такие соединения называются иммерсионными электростатическими линзами.

Компенсационный терморезистор *6* ($RK_K$) размещается на сапфировой подложке и защищен от инфракрасного излучения алюминиевым экраном. Оба элемента подключены к выводам болометра серебряной проволокой. Выводы болометра укреплены в цоколе на изоляторах из специального стекла. Стеклянный изолятор заливается специальным компаундом *1* для влагозащиты.

Оба элемента включают в плечи мостовой схемы (рис. 6.8). Если схему предварительно сбалансировать, т.е. создать равенство $RK_KR1 = RK_AR2$, то при изменении температуры окружающей среды оба терморезистора $R_K$ и $R_A$ одинаково изменяют свое сопротивление и равновесие моста не нарушается. В диагонали моста на выходе (точки А и Б) напряжение будет равно нулю ($U_{R1} = U_{R2}$ и $U_{RK_K} = U_{RKA}$).

При облучении активного элемента болометра $RK_A$ равновесие моста нарушается и на выходе схемы появляется сигнал. Выходной сигнал поступает в схему усиления и регистрации.

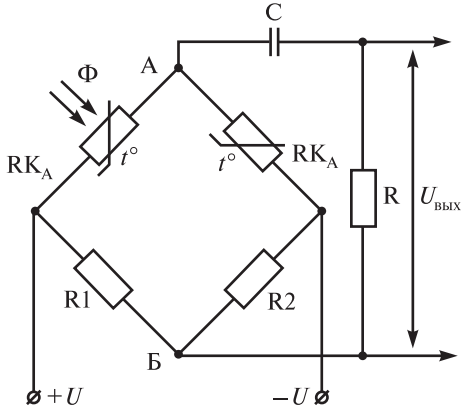



Рис. 6.8. Схема включения болометра БП1-2

Кроме общих для всех терморезисторов параметров, болометры имеют несколько дополнительных параметров:

1. Рабочее напряжение 60—250 В.

2. Чувствительность, определяемая как отношение напряжения на выходе болометра $U_{вых}$ к мощности теплового излучения $W$ ($S = U_{вых}/W$). Промышленные образцы имеют $S$ = 30—300 В/Вт.

3. Порог чувствительности, определяемый уровнем собственных шумов, при которых не регистрируется тепловое излучение (0,25 мкВ).

Болометры применяют для дистанционного измерения амплитуды. На железнодорожном транспорте их применяют в качестве приемников инфракрасного излучения для автоматического контроля наиболее ответственных узлов подвижного состава (буксовых узлов) и в других системах.

# Глава 7. ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

## 7.1. Общие сведения и классификация электровакуумных приборов

Электровакуумными приборами называются такие приборы, в которых рабочее пространство освобождено от воздуха и изолированно от окружающей атмосферы газонепроницаемой оболочкой (баллоном), имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной средой (парами или газами). Действие этих приборов основано на использовании электрических явлений в вакууме или газе.

Работа электровакуумных приборов основана на взаимодействии потока электронов, испускаемых катодом, с постоянным или переменным электрическим и магнитным полями. Эти приборы служат для различного рода преобразований электромагнитной энергии (генерации, усиления и т.д.).

Электрические процессы, протекающие в рабочем пространстве приборов, связаны с движением электрических зарядов в вакууме или газе. Под вакуумом следует понимать состояние газа, в частности воздуха, при давлении ниже атмосферного. Применительно к электровакуумным приборам понятие «вакуум» определяют исходя из характера движения электронов. Если электроны движутся в пространстве свободно, не сталкиваясь с оставшимися после откачки газа молекулами, то говорят о вакууме. Если же электроны сталкиваются с молекулами газа, то следует говорить просто о разреженном газе. В зависимости от рабочей среды электровакуумные приборы подразделяются на электронные и ионные приборы.

Во всех электровакуумных приборах электронный поток можно регулировать, воздействуя на него электрическим или магнитным полем.

Электронный электровакуумный прибор — это прибор, в котором электрический ток создается только свободными электронами, движущими в вакууме с давлением менее $10^{-5}$—$10^{-4}$ Па (высокий вакуум).

Ионный электровакуумный прибор — это прибор с электрическим разрядом в газе или парах с давлением выше $10^{-5}$ Па, но ниже атмосферного. При этом значительная часть движущихся электронов сталкивается с молекулами газа и ионизирует их. Эти приборы называются также газоразрядными.

Семейство электровакуумных приборов весьма обширно и в зависимости от назначения подразделяется на следующие приборы.

1. Электронные лампы — электронные электровакуумные приборы, в которых осуществляется электростатическое (с помощью электродов) управление электронным потоком (электростатическим полем) и которые предназначены для усиления и преобразования электрических колебаний с частотой до $3 \cdot 10^9$ Гц.

2. Электровакуумные СВЧ-приборы — электронные электровакуумные приборы с динамическим управлением током. В этих приборах увеличение энергии СВЧ-поля происходит от отдельного или от непрерывного взаимодействия электронов с энергией СВЧ-поля (магнитным статическим полем). Они предназначены для усиления, генерирования и преобразования электромагнитных сигналов с частотой от $3 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^{12}$ Гц.

3. Электронно-лучевые приборы — электронные электровакуумные приборы, в которых используется поток электронов, сконцентрированный в форме луча или пучка электронов (электронного луча), взаимодействующего с мишенью или экраном прибора. Они предназначены для различного рода преобразований информации, представленной в форме электрических или световых сигналов.

4. Электровакуумные фотоэлектронные приборы — электронные приборы, действие которых основано на использовании фотоэффекта. Предназначены для преобразования энергии оптического излучения в электроэнергию или изображения в невидимых (ИК-лучи) лучах в видимое изображение.

5. Вакуумные индикаторы — электровакуумные электронные приборы, в которых электроэнергия преобразуется в световую энергию для визуального определения уровня электрического сигнала.

6. Рентгеновские трубки — электровакуумные электронные или ионные приборы, действие которых основано на возбуждении рентгеновского излучения ($\lambda = 10^2 — 10^{-5}$ нм) в результате бомбардировки твердотельной мишени пучком ускоренных электронов.

7. Ионные электровакуумные приборы — газоразрядные приборы, действие которых основано на прохождении электрического тока через разреженный газ. Применяются как защитные, коммутирующие, генераторные и светоизлучающие приборы в режимах электрического разряда в газовой среде.

8. Другие специальные группы приборов.

Таким образом, с помощью электровакуумных приборов можно преобразовывать ток и напряжение по форме, значению и частоте, а также различные виды энергии (световая и электромагнитная) излучения в электрическую, и обратно, оптическое изображение в электрический сигнал, и наоборот.

Электровакуумные приборы классифицируются также по другим признакам:

– по типу катода (накаленный или холодный);

– по материалу и устройству баллона (стеклянный, металлический, керамический, комбинированный);

– по типу охлаждения (искусственное — лучистое, принудительное — воздушное, водяное, паровое).

Достоинства электровакуумных приборов обусловили их применение для выпрямления, усиления, генерации, преобразования частоты, осциллографии электрических и неэлектрических явлений и автоматического управления и регулирования, передачи и приема изображений и других процессов.

## 7.2. Электронные лампы

### *7.2.1. Устройство электронных ламп*

Электрические процессы в электронных лампах протекают в рабочем пространстве, которое ограничено баллоном. В баллоне создается достаточно высокое разрежение газа — вакуум (при остаточном давлении $133{,}322 \cdot 10^{-6}$ Па).

В рабочем пространстве электронной лампы протекают следующие основные процессы: образование свободных носителей электрических зарядов — электронов в процессе эмиссии с поверхности твердого тела; создание направленного потока электронов; управление как плотностью потока, так и направлением движущихся электронов. Все эти процессы осуществляются с помощью электродов (катодов, сеток, анодов, специальных пластин и др.), которые на-

ходятся внутри баллона и присоединяются к внешним источникам питания. Наиболее простой по устройству является двухэлектродная лампа, которая состоит из двух электродов — анода и катода. В более сложных лампах между анодом и катодом располагаются одна или несколько сеток и другие специальные электроды.

Баллоны разнообразны по размерам, форме, материалу (рис. 7.1). Наиболее распространены баллоны цилиндрической формы, но используются баллоны более сложной конфигурации. Габаритные размеры баллонов находятся в пределах от нескольких миллиметров (сверхминиатюрные лампы) до десятков сантиметров (мощные генераторные лампы). Баллон изготавливают из газонепроницаемых материалов — из специальных сортов стекла, которое герметически сваривается с металлом и не пропускает газ; из высокочастотной керамики в сочетании с металлическими деталями. Баллоны также изготавливаются металлостеклянными и металлическими. Внутри баллона при создании вакуума повышается средняя длина свободного пробега электронов.

В некоторых электронных лампах внутренняя поверхность баллона покрыта электропроводящим слоем, который предохраняет лампу от внешних электрических полей или, наоборот, исключает распространение внутреннего электрического поля лампы в окружающую среду, т.е. является внутренним экраном. Внешнюю поверхность лампы также можно покрывать защитным слоем, создавая

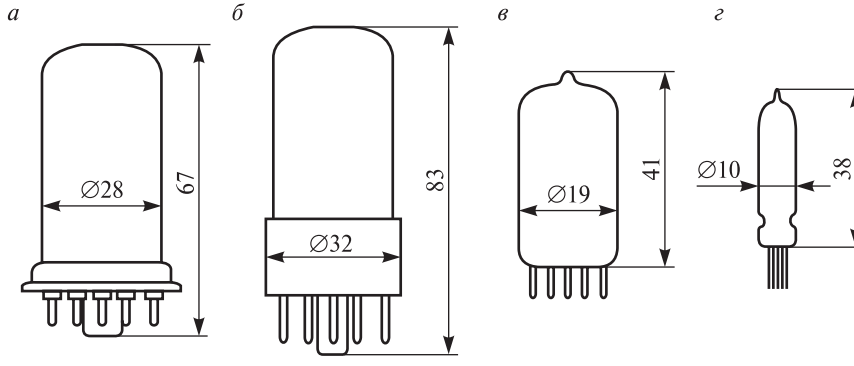



Рис. 7.1. Виды баллонов электронных ламп:
*а* — металлический; *б* — стеклянный; *в* — стеклянный миниатюрный; *г* — стеклянный сверхминиатюрный

наружный экран (обычно съемный). Экраном может служить и сам металлический баллон или слой металла, нанесенный на поверхность стеклянного баллона.

В комбинированных электронных лампах в одном баллоне создается несколько структур электродов, выполняющих функции самостоятельного прибора. В этом случае для разделения разных структур применяется внутренний разделительный экран. Комбинированные лампы, состоящие из двух, трех и более самостоятельных приборов, могут иметь как общий катод, так и раздельные катоды.

Катодом называется электрод, испускающий электроны. В электронных лампах используются термоэлектронные катоды (термокатоды), действие которых основано на явлении термоэлектронной эмиссии — испускания электронов при нагреве твердого тела. Материалом для их изготовления служит чистый металл (вольфрам, тантал) или металл с покрытием из активирующего слоя, который обеспечивает интенсивную эмиссию при меньших температурах нагрева. Катоды нагревают электрическим током от источника накала $U_н$=1—30 В. Различают катоды прямого и косвенного накала.

*Катод прямого накала* может быть выполнен для плоской и цилиндрической (объемной) системы электродов. Для плоской системы электродов катоды прямого накала изготавливаются из тонкой металлической нити или узкой плоской или гофрированной ленты (рис. 7.2, *б*), через которую проходит ток накала. Для цилиндрической системы электродов катод изготавливается в виде бифилярной спирали из тонкой проволоки или спирали из узкой плоской ленты (рис. 7.2, *а*), через которую проходит ток накала.

Такой катод выполняет функции и подогревателя, и эмиттера электронов. Катоды прямого накала более экономичны, но для накала требуют источник постоянного тока. При нагреве переменным током температура катода уменьшается, а потенциал катода относительно анода оказывается переменным. Это вызывает пульсацию анодного тока. Поэтому питание катодов прямого накала переменным током нежелательно из-за колебаний тока эмиссии, которые создают мешающий фон. Мешающий фон возникает также в результате взаимодействия переменного магнитного поля тока накала с током эмиссии (магнетронный эффект).

*Катод косвенного канала* может иметь плоскую или цилиндрическую конструкцию. В первом случае катод (рис. 7.2, *в*) состоит из

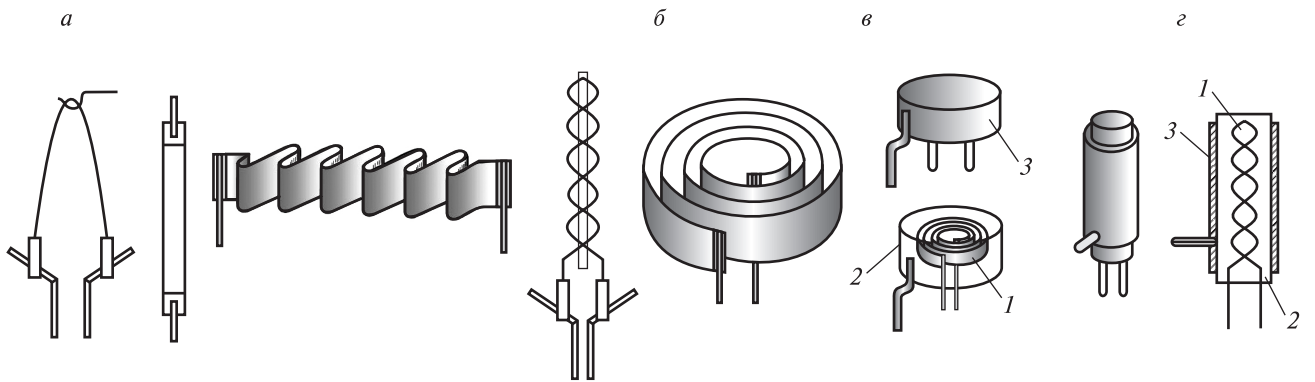



Рис. 7.2. Конструкция катодов:
*а* — прямого накала для плоской системы электродов из проволочной нити или плоской или гофрированной ленты; *б* — прямого накала для цилиндрической системы электродов; *в* — косвенного накала плоской конструкции и его устройство; *г* — косвенного накала цилиндрической конструкции и его устройство: *1* — подогреватель катода; *2* — катод; *3* — оксидный активатор

невысокого полого цилиндра с верхним основанием, а во втором (рис. 7.2, *г*) — из высокого полого цилиндра с верхним основанием. Внешняя поверхность цилиндров покрыта оксидным активатором. Внутри цилиндра находится подогреватель, покрытый алундовой изоляцией, выполняющей функции высокотемпературной изоляции. Подогреватель для катода плоской конструкции выполнен в виде спирали из узкой ленты, а для цилиндрической конструкции — в виде бифилярной спирали из вольфрама, проходящей внутри трубки. Катод и подогреватель электрически изолированы друг от друга густой керамической массой (суспензией) из порошка оксида алюминия — алунда на поверхности подогревателя.

Функции подогрева и эмиссии в катодах косвенного накала разделены. Такие катоды нагреваются теплом, получаемым от подогревателя. Поэтому сам подогреватель можно нагревать переменным током. В этом главное достоинство косвенного канала — отсутствие вредных пульсаций анодного тока, так как цепь анодного тока отделена от цепи нагрева и пульсации напряжения канала не влияют на анодный ток. Температура катода не успевает заметно измениться за четверть периода (0,005 с при частоте 50 Гц) и эмиссия остается постоянной (не пульсирует). Катод косвенного канала обладает большой тепловой инерцией. От момента включения (выключения) напряжения канала до полного разогрева (остывания) катода проходят десятки секунд. Оксидные активированные покрытия непрочны и легко разрушаются при механическом и электрическом воздействиях на них.

По сравнению с катодами прямого накала катоды косвенного накала сложнее по конструкции и их трудно сконструировать на очень малые токи. Поэтому они менее пригодны для маломощных экономичных ламп, рассчитанных на питание от батарей.

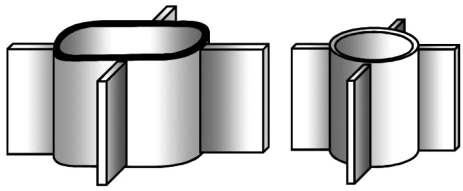


Рис. 7.3. Конструкция анодов с ребрами для охлаждения

Анод — это электрод, который при подаче на него положительного потенциала относительно катода собирает эмиттированные катодом электроны. Анод (рис. 7.3) выполнен из тугоплавких металлов (вольфрам, никель и др.) в виде цилиндра с

круглым, овальным или прямоугольным профилем, внутри которого располагаются остальные электроды. Для усиления теплового излучения анода увеличивают поверхность анода, вводя продольные ребра — радиаторы, а также всю поверхность подвергают чернению.

Сетки — электроды, с помощью которых в рабочем пространстве баллона формируется электрическое поле, используемое для управления потоком электронов. Конструкция сеток (рис. 7.4) выполняется в виде спирали из тонкой проволоки (никель, молибден и их сплавы, вольфрам), навиваемой для придания жесткости на продольные стержни, называемые траверсами. Иногда сетки выполняются из переплетенных проводников, плоские (дисковая), рамочные, цилиндрические с прорезями. Для лучшего охлаждения сеток применяют их чернение, а для исключения термоэмиссии их покрывают термостойким материалом с большой работой выхода электронов, например золотом. Чтобы эффективно управлять электронным потоком, сетку надо располагать очень близко к катоду. Число сеток в электронной лампе определяется ее конструкцией. Ближайшая к катоду сетка выполняет функции управляющего элек-

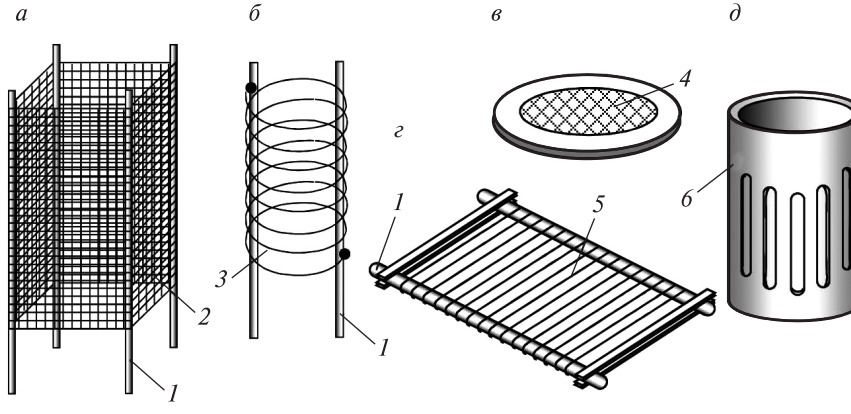



Рис. 7.4. Конструкция сеток электронных ламп:
*а* — из переплетенных проводников; *б* — навитая из проводников; *в* — дисковая для плоских электродов; *г* — навитая из проводников на рамку; *д* — стержневая — цилиндрическая; *1* — траверса; *2* — переплетенная проволока; *3* — витая проволока; *4* — сетка из проволоки плоская; *5* — проволока на рамке; *6* — цилиндр с прорезями

трода, а все последующие (вторая, третья) — соответственно экранирующего, защитного электродов лампы.

Необходимое напряжение на электроды подается по специальным металлическим проводникам — выводам, проходящим через баллон лампы. Выводы (токоотводы) пропускают через стеклянный или керамический цоколь (дно) лампы в виде ножки (рис. 7.5). Расположение выводов электродов лампы — цоколевка — приводится в справочниках.

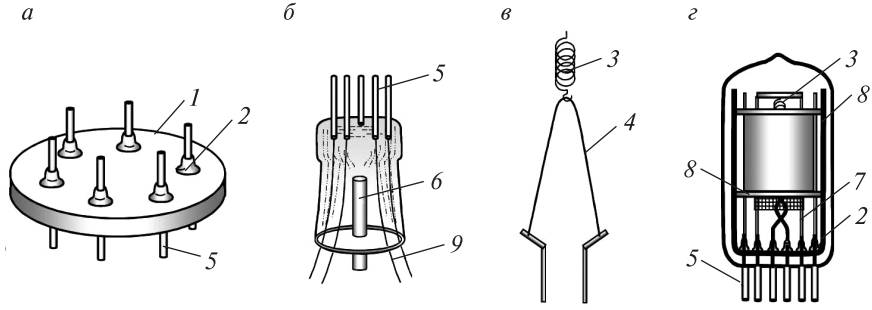



Рис. 7.5. Примеры крепления электродов и выводов в баллонах электронных ламп:
*а* — выводы для пальчиковой серии на плоском утолщенном стеклянном основании баллона; *б* — выводы в стеклянной сплющенной трубке — в корпусе основания; *в* — подвеска катода с помощью пружины; *г* — держатели электродов в баллоне; *1* — утолщенное основание баллона; *2* — держатели электродов; *3* — пружина; *4* — нить накала (подогреватель); *5* — внешние выводы; *6* — электроды; *7* — токоотводы; *8* — изоляторы для подвески электродов; *9* — держатели электродов

Фиксация взаимного расположения электродов в баллоне лампы достигается с помощью крепежных деталей. Эти детали изготовляют из металла (обычно никеля) или диэлектрика (из специальных видов слюды или керамики). Для поддержания вакуума и поглощения газов, выделяемых при сильном нагреве электродов из металлов, в баллон вводят химический газопоглотитель (геттер) (рис. 7.6). В качестве геттера служит барий или его соединения. Таблетка бария закрепляется на специальной никелевой полке, обращенной к куполу или боковой стенке баллона. При нагревании токами высокой частоты барий испаряется, его пары оседают на холодной стенке баллона, образуя слой

геттера (зеркальная поверхность внутри на баллоне). Геттер химически связывает появляющиеся в баллоне газы.

### *7.2.2. Классификация электронных ламп*

Классификацию ламп проводят по следующим признакам.

1. По числу электродов, содержащихся в лампе:

– диоды — с двумя электродами (катод, анод);

– триоды — с тремя электродами (катод, анод и одна сетка);

– тетроды — с четырьмя электродами (катод, анод и две сетки);

– пентод — с пятью электродами (катод, анод и три сетки);

– гексоды — с шестью электродами (катод, анод и четыре сетки);

– гептоды — с семью электродами (катод, анод и пять сеток);

– октоды — с восемью электродами (катод, анод и шесть сеток).

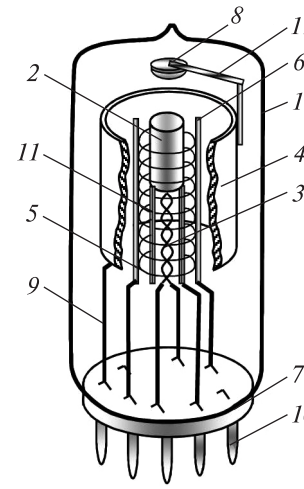



Рис. 7.6. Конструкция электронной лампы:
*1* — баллон; *2* — катод; *3* — нить подогревателя катода; *4* — анод; *5* — сетка; *6* — траверса; *7* — стеклянная ножка (цоколь); *8* — геттер; *9* — токоотводы (выводы); *10* — ножки; *11* — крепежные детали

Лампы с двумя и более сетками выделяются в отдельную группу — многоэлектродные. Конструктивно в одном баллоне могут находиться несколько групп электродов с независимыми потоками электронов (два диода, два триода, триод и пентод и т.д.). Такие лампы называются комбинированными (двойной диод, двойной триод, триод — пентод, двойной диод — пентод и т.д.).

2. По способу подогрева катода:

– прямого накала; косвенного накала.

3. По материалу и устройству баллона:

– стеклянный; металлический; керамический; комбинированный.

4. По виду преобразования электрической энергии:

– выпрямительные — для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока;

– генераторные — для преобразования энергии постоянного тока в энергию переменного тока синусоидальной формы высокой и сверхвысокой частоты;

– усилительные — для преобразования электроэнергии по силе тока или напряжения;

– частотопреобразовательные — для преобразования электроэнергии переменного тока по частоте;

– детекторные — для выделения энергии переменного тока определенной частоты.

5. По уровню выходной мощности:

– приемно-усилительные лампы с выходной мощностью 10—20 Вт;

– генераторные лампы с выходной мощностью от 10 Вт до нескольких МВт.

6. По рабочему диапазону частот:

– низкочастотные $f_р < 20$ кГц;

– высокочастотные $f_р = 20$ кГц — 30 МГц;

– сверхвысокочастотные $f_р > 30$ МГц.

### *7.2.3. Условное обозначение электронных ламп*

Основой системы обозначений электронных ламп, так же как и всех электровакуумных приборов, служат два вида обозначений — графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 7.7.

Система условных графических обозначений электронных ламп построена поэлементным способом и содержит:

– общее обозначение — базовый символ баллона (корпуса) в виде окружности диаметром $D = 10$ или 12 мм или овала шириной $h = 10$ или 12 мм и длиной $L = 20$ или 24 мм. Внутри баллона показаны: анод в виде отрезка длиной $L = 8$—10 мм с линией — выводом от середины отрезка, и катод прямого накала в виде дуги радиусом $R = 8$—12 мм и длиной $L = 8$—14 мм с линиями — выводами от концов дуги. Подогреваемый катод (катод косвенного накала) состоит из двух символов — подогревателя, изображенного так же, как и катод прямого накала, и собственно катода, обозначаемого дугой

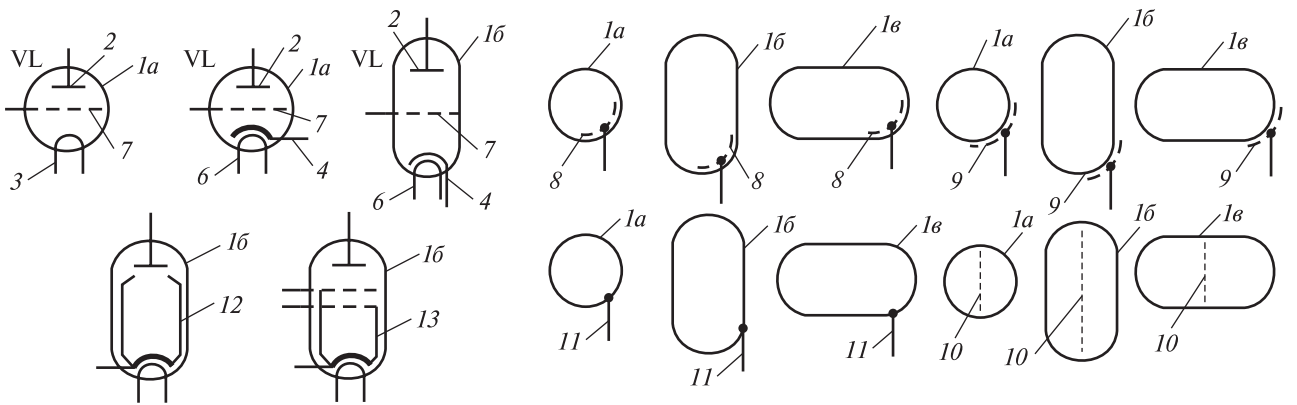



Рис. 7.7. Элементы условного графического обозначения электронных ламп:
*1* — баллон (*а* — круглый; *б* — овальный вертикальный; *в* — овальный горизонтальный); *2* — анод; *3* — катод прямого накала; *4* — катод косвенного накала; *6* — подогреватель; *7* — сетка; *8* — внутренний экран; *9* — внешний экран; *10* — разделительный экран; *11* — металлический экран — корпус с выводом; *12* — экранирующий электрод с соединением на катод; *13* — экранирующий электрод с соединением катод—сетка

над подогревателем радиусом $R = 10—14$ мм и длиной $L = 10—16$ мм с линией — выводом от одного конца дуги;

– дополнительные обозначения: сетка — три коротких штриха (длина штриха $L = 3—6$ мм) независимо от ее назначения и названия. Число сеток в графическом изображении зависит от конструкции лампы и сетки изображаются на одинаковом расстоянии друг от друга. Если число сеток больше одной, ближняя к катоду сетка называется управляющей, затем — экранирующая, защитная. Внутренний экран обозначается в виде штриховой дуги внутри баллона длиной 1/4 окружности диаметром $D = 10$ или 12 мм. Наружный экран изображают так же, как внутренний, но за пределами обозначения баллона от экрана сделан токоотвод — линия. Если экраном служит сам металлический баллон или слой металла, нанесенный на поверхность стеклянного баллона, то этот токоотвод показывают от символа баллона. Внутренний разделительный экран комбинированных ламп, изображают штриховой линией вдоль баллона, разделяющей условные обозначения соответствующих групп электродов. Экранирующие электроды изображаются в виде отрезков линии вдоль баллона и соединяются с катодом или с сеткой и катодом.

Комбинированные лампы, состоящие из двух, трех и более самостоятельных приборов, могут иметь в обозначении как общий катод, так и раздельные катоды. Отдельные части такой комбинированной лампы нередко используются в разных участках схемы. Это приходится учитывать при составлении схемы и изображать их в разных, иногда далеко отстоящих одно от другого местах, чтобы не спутать части комбинированной лампы с другими электронными приборами. Ее баллон вычерчивают не полностью. При этом если в комбинированной лампе один подогреватель, общий для всех катодов, его изображают только на одном из частичных символов, если же части лампы имеют общий катод, то подогреватель изображают только в одной части, а катод в каждой части баллона.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения электронной лампы (маркировку), классифицирующий электронные лампы по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим указывается буквенно-символическое обозначение: VL1, VL1.1, где VL — электровакуумный при-

бор, 1 — порядковый номер прибора в схеме, 1.1 — первая группа электродов в комбинированном приборе под номером 1.

Примеры графического обозначения некоторых типов электронных ламп по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81 приведены на рис. 7.8.

Промышленность выпускает несколько типов электронных ламп, которые имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий электронные лампы по определенным признакам в справочниках и состоящий из следующих элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81.

*Первый элемент* — цифра округленно указывает напряжение накала подогревателя или катода прямого накала (6 — напряжение накала 6,3 В, 5—5 В, 1—1,4 В, 3—3,15 В).

*Второй элемент* — буква характеризует назначение и тип лампы (Д — диод; Ц — диод, предназначенный для выпрямления переменного тока (кенотроны); С — триоды; Э — тетроды; П — низкочастотные выходные пентоды и лучевые тетроды; Ж — пентоды с короткой анодно-сеточной характеристикой; К — пентоды с удлиненной анодно-сеточной характеристикой; Г — комбинированные лампы диод-триоды; Б — комбинированные лампы диод-пентоды; Ф — комбинированные лампы триод-пентоды; Н — комбинированные лампы двойной триод; Х — двойной диод; Р — двойной лучевой тетрод.

*Третий элемент* — цифра или двухзначное число обозначает порядковый номер разработки лампы данного типа, позволяет различать однотипные (прибора) лампы.

*Четвертый элемент* — буква характеризует конструктивное исполнение лампы и вид материала баллона, конструкцию выводов и габариты (П — пальчиковая миниатюрная, т.е цельностеклянная со штырьками, выходящими непосредственно из стеклянного баллона диаметром D = 19—22; С — стеклянная с восьмиштырьковыми цоколем и диаметром баллона более 24 мм; Р, А, Б, Г — сверхминиатюрные лампы с диаметром стеклянного баллона Р — 5 мм, А — 18 мм, Б — до 10 мм, Г — свыше 10 мм. Отсутствие в системе обозначения типов электронных ламп четвертого элемента указывает на то, что эта лампа имеет металлический баллон.

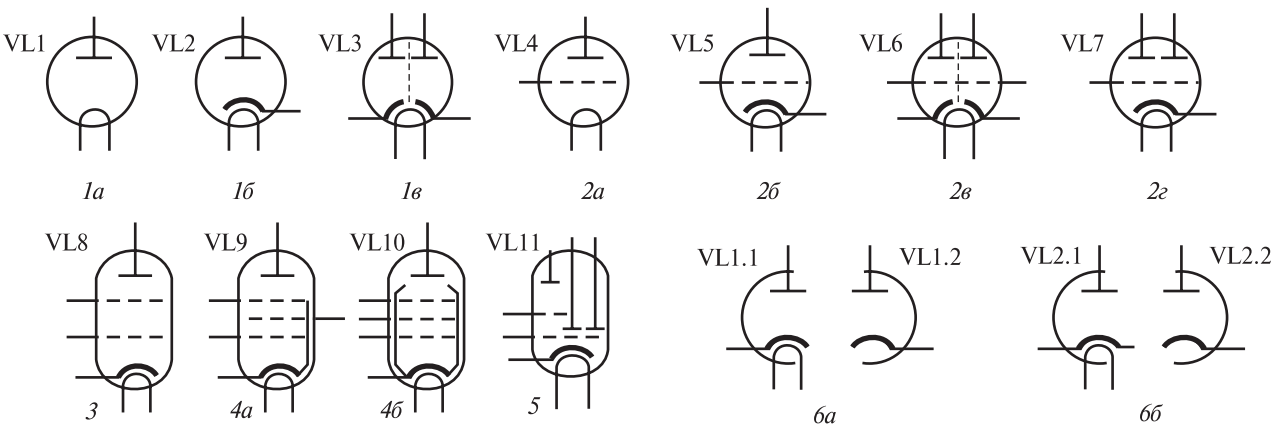



Рис. 7.8. Графическое обозначение некоторых типов электронных ламп:
*1* — диоды (*а* — одинарный диод с катодом прямого накала; *б* — одинарный диод с катодом косвенного накала; *в* — двойной диод); *2* — триоды (*а* — одинарный триод с катодом прямого накала; *б* — одинарный триод с катодом косвенного накала; *в* — двойной триод; *г* — двуханодный триод); *3* — тетрод; *4* — пентод (*а* — с экранирующим катодом; *б* — с экранирующими катодом и сеткой); *5* — двойной диод-триод; *6* — двойной диод с расположением каждого диода в разных частях схемы (*а* — с общим подогревателем и раздельными катодами; *б* — двойной диод с общим катодом косвенного накала)

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* 6Н1П: 6 — напряжение накала 6,3 В; Н — комбинированная лампа двойной триод; 1 — номер разработки; П — пальчиковая; 6П45С: 6 — напряжение накала 6,3 В; П — низкочастотный выходной пентод; 45 — номер разработки, С — стеклянная с восьмиштырьковыми цоколем и диаметром баллона более 24 мм в стеклянном баллоне нормальных габаритных размеров; 6Ж8: 6 — напряжение накала 6,3 В, Ж — пентод с короткой анодно-сеточной характеристикой, 8 — номер разработки, отсут-ствие четвертого элемента в обозначении указывает на то, что эта лампа имеет металлический (стальной) баллон.

### *7.2.4. Режимы, параметры и процессы в электронных лампах*

Электронная лампа — униполярный прибор, в котором создается только поток электронов и происходит управление этим потоком. Управление движением электронов, эмитированных катодом, осуществляется с помощью электрических полей, создаваемых электродами, потенциалы которых задаются внешними источниками. В электронных лампах потенциал катода принимают равным нулю ($U_К = 0$) и отсчитывают потенциалы всех других электродов относительно этого уровня. Разность потенциалов между электродом и катодом называется напряжением на электроде. При $U_К = 0$ напряжение на электроде численно равно его потенциалу.

Током электрода называют ток, протекающий во внешней цепи данного электрода. В соответствии с названием электрода различают анодный ток, сеточный ток и др.

Работа электронных ламп, как и полупроводниковых приборов, зависит от различных условий воздействия на них. Под воздействием понимают внешние факторы: электрические, механические, климатические, магнитные и т.д. Совокупность внешних воздействий определяет режимы работы электронных ламп. Так, например, электрический режим определяет значения напряжений на электродах и токи в их цепях при работе в определенных условиях. Механический режим определяет совокупность механических воздействий на работающую лампу (удары, тряски и т.п.).

Интервал рабочих температур, влажность и другие факторы определяют климатический режим. Каждая из величин, характеризующих режим, называется параметром режима.

Специальными стандартами или техническими условиями устанавливаются номинальный и предельный режимы электронных ламп. Номинальный режим характеризует условия работы, на которые рассчитан прибор. Предельный режим определяет максимально или минимально допустимые значения параметров режима.

К электродам прибора, работающего в схемах, могут быть подключены источники как постоянных, так и переменных напряжений. Если напряжения всех электродов прибора постоянны, т.е. не изменяется действующее значение амплитуды напряжения, то режим работы называется статическим. В этом случае все параметры режима остаются неизменными.

Режим работы, при котором хотя бы один из параметров действующего значения амплитуды напряжения, подключенного к одному из электродов, изменяется во времени, называется динамическим. Если параметры изменяются настолько медленно, что режим работы прибора в каждый момент времени несущественно отличается от статического, т.е. для прибора остается практически справедливым закон статического режима, то такой режим называется квазистатическим. В общем случае при динамическом режиме связи между параметрами отличаются от связей, характерных для статического режима.

При включении электронных ламп в различных схемах к их электродам могут быть включены различные элементы: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и т.д., которые называют нагрузочными элементами или просто нагрузкой.

Режим работы с нагрузкой в цепи какого-либо электрода называют режимом нагрузки или динамическим, так как элементы нагрузки могут изменять свои параметры во времени, что ведет к изменению напряжения на электродах лампы.

Все электронные лампы характеризуются параметрами. Параметры — это величины, характеризующие свойства прибора. Например, для электронной лампы параметрами служат номинальное напряжение накала, максимальное значение тока какого-либо электрода, максимальное значение мощности, выделяемой на аноде, значение междуэлектродных емкостей и др.

Особое место занимают статические параметры электронных ламп — величины, характеризующие в статическом режиме влияние изменения напряжения на одном или двух электродах лампы,

на изменение тока в цепи какого-либо электрода при условии, что напряжение на остальных электродах остается неизменным.

Рабочие параметры характеризуют основные свойства прибора в режиме нагрузки (динамическом) при условии, что неизменными остаются ЭДС источника постоянного напряжения и нагрузка в выходной цепи прибора.

Зависимость какого-либо параметра прибора от другого параметра при условии, что все остальные параметры остаются неизменными, называют характеристикой электронной лампы. Характеристики могут быть представлены таблично или графически. Совокупность таких зависимостей между параметрами, каждая из которых отличается от других новым постоянным значением параметра, называют семейством характеристик.

Важнейшими характеристиками электронных ламп являются статические характеристики, отображающие зависимость тока в цепи какого-либо электрода от напряжения на этом или другом электроде в статическом режиме.

Кроме статических используют и другие характеристики электрических ламп, например зависимость коэффициента усиления от частоты сигнала, зависимость статических параметров от нагрузки — динамическая характеристика и др.

Как уже говорилось выше, в работе электронной лампы можно выделить два основных процесса: создание потока заряженных частиц (электронов) и управление этим потоком. Источником электронов в лампе является катод. Основная задача — добиться выхода электродов из катода на его поверхность. Электроны, совершая хаотическое тепловое (при комнатной температуре $T = 300$ К) движение в металле, подходят и к его поверхности, а небольшое их количество, у которых достаточно большая энергия, выходят на его поверхность и даже могут удалиться на некоторое расстояние от нее. Электроны, покинувшие металл, оставляют у самой поверхности слой положительно заряженных ионов металла. Таким образом, по обе стороны от поверхности металла образуется электрический слой (рис. 7.9) с напряженностью поля $E_{\text{внеш}}$.

Электрическое поле, созданное этим электрическим слоем, является тормозящим для электронов, которые направляются к поверхности катода. Электроны, энергия которых недостаточна для выхода на поверхность, смещаются и располагаются в поверхностном слое

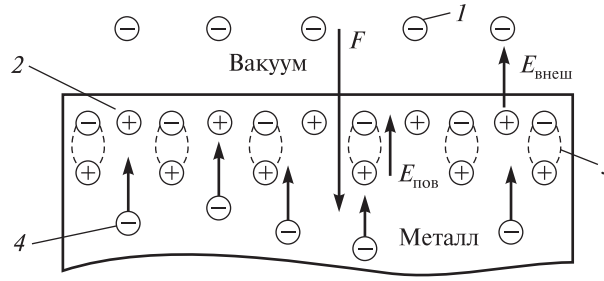



Рис. 7.9. Структура катода без активирующего вещества в процессе работы выхода электронов при комнатной температуре (около 300 К) в электронной лампе:

$E_{внеш}$ — внешнее электрическое поле; $E_{пов}$ — поверхностное электрическое поле; $F$ — отталкивающая сила, действующая на электрон; *1* — электроны, покинувшие металл (катод); *2* — ионы в поверхностном слое металла (катоде); *3* — поляризованные атомы металла (подложки) катода; *4* — свободные электроны катода

катода (рис. 7.9). Происходит поляризация атомов у поверхности металла (эллиптическая форма орбиты электронов в атомах) и создается электрический слой отрицательных зарядов, а положительные заряды смещаются вглубь катода. В результате такой поляризации атомов на поверхности металлического катода возникает электрическое поле напряженностью $E_{пов}$.

Отсюда можно сделать вывод, что у поверхности металла действуют совместно и согласованно два электрических поля (двойной слой): поверхностное (внутреннее) и внешнее. Эти два поля препятствуют движению электронов к поверхности металла (катода) и выходу на поверхность, так как электрическая сила $F$ направлена вглубь металла, т.е. действует встречно с направлением движения электронов и препятствует выходу электронов. Для преодоления этого тормозящего поля электронам требуется затратить значительную энергию — совершить работу выхода $W_0 = q\varphi_0$, где $q$ — заряд электрона, а $\varphi_0$ — разность потенциалов двойного электрического слоя.

Работа выхода зависит от материала вещества, из которого изготовлен катод. У вольфрама $W_0 = 4{,}5$ эВ, у тория $W_0 = 3{,}35$ эВ. Процесс испускания (выхода) электронов с поверхности катода называют электронной эмиссией.

В электронных лампах электронную эмиссию создают путем нагрева катода, и такой вид электронной эмиссии называют термоэлектронной эмиссией. Важнейшим параметром катода является его эффективность $H = I_i/P_у$, мА/Вт, где $I_i$ — ток эмиссии, $P_н$ — мощность, затраченная на нагрев катода. Эффективность катода тем больше, чем бóльший ток эмиссии можно получить на каждый ватт мощности, затраченный на накал катода. Эффективность катода тем выше, чем меньше работа выхода, т.е. чем меньше затрачено энергии для выхода электронов из катода.

Для уменьшения работы выхода электрона применяют активацию катода. Активация — это нанесение на поверхность катода тонкой пленки материала, который имеет меньшую работу выхода электронов на поверхность, чем у материала, из которого изготовлен катод. На слой активирующего материала действует сила ($F_{пов}$) поля поверхностного слоя катода (подложки), созданного поляризованными атомами, электроны которых не смогли покинуть поверхностный слой металла (рис. 7.10). В этом случае электроны атомов активирующего слоя перемещаются к поверхности подложки, не разрывая связей с ядром атома, т.е. происходит деформация

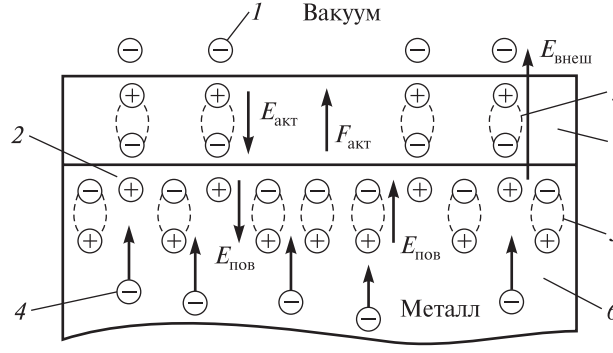



Рис. 7.10. Структура катода с активирующим веществом при комнатной температуре (около 300 К) в электронной лампе:
$E_{внеш}$ — внешнее электрическое поле; $E_{пов}$ — поверхностное электрическое поле; $F$ — отталкивающая сила, действующая на электрон; $E_{акт}$ — электрическое поле активатора; *1* — электроны, покинувшие металл (катод); *2* — ионы в поверхностном слое металла (катоде); *3* — поляризованные атомы металла (подложки) катода; *4* — свободные электроны катода; *5* — поляризованные атомы активированного слоя; *6* — подложка (металлический катод); *7* — активирующий слой

электронных оболочек атомов. В активирующем слое возникает собственное поле $E_{акт}$ силой $F_{акт}$, действующей навстречу полю с силой $F_{пов}$ подложки (рис. 7.10). В результате тормозящее поле у поверхности подложки $F_{пов}$ частично компенсируется силой $F_{акт}$ и требуется меньшая энергия нагрева для его преодоления, примерно на 2-3 эВ.

Электроны, вышедшие с поверхности катода, могут совершать хаотическое движение вблизи катода на расстоянии в соответствии с запасом энергии, полученной при выходе. Отдельные электроны достигают поверхности других электродов (анод, сетки), что указывает на наличие небольшого тока при отсутствии напряжения. Этот ток называют начальным током. Начальный ток можно исключить, если между электродами включить напряжение относительно катода («плюсом» на катод). За счет этого электрического поля электроны будут притягиваться к катоду, прекратится движение их в лампе и ток будет равен нулю. Большая часть электронов в отсутствие напряжения между анодом и катодом заполняет пространство между ними, образуя отрицательный пространственный заряд, величина которого уменьшается от катода к аноду. Пространственный заряд вблизи катода создает область отрицательного потенциала — электронное облако.

Направленное движение электронов в лампе создается за счет электрического поля при подключении внешнего напряжения между катодом и другими электродами (анод, сетка). Полярность приложенного напряжения должна быть такой, чтобы электроны двигались от катода к аноду, т.е. на катоде должен быть «минус» относительно других электродов. При таком включении напряжения возникает ток в лампе, т.е. направленное движения электронов в вакууме. Изменяя величину приложенного напряжения между катодом и анодом, катодом и сеткой можно изменять силу анодного тока. По мере возрастания напряжения происходит рассасывание пространственного заряда и возрастание тока. При некотором значении напряжения пространственный заряд полностью рассасывается и наступает режим насыщения, когда все электроны, вылетевшие с катода, достигают анода. Таким образом, при работе электронной лампы наблюдаются два режима — режим пространственного заряда и режим насыщения.

Основным режимом является режим пространственного заряда, так как в этом режиме проявляются управляющие действия по-

ля анода и анодный ток изменяется пропорционально анодному напряжению. Эта пропорциональность нарушается в режиме насыщения, когда изменение анодного напряжения не приводит к соответствующему изменению анодного тока.

## 7.3. Двухэлектродные лампы — диоды

### *7.3.1. Устройство и принцип действия*

Двухэлектродная лампа — простейший электронный прибор, содержащий два электрода — катод (К) и анод (А), разделенные вакуумным промежутком. Электроды имеют цилиндрическую или плоскую формы с катодом прямого или косвенного накала.

На рис. 7.11 показана примерная конструкция диода с катодом косвенного накала. В статическом режиме к электродам диода подключают источник анодного напряжения (рис. 7.12).

Для создания в лампе ускоряющего поля отрицательный полюс источника питания подключают к катоду, а положительный к аноду. Это напряжение называют анодным напряжением $U_а$. Одновременно к цепи накала подключаем источник накала $U_н$, под действием которого катод разогревается и начинает эмитировать электроны. Электроны попадают в ускоряющее поле $E_а$ анодного напряжения

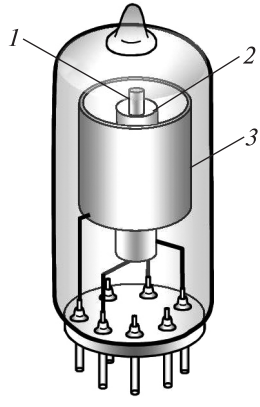



Рис. 7.11. Конструкция электронной лампы (диода) с катодом косвенного накала:
*1* — подогреватель; *2* — катод; *3* — анод

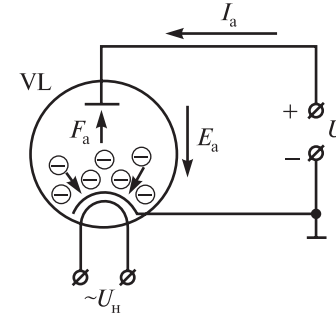



Рис. 7.12. Схема включения электронной лампы (диода)

$U_а$ и под действием сил поля $F_а$ перемещаются к аноду. Достигнув анода, электроны движутся по соединительным проводам к положительному полюсу источника анодного напряжения. При этом через диод и его внешнюю цепь течет ток, направление которого во внешней цепи показано стрелкой ($I_а$). Анодный ток направлен от анода к катоду, т.е. в противоположном направлении относительно движения электронного потока.

Когда на анод относительно катода подан отрицательный потенциал, а на катод — положительный, в пространстве между анодом и катодом создается тормозящее электрическое поле. При этом анодный ток прекращается, поскольку электроны под действием электрического поля возвращаются на катод. Таким образом, ток в диоде может протекать лишь в одном направлении от анода к катоду. Следовательно, диод обладает свойствами односторонней проводимости. Это свойство определяет основное назначение диодов — выпрямление переменного тока.

Двухэлектродные лампы, применяемые для выпрямления переменного тока, называют кенотронами.

### *7.3.2. Статические характеристики диода*

Анодный ток диода зависит от напряжения накала $U_н$ и анодного напряжения $U_а$. Наибольший интерес представляет анодная характеристика диода — зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении накала $I_а = \varphi(U_а)$ при $U_н = \text{const}$.

Зависимость $I_а$ для диода графически представлена на рис. 7.13. В анодной характеристике вакуумного диода можно отметить три характерных участка, соответствующих начальной ($AB$), восходящей ($BC$) и пологой ($CD$) областям.

Начальную область можно представить в виде двух участков: участок $AB'$, когда на аноде «минус» относительно катода, и участок $B'B$, когда на аноде «плюс» относительно катода. Анодный ток в начальной области $AB$ на участке $AB'$ соответствует небольшому количеству электронов, которые обладают достаточной энергией и способны достигать катода. Отрицательное напряжение на аноде ($-U_а$), при котором анодный ток равен нулю, составляет $-U_а = 0{,}5—0{,}7$ В.

При повышении анодного напряжения ток возрастает, но не сразу достигает своего наибольшего значения — тока насыщения.

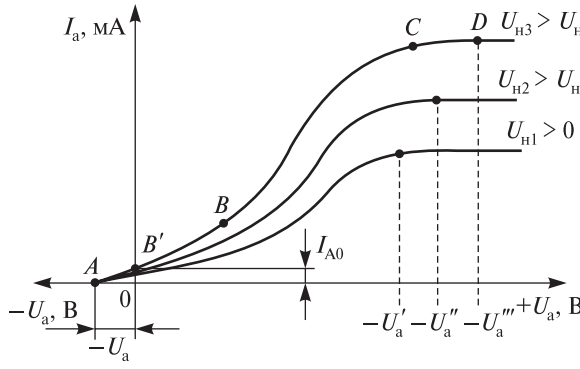



Рис. 7.13. Экспериментальные анодные характеристики электронной лампы (диода)

В области малых анодных напряжений (в области *AB* на участке *B′B* ток изменяется незначительно за счет влияния пространственного заряда, а затем быстро — на участке *BC*. Анодный ток возрастает, но вблизи катода сохраняется пространственный заряд, и часть электронов может возвращаться, не достигнув анода. По мере увеличения анодного напряжения плотность пространственного заряда уменьшается и при некотором значении анодного напряжения (напряжения насыщения) анодный ток достигает максимального значения и равен току эмиссии (участок *CD*). В этом режиме, который называется режимом насыщения, увеличение анодного тока $I_а$ возможно только за счет роста тока эмиссии. Однако экспериментальные анодные характеристики показывают, что в режиме насыщения (участок *CD*) анодный ток незначительно, но возрастает, и характеристика имеет наклон к оси абсцисс. Это обусловлено следующими факторами: ускорение при движении электронов, неравномерный нагрев катода и проявление эффекта Шоттки. Повышение напряжения $U_а$ ведет к увеличению внешнего электрического поля, электроны дополнительно ускоряются и покидают катод. Возле катода еще больше уменьшается область пространственного заряда и соответственно уменьшается тормозящее электрическое поле возле катода. Это способствует снижению работы выхода электронов из катода и увеличению эмиссии электронов. Особенно сильно проявляется эффект Шоттки у оксидных катодов.

### *7.3.3. Параметры диодов*

Различают основные технические, статические параметры, параметры предельно допустимого режима и др. В этом разделе мы рассмотрим статические, основные электрические и предельно допустимые параметры диода.

Статические параметры диода — это величины, характеризующие основные свойства лампы в статическом режиме. Для диодов статическими параметрами являются крутизна анодной характеристики лампы $S$, внутреннее или дифференциальное сопротивление лампы $R_i$ и сопротивление при постоянном токе или статическое сопротивление $R_0$.

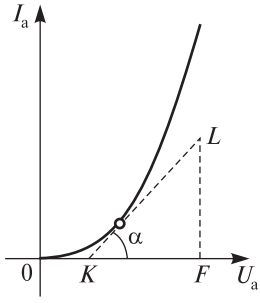



Рис. 7.14. К определению крутизны характеристики электронной лампы (диода) методом касательной

*Крутизна характеристики лампы* $S$ (мА/В) показывает, насколько изменяется анодный ток при изменении анодного напряжения на 1 В. Поскольку анодная характеристика диода нелинейна, крутизна для различных точек характеристики различна.

Для любой точки характеристики крутизна определяется по формуле $S = \dfrac{\mathrm{d}I_a}{\mathrm{d}U_a}$, при $U_н = \text{const}$.

Таким образом, крутизну можно определить для отдельных точек характеристики методом касательной в заданной точке (рис. 7.14), применяемым в основном для криволинейных участков характеристик. В этом случае крутизна численно равна тангенсу угла наклона касательной к оси абсцисс и определяется из треугольника $KLF$ как отношение катета $LF$ к катету $KF$.

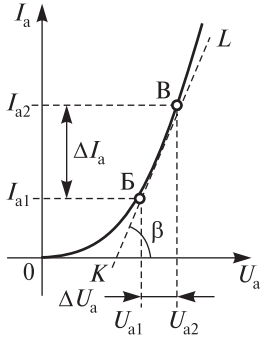



Рис. 7.15. К определению крутизны характеристики электронной лампы (диода) методом двух точек

Крутизну также можно определить приближенно (рис. 7.15) методом двух точек по отношению приращения анодного тока $\Delta I_a$ вблизи точки Б к соответствующему приращению анодного напряжении $\Delta U_a$. Такой метод применим только для прямолинейного участка характеристики (в режиме

пространственного заряда). В этом случае выбирают две точки, например Б и В, и по их проекциям на оси координат определяют $I_a$ и $U_a$. Получив разность токов $\Delta I_a = I_{a2} - I_{a1}$ и разность напряжений $\Delta U_a = U_{a2} - U_{a1}$, вычисляют крутизну характеристики $S$.

Крутизна для диодов $S = 1—30$ мА/В, и чем она выше, тем лучше лампа. Геометрический смысл крутизны состоит в том, что она определяет наклон характеристики диода к оси абсцисс.

*Внутреннее (дифференциальное) сопротивление* $R_i$ (Ом) диода переменному току является величиной, обратной крутизне:

$$R_i = \frac{1}{S} = \frac{dU_a}{dI_a} \text{ при } U_н = \text{const или } R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

Внутреннее сопротивление определяется по характеристике так же, как крутизна. Оно постоянно лишь на прямолинейном участке (рис. 7.15) характеристики и обычно увеличивается на участках, где крутизна минимальна. Внутреннее сопротивление диода $R_i = 50—1000$ Ом.

*Сопротивление лампы при постоянном токе* (статическое сопротивление) определяется как отношение напряжения к току. Например, для точки В характеристики, показанной на рис. 7.15, $R_0 = \frac{U_{a2}}{I_{a2}}$.

Сопротивление при постоянном токе численно равно котангенсу угла наклона (ctg β) прямой линии — касательной, проведенной из начала координат в заданную точку. На рис. 7.15 прямая линия (касательная) *KL*, проведенная к точке Б, совпадает с прямой, проведенной к точке В, так как этот участок характеристики является прямолинейным. При выборе точки не на прямолинейном участке для каждой точки будет своя касательная. В зависимости от того, на каком участке характеристики определяется $R_0$, его значение может быть меньше или больше значения $R_i$. В режиме пространственного заряда $R_0 = \frac{3}{2} R_i$.

*Основные электрические параметры* — это электрические величины, характеризующие условия работы лампы. При этом оговаривается номинальный режим работы прибора. Для диодов номинальный режим определяют:

– напряжение накала $U_н$ (В);
– анодное напряжение $U_а$ (В);
– ток накала $I_н$ (А);
– выпрямленный ток $I_{выпр}$ (А);
– начальный ток анода при $U_{а0} = 0$, $I_{а0}$ (мА) и др.

*Параметры предельно допустимого режима.* К этой группе параметров относятся прежде всего электрические параметры прибора — предельно допустимые значения, выход за пределы которых не разрешается стандартом или техническими условиями. В паспорте лампы, как правило, указываются:

– наименьшее и наибольшее значения напряжения канала $U_{н\ max}$ (В), $U_{н\ min}$ (В);
– наибольшее обратное напряжение анода $U_{а\ max}$ (В);
– наибольшая допустимая мощность, выделяемая на аноде, $P_{а\ max}$ (Вт);
– наибольший ток анода в импульсе $I_{а\ max}$ (мА);
– наибольший выпрямленный ток $I_а$ (А);
– наибольшее напряжение между катодом и спиралью подогревателя.

### *7.3.4. Применения двухэлектродных ламп*

Двухэлектродные лампы обладают свойствами односторонней проводимости. Это свойство позволяет применять их для выпрямления переменного тока, детектирования высокочастотных модулированных напряжений, а также в схемах амплитудного ограничения и в других схемах.

В зависимости от области применения различают два основных типа диодов.

Первая область — выпрямление переменного тока промышленной частоты в источниках электропитания. Применяемые здесь диоды называются кенотронами. Их подразделяют на низковольтные и высоковольтные. Низковольтные кенотроны работают в схемах двухполупериодных выпрямителей со средней точкой и содержат в одном баллоне два анода и катод (двуханодный диод). Высоковольтные кенотроны применяются для питания электронно-лучевых трубок. В баллоне высоковольтного кенотрона находится катод прямого накала.

Вторая область — преобразование высокочастотных сигналов в схемах детекторов, преобразователей и ограничителей. Диоды,

работающие в этих схемах, называются детекторными или высокочастотными. В одном баллоне помещены две системы электродов, разделенные экраном (двойной диод).

Преимущество вакуумных диодов по сравнению с полупроводниками — высокое обратное напряжение $U_{a\ max}$, отсутствие обратного тока, меньшая зависимость параметров от температуры окружающей среды. Существенные недостатки — большие масса и габариты, меньшие надежность и долговечность, инерционность при включении, большие затраты мощности и др. Поэтому электровакуумные диоды в настоящее время получили ограниченное применение в электронной технике.

## 7.4. Трехэлектродные лампы — триоды

### *7.4.1. Устройство и принцип действия триодов*

Для того чтобы увеличить возможность управления потоком электронов, эмиттированных катодом, и тем самым расширить область применения электронных ламп, были созданы трехэлектродные лампы — триоды. В триоде (рис. 7.16) между анодом А и катодом К помещен еще один электрод — управляющая сетка УС. Сетка конструктивно представляет спираль, либо сетку из переплетенных проводов. Как и в диоде, в триоде имеется нить накала (Н) для разогрева катода и электрическая цепь питания анода. Главное отличие триода от диода состоит в том, что в триоде имеется дополнительная возможность управления анодным током путем изменения напряжения между сеткой и катодом.

Таким образом, анодный ток триода зависит от двух основных цепей: анодной ($U_a$) и сеточной ($U_c$). Объектом управления является пространственный заряд электронов эмиттированных катодом. Степень влияния определяется расстоянием соответствующего электрода к катоду. Управляющая сетка расположена ближе к катоду, чем анод, и поэтому влияние электрического поля сетки на пространственный заряд у катода соответственно больше, чем поля анода. Управ-

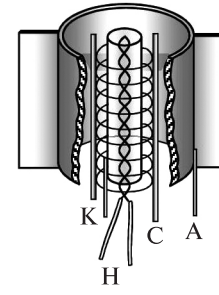



Рис. 7.16. Конструкция электродов электронной лампы (триода) с катодом косвенного накала

ляющая сетка является электростатическим экраном между катодом и анодом. Это означает, что не все электрические силовые линии поля анода достигают катода, так как часть этих линий замыкается на сетке, что приводит к соответствующему уменьшению воздействия поля анода на пространственный заряд, расположенный у поверхности катода.

Рассмотрим влияние напряжения сетки $U_c$ на величину анодного тока в схеме включения триода, показанной на рис. 7.17, *а*. Подадим постоянное напряжение между анодом и катодом $U_a$ «плюсом» на анод и постоянное напряжение между сеткой и катодом $U_c$ «минусом» на сетку. Будем изменять напряжение на сетке. При подаче отрицательного потенциала на сетку относительно катода для электронов пространственного заряда создается тормозящее поле. В результате в каждой точке между сеткой и катодом на электроны действует поле, образовавшееся при взаимодействии ускоряющего поля анода $E_a$ и тормозящим поля сетки $E_c$.

При определенном напряжении $U_c$ анодный ток $I_a$ становится равным нулю, а тормозящее поле создается не только у витков сетки, но и в промежутке между ними, препятствуя пролету электронов от катода к аноду. Напряжение $U_a$, при котором $I_a = 0$ называют напряжением запирания триода. При этом пространственный заряд у катода имеет небольшую плотность. Будем уменьшать напряжение $U_c$. Результирующее поле между витками сетки изменяется и становится ускоряющим для электронов. Чем меньше отрицательный

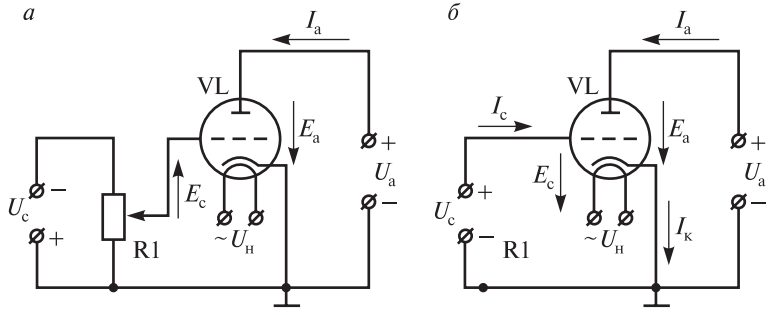



Рис. 7.17. Схемы включения электронной лампы — триода — при потенциале на сетке относительно катода:
*а* — при положительном; *б* — при отрицательном

потенциал на сетке относительно катода, тем сильнее действует ускоряющее поле и тем больше становится ток $I_a$.

При подаче положительного потенциала на сетку относительно катода $U_c$ (рис. 7.17, *б*) электроны получают ускорение не только за счет поля анода $E_a$, но также и за счет поля сетки $E_c$. Анодный ток увеличивается. Однако часть электронов притягивается к виткам сетки и образует ток сетки $I_c$.

Таким образом, при положительном потенциале на сетке поток электронов, движущихся от катода и образующих катодный ток $I_к$, разветвляется на два потока, создающих сеточный и анодный токи (рис. 7.17, *б*) $I_к = I_c + I_к$. С увеличением анодного напряжения $U_a$ возрастает анодный ток $I_a$, а сеточный ток $I_c$ несколько снижается.

Итак, изменение напряжения на сетке лампы приводит к существенному изменению картины поля в междуэлектродном пространстве, особенно в пространстве сетки — катод. На объемный заряд влияет результирующее поле в триоде, определяемое напряжением $U_a$ и $U_c$.

Поскольку управляющая сетка расположена ближе к катоду, чем анод, то ее влияние на изменение анодного тока значительно больше. Следовательно, для получения одинакового изменения анодного тока сеточное напряжение можно изменять на меньшую величину, чем анодное, т.е. $U_c < U_a$.

### *7.4.2. Статические характеристики триода*

Электронный ток в триоде управляется с помощью электрических полей, которые образуются благодаря внешним источникам питания, включенным в цепи электродов лампы. Катодный ток разветвляется на два: анодный и сеточный токи. Поэтому необходимо рассматривать зависимость каждого тока от напряжений на электродах лампы. Эти зависимости называются статическими характеристиками триода, т.е. характеристиками, снятыми при отсутствии нагрузки в анодной цепи лампы и при одном медленно изменяемом напряжении при неизменном другом. В результате можно получить четыре зависимости токов от напряжений, которые и будут статическими характеристиками триода:

– анодная характеристика (выходная) — $I_a = \varphi(U_a)$ при $U_c = \text{const}$;

– сеточно-анодная — $I_c = \varphi(U_a)$ при $U_c = \text{const}$;

– анодно-сеточная — $I_a = \varphi(U_c)$ при $U_a = \text{const}$;

– сеточная характеристика — $I_c = \varphi(U_c)$ при $U_a = \text{const}$.

Каждая из этих характеристик представляет зависимость анодного или сеточного тока от напряжения на одном из электродов триода при сохранении неизменным напряжения на другом электроде лампы.

Все четыре семейства характеристик могут отличаться для различных типов ламп в зависимости от их конструкции, назначения и т.п., но общий ход характеристик остается неизменным, типичным для любой трехэлектродной лампы. Схема для снятия этих характеристик показана на рис. 7.18.

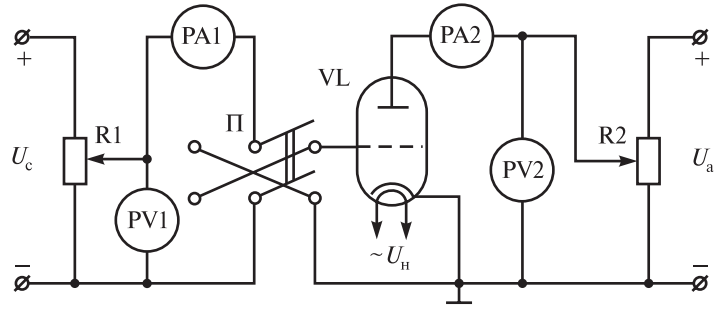



Рис. 7.18. Схемы для снятия статических вольт-амперных характеристик электронной лампы (триода)

***Анодная характеристика.*** Анодные характеристики являются выходными характеристиками триода и представляют собой зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном сеточном напряжении

$$I_a = \varphi(U_a) \text{ при } U_c = \text{const}.$$

Для снятия этих характеристик устанавливают номинальное напряжение накала $U_н$ и выбранное напряжение на сетке. Анодная характеристика, снятая при $U_c = 0$, проходит через начало координат (рис. 7.19) и на значительном протяжении линейна, подобно характеристике диода, т.е. действие сетки равно нулю и характеристика аналогична анодной характеристике диода. При подаче на сетку отрицательного потенциала ($U_c < 0$) анодные характеристики

сдвигаются вправо от начала координат (нулевой характеристики), так как при отрицательном потенциале на сетке электрическое поле анода должно компенсировать тормозящее поле сетки. Таким образом, при одном и том же напряжении между анодом и катодом анодный ток меньше при отрицательном потенциале на сетке, чем при нулевом потенциале.

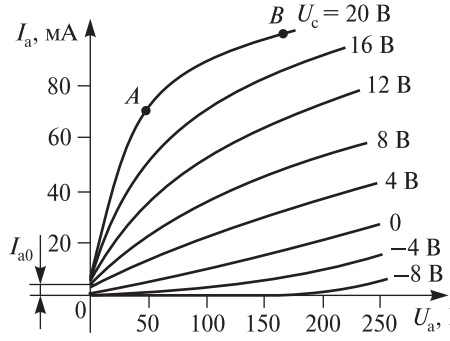



Рис. 7.19. Семейство выходных анодных характеристик электронной лампы (триода)

Анодные характеристики, снятые при $U_c > 0$, т.е. при положительном потенциале на сетке, располагаются левее характеристики, снятой при $U_c = 0$. При этом наблюдается ток $I_{a0}$ даже при $U_a = 0$, что объясняется возникновением ускоряющего поля для электронов за счет действия положительного потенциала сетки, который увеличивает энергию электронов, притягивая их и позволяя некоторым из них, пролетев между витками сетки, достичь анода. При небольшом напряжении $U_a$ вначале наблюдается резкое увеличение анодного тока $I_a$ (участок $0A$), а затем характеристика становится более пологой (участок $AB$). Это объясняется тем, что влияние анодного напряжения $U_a$ ослаблено экранирующим действием сетки, которая перехватывает электроны, движущиеся от катода к аноду, и рост анодного тока, естественно, замедляется. Электроны, захваченные сеткой, образуют ток сетки. Наклон характеристики анодного тока к оси абсцисс становится примерно таким же, как и наклон характеристики при $U_c < 0$, когда лампа работала без сеточного тока.

***Сеточно-анодные характеристики.*** Одновременно с анодными характеристиками снимаются и сеточно-анодные характеристики (характеристики обратной связи), представляющие собой зависимость сеточного тока от анодного напряжения при постоянном сеточном напряжении

$$I_c = \varphi(U_a) \text{ при } U_c = \text{const} \text{ (рис. 7.20).}$$

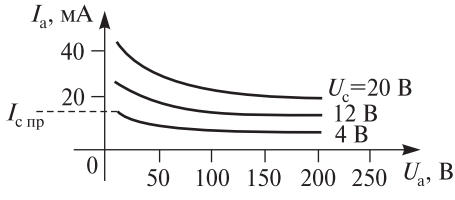



Рис. 7.20. Семейство сеточно-анодных характеристик электронной лампы (триода)

В цепи сетки токи возникают как при положительном, так и при отрицательном потенциале на сетке. При положительном и небольшом отрицательном потенциале на сетке на нее возможно попадание части электронов, пролетающих с катода к аноду триода. Эти электроны создают в цепи сетки прямой электронный ток сетки $I_{с\,пр}$. Электронный ток сетки ($I_c$) затем возрастает с повышением потенциала сетки.

При отрицательном потенциале на сетке в цепи сетки возникает обратный ток сетки, направление которого обратно электронному сеточному току. Значение этого тока составляет десятые доли микроампера, так как поле сетки значительно меньше поля анода, поэтому сеточно-анодные характеристики рассматривают только с позиции положительного потенциала на сетке относительно катода.

Для анализа работы триода при положительном потенциале на сетке вводят понятия о двух режимах работы триода — режим возврата на катод и режим перехвата электронов сеткой.

Электроны, пролетающие через сетку к аноду, создают в промежутке сетка—анод пространственный заряд. При $U_c \geq U_a$ значительная часть электронов пространственного заряда возвращается обратно к сетке под действием более сильного электрического поля сетки. При анодном напряжении $U_a = 0$ сеточный ток $I_c$ достигает максимального значения $I_{с\,пр}$ (рис. 7.20), что соответствует режиму возврата электронов на катод. С ростом анодного напряжения $U_a$ резко возрастает анодный ток $I_a$, а сеточный ток уменьшается, что объясняется влиянием электрического поля анода на электроны пространственного заряда в промежутке сетка—анод. В режиме, когда $U_c < U_a$, пространственный заряд рассеивается и сеточный ток создается только за счет электронов, непосредственно перехваченных сеткой благодаря положительному потенциалу на сетке относительно катода, что соответствует режиму перехвата электронов сеткой.

В режиме перехвата сеточный ток резко уменьшается при небольших анодных напряжениях $U_a$, но при дальнейшем увеличе-

нии $U_a$ он изменяется слабо, так как прекращается режим возврата электронов и действует только режим перехвата. Чем больше напряжение $U_c$, тем выше расположены характеристики сеточного тока, так большее количество электронов перехватываются сеткой. Уменьшение анодного напряжения при том же сеточном токе увеличивает сеточный ток.

***Анодно-сеточные характеристики.*** Анодно-сеточные характеристики триода представляют собой зависимости анодного тока при изменении сеточного напряжения и при постоянном анодном напряжении (рис. 7.21) $I_a = \varphi(U_c)$ при $U_a = \text{const}$.

При отрицательном напряжении на сетке поле сетки отталкивает электроны и прекращается движение электронов от катода к аноду. Анодный ток равен нулю и лампа закрывается. Сеточное напряжение, при котором лампа закрыта, называется напряжением запирания ($-U_{c0}$). На рис. 7.21 напряжение запирания $-U_{c0}$ пока-

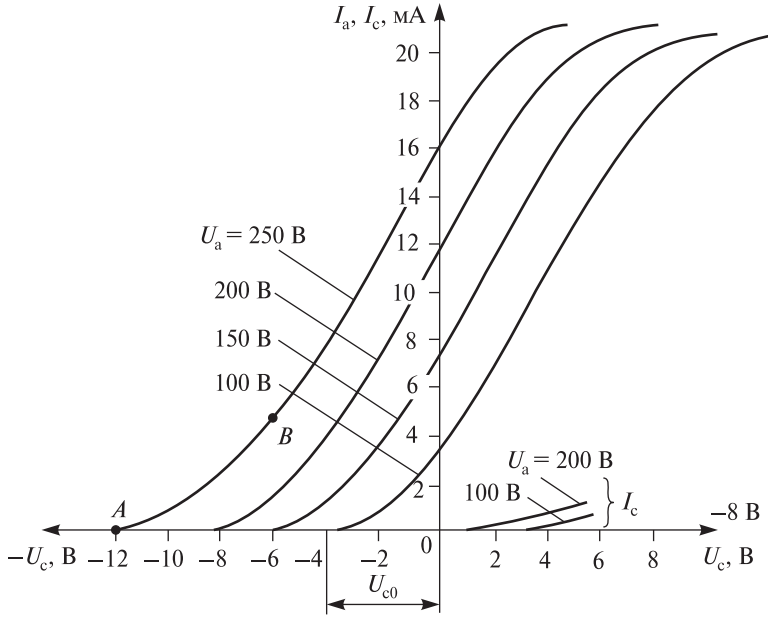



Рис. 7.21. Семейство анод-сеточных и сеточно-анодных характеристик электронной лампы (триода)

зано для характеристики при постоянном анодном напряжении, равном $U_a = 100$ В.

Значение напряжения запирания лампы зависит как от анодного напряжения, так и от конструктивных особенностей триода. Так, в лампе с густой сеткой при том же значении анодного напряжения запирающее напряжение сетки ($-U_{c0}$) меньше, чем в лампе с редкой сеткой. При большом значении анодного напряжения $U_a$ запирающее напряжение сетки $-U_{c0}$ тоже увеличивается, так как это необходимо для компенсации действия поля анода.

По мере уменьшения отрицательного сеточного напряжения, начиная с напряжения запирания, анодный ток возрастает сначала медленно (участок $0A$), а затем быстрее, и характеристика становится почти прямолинейной. В области положительных значений сеточного напряжения $U_c$ из-за появления сеточного тока ($I_c$) кривая постепенно становится более пологой, т.е. рост анодного тока замедляется. Это свидетельствует о том, что лампа работает в режиме перехвата электронов сеткой.

***Сеточные характеристики.*** Сеточные характеристики триода представляют собой зависимости сеточного тока при изменении сеточного напряжения и неизменном анодном напряжении

$$I_c = \varphi(U_c) \text{ при } U_a = \text{const}.$$

Эти характеристики снимаются одновременно с анодно-сеточными и показаны на рис. 7.21.

Из характеристик видно, что сеточный ток в основном появляется при положительном потенциале на сетке относительно катода и при определенном значении этого напряжения, т.е. сеточные характеристики начинаются не с нулевого значения сеточного напряжения (сдвинуты вправо), а при $U_c > 0{,}2—0{,}5$ В. С увеличением анодного напряжения сеточный ток при том же значении сеточного напряжения $U_c$ уменьшается, так как большая часть электронов достигает анода лампы.

### *7.4.3. Статические параметры триодов*

Трехэлектродная лампа характеризуется основными параметрами, с помощью которых оценивают влияние напряжения на электродах лампы на токи этих электродов.

*Крутизна* анодно-сеточной характеристики показывает, как изменится анодный ток лампы, если сеточное напряжение изменится на 1 В, сохраняя при этом неизменным анодное напряжение:

$$S = \frac{\mathrm{d}I_\mathrm{a}}{\mathrm{d}U_\mathrm{c}} \text{ при } U_\mathrm{a} = \text{const}.$$

Крутизна характеристики на разных участках анодно-сеточной характеристики различна. Единицей крутизны служит сименс, но обычно ее измеряют в мА/В.

Конструктивно крутизна зависит от расстояния между катодом и сеткой: чем меньше это расстояние, тем сильнее влияние поля сетки на электроны пространственного заряда у катода и тем больше *S*. На крутизну влияет также площадь катода. Крутизна зависит от мощности триода, для маломощных триодов *S* составляет 1—10 мА/В.

*Внутреннее сопротивление* лампы устанавливает связь между изменениями анодного напряжения и анодного тока при неизменном напряжении сетки

$$R_\mathrm{i} = \frac{\mathrm{d}U_\mathrm{a}}{\mathrm{d}I_\mathrm{c}} \text{ при } U_\mathrm{c} = \text{const}.$$

Сопротивление $R_\mathrm{i}$ является дифференциальным сопротивлением лампы при переменном токе, т.е. позволяет оценить изменение анодного тока от анодного напряжения в определенной рабочей точке характеристики.

Анодная характеристика триода криволинейна, поэтому сопротивление $R_\mathrm{i}$ в разных режимах его работы неодинаково. В зависимости от типа лампы и режима работы внутреннее сопротивление лампы $R_\mathrm{i}$ изменяется в пределах от 1 до 100 кОм.

*Сопротивление диода при постоянном токе (статическое сопротивление)*. Отличие статического сопротивления $R_0$ от внутреннего сопротивления $R_\mathrm{i}$ состоит в том, что сопротивление $R_0$ выражает отношение полного значения анодного напряжения к анодному току, а не отношение их приращений, т.е. $R_0 = \frac{U_\mathrm{a}}{I_\mathrm{a}}$. Для любого режима лампы параметры $R_\mathrm{i}$ и $R_0$ имеют разные значения.

*Входное сопротивление* триода зависит от режимов работы: без сеточных токов или с сеточными токами

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{с}}}{\Delta I_{\text{с}}} \text{ при } U_{\text{а}} = \text{const}.$$

Дело в том, что без сеточных токов $R_{\text{вх}}$ составляет сотни мегом, так как даже при отрицательном потенциале на сетке электроны, у которых начальная скорость вылета из катода достаточно велика, могут попадать на сетку.

При наличии сеточных токов входное сопротивление уменьшается. Следовательно, если подавать такое напряжение $U_{\text{с}}$, чтобы триод работал без сеточных токов, то $R_{\text{вх}}$ будет велико и управление происходит без затрат мощности в цепи сетки.

*Коэффициент усиления.* Коэффициент усиления триода оценивает относительное влияние сеточного и анодного напряжений на анодный ток

$$\mu = -\frac{\mathrm{d}U_{\text{а}}}{\Delta U_{\text{с}}} \text{ при } I_{\text{а}} = \text{const}.$$

Число $\mu$ показывает, на сколько надо изменить анодное напряжение при уменьшении сеточного напряжения на 1 В, чтобы анодный ток остался неизмененным. Знак «минус» означает, что для взаимной компенсации влияния на анодный ток $\Delta U_{\text{а}}$ и $\Delta U_{\text{с}}$ должны иметь разные знаки. Например, повышение $U_{\text{с}}$ вызывает увеличение тока $I_{\text{а}}$, а для его приведения к прежнему значению нужно уменьшить $I_{\text{а}}$. Для разных типов триодов $\mu$ составляет от 5 до 100 единиц.

*Проницаемость сетки.* Проницаемость сетки лампы оценивает относительное влияние сеточного и анодного напряжений на катодный ток

$$D = -\frac{\mathrm{d}U_{\text{с}}}{\Delta U_{\text{а}}} \text{ при } I_{\text{к}} = \text{const}.$$

Проницаемость сетки лампы характеризует степень проникновения электрического поля анода в пространство сетка—катод с учетом ослабления поля анода возле катода по сравнению с действием поля сетки возле катода.

При наличии сеточного тока $I_c$ проницаемость меньше и ток катода не равен току анода $I_к \neq I_a$.

При отсутствии сеточного тока ($I_c = 0$) $I_к = I_a$ и можно считать, что проницаемость обратно пропорциональна коэффициенту усиления $D = \frac{1}{\mu}$, т.е. $D = -\frac{dU_c}{\Delta U_a}$ при $I_к = I_a = \text{const}$.

В усилительных триодах $D < 1$, поэтому изменение анодного напряжения на 1 В равноценно по действию на катодный ток как очень малое изменение напряжения на сетке.

Рассмотрим статические параметры $S$ и $R_i$, связанные между собой соотношением $\mu = SR_i$, которое называется внутренним уравнением лампы.

Систематические параметры определяются по семейству статических характеристик так же, как и для двухэлектродной лампы (диода).

Кроме перечисленных параметров, триоды характеризуются, как и диоды, основными электрическими параметрами номинального и предельного режимов.

### *7.4.4. Нагрузочный режим работы триода*

#### Принцип работы триода в схеме усиления

Триоды применяются для усиления электрических сигналов. В зависимости от назначения различают следующие типы триодов: низкочастотные — для усиления слабых сигналов низкой частоты; выходные — для усиления заданной мощности низкочастотного сигнала в нагрузке; высокочастотные.

Переменный входной сигнал подают в цепь сетки. В выходную анодную цепь включают источник питания $U_a$ и нагрузку в простейшем варианте — активную $R_a$, с которой снимается усиленный сигнал (рис. 7.22).

Когда $U_{вх} = 0$, в цепи анода протекает постоянный ток покоя $I_{a0}$. При действии переменного напряжения на сетку ($U_{вх}$) анодный ток изменяется. Переменная и постоянная составляющие анодного тока создают падение напряжения на резисторе $R_a$, равное $U_R = I_a R_a$, а также часть напряжения падает на лампе $U_{a0} = U_a - I_a R_a$. Амплитуда переменного напряжения значительно больше амплитуды входного сигнала. Происходит усиление напряжения, тока, следовательно, и

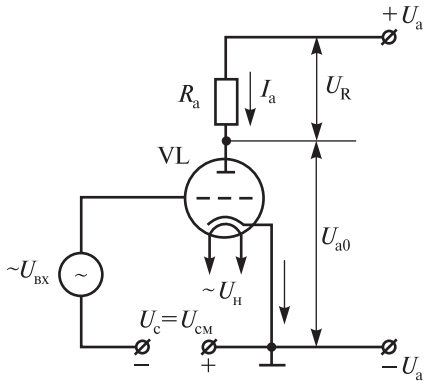



Рис. 7.22. Схема включения электронной лампы (триода) в нагрузочном режиме

мощности. Для оценки работы лампы в режиме нагрузки используют нагрузочные характеристики.

### Нагрузочные характеристики триода

Нагрузочные характеристики триода выражают зависимость $I_a = \varphi(U_a, U_c)$ при заданной нагрузке $R_a$ и напряжении источника питания $U_c$ = const или $U_a$ = const.

Выходную нагрузочную прямую строят в осях координат анодных статических характеристик (рис. 7.23) на основании уравнения, полученного по второму закону Кирхгофа для анодной (выходной) цепи $U_a = U_{a0} + I_a R_a$, где $U_{a0}$ — падение напряжения на внутренней структуре электронной лампы.

Примем $I_a = 0$, тогда из уравнения следует, что $U_a = U_{a0}$ (точка В), если же принять $U_{a0} = 0$, то $I_a = \frac{U_a}{R_a}$ (точка *А*). Соединяя обозначенные на осях координат точки *А* и *Б*, получаем выходную нагрузочную характеристику *АВ*. Каждая точка прямой *АВ* соответствует значению анодного тока лампы при нагрузке $R_a$ и постоянном напряжении на аноде $U_a$. Наклон нагрузочной характеристики зависит от нагрузки. Точка 0 соответствует статическому режиму работы триода, т.е. без нагрузки. В статическом режиме через лампу протекает постоянная составляющая анодного тока $I_{a0}$, которая создает падение напряжения на внутренней структуре триода $U_{a0}$ и на анодной нагрузке $R_a$ равное $U_R = R_a \times I_{a0}$.

Анодно-сеточную нагрузочную характеристику $I_a = \varphi(U_c)$ можно построить по координатам ($I_a$, $U_c$) точек *1, 2, 3, 0, 4, 5* и *В*, которые находятся на пересечении выходной нагрузочной характеристики с семейством статических характеристик (рис. 7.23). Перенеся эти точки в систему анодно-сеточных характеристик, строят искомую

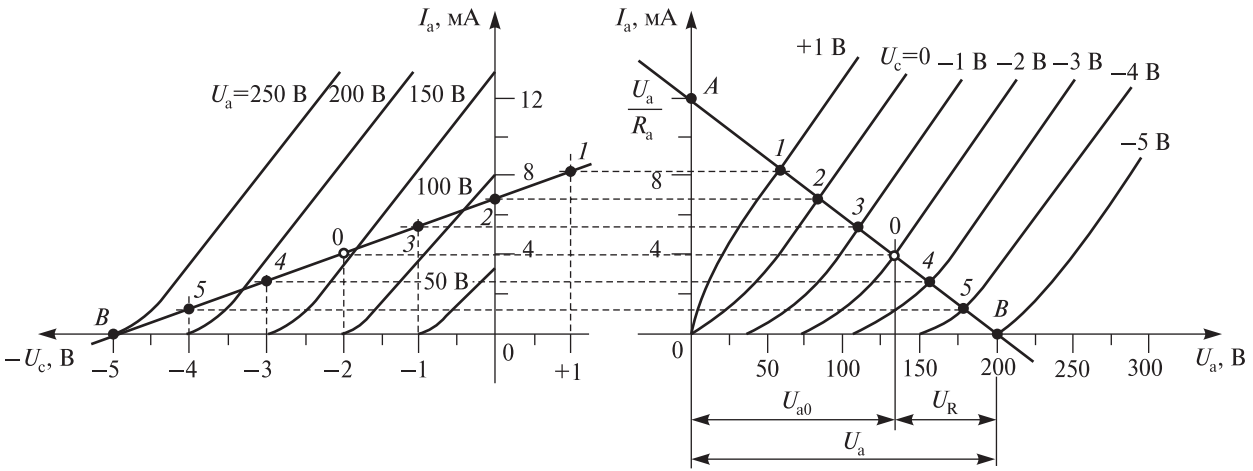



Рис. 7.23. Построение нагрузочных характеристик электронной лампы (триода)

нагрузочную характеристику $I_a = \varphi(U_c)$ при $R_a$ и $U_a = \text{const}$. Характеристика нелинейна, так как анодный ток $I_a$ нелинейно зависит от сеточного напряжения $U_c$.

### Нагрузочные параметры

Режим работы с нагрузкой характеризуют два параметра: крутизна нагрузочной анодно-сеточной характеристики $S = \dfrac{\mathrm{d}I_a}{\mathrm{d}U_c}$ и коэффициент усиления $\mu = -\dfrac{\mathrm{d}U_a}{\Delta U_c}$. Эти параметры выражают через статические параметры $S$, $\mu$ и сопротивление нагрузки $R_a$.

***Крутизна нагрузочной характеристики.*** В нагрузочном режиме во входную цепь триода (на сетку) подается переменное напряжение входного сигнала $U_{вх}$ (см. рис. 7.22). В этом режиме изменение сеточного напряжения приведет к изменению анодного тока, следовательно, и напряжения между анодом и катодом.

В результате анодный ток $I_a$ является функцией двух переменных $U_c$ и $U_a$, когда $U_a$ непостоянно и изменяется при изменении сеточного напряжения.

Функция изменения анодного тока от сеточного напряжения имеет вид $\mathrm{d}I_a = S\mathrm{d}U_c$, а от анодного напряжения — $\mathrm{d}I_a = \dfrac{\mathrm{d}U_a}{R_i}$.

Изменение анодного напряжения в нагрузочном режиме равно падению напряжения на нагрузочном резисторе $U_{a0} = U_a - I_a R_a$.

Дифференцируя это уравнение при условии, что $U_a = \text{const}$ и $R_a = \text{const}$, получим $\mathrm{d}U_a = -\mathrm{d}I_a R_a = -\mathrm{d}U_R$.

Отсюда видно, что изменение напряжения на аноде численно равно изменению напряжения на нагрузке. Знак «минус» показывает, что изменения напряжения на аноде и на нагрузке противоположны (т.е. при увеличении $\mathrm{d}U_R$ уменьшается $\mathrm{d}U_a$, и наоборот). С учетом равенства $\mathrm{d}U_a = -\mathrm{d}I_a R_a$ получим $\mathrm{d}I_a = \dfrac{\mathrm{d}I_a R_a}{R_i}$.

Таким образом, полная функция изменения анодного тока состоит из двух составляющих и имеет вид:

$$\mathrm{d}I_a = S\mathrm{d}U_c - \frac{\mathrm{d}I_a R_a}{R_i}.$$

Решая это уравнение, получаем

$$\mathrm{d}I_{\mathrm{a}} + \mathrm{d}I_{\mathrm{a}} \frac{R\mathrm{a}}{R_{\mathrm{i}}} = S\mathrm{d}U_{\mathrm{c}},$$

отсюда

$$\mathrm{d}I_{\mathrm{a}} = \frac{S}{1+\frac{R_{\mathrm{a}}}{R_{\mathrm{i}}}}\mathrm{d}U_{\mathrm{c}}$$

или

$$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}U_{\mathrm{c}}} = \frac{S}{1+\frac{R_{\mathrm{a}}}{R_{\mathrm{i}}}}.$$

Отношение $\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}U_{\mathrm{c}}}$ выражает крутизну статической анодно-сеточной характеристики, но в последнем равенстве присутствует сопротивление нагрузки в анодной цепи $R_{\mathrm{a}}$, поэтому отношение $\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}U_{\mathrm{c}}}$ можно считать крутизной нагрузочной анодно-сеточной характеристики $S_{\mathrm{н}} = \frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}U_{\mathrm{c}}}$. Отсюда

$$S_{\mathrm{н}} = \frac{S}{1+\frac{R_{\mathrm{a}}}{R_{\mathrm{i}}}} = \frac{SR_{\mathrm{i}}}{R_{\mathrm{i}}+R_{\mathrm{a}}}.$$

Из этого выражения следует, что $S_{\mathrm{н}} = S$ только в статическом режиме ($R_{\mathrm{a}} = 0$). При $R_{\mathrm{a}} > 0$ (в режиме нагрузки) всегда $S_{\mathrm{н}} < S$. В предельном режиме $R_{\mathrm{a}} = \infty$ (разомкнутая анодная цепь) линия нагрузки совпадает с осью абсцисс.

***Коэффициент усиления.*** Другим важным параметром режима работы с нагрузкой является коэффициент усиления по напряжению, который определяется как отношение изменения выходного напря-

жения на нагрузке $R_a$ к изменению входного напряжения, поданного на сетку лампы

$$\mu_н = \frac{dU_R}{dU_c} = \frac{dI_a R_a}{dU_c} = R_a S_н.$$

Подставляя в это выражение значения $S_н$, получим

$$\mu_н = R_a \frac{SR_i}{R_i + R_a},$$

где $SR_i = \mu$ — внутреннее уравнение лампы. Отсюда

$$\mu_н = R_a \frac{\mu}{R_i + R_a} = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a}.$$

Из формулы видно, что по мере роста сопротивления нагрузки значение $\mu_н$ увеличивается, при $R_a \to \infty$ коэффициент $\mu_н \to \mu$, но такой режим соответствует разрыву анодной цепи. Оптимальной для триода является нагрузка $R_a = (2—4)R_i$.

### *7.4.5. Усилительный каскад на триоде*

В любой схеме усилителя различают входную и выходную цепи. В зависимости от того, какой из электродов лампы является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения усилительного триода — с общим катодом (ОК), с общей сеткой (ОС) и с общим анодом (ОА) (рис. 7.24).

Во входной цепи всех схем включают источник постоянного напряжения смещения сеточной цепи $U_{c0}$ и источник входного сигнала (напряжения) $U_{вх}$, а в выходной цепи включают источник постоянного анодного напряжения $U_a$ и нагрузку $R_a$, с которой снимают усиленный сигнал. Каждая схема включения триода как усилителя характеризуется коэффициентами усиления тока, напряжения и мощности, а также входным и выходным сопротивлениями. Названные параметры являются основными в усилительных каскадах.

В построении электрических схем на лампах есть много общего с построением схем на транзисторах, но есть и различия, вытекающие из физических свойств и характеристик.

Схемы усилительных каскадов (рис. 7.24) различаются между собой не только общим электродом, но и местом включения в схеме

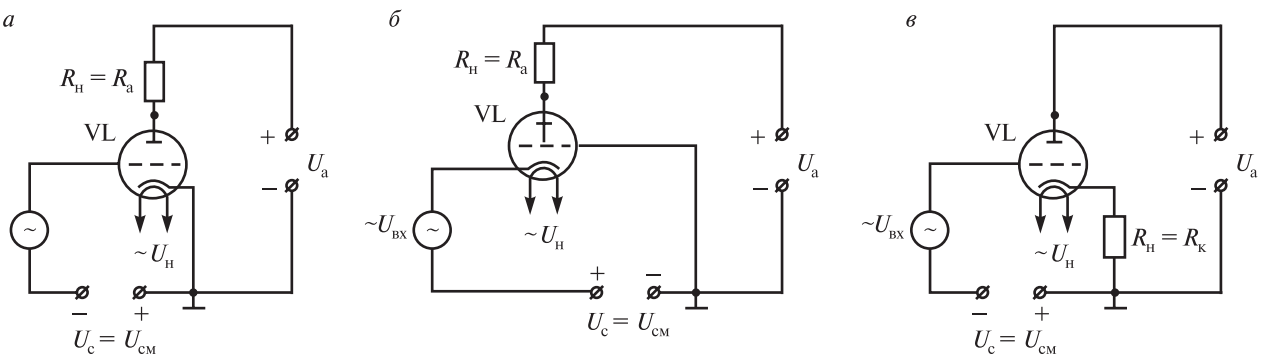



Рис. 7.24. Схемы включения электронной лампы (триода) в нагрузочном режиме:
*а* — с общим катодом; *б* — с общей сеткой; *в* — с общим анодом

источников смещения, источников сигнала и нагрузочного резистора. Каждая схема включения имеет свои статические характеристики, однако на практике для любой схемы включения пользуются характеристиками схемы с общим катодом (ОК).

Для анализа режима работы триода в усилительном каскаде (рис. 7.25) необходимо определить режим покоя. Режим покоя (рабочая точка) определяет начальное состояние триода в нагрузочном режиме без входного сигнала ($U_{вх} = 0$). Правильный выбор начального состояния рабочей точки необходим для получения неискаженного усиления сигнала в рабочем режиме, чтобы изменения анодного тока были пропорциональны изменениям сеточного напряжения лампы и отсутствовал сеточный ток.

Выбор режима работы, т.е. положения рабочей точки, производится напряжением смещения ($U_{см}$), подаваемого в цепь управляющей сетки триода. В этом случае потенциал на сетке относительно катода должен быть отрицательным, чтобы исключить сеточный ток.

Напряжение смещения $U_{см}$ изменяет положение рабочей точки на характеристиках лампы. Рабочая точка находится на пересечении какой-либо статической анодной характеристики с динамической характеристикой и в зависимости от $U_с$ и $U_а$ перемещается по динамической характеристике. В зависимости от $U_{см}$ различают три основных режима усиления *A*, *B* (*AB*) и *C*.

В режиме *A* (рис. 7.25) напряжение смещения в цепи управляющей сетки $U_{с0}$ устанавливается такое, чтобы рабочая точка *O* находилась примерно в середине прямолинейного участка динамической анодно-сеточной характеристики (*MN*), т.е. меньше допустимого максимального напряжения смещения в цепи сетки ($U_{с0m}$) и примерно равна 1/2 $U_{с0m}$. Максимально допустимая амплитуда входного переменного напряжения в цепи сетки ($U_{вхm} = U_{cm}$) выбирается равной или меньше напряжения смещения в цепи сетки $U_{с0}$. При таком выборе исходного режима и амплитуды входного сигнала анодный ток прямо пропорционален напряжению сигнала на сетке и по форме аналогичен входному сигналу без искажения. Положение рабочей точки определяет постоянную и переменную составляющие анодного тока $I_{а0}$, $I_{am}$ и анодного напряжения $U_{а0}$, $U_{am}$. Из графика (рис. 7.25) видно, что изменение напряжения на аноде лампы (выходное) выше, чем изменение входного сигна-

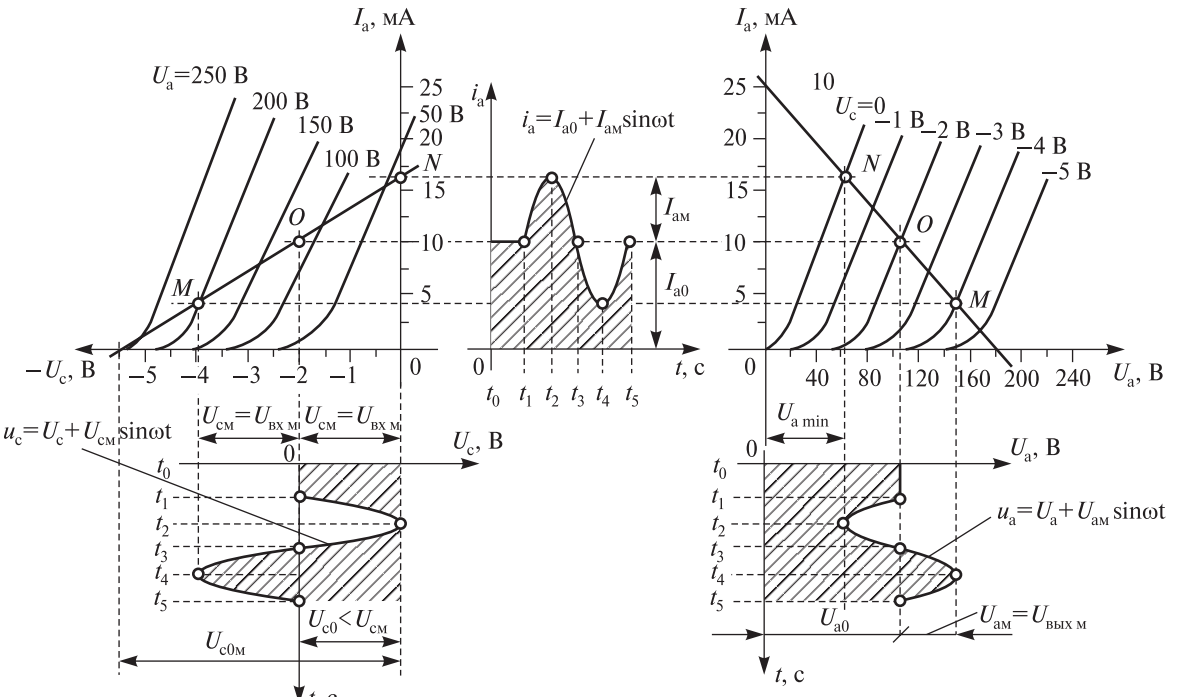



Рис. 7.25. Графическое представление работы электронной лампы (триода) в усилителе для режима *A*

ла, т.е. происходит усиление $K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$. Выходное напряжение в анодной цепи ($U_{\text{вых m}} = U_{R_{\text{а}}} = U_{\text{am}}$) находится в противофазе по отношению к амплитуде входного $U_{\text{вх}}$, и это объясняется тем, что при положительной полуволне входного сигнала $U_{\text{вх}}$ напряжение на сетке лампы относительно катода приближается к нулю и ток $I_{\text{а}}$ лампы увеличивается. Возрастающий ток увеличивает падение напряжения на $R_{\text{а}}$, а напряжение на аноде лампы $U_{\text{а0}}$ уменьшает.

В энергетическом отношении режим *A* неэкономичен, так как анодный ток протекает через лампу как при наличии входного сигнала, так и при его отсутствии. Практическое значение КПД составляет 20—25 %. Однако режим *A* применяется в установках, когда необходимо обеспечить минимальное нелинейное искажение и при усилении переменного сигнала.

В режиме *B* (рис. 7.26) напряжение смещения в цепи сетки $U_{\text{см}}$ устанавливают приблизительно равным напряжению запирания лампы (отсечки) $U_{\text{см}} = U_{\text{с0}}$. Анодный ток в этом режиме проходит через лампу только в течение положительной полуволны входного сигнала $U_{\text{вх}}$, что позволяет увеличить амплитуду входного и выходного сигналов.

В режиме *B* в течение отрицательной полуволны сигнала на сетке происходит отсечка анодного тока ($I_{\text{а}} = 0$). Для режима с отсечкой анодного тока введено понятие «угол отсечки», под которым понимают часть сигнала, в течение которого анодный ток протекает через лампу. В этом режиме через анод протекает ток только в течение половины периода и угол отсечки равен $\theta = 90°$. Ток через активный элемент в нагрузке протекает в течение времени $t = 2\theta$.

Таким образом, в режиме *B* нелинейные искажения составляют 50 %. Режим *B* можно использовать в выходных каскадах мощных двухтактных усилителей, так как при отсутствии входного сигнала ток в анодной цепи отсутствует, что повышает КПД до 50—60 %.

В режиме *C* (рис. 7.27) напряжение $U_{\text{см}}$ (абсолютное значение) больше напряжения запирания лампы ($U_{\text{см}} > U_{\text{с0}}$). Анодный ток в этом режиме протекает меньше половины периода входного сигнала ($\theta < 90$).

С уменьшением времени протекания тока через лампу в режиме *C*, по сравнению с режимом *B*, уменьшается постоянная составля-

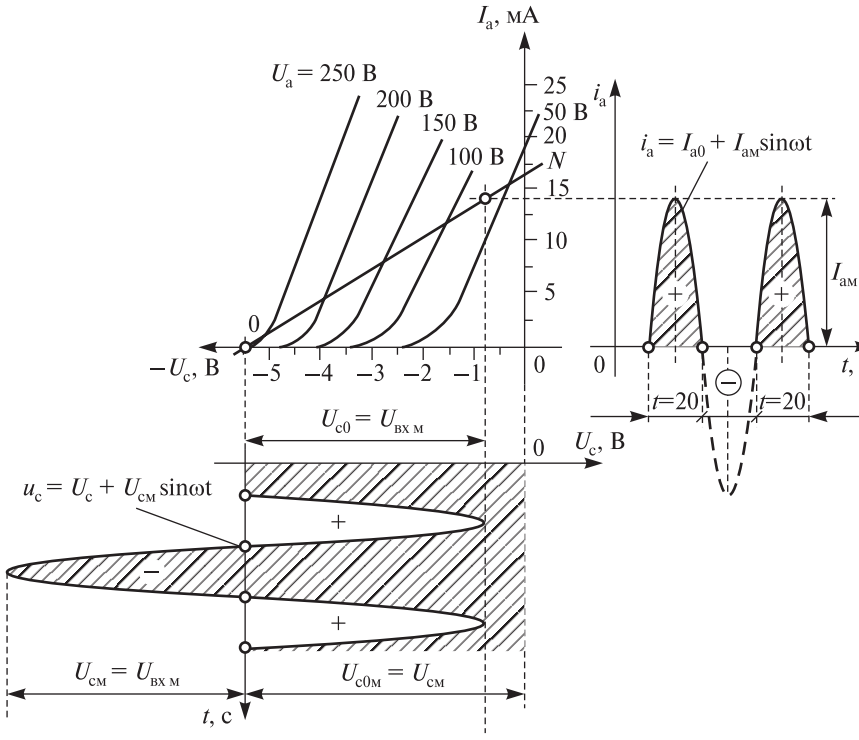



Рис. 7.26. Графическое представление работы электронной лампы (триода) в усилительном режиме *B* с углом отсечки θ = 90°

ющая анодного тока ($I_{a0}$) практически до нуля, и поэтому сокращается потребление энергии от источника питания. В этом режиме на вход можно подавать сигналы с большой амплитудой, получая большой выходной сигнал и повышая КПД до 65—85 %. Нелинейные искажения очень велики, поэтому такие режимы рекомендуется использовать в только мощных усилительных каскадах.

В усилительном каскаде на триоде большое значение имеет напряжение смещения в цепи сетки $U_{см}$, которое определяет режимы работы усилителя. Существуют различные способы подачи напряжения смещения, которые подразделяются на фиксированные и автоматические смещения.

*Фиксированное смещение* получают от отдельного источника постоянного фиксированного напряжения во входной цепи (цепь

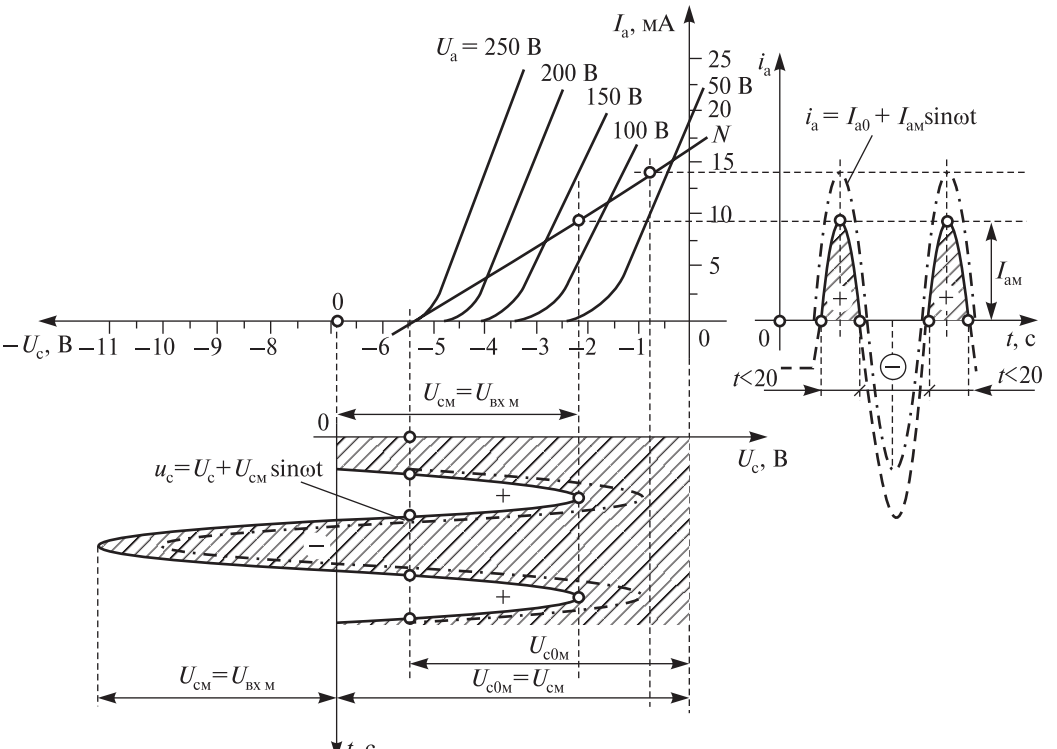



Рис. 7.27. Графическое представление работы электронной лампы (триода) в усилительном режиме *C* с углом отсечки $\theta < 90°$

сетки) $U_{см} = U_C$ (рассмотрено выше на рис. 7.22) или от специального делителя фиксированного напряжения (рис. 7.28). Недостатком фиксированного смещения является необходимость иметь дополнительный источник питания в цепи сетки или делитель, который покрывает дополнительное потребление мощности в схеме и снижает входное сопротивление схемы до величины $R_{вх} = \dfrac{R1\,R2}{R1 + R2}$, так как резисторы R1 и R2 включаются параллельно источнику питания $U_a$, а при подаче переменного входного сигнала источник сигнала замыкается через источник питания $U_a$ и частично через элемент делителя R2 (на рис. 7.28 цепь замыкания показана штрихами), поэтому фиксированное смещение применяют крайне редко.

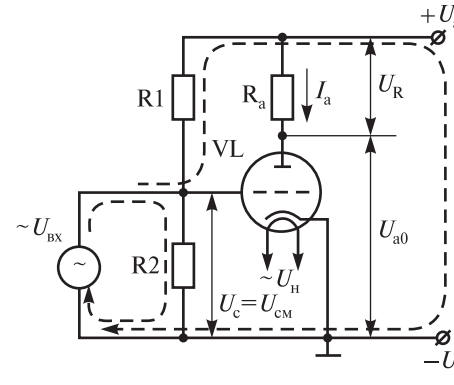



Рис. 7.28. Схемы подачи смещения способом фиксированного напряжения делителя для электронной лампы (триода)

*Автоматическое смещение* применяют в большинстве схем на электронных лампах. При этом в цепь катода включают резистор $R_к$ (рис. 7.29). Постоянная составляющая анодного тока покоя $I_{a0}$ (при $U_{вх} = 0$) создает на резисторе $R_к$ падение напряжения $U_{к0} = I_{a0}R_к$, обеспечивающее положительный потенциал на катоде и отрицательный на сетке, т.е. разность потенциалов между катодом и сеткой аналогично дополнительному источнику смещения $U_{см} = -I_{a0}R_к$. Чтобы обеспечить постоянное смещение независимо от переменного входного сигнала параллельно $R_к$ включают конденсатор $C_к$. Емкостные сопротивле-

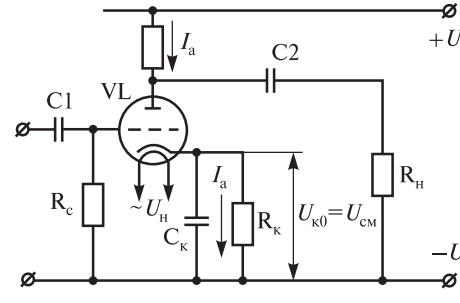



Рис. 7.29. Схемы включения электронной лампы (триода) с автоматическим смещением

ния $X_{Ск}$ не влияют на переменную составляющую входного сигнала и не изменяют падение напряжения $I_{a0}R_к$, что стабилизирует положение рабочей точки режима. Резистор в анодной цепи ($R_a$) является элементом конструктивной нагрузки, а резистор в цепи сетки ($R_c$) называется резистором утечки, который обеспечивает гальваническую связь сетки с катодом и общей шиной для стекания случайных электронов, попадающих на сетку. При отсутствии $R_c$ сетка заряжается перехваченными ею электронами до какого-то неконтролируемого и постоянно изменяющегося значения, которое приводит к нарушению работы лампы и усилителя в целом.

Разделительный конденсатор С1 исключает попадание на сетку постоянной составляющей входного сигнала и прохождение постоянного тока через источник входного сигнала $U_{вх}$. Аналогично конденсатор С2 отделяет постоянную составляющую анодного тока от нагрузки $R_н$.

## 7.5. Экранированные и специальные лампы

*Тетрод.* Тетродом называют четырехэлектродную лампу, имеющую катод, анод и две сетки. Между анодом и управляющей сеткой С1 (рис. 7.30) расположена экранирующая сетка С2, соединенная по переменному току с общей шиной.

Экранирующая сетка перехватывает значительную часть силовых линий электрического поля анода; некоторая их часть задерживается первой сеткой С1 и лишь небольшая часть проникает к катоду К. Из-за такого экранирования анода в тетроде уменьшается проницаемость и возрастает коэффициент усиления ($\mu = 100—200$), ослабляется влияние анодного напряжения на анодный ток, следовательно, увеличивается внутреннее сопротивление лампы ($R_i = 100—300$ кОм).

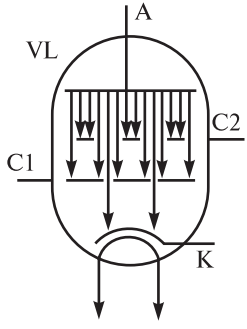


Рис. 7.30. Электрические поля в тетроде

Электронный поток в тетроде определяется совместным действием потенциалов сеток $U_{c1}$, $U_{c2}$ и анода $U_a$.

Для увеличения воздействия ускоряющего поля на пространственный заряд у катода на экранирующую сетку подают положительный потенциал относительно катода $U_{c2} = (0{,}5—1)\,U_a$.

Это напряжение создает в лампе ускоряющее поле, необходимое для перемещения электронов к катоду.

Свойства тетрода оценивают по анодным статическим характеристикам, снятым по схеме включения, показанной на рис. 7.31.

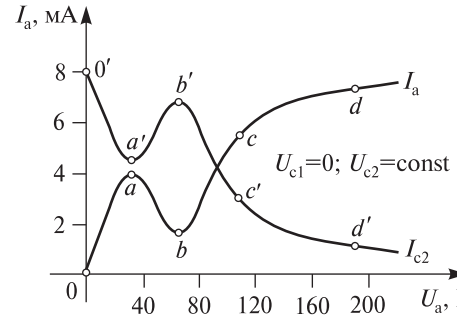



Рис. 7.31. Анодная и анодно-сеточная характеристики тетрода

Анодные характеристики тетрода выражают зависимость тока $I_a = \varphi(U_a)$ при $U_{c1}$ и $U_{c2} = \text{const}$ (рис. 7.31). Для более полного понимания физических процессов тетрода на рисунке наряду с анодной характеристикой приведена сеточно-анодная характеристика $I_c = \varphi(U_a)$ при $U_{c1}$ и $U_{c2} = \text{const}$.

В анодных характеристиках тетрода можно отметить четыре характерные области при различных значениях анодного напряжения $U_a$.

1. При $U_a = 0$ и $U_{c2} \geq 0$ анодный ток отсутствует. В этом режиме электроны в основном летят к экранирующей сетке С2 и ее ток $I_{c2}$ максимален (точка 0′ на характеристике), а ток $I_a = 0$ (точка 0).

2. При повышении $U_a$ до 15—20 В из-за перераспределения атомов наблюдается резкое увеличение тока $I_a$ (участок 0—$a$) и уменьшение тока $I_{c2}$ (участок 0—$a'$). Так как $U_a < U_{c2}$, лампа на этом участке характеристик работает в режиме возврата части электронов от анода к экранирующей сетке.

3. С увеличением напряжения $U_a$, но при условии $U_a < U_{c2}$ в лампе возникает динатронный эффект — явление вторичной электронной эмиссии электронов с анода и уход этих электронов к экранирующей сетке, имеющей более высокий, чем у анода потенциал. При этом ток $I_a$ уменьшается (участок $a$—$b$), а ток $I_{c1}$ соответственно увеличивается (участок $a'$—$b'$). Чем больше $U_{c2}$, тем больше снижение анодного тока $I_a$.

Этот процесс объясняется тем, что за счет сильного поля анода кинетическая энергия электронов растет и при ударе об анод они выбивают из анода электроны, т.е. возникает вторичная эмис-

сия. Выбитые электроны движутся к экранирующей сетке, так как $U_{c2} > U_a$, в результате чего снижается анодный ток.

4. Если увеличивать анодное напряжение $U_a$, приближая его к значению $U_{c2}$ и больше, то поле анода усиливается и электроны, выбиваемые с анода, возвращаются обратно на анод. В лампе наблюдается рост тока $I_a$ (участок $b$—$c$) и уменьшение тока $I_{c2}$ (участок $b'$—$c'$). При $U_a > U_{c2}$ рост тока $I_a$ замедляется и незначительно уменьшается ток $I_{c2}$ (участок $c$—$d$ и $c'$—$d'$). Малый рост тока $I_a$ на этом участке объясняется тем, что влияние анодного напряжения незначительно, так как оно подавляется действием сеточного напряжения $U_{c2}$, перераспределяющего электроны между анодом и сеткой С2. Это и есть результат действия динатронного эффекта.

Динатронный эффект играет вредную роль. Он вызывает нелинейность характеристики, которая приводит к искажениям при усилении сигнала. Невыгодно и то, что экранирующий ток сетки больше полезного анодного тока.

Для устранения динатронного эффекта используют три основных методов: увеличивают расстояние между анодом и сеткой С2 и плотность электронов в электронном луче, препятствующую переходу электронов от анода на сетку С2 (это используется в лучевых тетродах), а также вводят антидинатронную сетку С3 между анодом и сеткой С2 (в пентодах).

В лучевых тетродах между анодом и экранирующей сеткой С2 расположены лучеобразующие экраны, соединенные с катодом (рис. 7.32). Экраны концентрируют поток электронов в пространстве от С2 до анода А, поэтому электроны движутся узкими концентрированными лучами и создают в пространстве между анодом и сеткой С2 объемный отрицательный заряд, препятствующий переходу вторичных электронов от анода к сетке С2. Концентрированный пучок электронов высокой плотности препятствует электронам, выбитым из анода, перемещаться в сторону сетки С2.

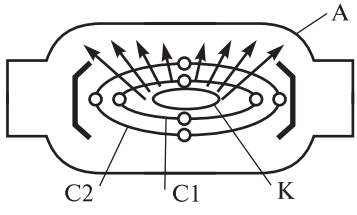



Рис. 7.32. Структурное устройство лучевого тетрода

Однако при малых напряжениях $U_a$ концентрация электронов уменьшается и может опять возникать динатронный эффект. Поэтому лучевые тетроды не используются при больших анодных токах в выходных каскадах.

*Пентод.* Пентод имеет катод, анод и три сетки (рис. 7.33). Потенциал первой управляющей сетки С1 обычно отрицательный, потенциал второй экранирующей сетки С2 положительный и составляет $(0{,}3—0{,}7)U_a$, третью антидинатронную защитную сетку С3 в маломощных пентодах соединяют с катодом внутри баллона (рис. 7.33, *а*), а в мощных — соединяют вне баллона (рис. 7.33, *б*).

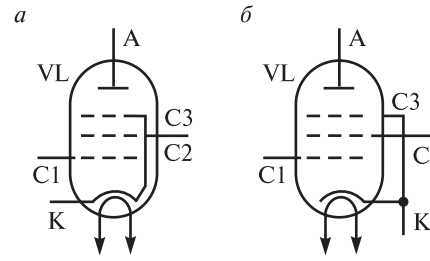



Рис. 7.33. Графическое обозначение пентодов:
*а* — маломощные; *б* — мощные

Редкая сетка С3 создает тормозящее электрическое поле, которое не представляет большого сопротивления для первичных электронов, летящих от катода к аноду, но мешает встречным электронам переходить с анода на сетку С2 при $U_{c2} > U_a$. Сетка С3 не только надежно устраняет динатронный эффект, но и улучшает статические параметры лампы.

Свойства пентодов оцениваются по семейству анодно-сеточных и анодных характеристик. Как и у тетродов, практическое применение имеют анодные характеристики.

Анодные характеристики выражают зависимость $I_a = \varphi(U_a)$ при $U_{c1} = \text{const}$, $U_{c2} = \text{const}$, $U_{c3} = 0$ (рис. 7.34).

При $U_a = 0$ в лампе возможен небольшой начальный анодный ток $I_a = I_0$. Он создается электронами, обладающими высокой начальной скоростью. Большинство же электронов, эмиттированых катодом в этом режиме работы, попадает на экранирующую сетку непосредственно или благодаря возврату из пространства между экрани-

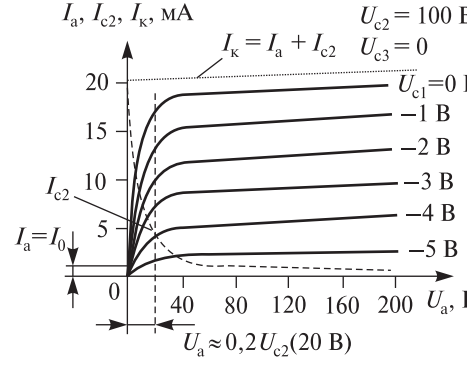



Рис. 7.34. Вольт-амперные характеристики пентода для токов анода (семейство анодных характеристик), экранирующей сетки и катода

рующей и защитной сетками. Дальнейшее увеличение анодного напряжения в пределах $0—0{,}2U_{c2}$ характеристика анодного тока круто поднимается, что указывает на уменьшение процесса возврата электронов и их большего прохода к аноду лампы. В этот период происходит уменьшение тока $I_{c2}$. При $U_a >> 0{,}2U_{c2}$ (в данном примере это произойдет при $U_{c2} = 100$ В на границе при $U_a = 20$ В) анодные и сеточные характеристики плавно переходят в пологий участок и далее идут почти параллельно оси $U_a$ (режим перехвата). В этой области анодных напряжений лампа работает в режиме прямого перехвата части электронов экранирующей сеткой. Анодный ток здесь растет главным образом за счет увеличения числа электронов, притягиваемых полем анода из объемного заряда, действующего вблизи катода.

Пологость характеристик в области больших значений $U_a$ объясняется весьма слабым влиянием на анодный ток поля анода. Пологость анодных характеристик нельзя отождествлять с режимом насыщения, при котором практически прекращается рост анодного тока. Характеристика катодного тока ($I_к$) почти не изменяется на всем ее протяжении.

Из семейства анодных характеристик, снятых при различных значениях $U_{c1}$, следует, что в области больших отрицательных значений $U_{c1}$ характеристики — более пологие, а при уменьшении отрицательного потенциала на С2 сила анодного тока возрастает.

Статические параметры тетродов и пентодов определяются так же, как для триодов.

*Крутизна характеристики*

$$S = \frac{\mathrm{d}I_a}{\mathrm{d}U_{c1}} \Bigg| U_a = \text{const},\ U_{c2} = \text{const},\ U_{c3} = \text{const}.$$

Управляющая сетка в тетродах и некоторых пентодах расположена так же, как и в триодах, поэтому крутизна у тетродов и пентодов примерно такая же, как и у триодов, т.е. составляет единицы или десятки миллиампер на вольт.

*Внутреннее сопротивление*

$$R_i = \frac{\mathrm{d}U_a}{\mathrm{d}I_a} \text{ при } U_{c1} = \text{const},\ U_{c2} = \text{const},\ U_{c3} = \text{const}.$$

Поскольку действие анодного напряжения в тетроде и пентоде ослаблено во много раз, сопротивление $R_i$ достигает сотен килоом и единиц мегаом и сильно зависит от токораспределения между анодом и сетками, так как при изменении анодного напряжения ток изменяется главным образом за счет токораспределения.

*Коэффициент усиления*

$$\mu = -\frac{dU_a}{dU_c} \text{ при } I_a = \text{const},\ U_{c2} = \text{const},\ U_{c3} = \text{const}$$

достигает сотен и тысяч единиц. Соотношение $\mu = SR_i$ остается в силе, как и для рассмотренных выше электронных ламп.

Статические параметры тетродов и пентодов определяются по статическим характеристикам так же, как и параметры триодов.

## 7.6. Электронно-лучевые приборы

### *7.6.1. Общие сведения*

Электронно-лучевыми приборами (ЭЛП) называют электровакуумные приборы, действие которых основано на формировании и управлении интенсивностью и положением одного или нескольких электронных лучей.

Электронно-лучевые приборы применяются в индикаторных устройствах радиолокаторов, для осциллографии, приема и передачи изображения, индикации, преобразования изображений и т.д.

Во всех этих приборах создается тонкий пучок электронов (луч), управляемый с помощью электрического или магнитного поля или обоими полями одновременно. Большинство электронно-лучевых приборов служат для получения видимых изображений на люминесцентном экране; их называют электронно-графическими.

По виду преобразуемых сигналов ЭЛП подразделяются на четыре группы:

– приемные ЭЛП — осциллографические, индикаторные, кинескопы, преобразующие электрические сигналы в изображение;

– передающие ЭЛП, преобразующие визуальное изображение в электрические сигналы;

– приборы, преобразующие электрические сигналы, потенциалоскопы и электронно-лучевые коммутаторы;

– приборы, преобразующие невидимое изображение в видимое.

По способу фокусировки и управления электронным лучом ЭЛТ подразделяются на три группы:

– с электростатическим управлением;

– с магнитным управлением;

– с электромагнитным управлением.

В данной главе рассматривается только одна группа приборов — приемные ЭЛП.

Основными элементами приемных групп ЭЛП являются (рис. 7.35):

– баллон (Б) имеет цилиндрическую форму с расширением в виде конуса (раструб) или в виде цилиндра большого диаметра;

– люминесцентный экран (Э) служит приемником электронов; это внутренняя поверхность основания расширенной части баллона, на которую нанесен слой люминофора, излучающий свет под ударами электронов;

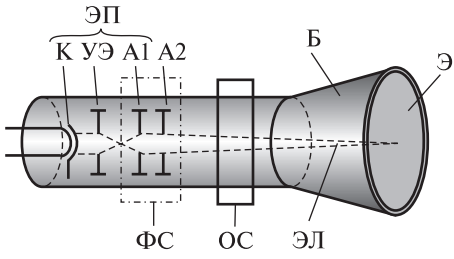



Рис. 7.35. Схематическое устройство электронно-лучевой трубки (ЭЛТ)

– электронный прожектор (ЭП) (электронная пушка) обеспечивает эмиссию электронов и создание электронного луча;

– фокусирующая система (ФС) обеспечивает фокусировку электронов, т.е. создает определенной плотности поток электронов в электронном луче;

– отклоняющая система (ОС) обеспечивает отклонение луча (Л) (управление лучом).

### *7.6.2. Электронно-лучевые приборы с электростатическим управлением*

При электростатическом управлении фокусировка и управление лучом осуществляются электрическим полем. В этих приборах все электроды заключены внутри баллона и выполнены из диамагнитного материала, чтобы исключить их намагничивание, которое может искажать наблюдаемые процессы на экране. Эти ЭЛП широко

используются в осциллографах и поэтому их часто называют осциллографическими.

*Электронный прожектор*. В приборах с электростатическим управлением электронный прожектор имеет триодную или тетродную конструкцию (рис. 7.36).

Катод (К) — оксидный, косвенного накала в виде цилиндра с подогревателем в форме спирали. Вывод катода иногда совмещают с одним выводом подогревателя. Оксидный слой нанесен на дно подогревателя. Вокруг катода располагается управляющий электрод, называемый модулятором (М), цилиндрической формы с отверстием (диафрагмой) в дне. Этот электрод служит для управления плотностью электронного потока и для его предварительной фокусировки. На модулятор подается отрицательный потенциал. При изменении отрицательного потенциала модулятора изменяются поток электронов, движущихся к экрану, и яркость изображения. С увеличением отрицательного потенциала на модуляторе все большее число электронов возвращается на катод, и при некотором напряжении модулятора ЭЛП запирается.

Аноды А1 и А2 также имеют цилиндрическую форму. Внутри анодов имеется одна или несколько перегородок с диафрагмами. На анод А1 подают напряжение в несколько сотен вольт, а на А2, соединенный с внутренним графитным покрытием экрана, — несколько киловольт. Под действием ускоряющего поля анодов элек-

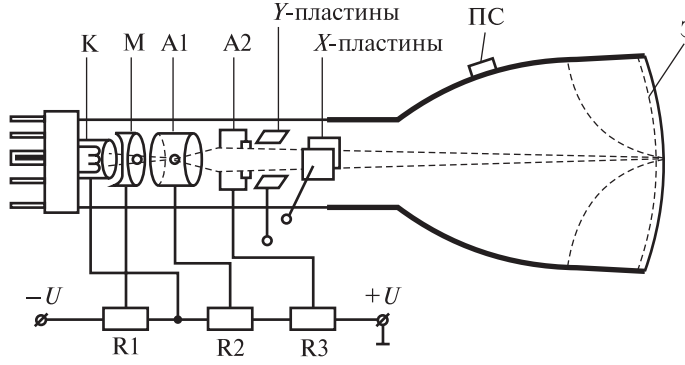



Рис. 7.36. Принцип устройства электростатической электронно-лучевой трубки (ЭЛТ)

троны приобретают значительную скорость. Из-за различия потенциалов и конфигурации поверхностей катода, модулятора и анодов в пространстве между ними создаются неоднородные электрические поля — электростатические электронные линзы.

Конструктивно электростатические электронные линзы представляют собой систему электродов в виде металлических диафрагм, находящихся под отрицательными электростатическими потенциалами.

Диафрагмы делят пространство в ЭЛП на две области (отсека) с различными потенциалами поля. Около самой диафрагмы происходит деформация поля, которая изменяет траекторию движения электронов. Поле диафрагмы может выполнять функции как собирательной, так и рассеивающей линзы.

Фокусирующие свойства электростатической электронной линзы, по аналогии с оптической линзой, характеризуются фокусным расстоянием *f*. К простейшей осесимметричной электростатической электронной линзе относится металлическая диафрагма с круглым отверстием, поле которой граничит с одной или с обеих сторон с однородными электростатическими полями (рис. 7.37). Фокусное расстояние такой линзы определяется по формуле $f = \dfrac{4U_2}{(E_1 - E_2)}$, где $U_2$ — потенциал диафрагмы, $E_1$ и $E_2$ — напряжения полей слева и справа от диафрагмы. При $E_1 > E_2$ — диафрагма служит собирательной линзой, а при $E_1 < E_2$ — рассеивающей. В собирательной линзе-диафрагме (рис. 7.37, *а*) пучок электронов, проходя через

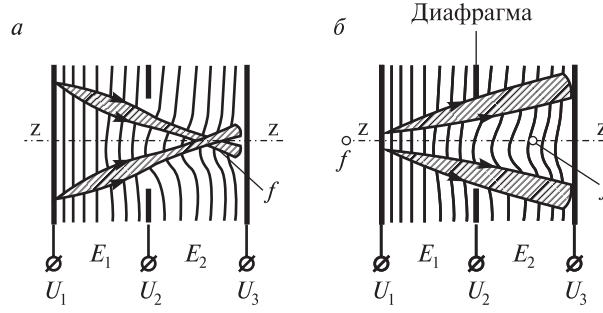



Рис. 7.37. Схема электростатических линз:
*а* — собирательной ($U_1 = 0$, $U_2 = 0$, $U_3 > 0$); *б* — рассеивающей ($U_1 = 0$, $U_2 = U_3 > 0$)

электростатические электронные линзы, образует узкий сходящийся электронный луч. Неоднородное электростатическое поле показано сплошными линиями, эквипотенциальные поверхности которого обращены выпуклостью в определенную сторону. В собирательной линзе-диафрагме (рис. 7.37, *а*) эквипотенциальные поверхности выпуклостью обращены в сторону электродов с меньшим потенциалом, в данном примере в сторону электродов $U_1$ и $U_2$, так как $U_1 = 0$, $U_2 = 0$, $U_3 > 0$. Отсюда следует вывод, что эквипотенциальная поверхность электростатического поля по отношению к пучку электронов, поступающих в него, можно считать аналогом выпуклой (собирательной) линзы. В собирательной линзе-диафрагме на рис. 7.37, *а*, форма электронного луча и направление (траектория) показаны заштрихованным сектором, который сужается к фокусу линзы и отклоняется по траектории к фокусу, что указывает на собирательные свойства оптической линзы. В рассеивающей линзе-диафрагме (рис. 7.37, *б*) форма электронного луча расширяется при удалении от фокуса линзы и направление электронного луча отклоняется от оптической оси линзы (z—z), что указывает на рассеивающие свойства оптической линзы.

Более сложные электростатические электронные линзы, состоящие из нескольких электродов, подразделяются на иммерсионные и одиночные линзы. Иммерсионные и одиночные линзы сочетают в своей структуре как фокусирующие, так и рассеивающие свойства, что позволяет с их помощью получать узкий сходящийся электронный луч. Изменяя потенциалы анодов, можно получить на экране сфокусированное светящееся пятно диаметром 0,2—0,3 мм.

Простейший прожектор содержит две линзы. Первая линза, или линза предварительной фокусировки, образована катодом, модулятором и первым анодом. На рис. 7.38 показано поле в этой части прожектора. Эта линза образована двумя диафрагмами, имеющими различные значения потенциалов электродов. Такие электростатические электронные линзы называются иммерсионными. Электростатические линзы, к которым непосредственно примыкает объект излучения, называются иммерсионным объективом. Так как к первой линзе непосредственно примы-

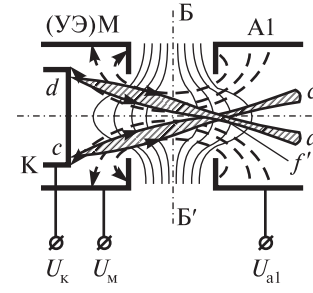



Рис. 7.38. Первая линза электронного прожектора

кает катод — излучатель электронов, то ее можно назвать иммерсионным объективом прожектора. В этой линзе потенциал первого анода А1 больше потенциала модулятора ($U_м < U_{a1}$), а потенциал модулятора более отрицателен, чем потенциал катода. На основе этих рассуждений показаны распределения силовых линий от первого анода к катоду и модулятору (штриховые линии). Линия осесимметрии ББ′ условно делит поле на две части. Слева и справа от оси ББ′ сплошными линиями показаны распределения потенциалов неоднородного электростатического поля (эквипотециальные поверхности) под действием двух полей: «А1 — модулятор» и «А2 — катод».

Из распределения эквипотенциальных линий следует, что левая часть линзы обладает собирательными свойствами (т.е. двояковыпуклой линзы), а правая — рассеивающими свойствами (т.е. двояковогнутой линзы). Причем эти свойства линзы проявляются с разной интенсивностью, потому что в левой части линзы (катод—модулятор) с более низким потенциалом скорость электронов меньше и за счет этого собирающее свойство выше, чем в правой половине линзы, где потенциал и скорость выше. В результате сильное собирательное свойство в левой части линзы преобладает над ее слабыми рассеивающими свойствами в правой части, что обеспечивает формирование электронного потока в узкий сходящийся луч — траектория движения электронов в луче до фокуса $f$ (электронные лучи представлены заштрихованными секторами: луч $c—c'$ и луч $d—d'$). За фокусом электронные лучи немного рассеиваются и отклоняются.

Вторая линза образована неоднородным полем между первым и вторым анодом (рис. 7.39). Действия второй линзы аналогичны действиям первой линзы, но фокусное расстояние больше, чем у первой линзы. Под действием двух линз увеличивается общее фокусное расстояние для удаленного экрана ЭЛП. Фокусное расстояние второй линзы можно регулировать, изменяя напряжение на первом аноде А1. Регулировка с помощью напряжения на аноде А2 не используется, так как напряжение и ток в нем очень большие и их изменение резко повлияет на скорость пролета электронов и яркость свечения.

Полная схема электронного прожектора представлена на рис. 7.40, где показано действие электростатической фокусирующей системы триодного прожектора и ее оптический эквивалент.

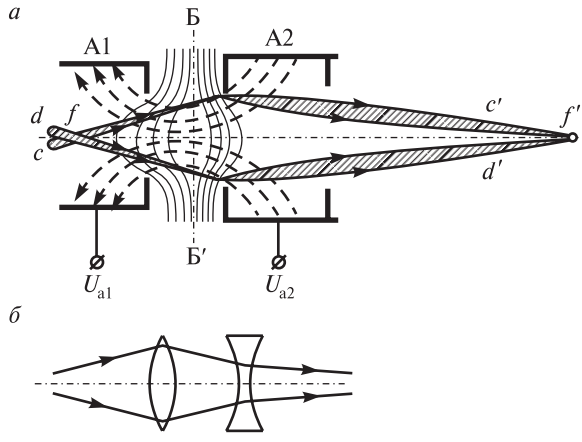



Рис. 7.39. Вторая фокусирующая линза электронного прожектора (*а*) и ее оптический аналог (*б*)

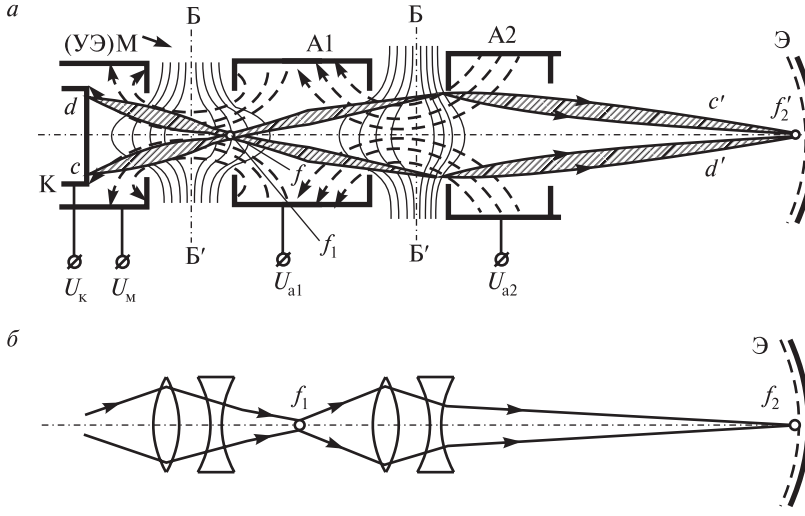



Рис. 7.40. Триодный прожектор:
*а* — модель электрического поля и траектория электронного луча; *б* — оптический эквивалент электронных линз

Электроны луча, попадая на экран, выбивают из слоя люминофора вторичные электроны. В установившемся режиме потенциал анода А2 примерно на 100 В выше потенциала экрана, поэтому вторичные электроны отводятся к аноду А2, чем снижается значение отрицательного заряда на экране. Некоторая часть вторичных электронов рассеивается и попадает на внутреннюю поверхность трубки, покрытую графитовым слоем (аквадагом), соединенным с анодом А2, и отводится на землю (анод А2 обычно заземлен).

Недостатком триодного прожектора является взаимное влияние регулировки яркости и фокусировки луча. Изменение потенциала первого анода влияет на яркость, так как поле этого анода действует на поле у поверхности катода, а изменение потенциала модулятора сдвигает вдоль оси трубки область первого пересечения электронных траекторий, что нарушает фокусировку. В настоящие время применяются прожекторы, в которых между модулятором и первым анодом поставлен дополнительный, ускоряющий (экранирующий) электрод. Он соединен со вторым анодом, и напряжение на нем постоянно. Благодаря экранирующему действию этого электрода изменение потенциала первого анода при регулировании фокусировки практически не изменяет поле у катода.

Фокусируемая система, состоящая из ускоряющего электрода и двух анодов (рис. 7.41), работает следующим образом. Поле между первым и вторым анодами такое же, как показано на рис. 7.39. Оно осуществляет фокусировку так, как было объяснено выше. Между ускоряющим электродом и первым анодом имеется неоднородное поле, подобное полю между анодами (см. рис. 7.39), но не ускоряющее, а тормозящее. Для электронов, влетающих в это поле расходящимся потоком, в левой половине поля происходит рассеивание, а в правой — фокусировка. При этом фокусировка преобладает, так как в правой половине поля скорость электронов меньше. Таким образом, на участке между ускоряющим электродом и первым анодом тоже происходит фокусировка. Чем меньше напряжение на первом аноде, тем выше напряженность поля и сильнее фокусировка.

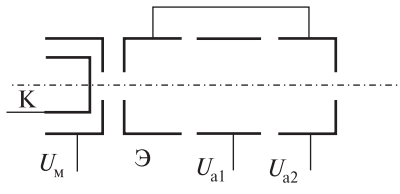



Рис. 7.41. Структура электронного прожектора с ускоряющим (экранирующим) электродом

Чтобы регулировка яркости меньше влияла на фокусировку, первый анод делают без диафрагмы (рис. 7.39, *а*). На него электроны не попадают, т.е. ток первого анода равен нулю. Современные электронные прожекторы дают на экране светящееся пятно диаметром, не превышающем 0,001—0,002 диаметра экрана.

### *7.6.3. Отклоняющая система*

За электронным прожектором располагается отклоняющая система с электростатическим отклонением луча. Она состоит из отклоняющих пластин: *X* — пластины отклоняют луч в горизонтальной плоскости, *Y* — пластины — в вертикальной плоскости. С помощью отклоняющих пластин электронный луч может быть направлен в любую точку экрана (рис. 7.42, *а*).

Если на отклоняющие пластины *Y* подано переменное напряжение, то электронный луч совершает колебания по вертикали и

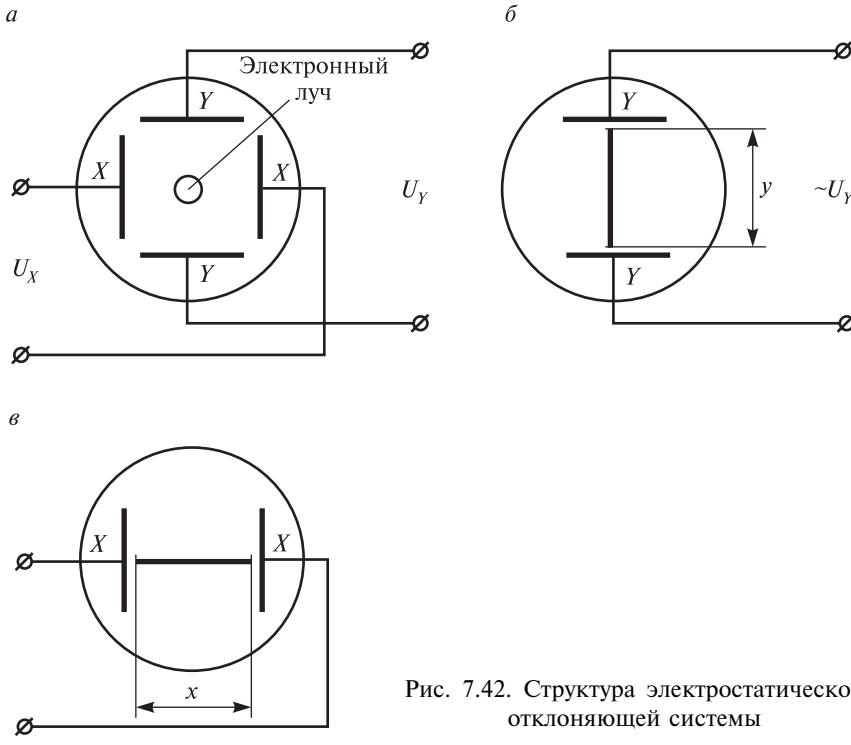



Рис. 7.42. Структура электростатической отклоняющей системы

на экране видна вертикальная светящаяся черточка (рис. 7.42, *б*). Ее длина пропорциональна двойной амплитуде подведенного напряжения $2U_м$. Зная чувствительность трубки ($S_y$) и измерив $y$, можно определить амплитуду $U_м$ по формуле $U_м = y/2S_y$. Чувствительность трубки ($S_y$) показывает смещение луча (пятна) на экране ЭЛП (в миллиметрах) на 1 В напряжения, поданного на отклоняющие пластины (мм/В). Например, если $S_y = 0{,}4$ мм/В, а $y = 20$ мм, то $U_м = y/2S_y = 20/2 \cdot 0{,}4 = 25$ В. Если чувствительность трубки известна, напряжение можно определить. Для этого нужно подвести к пластинам известное переменное напряжение и измерить длину светящейся черточки. Напряжение можно измерить вольтметром. Следует помнить, что вольтметр покажет действующее напряжение, которое надо пересчитать в амплитудное путем умножения действующего значения на 1,4. Таким образом, на пластину $Y$ подводят исследуемое напряжение, а для получения развертки вертикальной черточки во времени на пластины $X$ подводится напряжение развертки $U_x$ пилообразной формы. Частоту пилообразного напряжения развертки $U_x$ пилообразной формы регулируют так, чтобы ее период был кратным периоду изменения исследуемого напряжения.

Когда исследуемое напряжение отсутствует, на экране видна горизонтальная светящаяся черточка, играющая роль оси времени (рис. 7.42, *в*), длина которой пропорциональна времени нарастания переднего фронта пилообразного импульса $t_1$ (рис. 7.43) и спада заднего фронта $t_2$, т.е. $x = t_1 + t_2 = T_{разв}$. В течение времени $t_1$ электронный луч равномерно движется по горизонтали в одном направлении, например слева направо, т.е. делает прямой, или рабочий, ход. Резкое изменение напряжения в течение времени $t_2$ быстро перемещает луч в обратном направлении — обратный ход. Все это повторяется с частотой напряжения развертки.

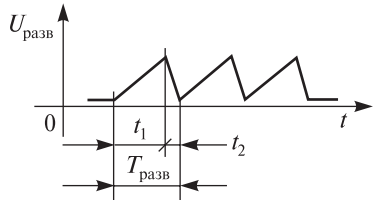



Рис. 7.43. Пилообразное напряжение для линейной развертки по оси $X$

При одновременном действии исследуемого напряжения на пластинах $Y$ и напряжения развертки на пластинах $X$ можно получить развертку исследуемого напряжения в виде неподвижного изображения

благодаря одновременному перемещению луча в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Непосредственное изображение получается в том случае, когда период напряжения развертки $T_{\text{разв}}$ равен периоду исследуемого напряжения $T$ или в целое число раз больше его: $T_{\text{разв}} = nT$, где $n$ — целое число (1, 2, 3, 4 и т.д.).

Достоинствами ЭЛП с электростатическим отклонением являются малая потребляемая энергия от источников сигнала, малые габариты и масса, безынерционность, высокая предельная частота отклоняющего напряжения. К недостаткам относится малое предельное отклонение луча и сильная зависимость чувствительности от ускоряющего напряжения.

### *7.6.4. Люминесцентный экран*

В ЭЛП люминесцентный экран является приемником электронов. Экран на расширенной части баллона выполнен из люминофоров, содержащих силикаты $ZnSiO_4$ (виллемит), сульфаты $ZnSO_4$ цинка или кадмия, и других соединений, эффективно преобразующих энергию электронов в световое излучение. Для получения нужной яркости, цвета свечения и длительности после свечения к люминофору добавляют активаторы (до 0,1 %). Активаторами служат серебро, марганец или медь. Длительное послесвечение особенно хорошо проявляется при использовании меди в качестве активатора.

Временем послесвечения экрана считают интервал времени между моментом прекращения электронной бомбардировки и моментом, когда яркость свечения уменьшается до 1 % от начального значения.

При электронной бомбардировке люминофора электроны проникают в тело люминофора, насыщенного активаторами. В результате в структуре слоя происходит разрушение ковалентных связей и переход электронов с примесных и валентных уровней в зону проводимости. В этом состоянии с повышенной энергией свободные электроны находятся короткое время. Рассеивая свою энергию при взаимодействии с кристаллической решеткой, они постепенно возвращаются на локальные уровни примесей и в валентную зону. В результате такого перехода возникает излучение квантов света — фотонов. Это явление называется катодолюминесценцией.

### *7.6.5. Электронно-лучевые приборы с электромагнитным управлением*

ЭЛП с электромагнитным управлением конструктивно проще приборов с электростатическим управлением, допускают большие углы отклонения луча (до 110°) и удобнее в эксплуатации. В этих приборах применяется магнитная фокусировка и магнитное отклонение луча (рис. 7.44).

Прожектор состоит из катода К, модулятора М и анода А. Анодом является проводящий слой — внутреннее графитовое покрытие экрана.

Электрические поля этих трех электродов образуют первую линзу, аналогичную линзе ЭЛП с электростатическим управлением. Второй линзой служит фокусирующая катушка индуктивности ФК, установленная на горловине трубки и питаемая постоянным напряжением (током). Ее неоднородное по длине магнитное поле играет роль собирательной линзы.

Построение ЭЛП данного вида возможно и с электростатической фокусировкой и магнитным отклонением луча. Такие ЭЛП используются в телевизионных приемниках. В этих приборах электронный прожектор аналогичен по конструкции ЭЛП с электростатическим управлением. Электростатическое управление луча осуществляется изменением потенциала на первом аноде А1 электронного прожектора. В ЭЛП с электростатической фокусировкой и магнитным отклонением луча в электронном прожекторе введен ускоряющий

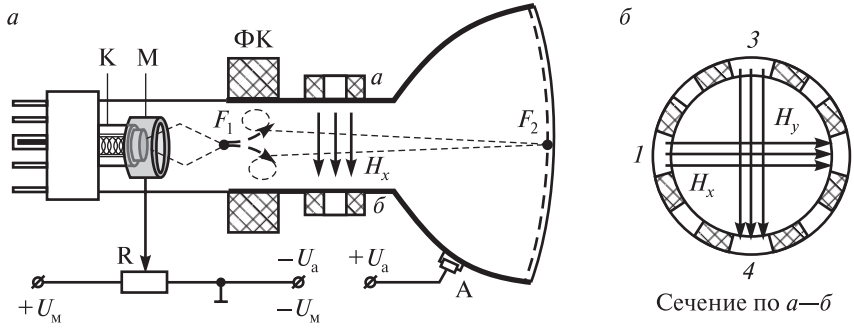



Рис. 7.44. Принцип устройства ЭЛТ с электромагнитным управлением (*а*) и действие электромагнитных полей в плоскостях отклоняющей системы (*б*)

электрод, потенциал которого выше потенциала первого анода А1 и который помещен между управляющим электродом УЭ и первым анодом А1. В таком электронном тетродном прожекторе изменение модулирующего напряжения на УЭ не нарушает фокусировку луча, а изменение напряжения на А1 не изменяет ток луча, т.е. яркость, так как анод А1 не проводит ток.

Отклоняющая система ЭЛП с магнитным управлением электронного луча состоит из двух пар ортогонально расположенных на горловине трубки катушек (надетых на трубку), которые создают вертикальное и горизонтальное магнитные поля так, что оси направления этих магнитных потоков взаимно перпендикулярны под углом 90° (рис. 7.44). Катушки *1* и *2* расположены по горизонтальной оси и их поле $H_x$ отклоняет луч по горизонтали. Их называют строчными, или *X*-катушками (рис. 7.45, *а*). Катушки *3* и *4* расположены по вертикальной оси и их поле $H_y$ отклоняет луч по вертикали. Они называются кадровыми, или *Y*-катушками (рис. 7.45, *а*).

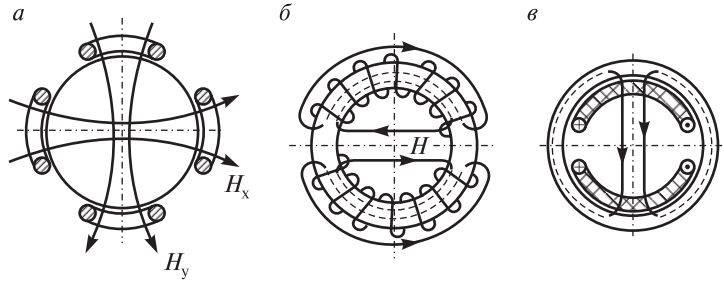



Рис. 7.45. Отклоняющие магнитные системы:
*а* — ортогонально расположенные катушки на горловине трубки; *б* — катушки с внутренним магнитопроводом; *в* — катушки с внешним магнитопроводом

Отклоняющие катушки имеют многовитковые обмотки с внутренним (рис. 7.45, *б*) или внешним (рис. 7.45, *в*) магнитопроводом. В катушках с внутренним магнитопроводом уменьшаются средняя длина витков и омические потери, но велика интенсивность поля рассеяния вне горловины трубки.

Для увеличения эффективности отклоняющей системы желательно уменьшить диаметр катушек и расстояние между ними. При этом возрастают напряженность магнитного поля и угол отклонения луча.

### *7.6.6. Условное обозначение электронно-лучевых приборов*

Основой системы обозначений электронно-лучевых приборов, так же как и всех электровакуумных приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 7.46.

Система условных графических обозначений электронно-лучевых приборов построена поэлементным способом и содержит общее обозначение:

– базовый символ баллона (корпуса), который упрощенно воспроизводится как внешнее очертание его конструкционной формы, изготовленной в виде «раструба» (рис. 7.46, *а*); размеры прямоугольника: ширина $h$ = 15—40 мм и длина $L$ = 40—80 мм; размеры раструба: длина 1/3—1/4 от длины ($L$) прямоугольника, угол «раструба» $\alpha$ = 45°—60°;

– в торце узкой части баллона изображается катод (рис. 7.46, *б*), остальные электроды изображаются в определенной (соответствующей реальному расположению в приборе) последовательности по обе стороны от оси симметрии баллона;

– первым после катода изображают управляющий электрод — модулятор, символ которого напоминает его устройство в осевом сечении — цилиндрический стаканчик с отверстием в дне (рис. 7.46, *в*) длиной $L$ = 8—10 мм и шириной $h$ = 5—8 мм;

– за модулятором расположены ускоряющий и фокусирующий электроды, называемые также первым и вторым анодами, символы этих электродов напоминают обозначение сеток, но состоят из двух штрихов длиной штриха $L$ = 3—6 мм и с линией — выводом от крайнего штриха (рис. 7.46, *г*);

– 3-й анод изображается двумя расходящимися отрезками вдоль «раструба» длиной $L$ = 7—10 мм; символ фокусирующего постоянного магнита — светлая прямоугольная скоба (рис. 7.46, *е*) или электромагнита — катушка из трех полуокружностей диаметром $D$ = 4—6 мм (рис. 7.46, *ж*), анод помещен вне символа баллона, а напротив того места, где изображают фокусирующие электроды;

– символ электростатической отклоняющей системы в виде двух параллельных пластин длиной $L$ = 5—7 мм на расстоянии

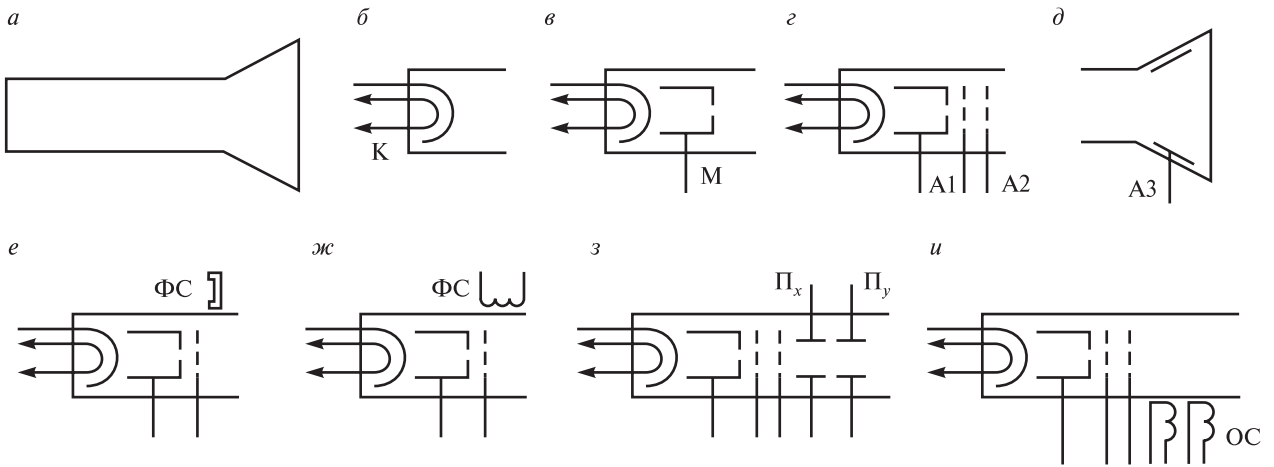



Рис. 7.46. Условное графическое обозначение элементов электронно-лучевых приборов:
*а* — баллон; *б* — катод с подогревателем; *в* — модулятор; *г* — ускоряющие и фокусирующие электроды (1-й и 2-й аноды); *д* — 3-й анод; *е* — фокусировка с постоянным магнитом; *ж* — электромагнитная фокусировка; *з* — электростатические отклоняющие пластины; *и* — электромагнитная отклоняющая система

$h$ = 8—12 мм друг от друга (рис. 7.46, *з*) внутри баллона или электромагнитной отклоняющей системы в виде катушек из двух полуокружностей $D$ = 4—6 мм, расположенных напротив того места, где в ЭЛП с электростатическим отклонением луча изображают отклоняющие пластины (рис. 7.46, *и*);

– от каждого символа в обозначении изображается токоотвод в виде линии.

Примеры графического обозначения одного из типов электронно-лучевых приборов (ЭЛП) по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81 приведены на рис. 7.47.

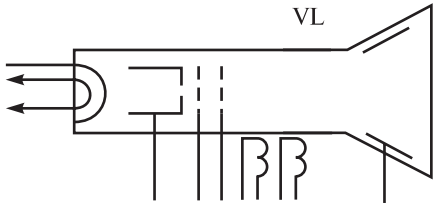



Рис. 7.47. Пример условного графического обозначения электронно-лучевого прибора

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида — буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения электронно-лучевых приборов (маркировку), классифицирующий электронно-лучевые приборы по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: VL1, где VL — электронно-лучевой прибор (электровакуумный прибор), 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Промышленность выпускает несколько типов электронно-лучевых приборов, которые имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий электронно-лучевые приборы по определенным признакам в справочниках и состоящий из четырех элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81.

*Первый элемент* — цифра (число), определяющая (ее) диаметр или диагональ экрана прибора в сантиметрах.

*Второй элемент* — буквы: ЛО — осциллографические ЭЛП с электростатическим управлением; ЛМ — осциллографические ЭЛП с магнитным управлением; ЛК — кинескопы с электромагнитным управлением луча.

*Третий элемент* — число, обозначающее порядковый номер разработки данного типа ЭЛП.

*Четвертый элемент* — буква, характеризующая цвет свечения экрана: А — синий, Б — белый, В — желто-оранжевый, И — зеленый, М — голубой.

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* Например, 61ЛК3Б-61 — размер диагонали экрана в сантиметрах, ЛК — кинескопы с электромагнитным управлением луча, 3 — номер разработки, Б — белое свечение экрана.

## 7.7. Ионные приборы

### *7.7.1. Общие сведения и классификация*

Ионными (или газоразрядными) приборами называют электровакуумные приборы, электропроводность которых обусловлена электронами и ионами при электрическом разряде в газовой среде. Баллоны этих приборов наполняют инертными газами, водородом или парами ртути.

Конструкция и назначение ионных приборов весьма разнообразны. По конструкции ионные приборы во многом напоминают электронные лампы. В корпусе (баллоне), заполненным газом, помещаются электроды, число которых зависит от назначения и вида ионного прибора. Однако, как и в электронной лампе, основными электродами являются анод и катод, конструкция которых так же, как и в электронной лампе, зависит от типа прибора и его назначения. В соответствии с этим условное графическое обозначение ионных приборов напоминает обозначение электронных ламп с небольшим отличием в графическом обозначении электродов.

Инные приборы применяются в качестве выпрямителей для выпрямления переменного тока (игнитроны, тиратроны, ртутные вентили), стабилизаторов напряжения (стабилитроны), коммутаторов в слаботочных цепях, защитных элементов от перенапряжений и грозовых разрядов (разрядники), индикаторов (газоразрядные индикаторы) и др.

Как правило, газ в этих приборах находится под низким давлением. Электрический разряд в газе — это совокупность явлений, сопровождающих прохождение электрического тока через газ (или пар). При таком разряде происходит несколько основных процессов: возбуждение атомов, ионизация атомов и рекомбинация электронов.

*Возбуждение атомов*. Если в какой-либо газовой среде имеются свободные электроны, то они при своем движении неизбежно сталкиваются с атомами или молекулами газа. В результате этих столкновений может быть нарушена устойчивость системы атома или молекулы. Возможно несколько случаев нарушения устойчивости таких систем, из которых наиболее характерными являются возбуждение и ионизация атома. При возбуждении атома под ударами электрона один или несколько электронов атома переходят на более удаленную от ядра орбиту, т.е. на более высокий энергетический уровень, не нарушая электронейтральности атома. Такое возбужденное состояние атома длится недолго, обычно $10^{-7}$—$10^{-9}$ с, после чего электрон возвращается на свою нормальную орбиту и при этом отдает в виде излучения энергию, которую атом получил при возбуждении от ударившего его электрона. Излучение сопровождается свечением газа, если испускаемые лучи относятся к видимой части электромагнитного спектра.

Для того чтобы произошло возбуждение атома, ударяющий электрон должен иметь определенную энергию, так называемую энергию возбуждения, например за счет напряжения возбуждения $U_{\text{d}}$.

*Ионизация атома (или молекул)* газа происходит при энергии ударяющего электрона больше той энергии, которой достаточно для возбуждения. Если ударяющий электрон обладает достаточным запасом кинетической энергии, то может произойти отрыв электрона и вместо нейтрального атома образуется положительный ион и свободный электрон. При соударении с нейтральным атомом электрона, имеющего малую кинетическую энергию, может произойти сцепление электрона с нейтральным атомом. В этом случае будет образован отрицательный ион. Вероятность образования отрицательных ионов зависит не только от скорости ударяющего электрона, но и от природы газа.

*Рекомбинация*. Наряду с ионизацией в газе происходит и обратный процесс нейтрализации — воссоединение ионов и электронов в нейтральные атомы. Положительные ионы и электроны совершают в газе беспорядочное (тепловое) движение и, приближаясь друг к другу, могут соединяться, образуя нейтральный атом. Этому способствует взаимное притяжение между разноименно заряженными частицами. Восстановление нейтральных атомов называется рекомбинацией. Полученный в результате рекомбинации нейтраль-

ный атом может снова ионизироваться, а затем его составные части — положительный ион и электрон — опять рекомбинироваться и т.д.

Поскольку на ионизацию затрачивается энергия, то положительный ион и электрон, получившиеся после ионизации, имеют в сумме энергию бóльшую, чем нейтральный атом. Поэтому рекомбинация сопровождается выделением лучистой энергии. Обычно при этом наблюдается свечение газа.

В зависимости от степени ионизации газа, приложенного напряжения и тока, протекающего через него, различают следующие виды разрядов: темный (тихий), тлеющий, дуговой, искровой, высокочастотный, коронный.

Если разряд поддерживается внешним ионизатором (например, термоэлектронная эмиссия накаливаемого катода, лучи света, радиоактивное излучение и т.д.), то разряд называют несамостоятельным. Если разряд существует без воздействия первоначального ионизатора, то такой разряд называют самостоятельным.

Ионные приборы, в зависимости от типа катода, вида разряда, конструкции, способа управления разрядом, силы испускания тока, классифицируются по следующим признакам:

*По типу катода:*

– с холодным катодом — разряд поддерживается без затрат энергии внешнего источника на ионизацию и относится к приборам с самостоятельным разрядом (в данных газоразрядных приборах не затрачивается энергия на разогрев катода);

– с подогретым катодом — разряд (ионизация) поддерживается за счет подогрева катода, конструктивно выполненного, как и в электронной лампе с подогретым катодом и относящийся к приборам с несамостоятельным разрядом.

*По способу управления разрядом (конструкции):*

– неуправляемые — содержат 2 электрода;

– управляемые — содержат 3 и более электродов.

*По виду разряда:*

– темный (или тихий) разряд — несамостоятельный разряд характеризуется начальной ионизацией газовой среды при незаметном свечении;

– дуговой разряд — газоразрядные приборы с подогретым катодом (газотроны тиратроны и др.) имеют накаливаемый катод

и наполняются инертным газом или парами ртути при давлении порядка десятых долей гПа; газоразрядные приборы с холодным катодом имеют жидкометаллический катод (ртутные выпрямители, экстроны и др.) либо самонакаливаемый катод (аркотроны);

– тлеющий разряд — газоразрядные приборы с холодным катодом при давлении газа несколько десятков гПа (стабилитроны, тиратроны и т.д.);

– искровой разряд — газоразрядные приборы с одинаковыми по конструкции холодными электродами при давлении газа внутри болона порядка сотен паскалей (искровые разрядники).

– коронный разряд — газоразрядные приборы с сильной неоднородностью электрического поля, разряд возникает лишь в области, примыкающей к аноду, при давлении газа внутри болона порядка сотен гПа (стабилитроны и др.).

Различные виды газового разряда можно проследить, изучая работу ионного прибора — его вольт-амперную зависимость, т.е. по вольт-амперной характеристике в двухэлектродном приборе с холодным катодом по схеме, показанной на рис. 7.48.

Если к электродам приложить небольшое напряжение $U_a$ (несколько вольт), то через прибор потечет ток, обусловленный начальной ионизацией (космическими лучами, радиоактивным фоном Земли и т.д. — участок 0А).

С увеличением напряжения $U_a$ ток возрастает и достигает насыщения (участок АБ). При дальнейшем увеличении напряжения $U_a$ происходит увеличение кинетической энергии электронов. Происходит ударная ионизация атомов газа электронами, ток увеличивается (участок БВ). В этом случае происходит газовый разряд, который называется «тихим», несамостоятельным, разрядом. Данный разряд применяется в газонаполненных фотоэлементах для умножения тока начальной ионизации, создаваемого за счет фотоэлектронной эмиссии катода. Свечение газа незаметно. Этот вид разряда предшествует другим видам разряда.

При дальнейшем увеличении тока положительные ионы из-за меньшей подвижности скапливаются в междуэлектродном промежутке и изменяют распределение потенциала между электродами и электрическое поле так, что почти все падение напряжения в приборе оказывается сосредоточенным вблизи катода. Положительные

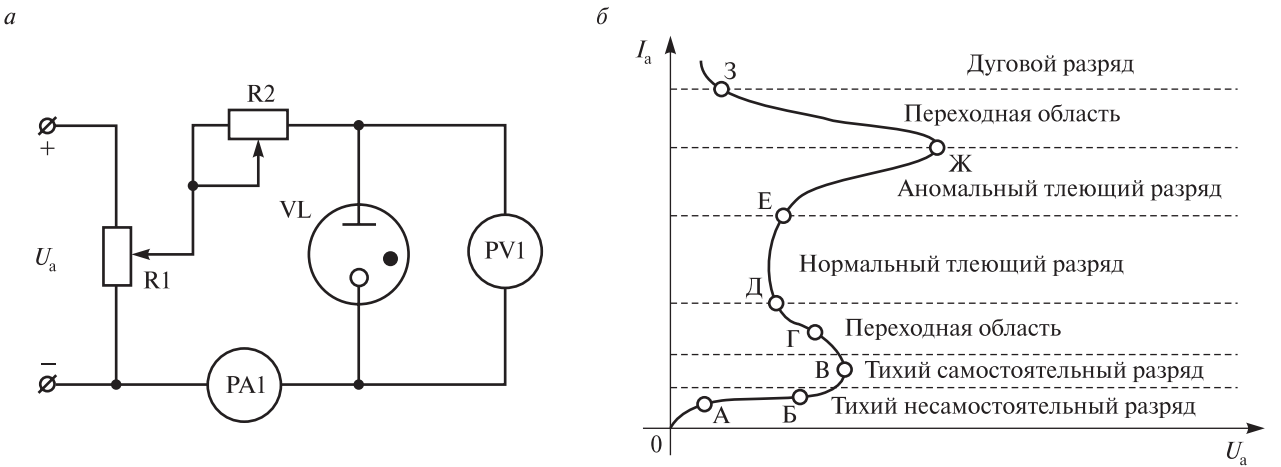



Рис. 7.48. Исследование газового разряда:
*а* — схема для снятия вольт-амперной характеристики газоразрядного прибора; *б* — вольт-амперная характеристика газового разряда

ионы, ускоряемые полем у катода, приобретают энергию, достаточную для выбивания электронов из катода.

Когда число ионов, попадающих на катод, и их энергии оказываются достаточными для того, чтобы вновь выбитые ими из катода электроны могли поддержать разряд без участия внешнего ионизатора, устанавливается самостоятельный разряд. Характер самостоятельного разряда зависит от ограничительного резистора в схеме (R) и конструкции электродов. При большом сопротивлении $R$ (около 1 МОм) и малой площади поверхности электрода возникает тихий самостоятельный разряд (участок ВГ) или его разновидность — коронный разряд.

Коронный разряд является самостоятельным и происходит в газовой среде с высоким давлением (порядка атмосферного и выше) и возле электродов с малой поверхностью (заостренные) электроды. Повышение тока и напряжения переводит коронный разряд в тлеющий или искровой разряд.

Если $R$ = 10—100 кОм, участок ВГ отсутствует (тихий самостоятельный разряд не возникает), и сразу устанавливается нормальный тлеющий разряд (участок ДЕ). Тогда напряжение на приборе составляет 60—150 В при токах от единиц до десятков миллиампер. Переходная область (участок ГД) — это переходной процесс от тихого разряда к тлеющему, когда происходит нарастание объемного заряда возле катода.

Тлеющий разряд получил название по характеру свечения — только вблизи поверхности катода. Цвет свечения зависит от рода выбранного газа. Катодное тлеющее свечение используется в цифровых и знаковых индикаторах.

Характерной особенностью коронного и нормального тлеющего разрядов является постоянство падения напряжения на приборе при увеличении силы тока. Это свойство разрядов используется в опорных стабилитронах для стабилизации напряжения.

С увеличением напряжения сила тока увеличивается и свечение покрывает всю поверхность катода. В этом случае увеличение тока становится возможным только за счет увеличения энергии ионов. Поэтому падение напряжения в приборе начинает возрастать. Такой разряд называется аномальным тлеющим разрядом (участок ЕЖ). Этот вид разряда используется в газосветных лампах, применяемых в качестве модуляторов света. Изменяя подводимое напряжение или

разрядный ток через лампу как управляющий сигнал, можно изменять яркость свечения. На этом принципе основано применение неоновых ламп в фототелеграфии, при записи звука в кино и т.п.

Дальнейшее повышение тока за счет уменьшения $R$ или увеличения $U_a$ может привести к тому, что после точки Ж аномальный тлеющий разряд скачком перейдет в самостоятельный дуговой разряд.

Самостоятельный дуговой разряд характеризуется большими токами (до сотен ампер) и малыми падениями напряжения на приборе (10—30 В). Эмиссия электронов с катода при дуговом разряде происходит за счет создания вблизи катода сильного электрического поля, образованного ионами газа. Такой вид эмиссии называется автоэлектронной эмиссией и возникает, если материал катода легко испаряется при нагреве (ртутные выпрямители, где катодом служит жидкая ртуть).

Эмиссия электронов с катода при дуговом разряде может возникнуть и за счет разогрева катода, тогда она называется термоэлектронной эмиссией.

В ионных приборах с накаливаемым катодом (т.е. существует искусственный внешний ионизирующий фактор в виде нагретого катода) возникает и несамостоятельный дуговой разряд. Применяется такой разряд в тиратронах и газотронах.

Искровой разряд подобен дуговому и представляет собой кратковременный (импульсный) электрический разряд.

Рассмотренные процессы в газоразрядных (ионных) приборах позволяют сделать вывод о широком использовании этих приборов в различных электронных устройствах.

На железнодорожном транспорте в устройствах автоматики и телемеханики применяются газоразрядные приборы с самостоятельным тлеющим разрядом — стабилитроны, неоновые лампы, тиратроны, разрядники и т.д.

### *7.7.2. Стабилитроны*

Стабилитроны — это двухэлектродные приборы с самостоятельным тлеющим разрядом. Используются для стабилизации напряжения. Конструктивно (рис. 7.49) стабилитрон состоит из стеклянного баллона *1*, наполненного смесью инертных газов (Ar + Ne (аргон + неон) или Ar + He (аргон + гелий). В баллоне находится цилинд-

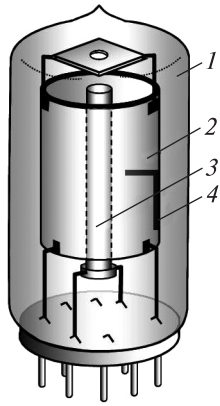



Рис. 7.49. Конструкция газонаполненного стабилитрона:
*1* — баллон; *2* — катод; *3* — анод; *4* — стержень

рический катод *2*, выполненный из никеля или стали, внутри которого помещен анод *3*, выполненный из проволоки, свитой в виде цилиндра. Внутреннюю поверхность катода покрывают тонким слоем бария, калия или цезия для уменьшения работы выхода электронов. К краю катода приваривают поджигающий стержень *4*. Он способствует снижению напряжения зажигания. Вначале тлеющий разряд возникает между поджигающим стержнем и анодом, а затем, по мере увеличения концентрации ионов в баллоне, переходит на поверхность катода.

Включение стабилитрона в схемах показано на рис. 7.50, *а*. Последовательно со стабилитроном включают ограничительный резистор (балластный) $R_б$, ограничивающий ток тлеющего разряда и препятствующий возникновению электрической дуги (дуговой разряд). Ограничительный резистор $R_б$ также служит для гашения напряжения при стабильном напряжении на стабилитроне ($U_{ст}$), т.е. для выполнения условия $U_{вх} = U_{ст} + \Delta U_{Rб}$, как в схеме полупроводникового стабилитрона. Резистор $R_н$ включается параллельно стабилитрону.

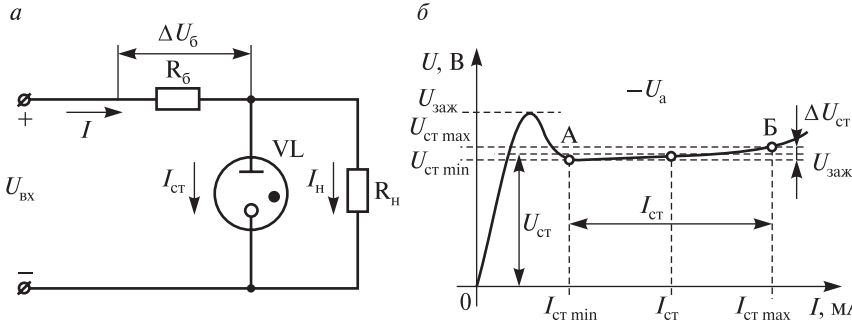



Рис. 7.50. Схема включения (*а*) и вольт-амперная характеристика стабилитрона (*б*)

Стабилитрон используется в режиме нормального тлеющего разряда, который характеризуется стабильностью напряжения между электродами при изменении тока через прибор от $I_{\text{ст min}}$ до $I_{\text{ст max}}$ (рис. 7.50, *б*).

Стабилитрон в схеме работает следующим образом. С увеличением входного напряжения в приборе усиливаются процессы ионизации, расширяется поверхность катодного свечения, уменьшается сопротивление стабилитрона, возрастает ток $I_{\text{ст}}$ через прибор. При этом возрастает падение напряжения на балластном резисторе $\Delta U_{\text{Rб}} = IR_{\text{б}} = (I_{\text{ст}} + I_{\text{н}})R_{\text{б}}$, а напряжение на стабилитроне и нагрузке $R_{\text{н}}$ остается практически неизменным.

С уменьшением входного напряжения несколько уменьшается напряжение на стабилитроне и нагрузке, что в режиме нормального катодного падения напряжения приводит к уменьшению рабочей поверхности катода и тока стабилизации $I_{\text{ст}}$. Из-за этого уменьшается общий ток $I = I_{\text{ст}} + I_{\text{н}}$ и падение напряжения на резисторе $\text{R}_{\text{б}}$, а напряжения на стабилитроне и нагрузке возрастают до прежнего значения. Из этого следует, что рабочий участок АБ вольт-амперной характеристики стабилитрона (рис. 7.50, *б*) соответствующий нормальному тлеющему разряду, характеризуется стабильностью напряжения между электродами при изменении тока через прибор от $I_{\text{ст min}}$ до $I_{\text{ст max}}$.

Параметрами стабилитрона являются: напряжение зажигания $U_{\text{заж}} \approx 100—200$ В; напряжение стабилизации $U_{\text{ст}} = 60—160$ В; предельное значение рабочего тока $I_{\text{a min}}—I_{\text{a max}} \approx 1{,}5—40$ мА.

Газоразрядные стабилитроны по сравнению с полупроводниковыми обеспечивают более высокую температурную стабильность работы, но механически менее прочны, громоздки, имеют меньшие токи стабилизированного напряжения. Запрещается использовать их в цепях переменного напряжения и изменять полярность входного напряжения.

### *7.7.3. Неоновые лампы*

Неоновые лампы — простейшие двухэлектродные приборы, в которых для более интенсивного свечения используется аномальный тлеющий разряд. Применяются для световой индикации (сигнальные), свидетельствующей о наличии напряжения в электрической цепи, и для определения электромагнитного поля высокой частоты.

Конструктивно лампы выполняются с симметричной или несимметричной формой электродов, помещенных в стеклянный баллон. Баллон наполняют неоново-гелиевой смесью с небольшой примесью аргона, дающей при разряде оранжево-красное свечение, которое хорошо заметно для глаза человека. Катоды имеют большую поверхность в основном в виде дисков и активируются. Для получения свечения другого цвета (желтого, голубого, зеленого и т.д.) на внутреннюю поверхность баллона лампы наносят слой цветного люминофора. Такие разновидности неоновых (сигнальных) ламп называются сигнальными люминесцентными лампами.

При симметричной конструкции электродов, выполненных в форме дисков, стержней (рис. 7.51, *а*, *б*), полярность включения не соблюдается, а при несимметричной конструкции, например анод в виде кольца, а катод в виде диска (рис. 7.51, *в*), отрицательный потенциал подают на электрод с большей площадью поверхности (катод).

Неоновые лампы с симметричной конструкцией электродов применяют в цепях переменного тока, а с несимметричной — в цепях постоянного тока.

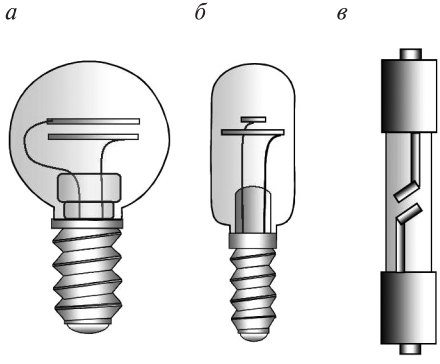



Рис. 7.51. Внешний вид неоновых ламп:
*а* — симметричной конструкции; *б* — несимметричной конструкции (миниатюрные); *в* — указатели высокого напряжения и электромагнитного поля высокой частоты

При включении неоновой лампы в схему (рис. 7.52) должен быть ограничен ток балластным резистором R1. Напряжение зажигания ламп колеблется в пределах 45—220 В, а токи — в пределах 1—20 мА.

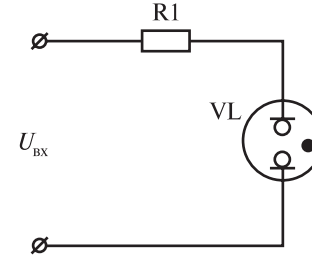



Рис. 7.52. Схема включения неоновой лампы

Основные параметры неоновых ламп: напряжение зажигания, рабочий ток, падение напряжения на горящей лампе, время запаздывания зажигания и время деионизации, ограничивающее частотные пределы работы ламп.

В зависимости от назначения и конструктивного выполнения различают обычные сигнальные лампы, миниатюрные, модуляторные и др.

### *7.7.4. Тиратроны*

Тиратрон с холодным катодом — прибор тлеющего разряда, где, кроме анода и катода, имеется один или два управляющих электрода (сетки). Назначение этих электродов — управлять моментом зажигания разряда. Управляющее действие сетки прекращается после зажигания тиратрона. Чтобы погасить разряд, необходимо уменьшить напряжение на аноде так, чтобы оно было ниже напряжения поддержания основного разряда.

Конструктивно тиратроны тлеющего разряда выполнены в виде миниатюрной микроэлектродной лампы (рис. 7.53) со стеклянным баллоном и, как правило, гибкими выводами. Внутри баллона находится цилиндрический никелевый катод *1* и стержневой молибденовый анод *2*. Между анодом и катодом имеется проволочное кольцо или цилиндр из никеля, выполняющие задачу управляющей сетки *3*. Стеклянный баллон (*4*) заполнен неоном с небольшой добавкой аргона. Чтобы облегчить зажигание тиратрона по анодной цепи, на сетку обычно подают постоянный положительный потенциал от источника $U_c$ (рис. 7.54, *а*). Между сеткой и катодом возникает темный разряд. Ионы, возникающие при разряде, бомбардируют катод, тем самым увеличивают выход из него электронов, что приводит к снижению потенциала зажигания по анодной цепи.

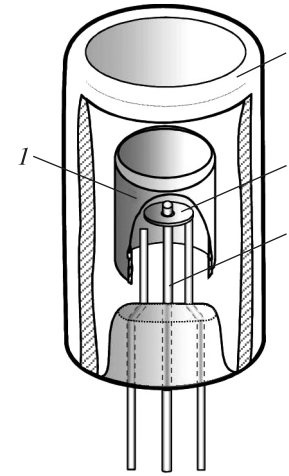



Рис. 7.53. Устройство тиратрона с холодным катодом:
*1* — катод; *2* — анод; *3* — управляющая сетка; *4* — баллон

Безнакальные тиратроны можно зажигать, изменяя потенциал $U_a$ на аноде, при

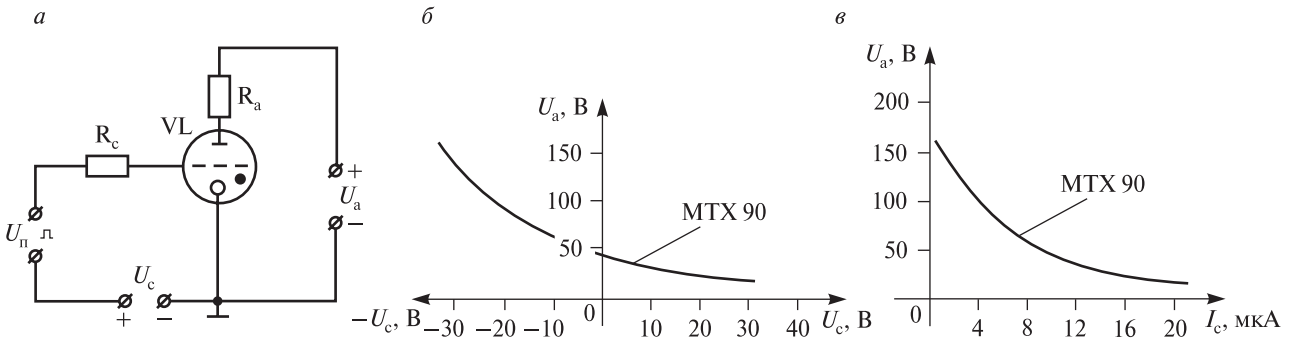



Рис. 7.54. Схемы включения тиратрона с холодным катодом (*а*), пусковая характеристика тиратрона с холодным катодом $U_a = \varphi(U_c)$ (*б*), пусковая характеристика тиратрона с холодным катодом $U_a = \varphi(I_c)$ (*в*), МТХ-90 — миниатюрный тиратрон тлеющего холодного разряда

постоянном напряжении на сетке $U_c$, или наоборот. Связь между напряжениями $U_a$ и $U_c$, при которых наступает зажигание, устанавливается пусковой характеристикой зажигания $U_a = \varphi(U_c)$ или $U_a = \varphi(I_c)$ (рис. 7.54, *б*, *в*). Повышение потенциала $U_c$ на сетке позволяет уменьшить потенциал зажигания на аноде $U_{a\,заж}$. Чтобы стабилизировать (фиксировать) момент зажигания, на сетку дополнительно можно подавать пусковой импульс $U_п$ положительной полярности.

Напряжение на аноде, при котором возникает основной разряд в анодной цепи, зависит от тока $I_c$ подготовительного разряда (тока переброса), протекающего в цепи сетка—катод. Чем больше ток $I_c$, тем больше электронов и ионов в приборе и меньше потенциал зажигания $U_{a\,заж}$ основного разряда.

Более широкие возможности регулирования имеет четырехэлектродный тиратрон (тетрод) с двумя сетками — управляющей $C_у$ и экранирующей $C_э$ (рис. 7.55). Зажигание и разряд в нем можно произвести не только увеличением напряжения второй сетки $U_{c\,э}$, но и ростом тока подготовительного разряда на первой сетки. Для повышения эффективности анода и катода в конструкции тиратронов применяются экраны (дополнительные сетки), выполненные в

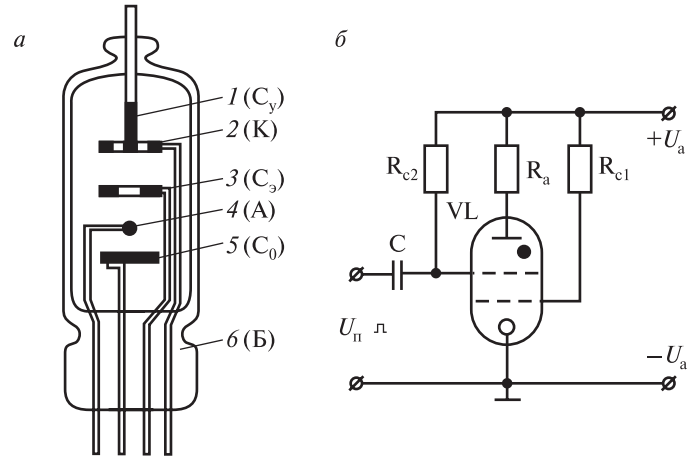



Рис. 7.55. Тиратрон с холодным катодом тетродного типа:
*а* — устройство: *1* — управляющая сетка; *2* — катод; *3* — экранирующая сетка; *4* — анод; *5* — экран анода; *6* — баллон; *б* — схема включения

виде цилиндров вокруг анодов и катодов. На рис. 7.55 такой экран обозначен $C_0$.

Основными параметрами тиратрона тлеющего разряда являются: время запаздывания возникновения разряда после включения напряжения; сеточный ток зажигания; падение напряжения на аноде—катоде и сетке—катоде; время восстановления рабочего напряжения анода.

Тиратроны тлеющего разряда применяются в схемах формирователей импульсов, в релейных схемах для счета импульсов.

### *7.7.5. Разрядники*

Защитные разрядники применяются для защиты линий проводной связи и аппаратуры железнодорожного транспорта от перенапряжений, которые могут индуктироваться в проводах этих линий при грозовых разрядах или аварийных режимах в соседних линиях электропередачи. Разрядник представляет собой двухэлектродный прибор, наполненный аргоном или водородом при давлении 4—8 кПа.

Различают разрядники с плоскими алюминиевыми электродами типа РА (рис. 7.56, *а*), расположенными на расстоянии 2-3 мм

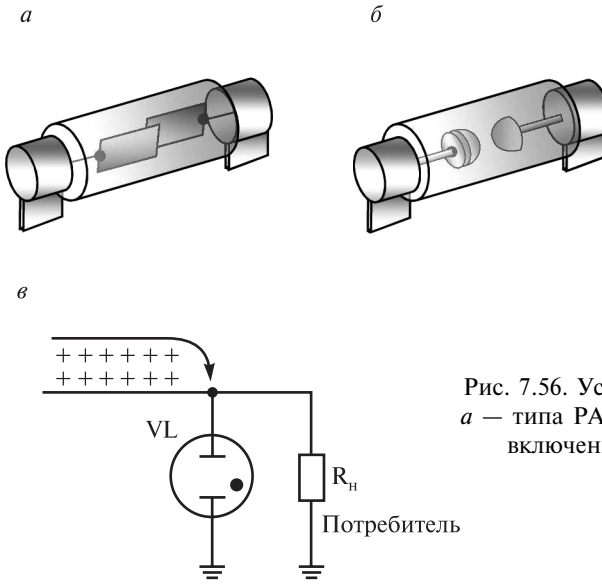



Рис. 7.56. Устройство разрядников: *а* — типа РА; *б* — типа РБ и схема включения разрядников (*в*)

друг от друга, и с шаровыми из ванадия типа РБ (рис. 7.56, *б*), активированными барием. Разрядники типа РА — маломощные. Разрядники включают на вводах в технические здания между каждым проводом линии связи и землей параллельно защищаемому объекту (рис. 7.56, *в*).

При номинальных напряжениях в линиях, не превышающих 250 В (меньше напряжения зажигания), разрядники обладают высоким сопротивлением изоляции ($R_{из} \geq 40$ МОм) и ток не проводят. Когда в проводах линии возникают повышенные напряжения, в разряднике (под действием электрического поля) возбуждается тлеющий разряд, который затем, по мере увеличения напряжения, быстро перерастает в дуговой разряд. С возникновением дугового разряда сопротивление разрядника снижается до единиц-сотен Ом и через разрядник в землю проходит большой ток, вследствие чего напряжение на электродах, следовательно, и на проводах защищаемой линии снижается до безопасного (10—30 В) значения.

Разрядники имеют следующие основные параметры: напряжение зажигания 350—460 В для разрядников РА и 350—430 В для разрядников типа РБ; допустимый ток разряда, ограничиваемый нагревом выводов и зависящий от длительности импульса перенапряжения, для разрядников РБ он составляет 30 А в течение 10 с, а для разрядников РА — 3 А в течение 2 с; время восстановления электрической прочности, которое зависит от охлаждения после разряда и составляет несколько минут. Разрядники имеют малую междуэлектродную емкость — до десятков пикофарад.

### *7.7.6. Условное обозначение ионных приборов*

Основой системы обозначений ионных приборов, так же как и всех электровакуумных приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 7.57.

Система условных графических обозначений ионных приборов построена поэлементным способом и содержит:

– общее обозначение — базовый символ баллона (корпуса) в виде окружности диаметром $D = 10$ или 12 мм, или овала с шириной

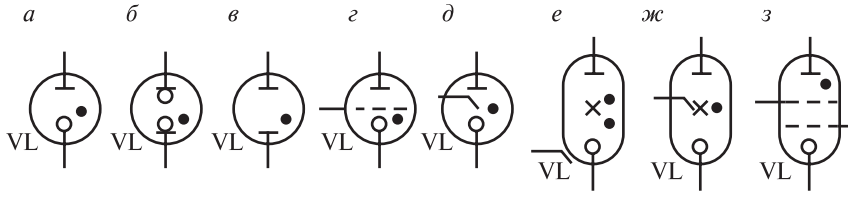



Рис. 7.57. Условное обозначение ионных газоразрядных приборов:
двухэлектродные с холодным катодом: *а* — с простыми электродами разной конструкции (стабилитрон); *б* — с комбинированными электродами одинаковой конструкции (неоновые лампы); *в* — с простыми плоскими электродами одинаковой конструкции (разрядники);
трехэлектродные с холодным катодом: *г* — с электродами разной конструкции (тиратрон)); *д* — с электродами разной конструкции и внутренним поджигающим электродом (тиратрон); *е*, *ж* — с электродами разной конструкции и видимым спектром излучения, соответственно с внешним и внутренним поджигающим электродом и высоким давлением и низким давлением);
тетродного типа с холодным катодом (*и* — с электродами разной конструкции (тиратрон)

$h$ = 10 мм или 12 мм и длиной $L$ = 20 мм или 24 мм; внутри баллона показаны: анод в виде отрезка длиной $L$ = 8—10 мм с линией — выводом от середины отрезка, холодный катод в виде незачерненного кружка диаметром $D$ = 2—4 мм, накаливаемый катод в виде дуги радиусом $R$ = 8—12 мм и длиной $L$ = 8—14 мм с линиями — выводами от концов дуги; возможно одинаковое изображение катода и анода одинаковой конструкции (плоские и точечные) в виде отрезка (плоские электроды) или незачерненного кружка (точечные электроды);

– дополнительные обозначения: сетка — точка внутри символа баллона, обозначающая наличие газового наполнения и давление (одна точка — низкое, две — высокое, три — сверхвысокое давление), сетки и экраны — три коротких штриха (длина штриха $L$ = 3—6 мм) независимо от назначения и названия. Число сеток в графическом изображении зависит от конструкции ионного прибора. Они изображаются на одинаковом расстоянии друг от друга. Поджигающий электрод — линия с изломом на конце (внутренний и внешний); знак спектра видимого излучения обозначается крестиком (×) внутри баллона.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обо-

значения и буквенно-числовой код обозначения ионных приборов (маркировку), классифицирующий ионные приборы по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: стабилитрон, тиратрон, неоновые лампы — VL1, где VL — ионный (электровакуумный) прибор, разрядники — F1, где F — разрядник, 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Примеры графического обозначения некоторых типов электронных ламп по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81 приведены на рис. 7.57.

Промышленность выпускает несколько типов ионных приборов — стабилитроны, тиратроны, неоновые лампы, разрядники и т.д., которые имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий ионные приборы по определенным признакам в справочниках и состоящий из следующих элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81.

*Первый элемент* — буквы, указывающие тип ионного прибора: ТХ — тиратрон тлеющего холодного разряда, ТХИ — тиратрон тлеющего холодного разряда импульсный, ТГИ — тиратрон тлеющего разряда с газовым наполнением импульсный, СГ — стабилитрон газовый, РА — разрядники с алюминиевыми электродами, РБ — разрядники с электродом, покрытым барием, СН — сигнальные неоновые лампы, МН — миниатюрные неоновые лампы, ПН — панельные неоновые лампы, ФН — фазовые неоновые лампы, ВМН — волномерные неоновые лампы, ВН — высоковольтные неоновые лампы, УВН — указатели высокого напряжения неоновой лампы, ТЛ — люминесцентная лампа тлеющего разряда с буквами, указывающими цвет свечения (О — оранжевый, Г — голубой, З — зеленый, Ж — желтый;

*второй элемент* — цифра, которая для тиратронов, стабилитронов, неоновых ламп указывает порядковый номер разработки данного типа прибора (1, 2, 3 и т.д.), для разрядников — напряжение зажигания (250 В, 430 В), для люминесцентных сигнальных ламп — номинальный ток в миллиамперах;

*третий элемент* — буква, которой часто обозначают конструктивное оформление прибора: М — миниатюрные; Б или Г — сверхминиатюрные; К — в керамической оболочке, П — пальчиковая, в разных типах приборов этот элемент неоднозначен; в тиратронах

конструктивное исполнение указывается как первый элемент; для люминесцентных сигнальных ламп — напряжение зажигания (1 — 145 В, 2 — 185 В).

*Примеры обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* СГ1П: СГ — стабилитрон газовый, 1 — номер разработки, П — пальчиковая. МТХ-90: М — миниатюрная, ТХ — тиратрон тлеющего холодного разряда, 90 — номер разработки. ТЛО-1-1: ТЛ — люминесцентная лампы тлеющего разряда, О — оранжевого свечения; 1 — номинальный ток, 1 — с напряжением зажигания 145 В.

# Глава 8. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И ПРИБОРЫ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

## 8.1. Общие сведения

Оптоэлектронными приборами называются приборы, которые излучают и преобразуют излучение в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой области спектра излучения или используют для своей работы электромагнитные излучения, частоты которых находятся в этих областях.

В общем случае термин «оптоэлектронный прибор» характеризует устройство, в котором имеются элементы, обеспечивающие генерирование оптического излучения, его передачу и прием. В современной технике оптоэлектронные приборы нашли широкое применение: полупроводниковые приборы и микросхемы, выполняющие функции устройств оптической переработки информации; устройства отображения информации; преобразователи электрических сигналов в оптические, и наоборот, фотоизлучатели и фотоприемники.

На базе современных фотоприемников и излучающих приборов развивается научно-техническое направление — оптоэлектроника, которая использует для передачи, обработки и хранения информации как электрические, так и оптические средства и методы.

Оптоэлектроника — это раздел электроники, который изучает способы применения эффектов взаимодействия электромагнитных волн, в оптическом диапазоне ($3 \cdot 10^{11}$—$3 \cdot 10^{17}$ Гц) с электронами в веществах (главным образом, в твердых веществах). В оптоэлектронике условно выделяют фотонику (методы создания устройств, предназначенных для хранения, передачи, обработки и отображения информации, представленной в виде только оптических сигналов), радиооптику (применение принципов и методов радиофизики в оптике) и оптронику (методы создания электронных устройств с внутренними оптическими связями, так называемых оптронных схем).

Таким образом, оптоэлектроника — это синтез оптики и электроники. Она занимается вопросами современного использования оптических и электрических методов обработки, хранения и передачи информации.

В основе работы генераторов оптического излучения лежит одно из следующих явлений: температурное свечение; излучение при газовой разрядке; электролюминесценция; индуцированное излучение.

Идея использования оптического излучения для обработки и передачи информации возникла в 1950-х гг. Оптоэлектроника начала формироваться как самостоятельный раздел науки и техники в 1960-х гг., когда были созданы лазеры и излучающие диоды. В последующие десятилетия были созданы основные приборы и устройства оптоэлектроники: полупроводниковые и жидкокристаллические индикаторы, кремниевые экраны с зарядовой связью, оптические запоминающие устройства, волоконно-оптические линии связи и т.д.

Достоинства оптоэлектроники по сравнению с вакуумной и полупроводниковой электроникой определяются преимуществами использования оптического излучения в приборах и устройствах, предназначенных для передачи, хранения, обработки и отображения информации. Это обусловлено электрической нейтральностью фотонов, что обеспечивает невосприимчивость к воздействию электромагнитных полей; гальваническую развязку входной и выходной цепи; информационную емкость; и т.д.

В оптоэлектронике световой луч выполняет функции, что и электрический сигнал в электрической цепях — управление, преобразование и связь. В качестве носителя информации в оптоэлектронике используются электромагнитные волны оптического диапазона. Длина волн лежит в диапазоне от 10 нм до 1 мм.

Оптический диапазон волн по физическим свойствам неоднороден, в связи с этим он делится на поддиапазоны: ультрафиолетовое излучение $\lambda = 0{,}002—0{,}4$ мкм, видимое излучение $\lambda = 0{,}38—0{,}78$ мкм и инфракрасное излучение $\lambda = 0{,}78—1000$ мкм (рис. 8.1). Длина волны определяет степень передачи и поглощения излучения в различных светопроводящих средах.

Элементную базу современной оптоэлектроники составляют следующие основные группы приборов: оптоизлучатели, светоизлуча-

ющие диоды и лазеры, фотоэлектронные приемники излучения — фоторезисторы и фотоприемники с $p$-$n$-переходом, приборы для отображения информации — индикаторы, приборы для электрической изоляции — оптроны, оптические каналы связи и оптические запоминающие устройства.

### *Законы фотоэффекта*

Фотоэффект — испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Открыт в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем.

Основные законы, на которых основана теория работы оптоэлектронных приборов, открыты выдающимся русским физиком А.Г. Столетовым в 1888 г. Он открыл существование фотонов и исследовал явление фотоэлектронной эмиссии:

– число электронов, покидающих катод за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света, облучающего катод;

– число фотоэлектронов в единицу времени пропорционально плотности потока излучения, а максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой излучения и не зависит от потока интенсивного излучения;

– для каждого вещества существует предельная длина электромагнитной волны, при которой фотоэффект еще возможен (красная граница фотоэффекта);

– фотоэффект практически безынерционен.

Шкала электромагнитных волн представлена на рис. 8.1. Свет представляет собой поток электромагнитной энергии (человеческий глаз реагирует на электромагнитные волны длиной $\lambda = 0{,}4$—$0{,}7$ мкм, соответствующей видимому диапазону волн — красному и фиолетовому цвету). Обладая как волновой, так и корпускулярной природой, свет излучает и поглощается веществом только в виде дискретных количеств энергии фотонов и квантов.

Энергия кванта $E$ пропорциональна частоте $f$ электромагнитной волны излучения, следовательно, $E = hf$, где $h$ — постоянная Планка. Для работы в диапазоне видимого излучения используются полупроводники с шириной запрещенной зоны 1,5—3,0 эВ. Поэтому, чтобы кванты энергии — фотоны, освободившиеся при рекомбинации, соответствовали квантам видимого света, ширина запрещенной зоны исходного полупроводника должна быть относительно большой. При меньшей ширине запрещенной зоны исход-

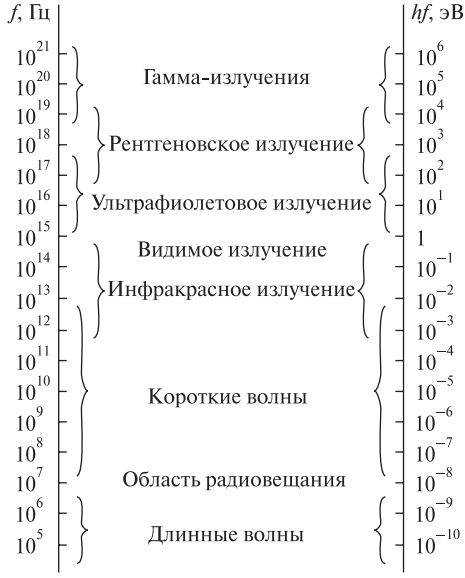



Рис. 8.1. Шкала электромагнитных волн

ного полупроводника кванты энергии, освобождающейся при рекомбинации носителей заряда, соответствуют инфракрасной области излучения. Это исключает применение германия и кремния, технология которых хорошо отработана, а используются другие материалы — арсенид галлия, фосфид галлия, нитрид галлия и карбид кремния.

В полупроводниках генерация оптического излучения обеспечивается инжекционной электролюминесценцией.

При воздействии светового потока на полупроводник электроны валентной зоны получают дополнительную энергию. Если эта энергия достаточна для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости, то образуются пары электрон—дырка, вследствие чего проводимость полупроводника увеличивается.

Электрическая проводимость, возникающая под действием светового потока, называется фотопроводимостью.

## 8.2. Фотоэлектрические и светоизлучающие приборы

### *Общие сведения и классификация фотоэлектрических приборов*

Электронные приборы, предназначенные для преобразования светового излучения в электрический ток, называются фотоэлектрическими. Фотоэлектрическими, или фотоэлектронными, приборами называют электровакуумные или полупроводниковые приборы, преобразующие энергию электромагнитного излучения оптического диапазона (световое излучение) в электрическую энергию. Действие фотоэлектрических приборов основано на электрических процессах, протекающих в веществе в результате поглощения им энергии электромагнитного излучения.

Процесс ионизации атомов вещества квантами света, сопровождающийся образованием подвижных носителей зарядов, называется фотоэлектрическим эффектом. Различают внутренний и внешний фотоэффекты.

Если электроны, освобождаясь от связей в атомах, не выходят во внешнюю среду, а лишь свободно перемещаются внутри вещества, повышая его проводимость, имеет место внутренний фотоэффект. Внутренний фотоэффект проявляется только в полупроводниках и диэлектриках и является основой работы полупроводниковых фотоэлектрических приборов. Внутренний фотоэффект в однородных структурах собственных и примесных полупроводников изменяет их электрическое сопротивление.

В приборах с внутренним фотоэффектом образуются пары носителей зарядов — электронов и дырок в полупроводнике или в электронно-дырочном переходе. Внутренний фотоэффект, возникающий в однородном полупроводнике, называется фоторезистивным и ведет к уменьшению электрического сопротивления полупроводника без его нагрева.

Число электронов и дырок в собственном полупроводнике, возникающих при облучении единицы его площади потоком фотонов, пропорционален числу фотонов. Этот процесс называется собственным поглощением.

В примесных полупроводниках наряду с собственным поглощением происходит примесное поглощение. Оно сопровождается генерацией носителей зарядов одного знака (электронов с энергоуровней доноров и дырок с энергоуровней акцепторов).

В электронно-дырочном переходе внутренний фотоэффект называется фотогальваническим, или вентильным. Он ведет к возникновению ЭДС на зажимах прибора при воздействии световой энергии.

Если электроны под действием облучения выходят во внешнюю среду, фотоэффект называется внешним. Внешний фотоэффект основан на возникновении фотоэлектронной эмиссии электронов при облучении металла или полупроводника светом. За счет поглощения квантов лучистого потока энергия электронов в твердом теле изменяется. Электроны, получившие дополнительную энергию, могут покинуть пределы твердого тела (фотоэлектронная эмиссия) или перейти на более высокие энергетические уровни, например из валентной зоны в зону проводимости. При переходе в зону прово-

димости число подвижных зарядов, следовательно и электропроводность тела, увеличиваются (фотопроводимость).

Фотоэлектрические, или фотоэлектронные, приборы классифицируются по следующим признакам.

1. По виду рабочей среды:

– электровакуумные фотоэлектронные приборы (электронные или ионные фотоэлементы и умножители);

– полупроводниковые фотоэлектронные (оптоэлектронные) приборы (с однородной структурой — фоторезисторы, полупроводниковые фотоэлементы; с *p-n*-переходами — солнечные батареи, фотодиоды, фототиристоры, фототранзисторы.

2. По принципу действия:

– электровакуумные с внешним фотоэффектом, работа которых основана на выходе электронов с поверхности металла под действием энергии электромагнитного излучения;

– полупроводниковые с внутренним фотоэффектом или фоторезистивным фотоэффектом, работа которых основана на изменении электрического сопротивления полупроводника под действием энергии электромагнитного излучения;

– полупроводниковые с внутренним (вентильным) или гальваническим фотоэффектом, в основу которых положено возникновение ЭДС между слоями полупроводника с проводимостью различного типа под действием энергии электромагнитного излучения.

3. По функциональному назначению:

– фотоприемники — преобразователи светового потока в электрический сигнал;

– фотодатчики — контролирующие преобразователи светового потока в электрический сигнал;

– фотопреобразователи — источники электроэнергии, полученной из световой.

## 8.3. Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов

Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов приведена на рис. 8.2.




Рис. 8.2. Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов

## 8.4. Полупроводниковые фотоэлектрические (оптоэлектронные) приборы

### *8.4.1. Фоторезисторы*

Полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в широких пределах в зависимости от интенсивности и спектрального состава воздействующего на него светового потока (электромагнитного излучения), называют фоторезистором (ФР).

Различают неохлаждаемые и охлаждаемые (со специальным устройством для понижения температуры) фоторезисторы. Основным элементом конструкции (рис. 8.3) фоторезистора является светочувствительный элемент *1*, нанесенный поверх подложки *2* методом напыления или прессования в виде тонкого слоя полупроводника *n*-типа. Светочувствительными материалами служат полупроводниковые соединения кадмия, германия или кремния с примесями золота, цинка и других элементов. В некоторых случаях пластину светочувствительного элемента изготавливают из монокристалла полупроводника. Изолирующая подложка (основание) *2* выполнена из стекла, слюды или керамики. По краям полупроводниковой пластины напыляют тонкопленочные металлические контакты *3*, соединенные с внешними выводами *6*. Поверхность светочувствительной пластины между металлическими контактами образует рабочую площадку фоторезистора, площадь которой колеблется для различных приборов от 0,5 до 30 мм$^2$. Для защиты

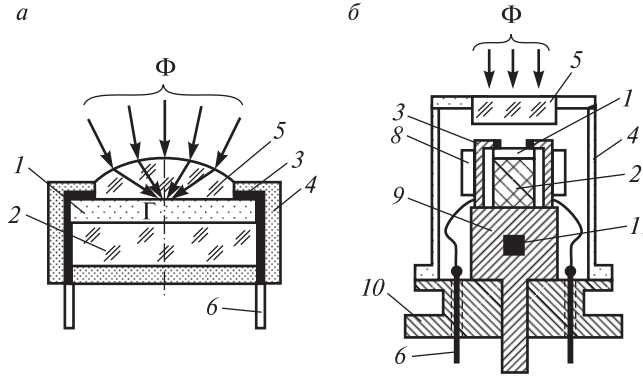



Рис. 8.3. Устройство неохлаждаемых (*а*) и охлаждаемых фоторезисторов (*б*)

от внешних воздействий светочувствительный элемент покрывают лаком и помещают в металлический или пластмассовый корпус *4* на основании *10* с окном для пропускания света и снабжают герметическими внешними токоотводами *6*. В окно *7* вставлено стекло или оптическая линза *5*, которая повышает чувствительность неохлаждаемого ФР (рис. 8.3, *а*). Оптическая линза является иммерсионным элементом, который концентрирует поток излучения на малую площадь светочувствительной пластины полупроводника *1* в фокусе линзы (*F*). Выпускается ФР квадратной или круглой формы.

На рис. 8.3, *б*, показана конструкция охлаждаемого фоторезистора. В конструкцию добавлен элемент теплоотвода *9*, выполненный из металла (медь) и выводящий тепло за корпус. Для повышения чувствительности фоторезистора в конструкции имеется предварительный усилитель *8*, выполненный на интегральной микросхеме. Термокоррекцию работы схемы предварительного усилителя осуществляет терморезистор *11*, вмонтированный в тело теплоотвода и подключенный к ИМС. Все остальные элементы аналогичны конструкции неохлаждаемого фоторезистора.

Принцип действия фоторезисторов основан на явлении фотопроводимости полупроводника. Фотопроводимость — увеличение электрической проводимости под действием света. Причина возникновения фотопроводимости — увеличение концентрации носителей зарядов — электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. В зависимости от спектральной чувствительности, т.е. длины волны светового излучения оптического диапазона, на которую реагирует фоторезистор, фоторезисторы делятся на три группы — для ультрафиолетовой, для видимой и для инфракрасной частей спектра. Спектральная чувствительность фоторезисторов зависит от вида полупроводникового материала, применяемого для создания фоточувствительного элемента.

Фотопроводимость в полупроводнике обусловлена внутренним фоторезистивным эффектом. В пластине примесного полупроводника (светочувствительный элемент фоторезистора) затемненного фоторезистора имеется небольшое число подвижных носителей заряда — электронов и дырок. Соответственно светочувствительный элемент обладает небольшой начальной проводимостью, которая называется темновой. При подаче напряжения на таком фоторезистор через него будет протекать небольшой ток, который также

называется темновым. При освещении поверхности полупроводниковой пластины световым потоком происходит собственное поглощение полупроводником фотонов энергии излучения. Этот процесс является первичным процессом при внутреннем фотоэффекте.

Под действием света при внутреннем фотоэффекте изменяется энергетическое состояние носителей зарядов внутри твердого тела. За счет поглощения лучистой энергии происходит увеличение концентрации подвижных носителей заряда. Процесс образования свободных носителей заряда под действием излучения происходит по-разному, причем возможны различные механизмы их генерации, которые зависят от энергетической структуры применяемого полупроводникового материала и видов поглощения света.

Концентрация дырок и электронов может увеличиваться за счет того, что кванты электромагнитного излучения возбуждают электроны, переходят из валентной зоны в зону проводимости. Кроме того, эти кванты могут вызвать переход электронов из валентной зоны на примесные уровни и увеличить только дырочную электропроводность или переход электронов с примесных уровней в зону проводимости и увеличить электронную электропроводность.

Таким образом, в полупроводнике при облучении светом происходит генерация пар носителей зарядов и переход электронов на более высокий энергетический уровень. Возрастает подвижность носителей зарядов и увеличивается электропроводность (называемая фотопроводимостью) кристалла. Когда освещенность светочувствительной пластины прекращается, свободные носители зарядов рекомбинируются и электропроводность восстанавливается. Электропроводность ФР без действия световой энергии называется темновой электропроводностью.

Основными характеристиками фоторезистора являются: световая, вольт-амперная и спектральная характеристики, снятые по схеме, показанной на рис. 8.4.

Световая (люкс-амперная) характеристика фоторезистора $I_Ф = \varphi(Ф)$ при $U = \text{const}$ показывает зависимость фототока $I_Ф$ от светового потока (освещенности) Ф на светочувствительной пластине при постоянном напряжении (рис. 8.5).

Характеристика линейна лишь в области небольших значений фотопотока Ф. С увеличением Ф возрастает концентрация свободных носителей зарядов и вероятность их рекомбинации, подвижность зарядов снижается и поэтому рост тока уменьшается.

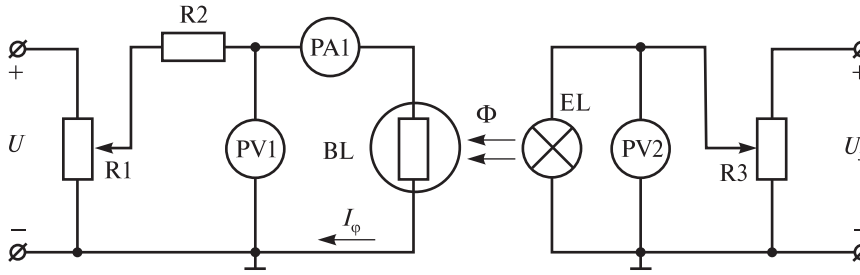



Рис. 8.4. Схема включения фоторезистора и дополнительных элементов для снятия характеристики терморезистора

Вольт-амперная характеристика фоторезистора $I_Ф = \varphi(U)$ при $Ф = \text{const}$ отображает зависимость тока и темнового тока от напряжения, приложенного к фоторезистору, при постоянной освещенности чувствительного элемента, характеристика линей на (рис. 8.6). В темноте проводимость фоторезистора обусловлена наличием свободных носителей зарядов — электронов и дырок, образовавшихся в результате теплового воздействия ($T > 0$ К). Ток через фоторезистор при некотором значении $U$ и $Ф = 0$ называется темновым током $I_т$, а ток при $Ф > 0$ — общим током $I_{общ}$. Разность этих токов равна фототоку: $I_Ф = I_{общ} - I_т$.

Полярность напряжения на характеристику не влияет. Наклон вольт-амперной характеристики зависит от сопротив-

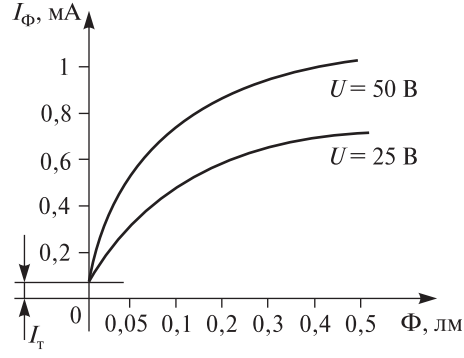



Рис. 8.5. Световая характеристика фоторезистора

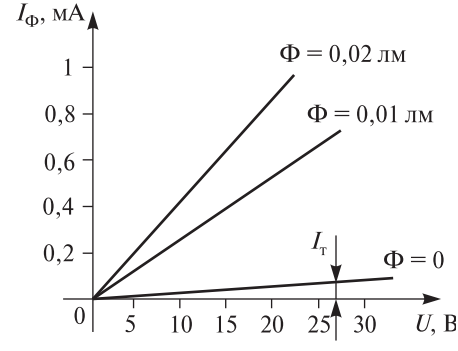



Рис. 8.6. Вольт-амперная характеристика фоторезистора

ления фоторезистора. С увеличением светового потока крутизна вольт-амперной характеристики уменьшается в $10^5$—$10^6$раз.

Спектральная характеристика представляет собой зависимость фототока от длины волны падающего на ФР светового потока $I_Ф/I_{Ф max}(\%) = \varphi(\lambda)$ (рис. 8.7).

На рис. 8.7 показаны усредненные спектральные характеристики различных фоторезисторов, из которых видно, что сернисто-кадмиевые ФР имеют максимальную чувствительность в видимой части спектра (кривая *1*), селенисто-кадмиевые — в красной (видимой) и инфракрасной (кривая *2*), а сернисто-свинцовые — в инфракрасной (кривая *3*). Зависимость фототока $I_Ф$ от длины волны $\lambda$ облучающего света объясняется различием энергии генерации, необходимой для возбуждения электрона в атомах различных веществ. Взаимодействие фотонов световой энергии с электронами представляет собой квантово-механический эффект передачи энергии от фотона к электрону. Нельзя рассматривать электроны и фотоны как «сталкивающиеся» частицы. В результате передачи энергии от фотона к электрону, когда энергия фотона $h_\nu$ равна или больше энергии генерации электрона $E_g$ ($E_g = E_З$ — энергия, равная энергии запрещенной зоны), электрон может преодолеть запрещенную зону и перейти в зону проводимости, т.е. $h_\nu \geq E_g$. В этом случае концентрация

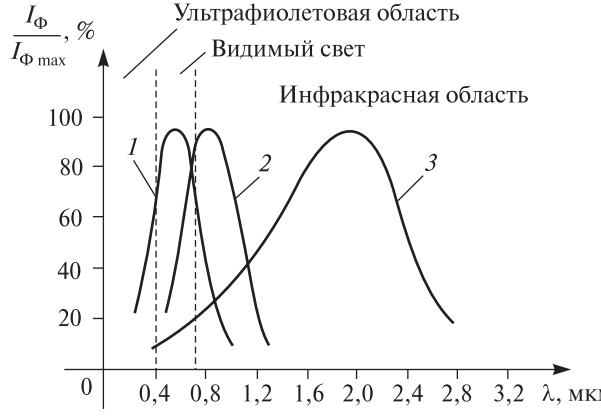



Рис. 8.7. Спектральные характеристики некоторых типов фоторезисторов (ФР): *1* — сернисто-кадмиевые ФР; *2* — селенисто-кадмиевые ФР; *3* — сернисто-свинцовые ФР

электронов ($N_э$) от действия светового потока будет наибольшей и фототок возрастет (пик характеристики и фототока).

При энергии фототока меньше, чем энергия электронов $h_\nu < E_g$, электроны не смогут преодолеть запрещенную зону и снизятся их концентрация и фототок (уменьшение длины волны светового излучения уменьшает энергию фототока). На рис. 8.7 этот участок расположен ближе к оси ординат. Если энергия фотона $h_\nu$ будет существенно больше $E_g$, то часть электронов приобретает слишком большую энергию. Такие электроны смогут покинуть кристалл. Чаще, однако, фотоны с энергией, сильно отличающиеся от $E_g$, просто не взаимодействуют с веществом. Вещество оказывается прозрачным для фотонов с энергией, много большей $E_g$ (такие фотоны не поглощаются полупроводником). Таким образом, при $h_\nu >> E_g$ концентрация $N_э$ в полупроводнике не увеличивается (электроны выходят из кристалла или отсутствует передача энергии от фотона), и уменьшаются их концентрация и фототок (справа от пика характеристики).

Свойства ФР, как и любого другого фотоэлектрического фотоприемника, характеризуют следующие параметры:

1) темновой ток $I_т$, протекающий в цепи фоторезистора при рабочем напряжении через 30 с, после снятия освещения;

2) темновое сопротивление $R_т$ — сопротивление фоторезистора при 20 °С ($R_т \approx 10^5$—$10^7$ Ом);

3) световой ток $I_{св}$ — ток при приложенном рабочем напряжении и освещенности 200 лк;

4) фототок $I_Ф$ — разность между общим и темновым токами;

5) удельная чувствительность $S_{уд}$ — отношение фототока к произведению светового потока, приложенного к фоторезистору, на приложенное к нему напряжение: $S_{уд} = I_Ф/ФU$, где Ф — падающий световой поток, лм; $U$ — напряжение, приложенное к фоторезистору;

6) удельная интегральная чувствительность $S_{уд\ инт}$ — произведение удельной чувствительности на предельное рабочее напряжение $S_{уд\ инт} = S_{уд}U_{max}$;

7) пороговая чувствительность — минимальный световой поток, вызывающий появление фототока;

8) рабочее напряжение $U$, при котором может работать фоторезистор;

9) $P_{доп}$ — допустимое значение мощности, рассеиваемой на фоторезисторе, без теплового разрушения при $T = 20$ °С;

**Условное обозначение фоторезисторов**

Основой системы обозначений фоторезисторов, так же как и всех полупроводниковых приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 8.8.

Графическое обозначение фоторезисторов содержит:

– общее обозначение — базовый символ резистора (прямоугольник 4×10 мм);

– дополнительные обозначения как отличительные особенности фотоэлектрических приборов — окружность диаметром $D = 12$ мм или 14 мм, которая указывает на то, что конструкция фоторезистора помещена в корпус; две стрелки в сторону символа резистора, расположенные под углом 45° к базовому символу резистора за корпусом и указывающие, что действие прибора основано на фотоэффекте.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения фоторезисторов (маркировку), классифицирующие фоторезисторы по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: BL1, где BL — фотоэлемент (фоторезистор), 1 — порядковый номер прибора в схеме.

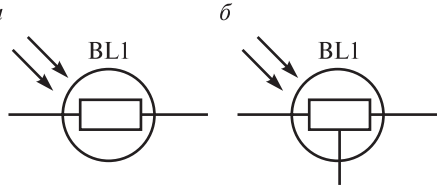



Рис. 8.8. Условное графическое обозначение фоторезисторов:
*а* — фоторезистор; *б* — дифференциальный фоторезистор

Промышленность выпускала и выпускает несколько типов фоторезисторов, которые имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий фотодиоды по определенным признакам в справочниках.

Ранние выпуски фоторезисторов имели буквенно-числовой код в системе обозначе-

ний, классифицирующих фоторезисторы по определенным признакам в справочниках. Он состоит из следующих элементов:

*первый элемент* — буквы, обозначающие тип фотоэлемента (ФС — фотосопротивление);

*второй элемент* — буква, обозначающая материал, из которого изготовлен чувствительный элемент (А — сернистый свинец, К — сернистый кадмий, Д — селенистый кадмий);

*третий элемент* — цифра, обозначающая тип конструктивного оформления (П — пленочный, М — монокристаллический).

В современной системе обозначений полупроводниковых фоторезисторов, классифицирующих фоторезисторы по определенным признакам в справочниках, буквенно-числовой код состоит из шести элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81:

*первый элемент* — буквы, обозначающие тип фоторезистора (СФ — сопротивление фоточувствительное, РГД — рентгено-гамма-датчик);

*второй элемент* — цифра, обозначающая материал, из которого изготовлен чувствительный элемент (2 — сернистый калий, 3 — селенистый кадмий, 4 — селенистый свинец);

*третий элемент* — цифра, обозначающая порядковый номер разработки прибора (от 1 до 9).

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* Фоторезистор СФ3-1: СФ — сопротивление фоточувствительное, 3 — чувствительный элемент изготовлен из селенистого кадмия, 1 — порядковый номер разработки.

Фоторезистор имеет высокую чувствительность, небольшое напряжение питания, широкий спектральный диапазон, большие допустимые фототоки, устойчивость к механическим воздействиям и др. Применяется в схемах автоматики и вычислительной техники, для фотоконтроля и обнаружения инфракрасного излучения, в системах оптической связи. Основные недостатки фоторезистора — инерционность и сильное влияние температуры на параметры.

### *8.4.2. Фотодиоды*

Фотодиодом (ФД) называют полупроводниковый диод, в котором под действием падающего на него светового потока образуются

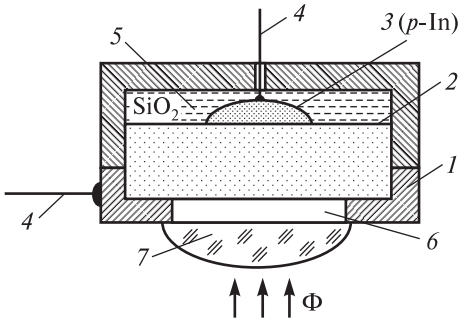



Рис. 8.9. Устройство фотодиода

подвижные носители зарядов, создающие дополнительный ток (фототок) в *p-n*-переходе при напряжении обратного смещения.

Устройство фотодиода показано на рис. 8.9. На ковар*овую или никелевую пластину *1*, которая является корпусом с металлическим контактом с выводом *4*, помещают пластину полупроводника *n*-типа из кремния *2*, которая служит базой фотодиода. Путем вплавления в пластину кремния капли индия образуется примесная область полупроводника *p*-типа *3* и тем самым создается электронно-дырочный переход. От области *p*-типа также создается металлический контакт с выводом *4*. Поверхность фотодиода защищается оксидной пленкой $SiO_2$ *5*, которая служит проявляющим слоем, повышающим чувствительность фотодиода. В корпусе фотодиода выполняется окно *6*, в которое закреплена стеклянная линза *7*, фокусирующая световое излучение на поверхности кристалла *n*-типа. Ковар — это сплав кобальта, никеля и железа, характеристики которого близки к тепловым характеристикам стекла. Используется при соединении стекла и металлов. Пластина полупроводника *n*-типа в данной конструкции является активным элементом фотодиода. Такая конструкция позволяет принимать световой поток Ф перпендикулярно плоскости *p-n*-перехода на одну из областей полупроводника. Благодаря этому увеличивается площадь *p-n*-перехода, участвующая в работе фотодиода и чувствительность практически одинакова по всей поверхности *p-n*-перехода. При параллельном способе приема светового потока на *p-n*-переход освещается одновременно полупроводник *p*- и *n*-типа. Этот способ приема светового потока не нашел широкого применения, так как в работе ФД участвует лишь часть площади электронно-дырочного перехода (рис. 8.10, *а*), которая освещается фотопотоком. Электрические переходы в фотодиодах могут быть различных типов, но практически их устройство такое же, как в обычных диодах. Фотодиод имеет окно в корпусе для доступа светового потока.

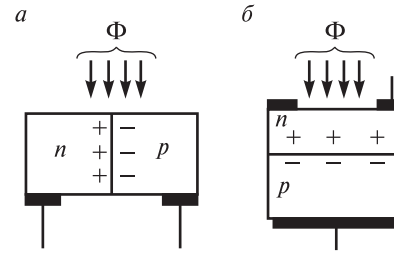



Рис. 8.10. Структура освещения фотодиодов:
*а* — параллельно *p-n*-переходу;
*б* — перпендикулярно *p-n*-переходу

Фотодиоды могут работать в двух режимах — фотодиодном (фотопреобразовательном) и вентильном (фотогенераторном).

В фотодиодном (фотопреобразовательном) режиме (рис. 8.11) на фотодиод подают обратное смещение от внешнего источника напряжения. Если освещение отсутствует ($\Phi = 0$), фотодиод аналогичен обычному диоду, включенному под обратное смещение (рис. 8.11, *а*). Таким образом, в фотодиоде под действием напряжения обратного смещения происходит экстракция неосновных носителей зарядов через потенциальный барьер и его увеличение. Движение неосновных носителей зарядов образует обратный ток ($I_{обр}$), который называется темновым ($I_т$).

Рассмотрим происходящие процессы в фотодиоде при действии светового потока перпендикулярно плоскости *p-n*-перехода

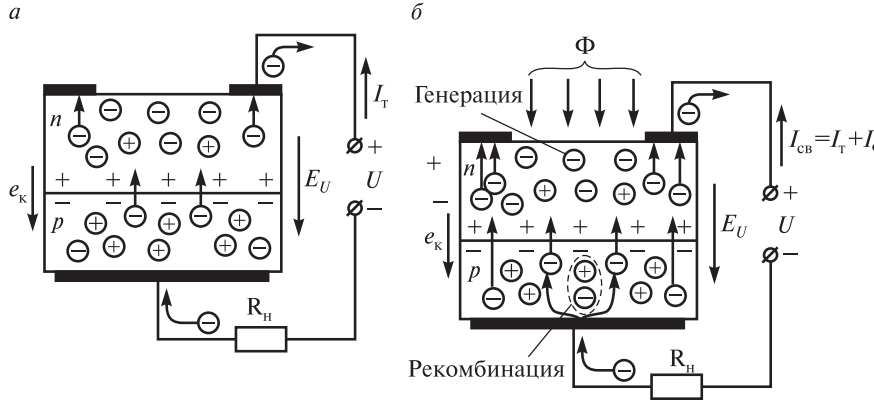



Рис. 8.11. Принцип работы и схема включения фотодиода в фотодиодном (фотопреобразовательном) режиме:
*а* — при $\Phi = 0$; *б* — при $\Phi > 0$

(рис. 8.11, *б*). При этом необходимо учесть, что толщина базы *n*-типа меньше диффузионной длины пробега электрона, т.е. база тонкая и практически светопроницаемая. В этом случае световая энергия через нее проникает и в структуру *p*-типа.

При освещении фотодиода ($\Phi > 0$), в его *p*- и *n*-областях под действием квантов света развивается процесс генерации пар носителей зарядов. Наиболее активен процесс генерации у внешней поверхности базы *n*-типа. Вновь образовавшиеся электроны в слое *n*-типа уходят непосредственно из этого слоя во внешнюю цепь под действием напряжения внешнего смещения $U$ (рис. 8.11, *б*).

Электроны, движущиеся во внешней цепи, достигают полупроводника *p*-типа и поглощаются в объеме недалеко от его поверхности. В результате собственной генерации и притока электронов из внешней цепи в объеме полупроводника *p*-типа (недалеко от его поверхности) увеличивается концентрация электронов, которые диффундируют по направлению к области с меньшей концентрацией, т.е. к потенциальному барьеру. В процессе диффузии электроны частично рекомбинируются с дырками, что несущественно повышает концентрацию дырок в полупроводнике. Достигнув потенциального барьера, электроны увлекаются контактным полем потенциального барьера $e_к$ и полем внешнего напряжения обратного смещения $E_U$ и совершают экстракцию в *n*-область. Из *n*-полупроводника электроны вновь уходят во внешнюю цепь.

Таким образом, в *n*-полупроводнике концентрация основных носителей зарядов — электронов — увеличивается несущественно. Поэтому концентрация основных носителей зарядов в *p*- и *n*-полупроводниках невелика и ее можно считать практически неизменной. Из этого можно сделать вывод, что ширина потенциального барьера постоянна. Ток через *p*-*n*-переход растет только за счет увеличения светового потока. Таким образом, фотопреобразовательный диод, включенный в электрическую цепь, ведет себя как фоторезистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от интенсивности освещения. В фотопреобразовательном диоде увеличивается число электронов, отдаваемых во внешнюю цепь из *n*-полупроводника, при увеличении светового потока. В результате уменьшается объемное сопротивление базы *n*-типа.

Таким образом, во внешней цепи происходит увеличение обратного тока $I_{св}$, который представляет собой так называемый световой ток.

В вентильном (фотогенераторном) режиме фотодиоду не требуется внешний источник напряжения смещения, поскольку фотодиод сам является генератором фотоЭДС (рис. 8.12).

Конструктивно фотодиоды, работающие в вентильном (фотогенераторном) режиме, не отличаются от фотодиодов, работающих в диодном режиме.

Под действием светового потока с достаточной энергией квантов происходит световая генерация с образованием пар носителей зарядов — электрона и дырки в полупроводниках *p*- и *n*-типа. Под действием электрического поля (контактной разности потенциалов) в потенциальном барьере образовавшиеся неосновные носители зарядов (в *p*-области — электроны) совершают дрейф в *n*-область, где они являются основными носителями зарядов. В приконтактном слое *n*-полупроводника электроны частично рекомбинируются с неосновными положительно заряженными носителями заряда — дырками, а также создают точечную компенсацию неподвижных положительных ионов в потенциальном барьере. При этом потенциальный барьер в *p*-*n*-переходе снижается.

Из-за снижения потенциального барьера в переходе вновь возникает слабый диффузионный процесс движения электронов из *n*-области в *p*-область, но только в приконтактном слое на длину свободного диффузионного пробега электрона. Снижение потен-

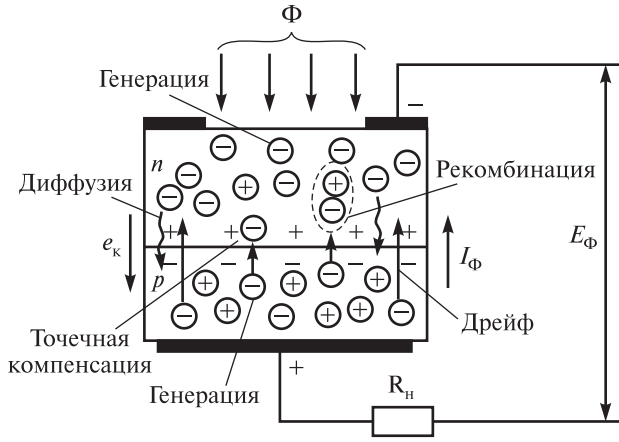



Рис. 8.12. Принцип работы и схема включения фотодиода в вентильном (фотогенераторном) режиме

циального барьера перехода уменьшает также контактную разность потенциалов в переходе $e_к$, что ослабляет дрейф электронов из *p*-области в *n*-область. Между встречными потоками электронов наступает динамическое равновесие (поток электронов из *p*-области равен потоку электронов из *n*-области).

Однако в результате дрейфа увеличивается концентрация основных отрицательно заряженных зарядов — электронов в *n*-области и положительно заряженных дырок в *p*-области и создается разность потенциалов между *p*- и *n*-областями, которая зависит от интенсивности светового потока и называется фотоэлектродвижущей силой (фотоЭДС). Обычно она составляет 0,1—1 В и не может быть больше контактной разности потенциалов в потенциальном барьере. Образование фотоЭДС, обусловленное перераспределением зарядов между *p*- и *n*-полупроводниками за счет фотопотока, называется фотогальваническим эффектом. Таким образом, в результате образования фотоЭДС частично компенсируется контактная разность потенциалов *p*-*n*-перехода и тем самым снижается его потенциальный барьер.

Если области полупроводника, образующие *p*-*n*-переход, замкнуть внешней цепью, то в ней потечет фототок $I_Ф$, направление которого совпадает с направлением тока неосновных носителей заряда *p*-области, т.е. фототок течет в том же направлении, что и обратный ток *p*-*n*-перехода при подаче напряжения обратного смещения.

Основными характеристиками фотодиодов являются световая, вольт-амперная и спектральная характеристики, снятые по схеме, показанной на рис. 8.13. Рассмотрим основные характеристики фотодиода в фотодиодном (фотопреобразовательном) режиме.

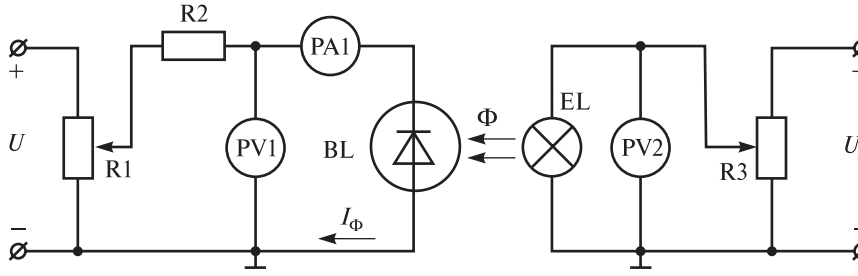



Рис. 8.13. Схема включения фотодиода и дополнительных элементов для снятия характеристик

Световые (энергетические) характеристики ФД в фотодиодном (фотопреобразовательном) режиме (рис. 8.14) показывают зависимость фототока от освещенности при различных напряжениях на диодах $I_Ф = φ(Ф)$ при $U_{обр} = const$. Эти характеристики линейны в широком интервале изменений светового потока. Это объясняется тем, что толщина базы фотодиода значительно меньше диффузионной длины пробега электрона, поэтому меньшая часть носителей зарядов успевает рекомбинироваться, а большая идет на образование и увеличение фототока ФД.

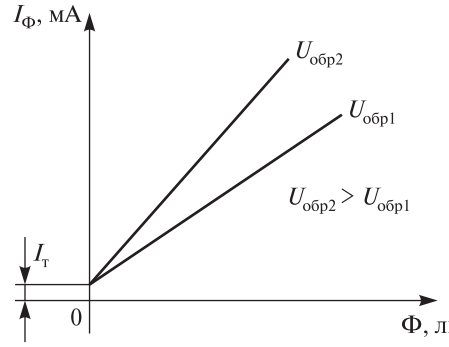



Рис. 8.14. Световая характеристика фотодиода в фотодиодном (фотопреобразовательном) режиме

Вольт-амперная характеристика фотодиода (рис. 8.15) показывает зависимость фототока от напряжения обратного смещения или различных потоках лучистой энергии $I_Ф = φ(U_{обр})$ при $Ф = const$.

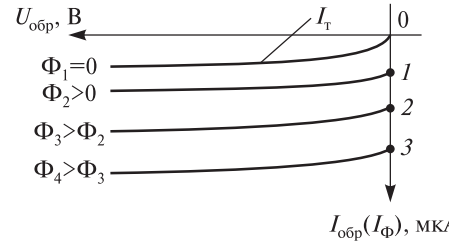



Рис. 8.15. Вольтамперная характеристика фотодиода в фотодиодном (фотопреобразовательном) режиме

Из характеристик видно, что с увеличением фотоизлучения (Ф) ток диода увеличивается. Характеристика, снятая при $Ф = 0$, характеризует темновой ток и соответствует обратному току обычного диода. При увеличении светового потока Ф через фотодиод ток увеличивается и характеристика смещается вниз. Начало характеристик (точки *1*, *2* и *3*) при $Ф > 0$ соответствует фототоку в фотодиоде за счет дрейфа неосновных носителей зарядов, полученных при световой генерации, через *p-n*-переход.

Спектральная характеристика фотодиода показывает зависимость фототока от длины волны падающего на ФД светового потока $I_Ф/I_{Фmax}(\%) = φ(λ)$ (рис. 8.16). Спектральная характеристика сильно зависит также от материала полупроводника, т.е. ширины запре-

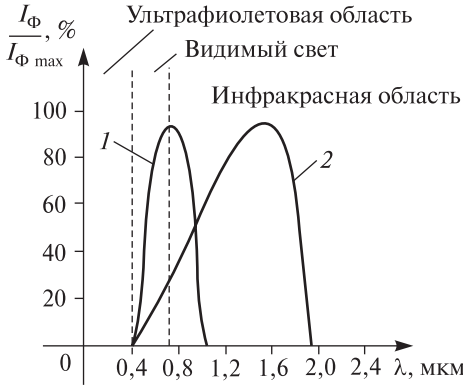



Рис. 8.16. Спектральные характеристики некоторых типов фотодиодов:
*1* — кремниевый ФД;
*2* — германиевый ФД

щенной зоны энергетической структуры. Подробно об этом говорилось в разделе о терморезисторах. Максимум спектральной характеристики приборов из кремния, имеющего ширину запретной зоны $\Delta E_З \approx 1{,}1$ эВ, соответствует меньшим значениям длины волны, чем для приборов из германия ($\Delta E_З \approx 0{,}72$ эВ).

Снижение чувствительности в области коротких волн объясняется недостаточностью полученной энергии электронами от фотонов для преодоления запрещенной зоны. В области длинных волн энергия фотонов больше энергии генерации электрона и электрон, поглощая энергию фотона, совершает выход из кристалла. Однако процесс поглощения световой энергии электронами зависит от взаимодействия электромагнитного поля световой волны с колебаниями узлов кристаллической решетки. Поскольку такое взаимодействие носит резонансный характер, то максимальное поглощение энергии фотонов электронами кристаллической решетки возможно только при совпадении частоты электромагнитного поля светового потока с частотой колебаний узлов кристаллической решетки. Из этого следует, что пик поглощения светового потока соответствует определенной длине волны светового излучения. Таким образом, при увеличении длины волны светового излучения в диапазоне длинных волн выше резонансной также происходит уменьшение спектральной чувствительности, как и в пределах диапазона коротких волн до резонансной частоты. В обоих режимах в кристаллах *p*- и *n*-типа недостаточно зарядов для создания фототока.

Основные характеристики фотодиода в вентильном (фотогенераторном) режиме аналогичны характеристикам фотодиода в фотодиодном (фотопреобразовательном) режиме, но имеют некоторые отличия.

Световая (энергетическая) характеристика фотодиода в вентильном режиме показывает зависимость фототока от освещенности при постоянном сопротивлении во внешней цепи $I_Ф = U(Ф)$ при $R_н = \text{const}$. В вентильном режиме линейность характеристики зависит от сопротивления нагрузки, с увеличением сопротивления характеристики становятся все более нелинейными, а повышение освещенности снижает чувствительность (рис. 8.17). Это объясняется влиянием дифференциального сопротивления перехода $r_{p\text{-}n}$ и объемным сопротивлением базы $r_Б$. При малых значениях светового потока $r_{p\text{-}n}$ очень велико и практически не изменяется и световая характеристика является линейной (участок 0А). С увеличением светового потока $r_{p\text{-}n}$ уменьшается и прекращается дрейф носителей зарядов через переход, в результате уменьшается фототок через $p$-$n$-переход.

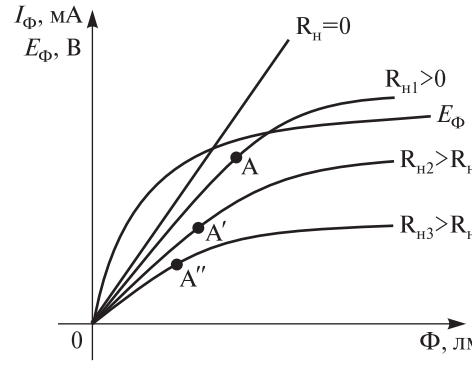



Рис. 8.17. Световая характеристика фотодиода в фотовентильном (фотогенераторном) режиме

Вольт-амперные характеристики фотодиода в вентильном режиме представляют собой зависимость $U_{ФЭДС} = \varphi(I_Ф)$ при $Ф = \text{const}$ (рис. 8.18) и располагаются в четвертой четверти декарто-

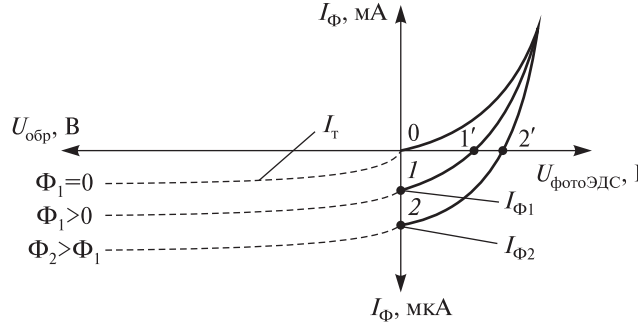



Рис. 8.18. Вольт-амперная характеристика фотодиода в фотовентильном (фотогенераторном) режиме

вой системы координат. При $\Phi = 0$ фототок отсутствует. При заданном значении светового потока ($\Phi_1 > 0$) характеристика отсекает по оси ординат значение тока $I_{\Phi 1}$ (точка *1*), увеличение светового потока ($\Phi_2 > \Phi_1$) — значение тока $I_{\Phi 2}$ (точка *2*) и т.д., а на оси абсцисс — отрезок, равный соответственно значениям фотоЭДС $U_{\Phi 1}$, $U_{\Phi 2}$ (точки *1′*, *2′* и т.д.). Напряжение на зажимах фотодиода соответствует режиму холостого хода, т.е. без нагрузки ($I_\Phi = 0$), а ток — режиму короткого замыкания, когда $U_\Phi = 0$. При изменении нагрузки от $R_н = 0$ до $R_н = \infty$ можно проследить за изменением фототока и фотоЭДС и построить графическую зависимость $U_{\Phi ЭДС} = \varphi(I_\Phi)$ при $\Phi = \text{const}$, из которой видно, что при разрыве внешней цепи фотоЭДС минимальна.

Спектральные характеристики фотодиода в вентильном режиме полностью соответствуют характеристикам фотодиода в фотодиодном режиме.

Параметры фотодиодов:

1) рабочее напряжение (в фотодиодном режиме) $U_{\text{обр ном}}$;

2) максимально допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр max}}$ (в фотодиодном режиме), когда нет электрического пробоя;

3) темновой ток $I_т$, мкА;

4) интегральная чувствительность $S_{U\Phi} = \dfrac{\Delta U_{вых}}{\Phi}$ показывает, на сколько изменится фототок при изменении светового потока на 1 лм;

5) фотоЭДС при разомкнутой внешней цепи $E_\Phi = 0{,}5—0{,}6$ В.

Параметры ФД, как и всех полупроводниковых приборов, зависят от температуры окружающей среды, изменения которой особенно влияют на темновой ток.

### Условное обозначение фотодиодов

Основой системы обозначений фотодиодов, так же как и всех полупроводниковых приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 8.19.

Графическое обозначение фотодиодов содержит:

– общее обозначение — базовый символ полупроводникового диода;

– дополнительные обозначения как отличительные особенности фотоэлектрических приборов — окружность диаметром $D = 12$ мм или 14 мм, которая указывает на то, что конструкция фотодиода помещена в корпус; две стрелки в сторону символа диода, которые расположены под углом 45° к базовому символу полупроводникового диода за корпусом и указывают, что действие прибора основана на фотоэффекте.

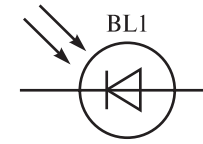



Рис. 8.19. Условное графическое обозначение фотодиода

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения фотодиода (маркировку), классифицирующие фотодиоды по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: BL1, где BL — фотоэлемент (фотодиод), 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Промышленность выпускает несколько типов фотодиодов, которые имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), который классифицирует фотодиоды по определенным признакам в справочниках и состоящий из следующих элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81.

*Первый элемент* — буквы, обозначающие тип фотоэлемента (ФД — фотоприборы с *p-n*-переходом; ФУ — фотоприбор с *p-n*-переходом и внутренним усилением).

*Второй элемент* — буква, обозначающая материал, из которого изготовлен чувствительный элемент (Г — германий, К — кремний, З — золото как легирующий элемент).

*Третий элемент* — число, обозначающее порядковый номер разработки прибора (от 001 до 999).

*Четвертый элемент* — буква, определяющая подгруппу фотоэлементов (Б — биполярный фототранзистор; У — униполярный фототранзистор; Т — фототиристор).

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* ФД-ГЗ-001: ФД — фотоприбор с *p-n*-переходом, Г — чувстви-

тельный элемент изготовлен из германия; З — легирован золотом; 001 — порядковый номер разработки.

Фотодиоды широко используются для формирования электрических сигналов под действием оптического излучения, в фотометрии, фототелеграфии, в устройствах ввода информации, т.е. в фотодиодном режиме.

### Фотоэлемент

Фотоэлемент — это фотоэлектронный прибор, который в результате поглощения энергии падающего на него оптического излучения генерирует ЭДС (фотоЭДС) или электрический ток (фототок).

Фотоэлемент, действие которого основано на внутреннем фотоэффекте, представляет собой полупроводниковый прибор с выпрямляющим полупроводниковым эффектом (электронно-дырочным переходом, изотипным гетеропереходом или контактом металл—полупроводник).

Фотоэлемент обычно служит приемником оптического излучения, в том числе приемником видимого спектра, и его нередко отождествляют с фотодиодом. Полупроводниковые фотоэлементы используются также для прямого преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию (в солнечных батареях, фотоэлектрических генераторах) как источники ЭДС для электропитания различных электронных устройств, приборов автоматики и др.

Принцип действия полупроводниковых фотоэлементов основан на фотогальваническом эффекте — явлении возникновения фотоЭДС в электронно-дырочном переходе при облучении его световым потоком, т.е. полностью соответствует работе диода в вентильном режиме.

Существенным отличием полупроводникового фотоэлемента от фотодиода является его конструкция. Устройство полупроводникового фотоэлемента схематически показано на рис. 8.20.

Основой кремниевого фотоэлемента служит пластина *n*-полупроводника кремния (Si) толщиной $h = 0{,}3—1$ мм, на поверхности которой создается полупроводниковый слой *p*-Si толщиной $h = 0{,}4—1$ мм. На границе двух слоев образуется *p*-*n*-переход с толщиной запирающего слоя $h \approx 0{,}05$ мкм. Контактные пленки выводов от полупроводников — полупрозрачные и выполнены из титана. С тыльной стороны пластины вытравливается лунка, в которой создается контакт с пластиной кремния (Si) *n*-типа.

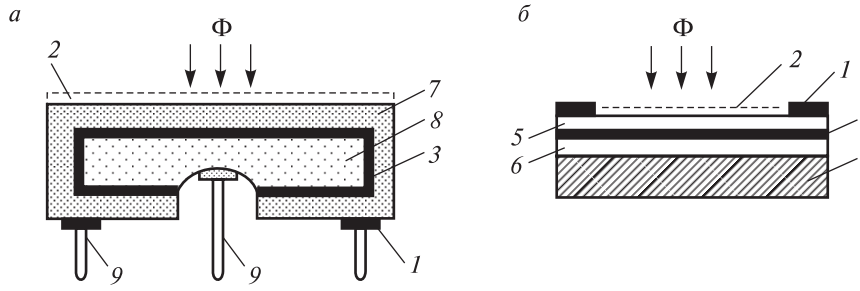



Рис. 8.20. Устройство полупроводниковых фотоэлементов:
*а* — кремниевого; *б* — селенового; *1* — контактное кольцо; *2* — прозрачный слой металла; *3* — *p*-*n*-переход; *4* — металл; *5* — *n*-Se; *6* — *p*-Se; *7* — *p*-Si; *8* — *n*-Si; *9* — выводы

Из описания конструкции видно, что площадь *p*-*n*-перехода значительно больше у фотоэлемента, чем у фотодиода (см. рис. 8.9), что существенно усиливает внутренний фотогальванический эффект и фотоЭДС при облучении световым потоком.

Характеристики, параметры, условное обозначение и маркировка полупроводниковых фотоэлементов такие же, как у фотодиодов.

Эффективность работы фотоэлемента характеризуется коэффициентом полезного действия:

$$\eta = P_{max}/P_0 \cdot 100\ \%,$$

где $P_{max}$ — максимальная полезная электрическая мощность; $P_0$ — полная мощность лучистого потока, падающего на рабочую поверхность фотоэлемента.

Значение КПД фотоэлемента зависит от ряда факторов. Существенную роль играют световые потери, определяемые коэффициентами отражения и поглощения, энергетические потери за счет рекомбинации пар носителей зарядов.

КПД фотоэлемента повышается с ростом светового потока Ф, однако при больших значениях Ф увеличивается и рекомбинация носителей зарядов, что снижает коэффициент полезного действия. Процесс рекомбинации зависит от толщины светочувствительного слоя, и чем он меньше, тем быстрее заряды диффундируют к *p*-*n*-переходу увеличивается их дрейф и возникает фотоЭДС, равная 0,5—0,6 В.

Из этого можно сделать вывод, что толщина светочувствительных пленок в фотоэлементе должна быть меньше диффузионной длины пробега электрона.

### *8.4.3. Фототранзисторы*

Фототранзистор — фоточувствительный полупроводниковый приемник светового излучения, по структуре подобный транзистору (биполярному, полевому или однопереходному) и способный преобразовывать световую энергию в электрическую с внутренним усилением электрического сигнала.

Фототранзисторы являются фотогальваническими приемниками светового излучения с внутренним фотоэффектом и могут работать только в фотопреобразовательном режиме с внешним напряжением.

Конструкция фототранзисторов аналогична конструкции обычных транзисторов и отличается только наличием прозрачного окна в корпусе, через которое световой поток попадает на одну из областей транзистора.

**Биполярный фототранзистор**

Различают германиевые и кремниевые биполярные фототранзисторы *n-p-n* и *p-n-p*-типов. На рис. 8.21 приведена структура фототранзистора типа *n-p-n* с освещением базовой области. Практически можно освещать любую область — базовую, эмиттерную, коллекторную — или даже все области. При этом световой поток может попадать на кристалл параллельно *p-n*-переходам или перпендику-

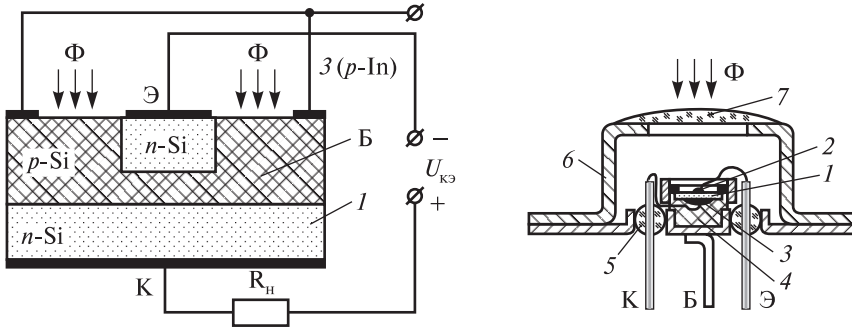



Рис. 8.21. Структура, конструкция и схема включения (с отключенной базой) фототранзистора:
*1* — пластина *n*-типа (Ge); *2* — эмиттер; *3* — коллектор; *4* — кристаллодержатель; *5* — изолятор; *6* — корпус; *7* — изолятор; К, Б, Э — выводы от коллектора, базы и эмиттера

лярно. Наибольшая эффективность достигается при перпендикулярном направлении светового пучка на переход коллектор—база и при освещении базовой области.

Фототранзистор можно включать в измерительные схемы как обычный транзистор в схеме с ОЭ, ОБ и ОК и как диод с отключенными базой, эмиттером или коллектором (рис. 8.22).

При включении фототранзистора как двухполюсника (схема со свободным коллектором или эмиттером) схема не отличается от схемы включения фотодиода в фотодиодном режиме. Наибольшее распространение получили схемы включения фототранзистора с общим эмиттером и отключенной или подключенной базой.

Рассмотрим работу фототранзистора при отключенной базе (рис. 8.22, *в*) в схеме с ОЭ. При таком включении напряжение $U_{КЭ}$, несмотря на то что база отключена, пропорционально распределяется между обоими переходами на их дифференциальных сопротив-

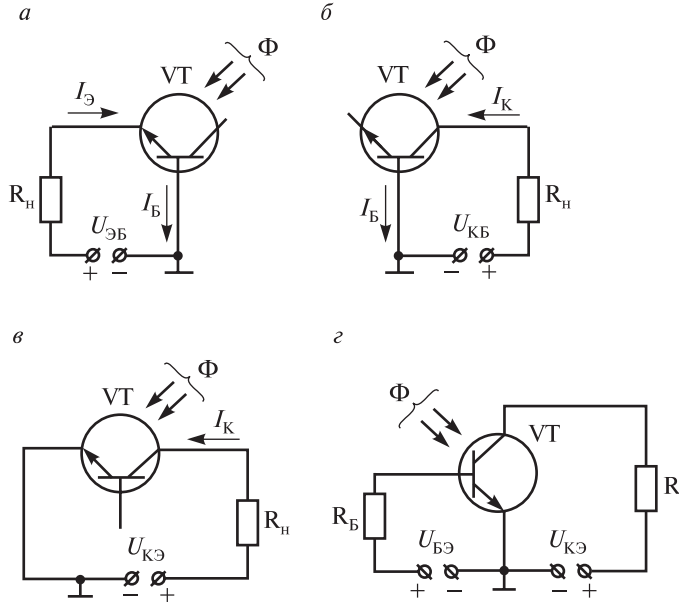



Рис. 8.22. Схема включения биполярных фототранзисторов:
*а* — со свободным коллектором; *б* — со свободным эмиттером; *в* — со свободной базой; *г* — с общей базой

лениях ($r_{К\ диф}$ и $r_{Э\ диф}$). На коллекторный переход напряжение $U_{КЭ}$ действует как обратное смещение, а на эмиттерный — как прямое смещение, так как внешнее электрическое поле действует согласованно с внутренним полем потенциального барьера эмиттерного перехода и встречно с внутренним полем потенциального барьера коллекторного перехода. Большая часть напряжения $U_{КЭ}$ падает на коллекторном переходе и только малая часть — на эмиттерном переходе, так как $r_{К\ диф} > r_{Э\ диф}$. Поэтому потенциальный барьер в эмиттерном *p*-*n*-переходе скомпенсирован частично.

В отсутствие освещения в замкнутой электрической цепи транзистора течет темновой ток $I_т$, который представляет собой сквозной ток транзистора при $I_Б = 0$ и является тепловым током транзистора $I_{КЭ\,обр} = I_т$. При освещении базы ($Ф > 0$) в ней происходит генерация пар носителей зарядов (электрон и дырка) за счет энергии светового потока. Наиболее интенсивная генерация идет в поверхностном слое кристалла базы (*p*-типа) возле эмиттера (*n*-типа), поэтому электроны внутри базы диффундируют к коллекторному переходу, который находится в глубине и где концентрация электронов ниже. Под действием внешнего обратного смещения, действующего согласованно с внутренним полем, электроны экстрагируют в коллектор и увеличивают в его цепи обратный ток коллекторного перехода за счет фототока.

Одновременно в фототранзисторе идет другой процесс, отличающий его от фотодиода. Возникающие в базе за счет фотогенерации основные носители зарядов — дырки — не рекомбинируются, так как база отключена от внешнего источника. Объемный заряд накапливающихся в базе дырок увеличивает ее положительный потенциал. Дырки в базовой области *p*-типа, накапливаясь на границе с эмиттером, компенсируют неподвижный заряд ионов потенциального барьера, что снижает потенциальный барьер эмиттерного перехода. Это вызывает дополнительную инжекцию основных носителей — электронов из эмиттера в базу, где они становятся неосновными носителями и диффундируют к коллектору, а за счет обратного смещения коллекторного перехода экстрагируют в коллектор. Таким образом, в фототранзисторе ток управляется с помощью светового потока, благодаря которому создаются избыточные носители заряда, что приводит к частичной компенсации потенциального барьера в

эмиттерном переходе. В фототранзисторе фототок увеличивается, как и в обычном транзисторе в схеме с ОЭ, в $h_{21Э}$ раз.

Схема с отключенной базой имеет низкую температурную стабильность. При увеличении температуры режим работы резко изменяется из-за роста обратного тока $I_{КЭ\,обр}$ и темнового тока $I_т$. Поэтому включение фототранзистора без базового вывода применяют лишь при большой интенсивности светового потока. Обычно вывод базы подключают во внешнюю цепь под напряжение $U_{КЭ}$ (рис. 8.22, *г*), что позволяет осуществить электрическое управление фототранзистором для стабилизации рабочей точки и компенсации внешних воздействий (температуры, изменений температуры и т.д.). Таким образом, фототранзистор имеет два входа — оптический и электрический. Одновременное использование оптического и электрического сигналов значительно расширяет возможности фототранзистора.

Основные характеристики фототранзистора по виду аналогичны характеристикам фотодиода и снимаются по схеме, показанной на рис. 8.23.

Световая (энергетическая) характеристика фототранзистора $I_Ф = \varphi(Ф)$ при $U_{КЭ} = \text{const}$, как и у фотодиода, линейна (рис. 8.24). С увеличением напряжения $U_{КЭ}$ фототок несколько увеличивается за счет изменения ширины базы.

Спектральные характеристики фототранзистора полностью аналогичны характеристикам фотодиодов.

Вольт-амперные характеристики фототранзисторов $I_К = \varphi(U_{КЭ})$ при $Ф = \text{const}$ напоминают статические выходные характеристики биполярного транзистора в схеме с ОЭ (рис. 8.25). Наклон этих

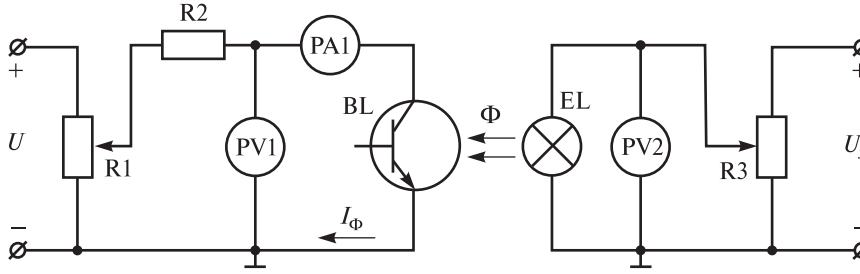



Рис. 8.23. Схема включения фототранзистора и дополнительных элементов для снятия характеристик

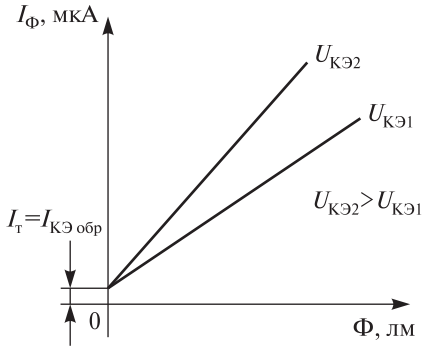



Рис. 8.24. Световая (энергетическая) характеристика фототранзистора

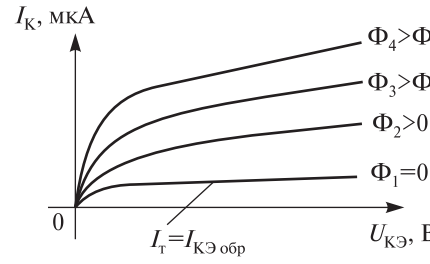



Рис. 8.25. Вольт-амперная (выходная) характеристика фототранзистора

характеристик больше, чем у фотодиода, следовательно, выходное сопротивление фототранзистора получается меньше, чем у фотодиода. Темновой ток фототранзистора больше, чем у фотодиода, так как ток, который возникает в базе транзистора, усиливается в $h_{21Э}$ раз.

Основными параметрами биполярных фототранзисторов, которые аналогичны параметрам фотодиодов, фоторезисторов и биполярных транзисторов, являются:

1) рабочее напряжение, В ($U_К$, $U_Э$);

2) темновой ток, мкА, ($I_т$);

3) общий ток коллектора при освещении прибора, мА ($I_К$);

4) максимальная рассеиваемая мощность, мВт ($P_{max}$);

5) коэффициент усиления по фототоку — отношение фототока коллектора фототранзистора при отключенной базе к фототоку освещаемого *p-n*-перехода в диодном режиме

$$K_{УФ} = 1/1 - h_{21Б};$$

6) интегральная чувствительность — коэффициент усиления по фототоку

$$K_{I\,Ф} = I_Ф/Ф = I_К - I_Т/Ф.$$

Биполярные фототранзисторы целесообразно использовать для регистрации больших входных световых сигналов. К их недостаткам относятся небольшая чувствительность по сравнению с фотодиодом и инерционность, что ограничивает их применение в качестве быстродействующих приборов.

### Полевой фототранзистор

Кроме биполярных фототранзисторов, в качестве приемников светового излучения используются полевые фототранзисторы. Полевые фототранзисторы (ФТ) в зависимости от вида управляющего поля сочетают свойства фотодиода, фоторезистора и полевого транзистора.

Полевой фототранзистор с управляющим *p-n*-переходом, как и обычный полевой транзистор, имеет три вывода — исток, сток и затвор. Полевой фототранзистор с управляющим *p-n*-переходом может иметь структуры с горизонтальным или вертикальным каналом.

Полупроводниковая структура полевого фототранзистора с управляющим *p-n*-переходом и горизонтальным каналом показана на рис. 8.26, *а*. В пластине из полупроводника с большой концентрацией акцепторных примесей ($p^+$-область) создан участок полупроводниковой структуры с электропроводностью *n*-типа, который является каналом. На концах полупроводниковой структуры *n*-типа созданы области с большой концентрацией донорных примесей ($n^+$-типа), на которых размещены металлические контакты с выводами истока (И) и стока (С). Нижняя поверхность пластины с большой концентрацией акцепторных примесей ($p^+$-область) металлизирована и от металлического слоя выполнен вывод затвора (З). Световой поток воздействует на поверхность кристалла канала *n*-типа.

Полупроводниковая структура полевого фототранзистора с управляющим *p-n*-переходом и вертикальным каналом показана на рис. 8.26, *б*. В пластине из полупроводника с большой концентрацией акцепторных примесей ($p^+$-область) создан участок полупроводниковой структуры *n*-типа, являющийся затвором (З). От полупроводниковых структур *n*-типа и $p^+$-типа выполнены металлические контакты с выводами соответственно истока (И) и затвора (З). С противоположной стороны от вывода истока полупроводниковая пластина $p^+$-типа маталлизирована и от металлического слоя сделан вывод стока (С). Металлизированный слой прозрачный, что позволяет пропускать световой поток на полупроводниковую структуру канала $p^+$-типа. Таким образом, в полупроводниковой структуре полевого фототранзистора с управляющим *p-n*-переходом и горизонтальным каналом создан транзистор с каналом *n*-типа, а в полупроводниковой структуре полевого фототранзистора с управляющим *p-n*-переходом и вертикальным каналом создавался

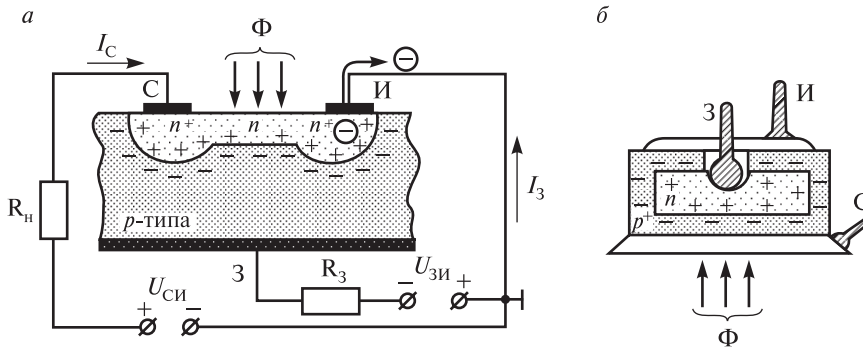



Рис. 8.26. Структура полевого фототранзистора с управляющим $p$-$n$-переходом:
*а* — с горизонтальным каналом и с включением по схеме с общим истоком;
*б* — с вертикальным каналом

транзистор с каналом $p$-типа. При этом необходимо отметить, что аналогично могут быть созданы структуры полевых фототранзисторов с управляющим $p$-$n$-переходом с горизонтальным каналом $p$-типа и вертикальным каналом $n$-типа.

Рассмотрим принцип работы полевого фототранзистора с управляющим $p$-$n$-переходом и горизонтальным каналом, включенного по схеме с общим истоком (ОИ) (рис. 8.26, *а*). Объем полупроводника между истоком и стоком образует проводящий канал. Затвор отделен от канала $p$-$n$-переходом, образованным между структурой $n$-типа (каналом) и структурой $p$-типа (затвором). Образовавшийся в $p$-$n$-переходе потенциальный барьер препятствует движению основных носителей зарядов в канале, т.е. сужает канал. Область пространственного заряда неподвижных носителей зарядов зависит от напряжения между истоком и затвором ($U_{ЗИ}$) в схеме с общим истоком. От ширины области пространственного заряда потенциального барьера, образованного переходом затвор—канал, зависит сечение канала и величина тока стока. Переход затвор—канал можно рассматривать как фотодиод. При освещении $n$-канала полевого фототранзистора в нем генерируются электроны и дырки. В результате возрастания концентрации электронов в канале $n$-типа электроны уходят непосредственно из структуры в области истока во внешнюю цепь под действием напряжения $U_{ЗИ}$, создающего обратное смещение $p$-$n$-перехода между затвором и истоком.

Возникшее при этом увеличение тока затвора $I_З$ представляет собой фототок затвора ($I_З = I_Ф$). Этот ток создает падение напряжения ($I_Ф R_З$) на ограничительном резисторе $R_З$ уменьшает обратное смещение на управляющем переходе исток—затвор. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению ширины потенциального барьера перехода и увеличению толщины канала возле истока, следовательно, и к дополнительному уменьшению его сопротивления и возрастанию тока через канал ($I_С$). Одновременно с этим при увеличении концентрации электронов во всей области канала происходит точечная компенсация неподвижных положительных ионов электронами в потенциальном барьере *p-n*-перехода со стороны канала. Потенциальный барьер по всему каналу уменьшается, а ширина канала увеличивается. Это еще больше увеличивает ток стока ($I_С$) — фототок через канал.

Таким образом, осуществляется управление током стока с помощью света за счет работы *p-n*-перехода в фотодиодном режиме. Фототок в переходе затвор—канал влияет на ширину канала и величину тока в нем. В результате можно считать приращение тока стока (ток в канале) как фототок, так как величина приращения этого тока зависит от величины светового потока.

Полевые фототранзисторы с изолированным затвором от канала МДП-структуры также используются в качестве фотоприемников. Известны два вида фототранзисторов МДП-структуры: с встроенным и индуцированным (инверсным) каналами.

Основой фототранзистора с встроенным каналом (рис. 8.27, *а*) служит подложка из полупроводника *p*-типа, в которой сформирован канал *n*-типа и две области $n^+$-типа, выполняющие функции токосъемников канала. Одна из них — исток, другая — сток. Вся структура покрыта слоем диэлектрика, в котором над токосъемниками вытравливают окна и наносят в них металлическую контактную пленку с токоотводящим проводником. Над каналом на диэлектрике наносят металлический полупрозрачный затвор, через который освещается область полупроводника под затвором (подложка). От затвора сделан вывод для подключения в схему. Подложка выполняет роль фоторезистора. В структуре фототранзистора с индуцированным каналом канал технологически не встраивается.

Схемы включения полевых фототранзисторов с изолированным затвором от канала с встроенным и индуцированным каналами показаны на рис. 8.27 по схеме включения с общим истоком (ОИ).

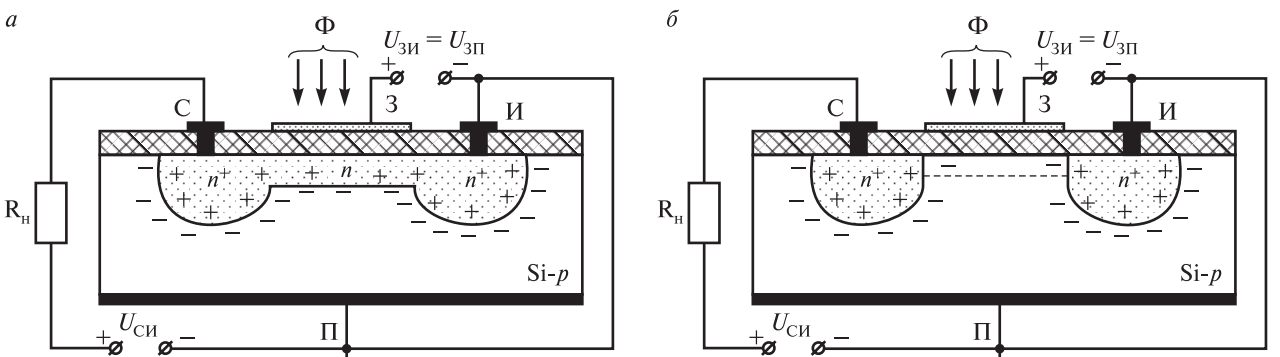



Рис. 8.27. Структура МДП (МОП)-фототранзистора и схема включения с ОИ:
*а* — с встроенным каналом *n*-типа; *б* — с индуцированным каналом *n*-типа

Принцип работы фототранзисторов МДП-структуры без воздействия светового излучения аналогичен работе обычных полевых транзисторов МДП-структуры. Однако необходимо учесть, что полярность напряжения между затвором (подложкой) и истоком ($U_{ЗИ} = U_{ЗП}$) для фототранзисторов МДП-структуры должна обеспечивать работу фототранзисторов только в режиме обогащения канала (это показано на схемах рис. 8.27).

При воздействии светового излучения через полупрозрачный затвор на верхний слой подложки между истоком и стоком происходит фотогенерация пар носителей зарядов — электронов и дырок. Под действием внешнего электрического поля между затвором и подложкой ($U_{ЗИ}$) дырки рекомбинируются с электронами, поступающими из внешней цепи. В результате в слое подложки между истоком и стоком преобладают электроны — создается канал в транзисторе с индуцированным каналом и канал обогащается электронами в транзисторе с встроенным каналом. Увеличение основных носителей зарядов (электронов) в канале *n*-типа уменьшает его сопротивление и увеличивает силу тока $I_C$, т.е. появляется фототок $I_Ф$. За счет светового воздействия можно уменьшить напряжение $U_{ЗИ}$, необходимое для обогащения поверхностного слоя подложки между истоком и стоком. При световом воздействии электроны в этом слое возникают за счет световой генерации и нет необходимости их вытягивать из глубины подложки.

Основные характеристики полевого фототранзистора аналогичны характеристикам биполярного фототранзистора.

Световая (энергетическая) характеристика $I_C = \varphi(Ф)$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$ (рис. 8.28) показывает возрастание тока $I_C$ с увеличением светового потока. Ток стока при малых уровнях светового потока Ф близок к нулю, так как канал практически отсутствует, т.е. перекрыт (участок 0*A*) за счет большого напряжения обратного смещения $U_{ЗИ}$.

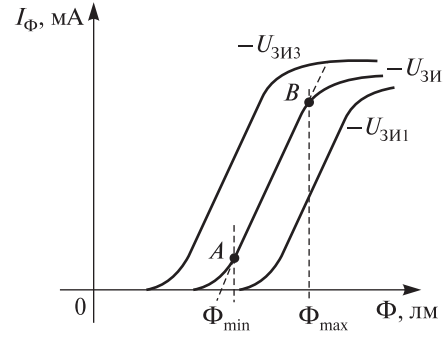



Рис. 8.28. Световая (энергетическая) характеристика полевого (канального) фототранзистора

При $\Phi > \Phi_{min}$ в цепи стока протекает ток, линейно зависящий от светового потока (участок *AB*). Линейная зависимость энергетической характеристики сохраняется до $\Phi = \Phi_{max}$. При большом световом потоке $\Phi > \Phi_{max}$ его влияние на $I_C$ снижается и ток стока ($I_C$) практически не зависит от $U_{ЗИ}$. Большой световой поток Ф увеличивает концентрацию подвижных носителей зарядов и уменьшает подвижность электронов, что замедляет рост тока. Отсутствие зависимости тока стока ($I_C$) от напряжения ($U_{ЗИ}$) объясняется невозможностью увеличения тока затвора, равного фототоку ($I_З = I_Ф$), так как падение напряжения на резисторе в цепи затвора, равное $I_Ф R_З$, и напряжение смещения ($U_{ЗИ}$) равны между собой ($I_Ф R_З = U_{ЗИ}$). В этом случае *p-n*-переход затвор—исток не имеет смещения, т.е. нет притока электронов в область истока. Из этого следует, что полевой фототранзистор, как приемник световой энергии, может работать в определенном диапазоне уровня светового излучения.

Вольт-амперные характеристики полевого фототранзистора при различных значениях светового потока приведены на рис. 8.29: $I_C = \varphi(U_{СИ})$ при $\Phi = \text{const}$. Они по форме аналогичны выходным характеристикам обычного полевого транзистора. Сравнивая эти характеристики с выходными вольт-амперными характеристиками обычного транзистора, можно заметить, что приращение тока стока происходит за счет увеличения фототока затвора от светового потока при постоянном напряжении $U_{ЗИ}$.

Спектральная характеристика и параметры полевого фототранзистора такие же, как и для биполярного фототранзистора.

Полевые фототранзисторы имеют высокое входное сопротивление (что позволяет использовать их при больших уровнях входного сигнала) высокую чувствительность, большую полосу пропускания и низкий уровень шумов.

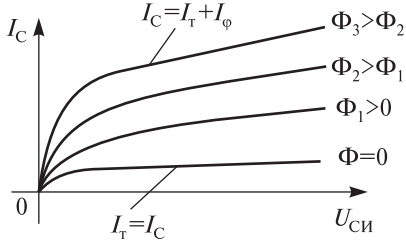



Рис. 8.29. Вольт-амперная (выходная) характеристика полевого фототранзистора

Фототранзисторы применяются в фототелеграфии и фототелефонии, для ввода и вывода информации в вычислительной технике, в качестве приемников энергии, а также для регистрации видимого ультрафиолетового и инфракрасного излучения.

**Условное обозначение фототранзисторов**

Основой системы обозначений фототранзисторов, так же как и всех полупроводниковых приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 8.30.

Графическое обозначение фототранзисторов содержит:

– общее обозначение — базовый символ полупроводникового биполярного или полевого транзистора;

– дополнительные обозначения, как отличительные особенности фотоэлектрических приборов, — окружность диаметром $D = 12$ мм или 14 мм, которая указывает на то, что конструкция фототранзистора помещена в корпус; две стрелки в сторону символа фототранзистора, расположенные под углом 45° к базовому символу полупроводникового фототранзистора за корпусом, указывают, что действие прибора основана на фотоэффекте.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения фототранзистора (маркировку), классифицирующие фототранзисторы по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: BL1, где BL — фотоэлемент (фототранзистор), 1 — порядковый номер прибора в схеме.

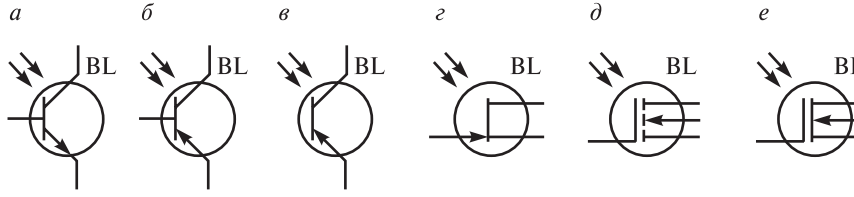



Рис. 8.30. Условное графическое обозначение фототранзисторов: *а* — биполярный *n-p-n* с выводом базы; *б* — биполярный *p-n-p* структуры с выводом базы; *в* — биполярный *p-n-p*-структуры без вывода базы; *г* — полевой с каналом *n*-типа и управляющим *p-n*-переходом; *д* — полевой МДП-структуры с индуцированным каналом *n*-типа; *е* — полевой МДП-структуры со встроенным каналом *n*-типа

Промышленность выпускает несколько типов фототранзисторов, которые имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий фототранзисторы по определенным признакам в справочниках и состоящий из следующих элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81:

*первый элемент* — буквы, обозначающие тип фотоэлемента (ФТ — фототранзистор);

*второй элемент* — буква, обозначающая материал, из которого изготовлен чувствительный элемент (Г — германий, К — кремний);

*третий элемент* — число, обозначающее порядковый номер разработки прибора (от 1 до 9);

*четвертый элемент* — буква, определяющая подгруппу фотоэлементов (Б — биполярный фототранзистор; У — униполярный фототранзистор), во многих маркировках не указывается.

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* ФТГ-3Б: ФТ — фототранзистор, Г — чувствительный элемент изготовлен из германия, 3 — порядковый номер разработки, Б — биполярный.

### *8.4.4. Фототиристоры*

Фототиристор (ФТР) представляет собой фотоэлектрический приемник излучения, сочетающий в себе качества тиристора и фотоприемника — преобразователя световой энергии в электрическую и обладающий свойствами обычного управляемого тиристора.

Конструкция ФТР сходна с конструкцией обычного тиристора, но с одной стороны корпуса имеется окно с защитным стеклом и фокусирующей линзой, через которое свет проникает на поверхность полупроводника.

Назначение фототиристора — создать переключающее устройство, которое управляется световым лучом, подобно тому, как триодные тиристоры управляются напряжением, подаваемым на один из эмиттерных переходов. Из этого следует, что работа ФТР аналогична работе триодного тиристора, если в качестве управляющего сигнала используется свет. Наибольшее распространение получили ФТР с освещаемым $n$-эмиттером и с освещаемой $p$-базой.

Рассмотрим работу и процессы в фототиристоре на примере структуры и схемы включения, показанной на рис. 8.31, *а*, при освещении базы $p_1$-типа.

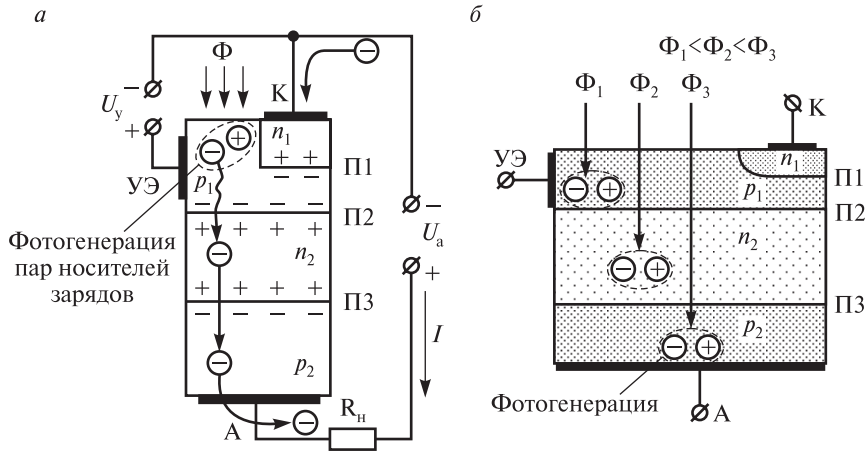



Рис. 8.31. Фототиристор:
*а* — полупроводниковая структура и схема включения с управляющим напряжением; *б* — структура фотогенерации в зависимости от силы светового потока

Работа фототиристора аналогична работе триодного тиристора, если в качестве управляющего сигнала использовать световой поток. При отсутствии светового сигнала и потенциала на управляющем электроде, т.е. напряжения управления ($U_у$), фототиристор закрыт и через него проходит только темновой ток:

$$I_т = \frac{I_{К\,обр}}{1-(\alpha_1+\alpha_3)},$$

где $I_{К\,обр}$ — ток утечки коллекторного перехода; $\alpha_1$ и $\alpha_3$ — коэффициенты усиления по току эмиттерных переходов П1 ($\alpha_1$) и П3 ($\alpha_3$).

При действии света на область базы $p_1$ в ней генерируются электроны и дырки. Генерация носителей зарядов, находящихся на расстоянии длины диффузионного пробега электронов от *p-n*-перехода, происходит менее интенсивно. Таким образом, в зависимости от глубины проникновения света число генерируемых пар носителей зарядов экспоненциально убывает. Наибольшее число генерируемых пар носителей зарядов находится в поверхностном слое, т.е. в глубине кристалла число генерируемых пар носителей зарядов

экспоненциально убывает. Так как в поверхностном слое полупроводника $p_1$-типа электронов больше, чем в глубине, то электроны поверхностного слоя базы $p_1$ диффундируют в глубину кристалла к переходу П2, находящемуся под обратным смещением напряжения $U_A$, и экстрагируют в базу $n_2$, создавая первичный фототок в коллекторном переходе ($I_{Ф2}$). Накапливающиеся в $n_2$-области электроны компенсируют неподвижные положительные ионы потенциальных барьеров П2 и П3, тем самым разрушая потенциальные барьеры коллекторного и эмиттерного переходов П2 и П3.

В результате электроны инжектируются из области $n_2$ в область $p_2$, создавая первичный фототок в эмиттерном переходе П3 ($I_{Ф3}$). Электроны, инжектируемые в область $p_2$, через внешнюю цепь поступают в область эмиттера $n_1$, в которой повышается концентрация электронов и разрушается потенциальный барьер П1. В переходе П1 электроны инжектируются в область $p_1$, создавая первичный фототок в эмиттерном переходе П1 ($I_{Ф1}$). Аналогично можно рассмотреть процессы фиктивного перемещения дырок в противоположном направлении. Таким образом, через фототиристор течет сквозной анодный ток ($I$), сила которого зависит от светового потока при неизменном напряжении $U_a$, которое меньше напряжения включения ($U_{вкл}$) тиристора. Этот ток называется фототоком:

$$I_Ф = \frac{I_{Ф2} + \alpha_3 I_{Ф3} + \alpha_1 I_{Ф1}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_3)}.$$

Как только суммарный коэффициент усиления по току фототиристора достигнет единицы ($\alpha = \alpha_1 + \alpha_3 = 1$), фототиристор переключается в проводящее состояние. Общий ток, протекающий в освещенном фототиристоре, равен сумме темнового тока и фототока с учетом суммарного коэффициента усиления по току ($\alpha$) в эмиттерных переходах тиристора:

$$I = \frac{I_{К\,обр} + I_{Ф2} + \alpha_3 I_{Ф3} + \alpha_1 I_{Ф1}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_3)}.$$

Тиристор при этом открыт, т.е. переходит во включенное состояние. Процесс переключения фототиристора с помощью управляющего напряжения $U_у$ такой же, как и в обычных тиристорах. При увеличении светового потока (Ф) проникновение излучения

происходит глубже (рис. 8.31, *б*), что существенно влияет на величину фототока.

После включения ФТР ни световой поток (Ф), ни потенциал управляющего электрода ($U_у$) не влияют на его анодный ток. Чтобы вернуть ФТР в закрытое (отключенное) состояние, необходимо, как и обычном тиристоре, снизить анодное напряжение до значения меньше $U_{ост}$ или изменить его полярность.

Фототиристор включается при сравнительно больших уровнях освещенности (300—2000 лм и выше). Этим уровнем можно управлять, подавая напряжение на управляющие электроды и световой поток в область базы. Чем больше ток управляющего электрода, тем при меньшей освещенности включается ФТР. Возможность управлять включением фототиристора сочетанием светового и электрического сигналов является его существенным преимуществом. С увеличением светового потока напряжение включения ФТР уменьшается.

Основными характеристиками фототиристора являются — световая, спектральная, вольт-амперная и характеристика управления.

Световая (энергетическая) характеристика фототиристора представляет собой зависимость фототока, протекающего через прибор, от величины светового потока $I_Ф = φ(Ф)$ при $U_а = \text{const}$ (рис. 8.32).

Из световой характеристики (рис. 8.32) видно, что при некоторой величине фотопотока (Ф) происходит переключение фототиристора из закрытого состояния в открытое. Этому значению соответствует световой поток включения $Ф_{вкл}$. В состоянии включения фототиристора (точка *B*) сила светового потока, проникающая в полупроводниковую структуру фототиристора, резко уменьшается, так как резко возрастает подвижность носителей зарядов, и равна $Ф_{ост}$. При переходе фототиристора во включенное состояние (точ-

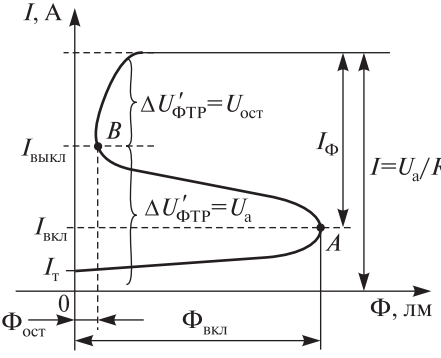



Рис. 8.32. Световая характеристика фототиристора

ка $B$) силу светового потока можно уменьшить практически до нуля ($\Phi \approx 0$) и фототиристор останется включенным. Однако, если после включения фототиристора вновь увеличивать силу светового потока ($\Phi$) при неизменном напряжении $U_а$, ток через него возрастает до $I_\Phi = U_а/R_н$ и больше не изменяется при увеличении силы светового потока ($\Phi$), т.е. имеет два стабильных состояния: отключен — точка $A$ и включен — точка $B$ (рис. 8.32) и может использоваться как элемент памяти. Это указывает на то, что световой поток слабо влияет на анодный ток в структуре фототиристора во включенном состоянии. При включении фототиристора на структуре фототиристора создается практически неизменное небольшое остаточное падение напряжения $\Delta U'_{\text{ФТР}} = U_{\text{ост}}$, в то время как при закрытом состоянии фототиристора все анодное напряжение падало на структуре фототиристора $\Delta U_{\text{ФТР}} = U_а$.

Спектральная характеристика фототиристора представляет собой зависимость спектральной чувствительности от длины волны светового излучения $I_\Phi/I_{\Phi\max}(\%) = \varphi(\lambda)$. Форма спектральной характеристики определяется материалом полупроводника и практически совпадает с формой спектральных характеристик других рассмотренных выше фотоприемников, имеющих $p$-$n$-переходы. Спектральная характеристика кремниевого фототиристора имеет такой же вид, как и спектральная характеристика кремниевого биполярного фототранзистора. Однако в зависимости от конструкции приборов, структуры и технологических особенностей максимум характеристик может смещаться в сторону длинных или коротких волн светового излучения.

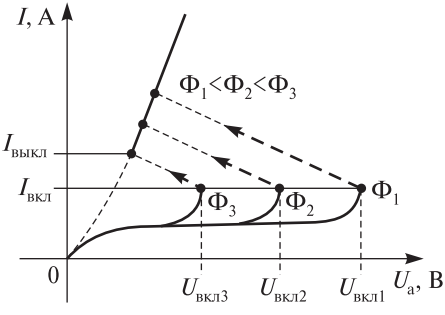



Рис. 8.33. Вольт-амперная характеристика фототиристора при $U_у = 0$

Вольт-амперные характеристики фототиристора выражают зависимость выходного тока фототиристора от анодного напряжения при различных световых потоках $I = \varphi(U_а)$ при $\Phi$ = const (рис. 8.33). С увеличением светового потока фототиристор будет переключаться при меньших напряжениях $U_а$.

Зависимость напряжения включения $U_{вкл}$ от силы светового потока Ф называют характеристикой управления $U_{вкл} = \varphi(\Phi)$ при $I_у = \text{const}$ (рис. 8.34). Рабочая область ФТР ограничена пороговым световым потоком $\Phi_{пор}$ и световым потоком спрямления $\Phi_{спр}$. Пороговый световой поток определяет минимальный световой поток, к которому фототиристор нечувствителен.

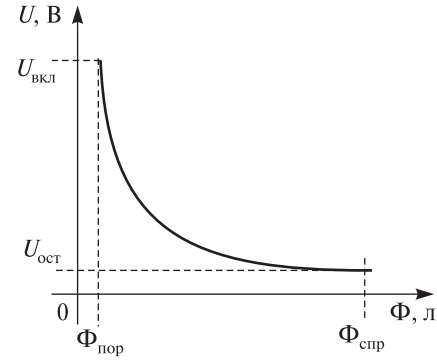



Рис. 8.34. Характеристика управления фототиристора

Максимальный световой поток $\Phi_{спр}$ характеризует тиристор как диод под прямым смещением, т.е. потенциальный барьер всех переходов разрушается и общее сопротивление тиристора минимально. При этом остаточное падение напряжения $U_{ост}$ на тиристорной структуре минимально, тиристор включен, и снижение мощности светового потока не приведет к его закрытию. Таким образом, тиристором можно управлять в пределах от $\Phi_{пор}$ до $\Phi_{спр}$, когда в коллекторном переходе потенциальный барьер разрушен частично. Таким образом, с увеличением светового потока напряжение включения фототиристора уменьшается, что также указывает и на уменьшение времени перехода фототиристора из закрытого состояния в открытое.

Основные параметры фототиристора:

1) напряжение включения ($U_{вкл}$), В;

2) прямой ток ($I_{пр}$), А;

3) темновой ток ($I_т$), мкА;

4) запускающее излучение (мВт/см$^2$) показывает мощность светового потока на 1 см$^2$.

По сравнению с другими фотоприемниками ФТР имеют следующие преимущества: повышенную чувствительность; наличие управляющего электрода позволяющего осуществлять наряду со световым и электрическое управление работой фототиристора.

Фототиристоры применяются для коммутации световым потоком мощных электрических цепей, развязывая управляющие и силовые цепи, в схемах автоматического управления и контроля устройств

энергоснабжения, в переключающих устройствах: генераторах, усилителях, счетчиках и т.д.

### Условное обозначение фототиристоров

Основой системы обозначений фототиристоров, так же как и всех полупроводниковых приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 8.35.

Графическое обозначение фототиристоров содержит:

– общее обозначение — базовый символ тиристора (динистор или тринистор);

– дополнительные обозначения как отличительные особенности фотоэлектрических приборов — окружность диаметром $D = 12$ мм или 14 мм, которая указывает на то, что конструкция фототиристора помещена в корпус; две стрелки в сторону символа фототиристора, расположенные под углом 45° к базовому символу полупроводникового фототиристора за корпусом, которые указывают, что действие прибора основана на фотоэффекте.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения фототиристора (маркировку), классифицирующие фототиристоры по определенным признакам в справочниках.

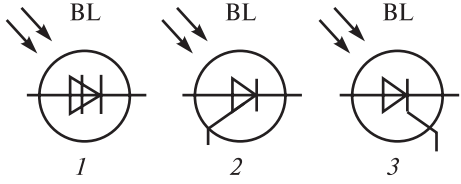



Рис. 8.35. Условное графическое обозначение фототиристоров:
*1* — диодный, неуправляемый, запираемый в обратном направлении (динистор); *2* — триодный, управляемый, незапираемый, с управлением по аноду; *3* — триодный, управляемый, незапираемый, с управлением по катоду, возможно обозначение без корпуса (окружности)

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: BL1, где BL — фотоэлемент (фототиристор), 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Промышленность выпускает несколько типов фототиристоров, которые имеют

буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий фототиристоры по определенным признакам в справочниках и состоящий из следующих элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81:

*первый элемент* — буквы, обозначающие тип фотоэлемента (ТФ — фототиристор);

*второй элемент* — буква или цифра, обозначающие материал, из которого изготовлен чувствительный элемент (Г или 1 — германий, К или 2 — кремний);

*третий элемент* — число, обозначающее порядковый номер разработки прибора (от 1 до 9);

*четвертый элемент* — буква, определяющая подгруппу фотоэлементов (Т — фототиристор), во многих маркировках отсутствует, или указывается цифра, обозначающая вид конструкции от 0 до 5;

*пятый элемент* — число, указывающее максимально допустимый ток в открытом состоянии.

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* ТФ 130-40: ТФ — фототиристор, 1 — чувствительный элемент изготовлен из германия, 3 — порядковый номер разработки, 0 — вид конструкции, 40 — максимально допустимый ток фототиристора в открытом состоянии.

## 8.5. Светоизлучающие полупроводниковые приборы

### *8.5.1. Общие сведения*

Светоизлучающие полупроводниковые приборы — это приборы, предназначенные для непосредственного преобразования электрической энергии в энергию светового (видимого или инфракрасного) излучения.

По виду рабочей среды излучающие приборы подразделяются на электровакуумные, газоразрядные, полупроводниковые и жидкокристаллические.

По форме представления сигнала различают: *световые*, отображающие сигнал свечением индикатора; *цветосигнальные*, отображающие каждый сигнал из группы отдельным цветом свечения; *знаковые*, отображающие каждый сигнал из группы буквой, цифрой или символом; *экранные*, представляющие принятую за определенный интервал времени совокупность сигналов в виде изображения;

*шкальные,* отображающие поступивший сигнал местоположением светового пятна или границы светящейся линии.

Принцип действия излучающих полупроводниковых приборов основан на излучении квантов электромагнитной энергии при переходе электронов с высоких энергетических уровней, т.е. из зоны проводимости, на более низкие уровни, находящиеся в валентной зоне, где происходит их рекомбинация. В процессе рекомбинации выделяется квант энергии, соответствующий энергии запрещенной зоны и зависящий от ее ширины. Все эти переходы электронов могут сопровождаться излучением энергии как в виде фотона (звуковые, невидимые излучения), так и в виде фононов (световые, видимые излучения). При излучении фотона происходит выделение световой (лучистой) энергии, а при излучении фонона — тепловой энергии. В обычных полупроводниковых приборах рекомбинация заканчивается выделением энергии в виде квантов тепловых колебаний решетки (фононов) и является безызлучательной рекомбинацией. В светоизлучающих полупроводниковых приборах преобладает излучательная рекомбинация в виде выделения квантов световой энергии (фотонов). С излучательной рекомбинацией связано такое явление, как люминесценция.

*Люминесценцией* называют оптическое излучение, возбуждаемое в веществе за счет какого-либо вида энергии и представляющее собой избыток над тепловым излучением. Люминесценция характеризуется достаточно длительным свечением после того, как действие возбуждающего фактора прекратилось.

Для возникновения люминесценции в полупроводнике последний должен быть переведен в возбужденное состояние с помощью внешнего источника энергии. В частности, возбужденному состоянию полупроводника соответствует образование неравновесных концентраций свободных частиц: электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. В полупроводниковых излучающих приборах для перевода полупроводника в возбужденное состояние используется электрическое поле или ток, и такой вид люминесценции называется электролюминесценцией. Так, с помощью электрического поля можно получить межзонное возбуждение, основными механизмами которого служат ударная ионизация ускоренными электронами.

Широко используются методы возбуждения полупроводникового кристалла, содержащего электронно-дырочный переход: инжекция основных носителей зарядов под действием внешнего источника напряжения, создающего прямое смещение *p-n*-перехода; лавинный пробой *p-n*-перехода при подключении обратного смещения на *p-n*-переход; туннельный пробой и др.

В большинстве случаев в проводниках наряду с излучательными переходами наблюдаются также безызлучательные переходы. Спектр люминесцентного излучения определяется характером преобладающих излучательных переходов. Эффективность процесса люминесцентного излучения определяется отношением выделяемой лучистой энергии к полной энергии возбуждения.

### *8.5.2. Устройство светоизлучающего диода*

Светоизлучающие диоды (светодиоды) относятся к электролюминесцентным источникам света, излучение (свечение) которых обусловлено интенсивной рекомбинацией в результате инжекции электронов через *p-n*-переход. Иногда их называют инжекционными светодиодами, а свечение, возникающее в светодиодах, относится к явлению так называемой инжекционной электролюминесценции.

Светодиод представляет собой излучающий *p-n*-переход, свечение в котором возникает в результате рекомбинаций инжектируемых электронов и дырок при прямом смещении. Конструкции светодиодов различаются по площади и форме излучающей поверхности, которые определяют мощность светового излучения. В светодиодах малой мощности используется плоская конструкция с большой равномерно светящейся поверхностью, а в мощных светодиодах — плоская поверхность с малой излучающей поверхностью и полусферическая поверхность. Наибольшее распространение получили светодиоды с полусферической структурой, имеющие больший квантовый выход световой энергии.

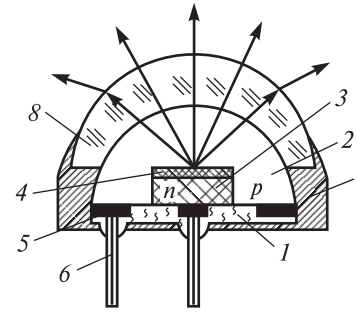


Рис. 8.36. Устройство светодиода

Устройство полусферического светодиода (рис. 8.36), изготовленного методом эпитаксии, представляет со-

бой подложку *1* в виде монокристалла *p*-типа, на которой выращена базовая область *2* монокристалла полупроводника сферической формы *p*-типа. Сферическая структура позволяет создать эффект линзы для пропускания излучаемого светового потока. На базовой основе методом диффузии из расплава получают кристалл *n*-типа *3*. Исходными материалами для *p*- и *n*-структур служат арсенид галлия (инфракрасное излучение), фосфид галлия с применением цинка и кислорода (красное свечение), фосфид галлия, легированный азотом (зеленое свечение) и карбид кремния (желтое свечение). В светодиодах ИК-излучения для преобразования излучения в видимое излучение в кристаллы добавляют цинк, медь и серу. После таких добавок получается вещество, способное светиться под действием постоянного или переменного электрического поля. Оно называется электролюминофором. Между кристаллами *p*- и *n*-типа создается *p*-*n*-переход *4*. Кристаллы привариваются к металлическим контактам *5* с выводами *6*, которые монтируются в коваровый, керамический или пластмассовый корпус *7*. Верхняя часть корпуса имеет стеклянную или полимерную линзу *7*, которая служит выходным окном для излучения, концентрирует излучение в узкий конус и защищает полупроводниковый кристалл от повреждений.

### *8.5.3. Принцип действия светодиода*

Действие светодиодов основано на инжекции основных носителей зарядов в *p*-*n*-переходе при прямом его смещении (рис. 8.37). На первом этапе при подключении напряжения происходит возбуждение электронов в *n*-области. В результате возбуждения электроны движутся к *p*-*n*-переходу и происходят разрушение потенциального барьера и инжекция электронов в *p*-область. Как известно, прохождение тока через

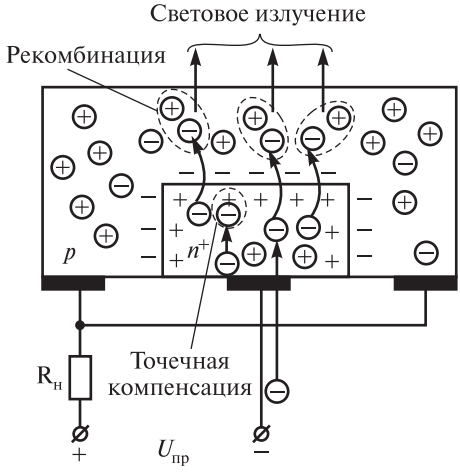



Рис. 8.37. Схема включения структуры светодиода и распределение зарядов при прямом смещении

*p-n*-переход при прямом смещении сопровождается рекомбинацией инжектированных носителей зарядов — электронов в *p*-области. Рекомбинация происходит в примыкающих к переходу слоях, ширина которых определяется диффузионной длиной пробега электрона. При рекомбинации выделяется энергия, равная энергии ширины запрещенной зоны $\Delta W$. Чтобы кванты энергии — фотоны, освободившиеся при рекомбинации, соответствовали квантам энергии видимого света, ширина запрещенной зоны исходного полупроводника должна быть относительно большая ($\Delta W > 1{,}3$ эВ). В этом случае происходит инжекционная люминесценсия в светодиоде — выделение в окружающее пространство электромагнитного излучения видимого спектра. В светодиодах излучающей является только одна область, поэтому стремятся получить максимальную инжекцию в эту область. Если в нашем примере излучающей областью является *p*-область, то концентрация примесей в *n*-области должна быть гораздо выше, чем в излучающей *p*-области ($N_n >> N_p$). Это приводит к практически односторонней инжекции из *n*-области в *p*-область.

Однако в процессе рекомбинации не все электроны выделяют квант энергии в виде светового излучения, т.е. фотонов. Это происходит из-за неоднородности кристаллической решетки структуры полупроводников при введении легирующих примесей. Небольшая часть электронов выделяет энергию меньше энергии ширины запрещенной зоны ($\Delta W$), так как рекомбинация происходит на более высоких энергетических уровнях, в виде тепловой энергии (фонона). В результате в светодиоде возникают два вида излучения — световое и тепловое с различной длиной волны излучения, т.е. возникает некогерентное излучение. За счет теплового излучения может возникнуть генерация и поглощение энергии электронами, что уменьшит световое излучение. Таким образом, яркость свечения зависит от числа зарядов, инжектированных *p-n*-переходом и рекомбинируемых в излучательной области, а цвет свечения — от материала легирующих примесей. Для получения большой яркости свечения светодиода его излучающий кристалл выполняют в форме полусферы и в окне корпуса располагают линзу для концентрации излучения в узком луче.

Возможно создание светодиодов, которые в зависимости от их включения или режима работы будут излучать в различных областях

спектра и иметь управляемый цвет свечения. При этом используется способ смешивания излучений двух светодиодов, имеющих свечения разного цвета. В таких светодиодах используется двухпереходные структуры на основе фосфида галлия с различными примесями — цинком и азотом (рис. 8.38, *а*). Примеси подобраны так, что один *p-n*-переход излучает свет красного, а другой — зеленого цвета. При их смешивании получается свет желтого цвета. Как видно из рис. 8.38, *а*, в структуре имеются две дырочные области, легированные различными примесями — цинком и азотом. Область $p_1$-легирована азотом (зеленое свечение), а область $p_2$ — цинком (красное свечение). В структуре имеются три вывода (*1*, *2*, *3*), что позволяет через каждый *p-n*-переход пропускать определенный ток. Изменяя токи переходов, удается менять цвет излучения от желто-зеленого до красно-желтого оттенка и получать чистые цвета — красный и зеленый. Эквивалентная схема включения двухцветного светодиода приведена на рис. 8.38, *б*.

Основные характеристики светодиода — вольт-амперная, яркостная и спектральная.

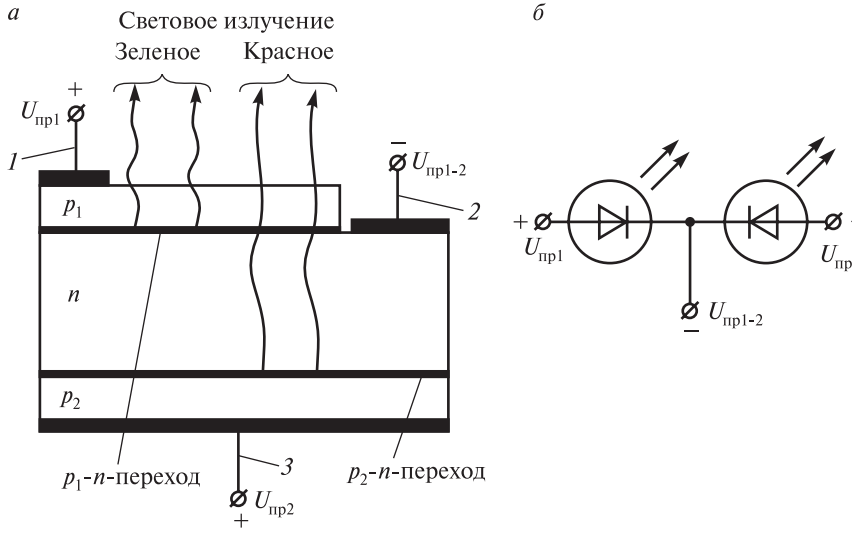



Рис. 8.38. Структура светодиода с управляемым цветом свечения (*а*) и его эквивалентная схема (*б*)

Вольт-амперная характеристика светодиода аналогична характеристикам обычного выпрямительного диода при прямом смещении $I_{пр} = \varphi(U_{пр})$ (рис. 8.39). Постоянное напряжение прямого смещения светодиода составляет 1—2 В, а максимальный прямой ток — в зависимости от типа светодиодов 10—100 мА. Допустимое напряжение обратного смещения невелико и составляет 3—7 В. Необходимо отметить, что светодиоды не рассчитаны на работу под напряжением обратного смещения.

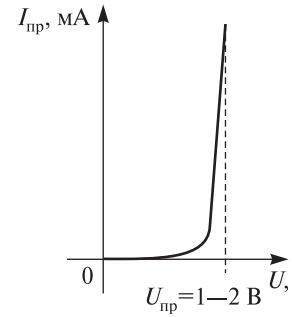



Рис. 8.39. Вольт-амперная характеристика светодиода

Яркостная (излучательная) характеристика представляет собой зависимость яркости излучения от прямого тока $B = \varphi(I_{пр})$ (рис. 8.40), где $B$ — яркость, измеряемая в канделах на квадратный метр (кд/м$^2$). С ростом прямого тока поток излучения и сила света увеличиваются, а затем наступают насыщение и спад яркости излучения. Нелинейный начальный участок 0А характеризуется низкими выходными яркостями. Из-за малого числа рекомбинированных электронов яркость незначительна, а нелинейность объясняется неравенством инжектированных и рекомбинированных электронов. Неравенство возникает из-за того, что часть электронов участвуют в точечной компенсации неподвижных зарядов потенциального барьера (разрушение потенциального барьера). Линейный участок АБ соответствует равенству инжектированных и рекомбинируемых зарядов и начинается с порогового тока $I_{пор}$, который в светодиодах разных типов находится в интервале 0,1—2,5 мА.

При некотором значении прямого тока $I_{пр\ нас}$ наблюдается максимум излучения (точка Б) и при дальнейшем увеличении $I_{пр}$ излучение снижается, так как возникает ударная генерация носителей зарядов и уменьшается ширина запрещенной зоны, что часто приводит к умень-

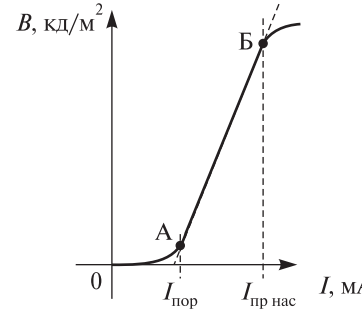



Рис. 8.40. Яркостная (излучательная) характеристика светодиода

шению энергии запрещенной зоны $\Delta W$. Вероятность попадания электронов в зону проводимости увеличивается, а рекомбинация в валентной зоне уменьшается.

Спектральная характеристика показывает зависимость относительной мощности излучения от длины волны $\frac{P}{P_{\max}} = \varphi(\lambda)$ (рис. 8.41) и ее вид зависит от легирующих материалов, имеющих разную ширину запрещенной зоны $\Delta W$. На характеристике видно, в каком диапазоне волн наблюдается наибольшая излучательная способность светодиода. Длина волны излучения зависит от ширины запрещенной зоны

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta W},$$

где $h$ — постоянная Планка; $c$ — скорость света.

Основные параметры светодиода:

1) напряжение прямого смещения (рабочее) $U_{\text{пр}}$, В;

2) цвет свечения и длина волны ($\lambda$), соответствующие максимальному световому потоку;

3) выходная световая мощность $P_{\text{вых}}$, мВт;

4) световой поток Ф, млм;

5) сила света — световой поток на единицу телесного угла в одном направлении, выраженная в канделах, кд;

6) яркость — отношение силы света к площади светящейся поверхности, кд/м$^2$.

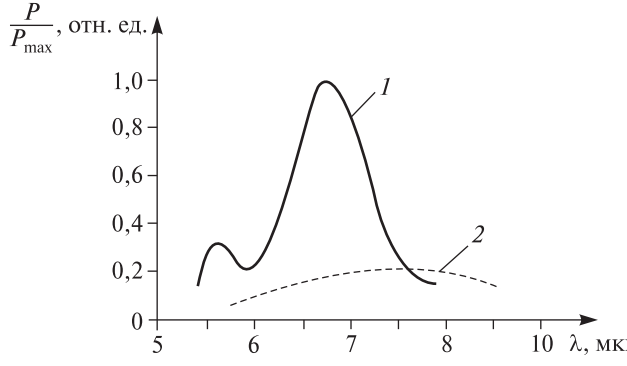



Рис. 8.41. Спектральные характеристики светодиода из фосфида галлия при прямом (*1*) и обратном смещении (*2*)

Светоизлучающие диоды широко применяются в качестве световых индикаторов и для построения светоизлучающих приборов со знаковой индикацией для получения сплошных изображений (знаки, буквы, шкалы, диаграммы). Широкое применение светодиоды нашли в оптронных приборах, системах точного ви́дения, в автоматике и вычислительной технике. Двухцветные светодиоды перспективны для использования в устройствах железнодорожного транспорта в качестве четырехпозиционных сигнализаторов (красный—желтый—зеленый—выключено), а также в качестве оптических индикаторов скорости.

### *8.5.4. Условное обозначение светодиодов*

Основой системы обозначений светодиодов, так же как и всех полупроводниковых приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 8.42.

Графическое обозначение светодиодов содержит:

– общее обозначение — базовый символ диода;

– дополнительные обозначения, как отличительные особенности фотоэлектрических приборов, — окружность диаметром $D = 10$ или 12 мм, которая указывает на то, что конструкция светодиода помещена в корпус; две стрелки от символа диода, расположенные под углом 45° к базовому символу полупроводникового диода за корпусом справа, которые указывают, что действие прибора основано на светоизлучении.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения светодиода (маркировку), классифицирующий светодиоды по определенным признакам в справочниках.

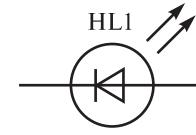



Рис. 8.42. Условное графическое обозначение светодиода

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: HL1, где HL — прибор световой сигнализации, 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Промышленность выпускает несколько типов светодиодов, которые имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий светодиоды по определенным признакам в справочниках и состоящий из следующих элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81:

*первый элемент* — буква или цифра, обозначающие материал, на основе которого изготовлен прибор (Г или 1 — германий, К или 2 — кремний, А или 3 — арсенид галлия и т.д.);

*второй элемент* — буква, обозначающая подкласс прибора: Л — единичный светодиод, ЛС — матрица светодиодов;

*третий элемент* — цифра, определяющая основные функции прибора: для светодиода 1 — излучающий диод ИК-излучения, 2 — излучающий модуль ИК-излучения, 3 — светоизлучающий диод видимого спектра за ИК-излучением;

*четвертый элемент* — число, обозначающее порядковый номер разработки от 01 до 99 или от 001 до 999;

*пятый элемент* — классификация по технологии.

Дополнительный элемент — особенности конструкции (виды выводов, сборки и т.д.).

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* АЛ307А: А — арсенид галлия, Л — излучающий светодиод, 3 — световой поток видимого спектра излучения, 07 — номер разработки, А — технологическая группа разработки.

## 8.6. Оптроны

### *8.6.1. Общие сведения*

Основным компонентом оптоэлектроники является пара с фотоновой связью, называемая оптроном. Оптрон — это прибор, состоящий из излучателя света и фотоприемника, которые размещены в одном корпусе и взаимодействуют между собой. Оптрон используется главным образом для связи отдельных частей радиоэлектронных устройств, при которой одновременно обеспечиваются электрическая развязка между ними и бесконтактное управление электрическими цепями. Если оптрон имеет только один излучатель и один приемник излучения, то его называют оптопарой или элементарным оптроном. Между элементами оптрона может быть осуществлена как оптическая связь, так и электрическая. Вход и выход оптрона

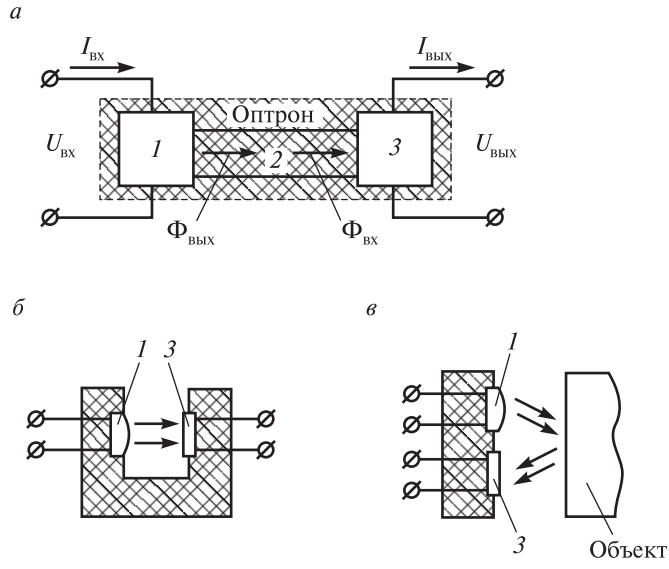



Рис. 8.43. Структура оптрона с фотоновой связью:
*а* — с внутренним закрытым оптическим каналом; *б*, *в* — с открытым оптическим каналом

также могут быть как электрическими, так и оптическими. Оптрон с внутренней фотоновой связью (рис. 8.43, *а*) представляет собой четырехполюсник, состоящий из трех элементов: источника света *1*, световода *2* и приемника света *3*. Оптрон с электрической внутренней связью и фотоновыми внешними связями (рис. 8.44) служит для усиления световых сигналов или преобразования сигнала одной частоты в сигнал другой частоты, например сигналов невидимого инфракрасного излучения в сигнал видимого спектра. Фотоприемник *1* преобразует входной световой сигнал в электрический. Последний усиливается электронным усилителем *2* и возбуждает источник света *3*,

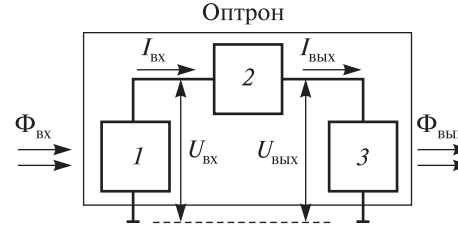



Рис. 8.44. Структура оптрона с внутренней электрической связью

частота излучения которого может существенно отличаться от частоты входного сигнала. В настоящее время получили широкое распространение лишь оптроны с прямой оптической связью — оптоэлектронные пары. На входе и выходе оптронов с прямой оптической связью есть электрические сигналы, а связь входа с выходом осуществляется световыми сигналами. Цепь излучателя является управляющей, а цепь фотоприемника — управляемой. Конструктивно в оптронах такого вида излучатель и приемник излучения помещаются в корпус и заливаются оптически прозрачным клеем (см. рис. 8.43). Однако оптроны, выполненные в миниатюрных гибридных микросхемах, могут не иметь корпуса, т.е. быть бескорпусными. Особую конструкцию имеют оптопары с открытым оптическим каналом. В таких оптронах между излучателем и фотоприемником имеется воздушный зазор (см. рис. 8.43, *б*), в котором может перемещаться светонепроницаемая преграда, например перфолента с отверстиями, с помощью которой можно управлять световым потоком. В другом варианте оптрона с открытым оптическим каналом световой поток излучателя попадает в фотоприемник, отражаясь от какого-либо внешнего объекта (рис. 8.43, *в*).

Один из вариантов конструкции оптрона с оптической связью показан на рис. 8.45. В состав его входят инжекционный светодиод *2*, световод из селенового стекла *3* с контактным слоем и фотодиодный приемник *5*. В конструкции видны омические контакты *1* для создания внешних соединений.

Источником излучения в оптронах служит светодиод. Оптический канал, связывающий между собой излучатель света и фотоприемник, должен обеспечивать максимальный уровень электрической изоляции между излучателем и фотоприемником и обладать максимальной оптической прозрачностью для оптического излучения светодиода в излучаемом спектре волн. Используются три основных варианта передающей среды канала — воздушный или газовый промежуток,

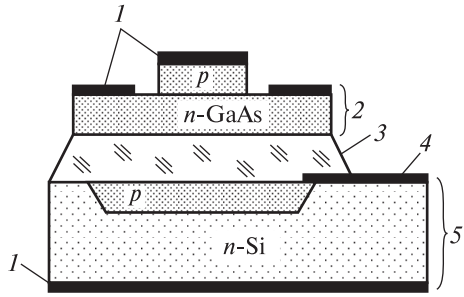



Рис. 8.45. Конструкция простейшего оптрона

различные согласующие среды (полимерные оптические лаки, стекло и др., из которых изготовлены линзы) и волоконные световоды (стекловолокно).

Волоконный световод представляет собой нить, изготовленную из расплава различных стекол. Световой луч поступает в торец световода и после многократного полного отражения от боковых стенок нити выходит с другого конца световода с незначительным затуханием. При использовании волоконного световода фотоприемник можно разместить на значительном расстоянии от излучателя, обеспечив высокую электрическую изоляцию световода от фотоприемника.

В качестве фотоприемников используются фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры.

Рассмотрим различные типы оптопар, отличающиеся друг от друга фотоприемниками.

*Резисторные оптопары* имеют в качестве излучателя сверхминиатюрную лампочку накаливания или светодиод, излучающий видимое или инфракрасное излучение. Приемником излучения служит фоторезистор из селенида кадмия или сульфида свинца. Фоторезистор может работать как на постоянном, так и на переменном напряжении. Для хорошей работы оптопары необходимо согласовать излучатель и фоторезистор по спектральным характеристикам. На рис. 8.46, *а*, представлена схема включения резисторной оптопары (светодиод и фоторезистор), в которой выходная цепь питается от источника постоянного или переменного напряжения ($U$) и имеет нагрузку $R_н$. Напряжение управления $U_{упр}$, подаваемое на светодиод, управляет током в нагрузке. Цепь управления (цепь излучателя) хорошо изолирована от фоторезистора, который может быть включен в цепь относительно высокого напряжения 220 В.

*Диодные оптопары* (рис. 8.46, *б*) имеют обычно кремниевый фотодиод и инфракрасный арсенидо-галлиевый светодиод. Фотодиод может работать в фотогенераторном режиме, создавая фотоЭДС до 0,5—0,8 В, или в фотодиодном режиме. Диоды изготавливаются по планарно-эпитаксиальной технологии. Для повышения быстродействия применяют фотодиоды типа *p-i-n*. Разновидностью диодных оптопар являются оптопары, в которых фотоприемником служит фотоварикап (рис. 8.46, *в*).

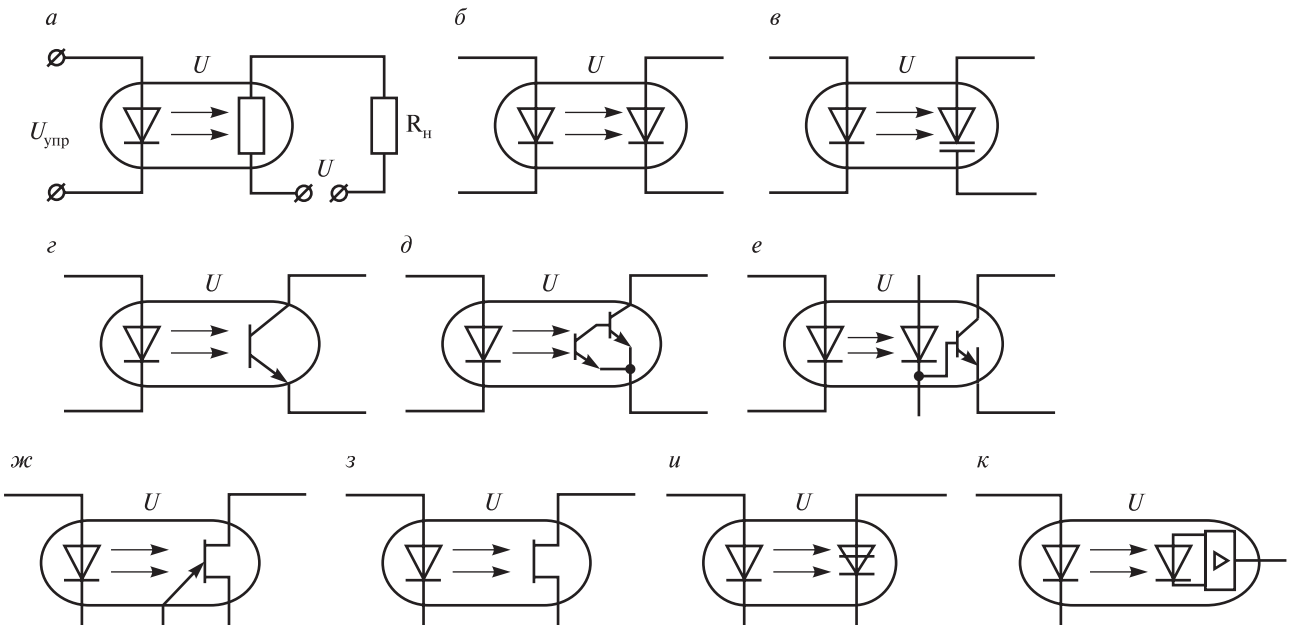



Рис. 8.46. Условное графическое обозначение оптопар:
*а* — резисторная; *б* — диодная; *в* — диодная (варикап); *г* — транзисторная (биполярный); *д* — транзисторная (составной транзистор); *е* — транзисторная с диодом; *ж* — транзисторная (составной транзистор); *з* — транзисторная (полевой транзистор); *е* — тиристорная; *и* — диодная оптопара с усилителем

*Транзисторные оптопары* (рис. 8.46, *г*) имеют обычно в качестве излучателя арсенидо-галлиевый светодиод, а приемником излучения служит биполярный кремниевый фототранзистор типа *n-p-n*. Для повышения чувствительности в транзисторной оптопаре можно использовать составной транзистор (рис. 8.46, *д*) или фотодиод с транзистором (рис. 8.46, *е*). Разновидностью транзисторных оптопар являются оптопары с однопереходным фототранзистором (рис. 8.46, *ж*) и с полевым фототранзистором (рис. 8.46, *з*).

*Тиристорные оптопары* в качестве фотоприемников имеют кремниевый фототиристор (рис. 8.46, *е*).

В настоящее время оптроны выпускаются и в интегральном исполнении, в состав которых входят устройства для обработки сигналов, получаемых от фотоприемников. В качестве устройства обработки сигнала используются также усилитель, выполненный в одном технологическом цикле и на одном кристалле с излучателем и фотоприемником. Такое структурное соединение позволяет уменьшить размеры схемотехнического решения, повысить надежность и улучшить характеристики оптопары. Пример условного графического обозначения оптопары с усилителем показан на рис. 8.46, *и*.

Свойства оптрона определяются входной, передаточной и выходной характеристиками. Входной характеристикой оптрона служит вольт-амперная характеристика его светодиода, выходной — соответствующая характеристика его фотоприемника при заданном токе на входе оптрона. Передаточная характеристика показывает зависимость выходного тока от входного $I_{вых} = \varphi(I_{вх})$. Эта характеристика в общем случае нелинейна, но имеет небольшой участок, близкий к линейному.

Оптроны имеют следующие основные параметры: коэффициент передачи тока $K_i = I_2/I_1$, представляющий собой отношение тока приемника $I_2$ к току излучателя $I_1$; быстродействие, определяемое частотой $f_{гр}$ и временем нарастания и спада выходного сигнала до уровня 50 % его амплитуды; сопротивление изоляции $R_{из}$; проходная емкость.

Важнейшими достоинствами оптронов являются их следующие свойства:

1. Отсутствие электрической связи между входом и выходом и обратной связи между фотоприемником и излучателем. Сопротив-

ление изоляции между входом и выходом может достигать $10^{12}$—$10^{14}$ Ом, а проходная емкость не превышает 2 пФ и в некоторых оптронах снижается до долей пикофарад.

2. Широкая полоса частот колебаний, пропускаемых оптроном. Возможность передачи сигналов с частотой от нуля до $10^{13}$—$10^{14}$ Гц.

3. Возможность управления выходными сигналами путем воздействия на оптическую часть прибора.

4. Высокая помехозащищенность оптического канала, т.е. его невосприимчивость к воздействию внешних электромагнитных полей.

5. Возможность совмещения оптронов в любых электронных устройствах с другими полупроводниковыми и микроэлектронными приборами.

К недостаткам оптронов следует отнести: значительную потребляемую мощность из-за двойного преобразования; высокий уровень собственных шумов; сильное влияние температуры и радиации на свойства оптронов; заметное старение, т.е. ухудшение параметров с течением времени; сложность технологии.

Все рассмотренные недостатки постепенно устраняются в процессе развития оптронной техники.

Оптроны являются перспективными устройствами в области связи, вычислительной техники, автоматики на железнодорожном транспорте при создании новых схемных решений, где требуется полная гальваническая развязка входной и выходной цепи.

### *8.6.2. Условное обозначение оптронов*

Основой системы обозначений оптронов, так же как и всех полупроводниковых приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 8.46.

Графическое обозначение оптронов содержит:

– общее обозначение — базовых символов светодиода (излучателя световой энергии) и фотоприемника (фотодиода, фототранзистора, фототиристора);

– дополнительные обозначения, как отличительные особенности оптронов — овал с шириной $h = 10$ или 12 мм и длиной $L = 20$ или 24 мм, который указывает на то, что конструкция оптрона помещена в корпус; две стрелки от символа светодиода к фотоприемнику, указывающие, что действие прибора основано на светоизлучении.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения оптрона (маркировку), классифицирующий оптроны по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: U1, где U — оптрон (оптопара), 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Промышленность выпускает несколько типов оптронов, которые имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий оптроны по определенным признакам в справочниках и состоящий из следующих элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81:

*первый элемент* — буква или цифра, обозначающие материал, на основе которого изготовлен прибор (Г или 1 — германий и его соединения, К или 2 — кремний и его соединения, А или 3 — арсенид галлия и его соединения, И или 4 — индий и его соединения);

*второй элемент* — буква, обозначающая подкласс прибора: О — оптопары;

*третий элемент* — цифра, определяющая основные функциональные возможности прибора (подкласс): подкласс О — оптопары (Р — резисторная, Д — диодная, У — тиристорная, Т — транзисторная);

*четвертый элемент* — число, обозначающее порядковый номер разработки от 01 до 99 или от 101 до 999;

*пятый элемент* — буква, условно определяющая классификацию (разработку по параметрам) приборов, изготовленных по единой технологии;

*дополнительный элемент* — особенности конструкции (виды выводов, сборки и т.д.).

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* АОД109А: А — арсенид-галлиевая основа; О — оптопара, Д —

диодная, 109 — номер разработки, А — технологическая группа разработки.

## 8.7. Электровакуумные фотоэлектронные приборы

### *8.7.1. Фотоэлектронная эмиссия и фотоэффект*

Принцип действия электровакуумных фотоэлектронных приборов основан на создании фотоэлектронной эмиссии за счет лучистой энергии света, падающей на фотокатод.

Фотоэлектронная эмиссия, называемая иначе внешним фотоэффектом, представляет собой электронную эмиссию под действием электромагнитного излучения. Эмитирующий электрод при этом называют фотоэлектронным катодом (фотокатодом), а испускаемые им электроны — фотоэлектронами.

Сам процесс выхода электрона из вещества во внешнюю среду под действием света составляет фотоэлектронную эмиссию. Начало изучения фотоэлектронной эмиссии относится к 1886 г., когда немецкий ученый Г. Герц заметил, что напряжение для возникновения электрического разряда между электродами снижается, если осветить один из этих электродов. Детальное исследование этого явления провел в 1888 г. русский физик А.Г. Столетов, открывший существование фототока и установивший, что число свободных электронов $n$, эмитируемых катодом, пропорционально световому потоку, облучающему катод:

$$I_{\Phi} = ne = K\Phi,$$

где $I_{\Phi}$ — фототок, мкА; $n$ — число электронов; $e$ — заряд электрона, Кл; $K$ — коэффициент пропорциональности; Ф — световой поток, лм (интегральная чувствительность катода, мкА/лм).

Согласно закону А. Эйнштейна кинетическая энергия эмитированных электронов $W_0$ зависит от частоты световых колебаний $\nu$ и не зависит от интенсивности светового потока:

$$W_0 = h\nu,$$

где $h = 6{,}63 \cdot 10^{34}$ Дж·с — постоянная Планка.

Таким образом, излучение можно рассматривать как поток частиц — фотонов, обладающих энергией $h\nu$. Эти два закона являются основными законами фотоэлектронной эмиссии.

Теоретическое обоснование этих законов впоследствии было дано на основании квантовой теории света, согласно которой все тела поглощают и излучают световую энергию отдельными порциями — квантами (фотонами).

Отсюда можно сделать вывод о том, что энергия кванта света, попадая на поверхность металла, поглощается электроном. За счет этой энергии электрон совершает работу выхода и приобретает кинетическую энергию $W_0$, соответствующую начальной скорости электрона:

$$W_0 = h\nu = mU^2/2,$$

где $m$ — масса электрона; $U$ — скорость электрона.

### *8.7.2. Электровакуумные фотоэлементы*

Электровакуумным фотоэлементом называют электронный прибор с фотоэлектрическим катодом. Различают высоковакуумные и ионные фотоэлементы. В последних баллоны заполнены инертным газом.

Простейший электронный фотоэлемент представляет собой стеклянный баллон и два электрода (рис. 8.47). Фотокатод — тонкий слой светочувствительного вещества, нанесенный на внутреннюю поверхность баллона (занимает половину поверхности баллона, а остальная часть поверхности баллона остается прозрачной и служит окном, через которое свет попадает на фотокатод) или на специальную пластину баллона. Анод имеет форму кольца, сетки или диска. Такое устройство анода меньше препятствует прохождению световых лучей на фотокатод. Электроды имеют выводы на баллоне и на цоколе лампы. Катоды выполняются из светочувствительных щелочных и щелочно-земельных металлов.

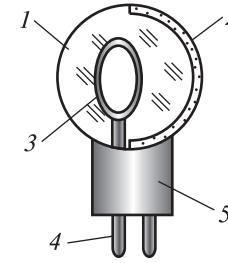



Рис. 8.47. Устройство электронного фотоэлемента: *1* — стеклянный баллона; *2* — фотокатод на стекле баллона; *3* — анод в виде кольца; *4* — выводы; *5* — цоколь

Для ультрафиолетового спектра используют чисто металлические фотокатоды. Наибольшее применение получили кислородно-серебряно-цезиевые и сурьмяно-цезиевые фотокатоды. Анод изготавливается из никеля. В ионных фотоэлементах бал-

лон после откачки воздуха заполняют аргоном при низком давлении, а в электронных фотоэлементах создается высокий вакуум.

### *8.7.3. Условное обозначение электровакуумного фотоэлемента*

Основой системы обозначений фотоэлементов, так же как и всех электровакуумных приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 8.48.

Графическое обозначение электровакуумного фотоэлемента содержит:

– общее обозначение — базовый символ баллона (корпуса) в виде окружности диаметром $D = 10$ или 12 мм, или овала шириной $h = 10$ или 12 мм и длиной $L = 20$ или 24 мм; внутри баллона показаны катод и анод в виде отрезка $h = 8$—10 мм (плоская конструкция), окружности $D = 2$—3 мм (точечная конструкция), дуги $D = 8$—10 мм на 1/4 длины окружности баллона (конструкция нанесена на баллон);

– дополнительные обозначения, как отличительные особенности электровакуумного фотоэлемента, — две стрелки от символа баллона с левой стороны под углом 45°, указывающие, что действие прибора основано на фотоэлектрическом эффекте; точка внутри баллона обозначают газонаполненный фотоэлемент.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения электровакуумного фотоэлемента (маркировку), классифицирующий электровакуумные фотоэлементы по определенным признакам в справочниках.

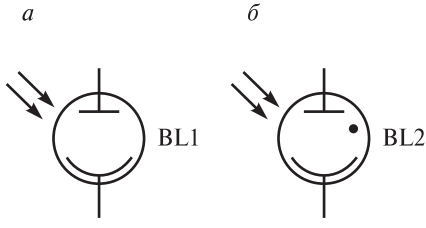



Рис. 8.48. Условное обозначение фотоэлементов:
*а* — вакуумного; *б* — газонаполненного

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: BL1, где BL — фотоэлемент, 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Промышленность выпускает несколько типов электровакуумных фотоэлементов, которые имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий электровакуумные фотоэлементы по определенным признакам в справочниках и состоящий из следующих элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81:

*первый элемент* — буква, обозначающая материал, на основе которого изготовлен фотокатод прибора (Ц — кислородно-серебряно-цезиевый фотокатод, изготовленный на внутренней поверхности баллона, СЦ — сурьмяно-цезиевый фотокатод, изготовленный на внутренней поверхности баллона, Ф — сурьмяно-цезиевый фотокатод, изготовленный на металлической подкладке, расположенной на внутренней поверхности баллона);

*второй элемент* — буква, обозначающая состав среды внутри баллона (В — вакуум, Г — газовая среда);

*третий элемент* — цифра, обозначающая порядковый номер разработки прибора 1 до 9.

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* СЦВ-3: СЦ — сурьмяно-цезиевый фотокатод, В — баллон заполнен вакуумом, 3 — номер разработки.

Схема включения электровакуумного фотоэлемента представлена на рис. 8.49. Под действием светового потока Ф из фотокатода выбиваются электроны (внешний фотоэффект), которые попадают в ускоряющее поле анодного напряжения внешнего источника ($U_а$) и, достигая его, рекомбинируются с положительными ионами, поступающими от источника внешнего напряжения. В результате создается замкнутый процесс движения электронов от катода к аноду, т.е. во внешней цепи течет фототок $I_Ф$, пропорциональный световому потоку. При изменении светового потока изменяется ток во внешней цепи, следовательно, изменяется и падение напряжения на резисторе нагрузки $R_н$. Таким образом, с помощью фотоэлемента световой поток осуществляет управление выходным напряжением ($U_{вых}$).

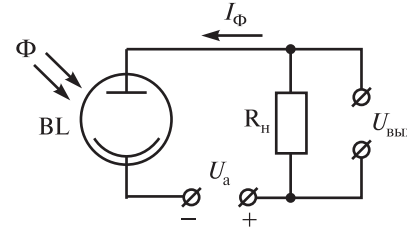



Рис. 8.49. Схема включения электронного фотоэлеэмента

Основными характеристиками, определяющими свойства фотоэлемента, являются: вольт-амперная, световая (энергетическая) и частотная.

Вольт-амперная характеристика электронного фотоэлемента (рис. 8.50, *а*) — это зависимость фототока ($I_Ф$) от анодного напряжения ($U_а$) при постоянном световом потоке (Ф)

$$I_Ф = \varphi(U_а) \text{ при } Ф = \text{const}.$$

На начальном участке при небольших значениях $U_а$ не все электроны, эмитированные катодом, попадают на анод, поэтому ток растет незначительно. У поверхности катода накапливают электроны и возникает отрицательный объемный заряд, который тормозит электронный поток.

Явление тормозящего поля можно объяснить на основе закона Кулона. При освещении катода с его поверхности вылетают электроны с энергией, равной энергии фотона (кванта света). Электроны скапливаются вокруг катода, так как не обладают достаточной энергией для перемещения к аноду из-за малого значения напряжения $U_а$, и образуют облако отрицательного объемного заряда. Катод при отсутствии освещения остается электрически нейтральным, но при эмитировании электронов становится положительно заряженным. Таким образом, между катодом и облаком отрицательного заряда, имеющими разноименные заряды, создается сила взаимодействия, тормозящая движение электронов. Когда анодное напряжение $U_а$ создает силу, превышающую действие катода, электроны начнут

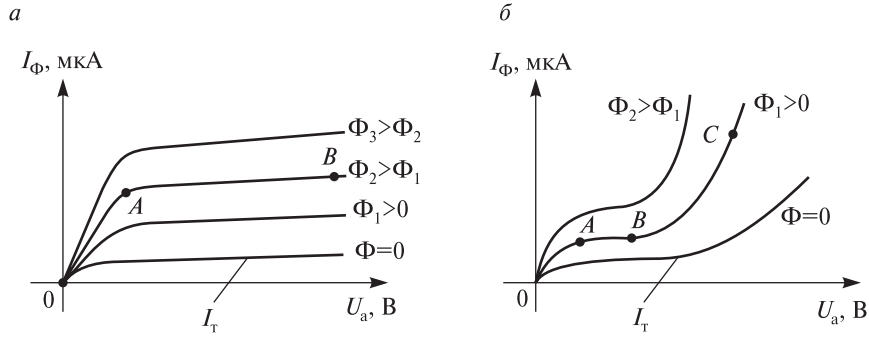



Рис. 8.50. Вольт-амперная характеристика фотоэлементов:
*а* — электронного; *б* — ионного (газонаполненного)

двигаться к аноду и создавать анодный ток. Сила анодного тока пропорциональна величине анодного напряжения (участок $0A$ на рис. 8.50, *а*).

По мере увеличения анодного напряжения объемный отрицательный заряд вокруг катода рассасывается и дальнейшее протекание фототока обусловлено равенством эмитированных электронов и электронов, достигших анода (пологий участок *AB*). Этот режим соответствует насыщению фотоэлемента. Ток насыщения определяется эмиссией фотокатода и поэтому он тем больше, чем больше световой поток Ф. Таким образом, рост анодного тока в режиме насыщения может быть достигнут только за счет увеличения светового потока Ф, т.е. фотоэмиссии катода. Рабочий режим электронного фотоэлемента обычно выбирают в области насыщения, где стабилен фототок при отклонениях анодного внешнего напряжения $U_a$.

Характеристика при $\Phi = 0$ приведена на графике в одной декартовой плоскости с характеристиками при $\Phi > 0$, но в более крупном масштабе напряжения, чем масштаб для характеристик при $\Phi > 0$, поскольку она показывает зависимость темнового тока, который очень мал по сравнению с фототоком, и действует в цепи при значительно больших напряжениях. Темновой ток представляет собой сумму термоэлектронного тока катода, возникающего за счет термоэлектронной эмиссии при повышении температуры выше нуля ($T > 0$ °С) и тока утечки по стеклу колбы. С ростом температуры темновой ток заметно растет, главным образом, за счет увеличения его термоэлектронной составляющей. Темновой ток электронных фотоэлементов обычно очень мал по сравнению с фототоком ($I_т = 10^{-8}—10^{-7}$ А) и его практически можно считать равным нулю.

Вакуумные фотоэлементы имеют небольшие фототоки, поэтому их необходимо усиливать.

Для повышения интегральной чувствительности фотоэлемента его баллон заполняют инертным газом при небольшом давлении. Такие фотоэлементы называются ионными. Вольт-амперные характеристики ионных фотоэлементов (рис. 8.50, *б*) на начальных участках изменяются так же, как и характеристики электронных фотоэлементов (участок *AB*), но при меньшем значении тока $I_Ф$. Это объясняется тем, что меньшее число электронов проходит от катода к аноду из-за наличия газовой среды, в которой электроны соударяются с ионами и тормозятся. При определенном напряже-

нии электроны приобретают уровень кинетической энергии, соответствующий возникновению процесса ионизации молекул газа. Вновь образованные электроны движутся к аноду, а положительно заряженные ионы перемещаются к катоду и за счет увеличения электронов фототок анода резко увеличивается (участок *BC*). Вольт-амперная характеристика ионных фотоэлементов по сравнению с аналогичной характеристикой вакуумных фотоэлементов имеет меньшую область насыщения (участок *AB* на рис. 8.50, *б*). Это связано с тем, что когда анодное напряжение становится достаточно большим, в ионном (газоразрядном) фотоэлементе возникает ударная ионизация газа (несамостоятельный газовый разряд) и при дальнейшем увеличении анодного напряжения ток резко возрастает, следовательно, чувствительность фотоэлемента также возрастает. Чем выше анодное напряжение, тем больше анодный ток и тем выше чувствительность фотоэлемента. Однако нельзя увеличивать анодное напряжение до возникновения тлеющего разряда, который может привести к потере управления и выходу из строя катода. Поэтому при работе ионных фотоэлектрических приборов нельзя допускать тлеющего разряда, т.е. работа прибора должна происходить в темном (невидимом) спектре излучения в процессе ионизации молекул газа.

Темновой ток вакуумных фотоэлементов значительно меньше, чем газонаполненных фотоэлементов. Темновой ток необходимо принимать во внимание особенно при измерении слабых световых потоков.

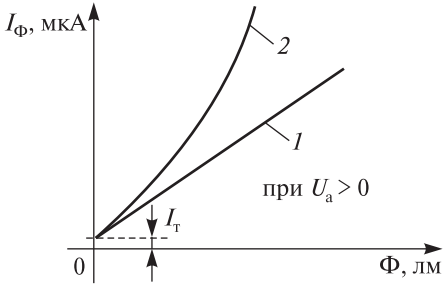



Рис. 8.51. Световая (энергетическая) характеристика фотоэлементов при одинаковом анодном напряжении

Световая характеристика фотоэлемента отражает прямую пропорциональную зависимость между световым потоком (Ф) и фототоком $I_Ф$ при постоянном анодном напряжении ($I_Ф$ = = φ(Ф) при $U_a$ = const). Ее наклон определяется коэффициентом $K$ в уравнении закона Столетова $I_Ф$ = КФ. Световые характеристики для электронного фотоэлемента *1* и ионного фотоэлемента *2* представлены

на рис. 8.51, снятые при одинаковом анодном напряжении $U_a$. Из характеристик видно, что сила фототока в ионном фотоэлементе значительно больше, чем в электронном фотоэлементе за счет ионизации газа. Световая характеристика электронного фотоэлемента практически линейна, в то время как для ионных фотоэлементов линейность характеристики наблюдается только при малых значениях светового потока. С возрастанием светового потока увеличивается количество соударений электронов с молекулами газа, что ведет к ударной ионизации, т.е. к возникновению дополнительных электронов и ионов в газовой среде и увеличению силы анодного тока.

Частотная характеристика фотоэлемента показывает зависимость чувствительности фотоэлемента от частоты изменения интенсивности светового потока, облучающего светодиод $K/K_{max} = \varphi(f)$. На рис. 8.52 приведены для сравнения частотные характеристики электронного (*1*) и ионного (*2*) фотоэлементов. Чувствительность ионного фотоэлемента уменьшается при увеличении частоты за счет инерционности процессов ионизации и рекомбинации при газовом разряде, что связано с малой подвижностью ионов. Характеристика электронного фотоэлемента остается линейной вплоть до частоты $10^9$ Гц. Снижение чувствительности в области частот свыше $10^9$ Гц объясняется влиянием времени пролета электронов при очень больших частотах изменения интенсивности светового потока.

Спектральная характеристика фотоэлементов определяет зависимость фототока от длины волны излучения при неизменной силе светового потока $I_Ф = \varphi(\lambda)$ при $Ф = \text{const}$. Если сопоставить спектральную активность источника излучения со спектральной характеристикой фотоэлемента, можно судить о том, какая часть светового потока источника используется полезно в данном фотоэлементе как преобразователе лучистой энергии в электрическую. Спектральные характеристики зависят также и от вида материала, из которого изготовлен

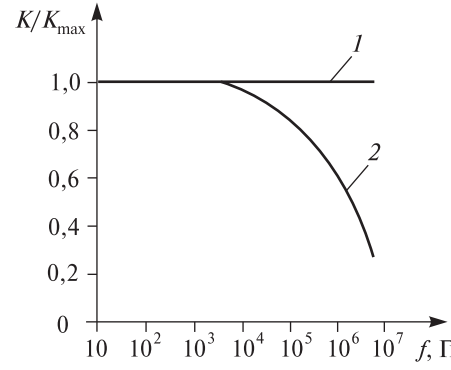



Рис. 8.52. Частотная характеристика фотоэлементов

фотокатод. На рис. 8.53 показаны спектральные характеристики фотоэлементов с сурьмяно-цезиевым (*1*) и кислородно-цезиевым (*2*) фотокатодом. Для вакуумного фотоэлемента с сурьмяно-цезиевым фотокатодом максимум фототока находится на границе между видимой и ультрафиолетовой областям спектра, а для фотоэлемента с кислородно-цезиевым фотокатодом имеется два максимума — в инфракрасном и ультрафиолетовом спектрах излучения.

### *8.7.4. Основные параметры фотоэлементов*

Основными параметрами вакуумных и газонаполненных фотоэлементов являются чувствительность, темновой ток, максимально допустимое анодное напряжение, термостойкость, стабильность фотокатодов и утомляемость.

1. *Чувствительность.* Для фотоэлементов определяют интегральную и спектральную чувствительность. Интегральная чувствительность (мкА/лм) равна отношению анодного тока (фототока) $I_A(I_Ф)$ в режиме насыщения к величине падающего светового потока Ф эталонного источника излучения $K_Ф = I_Ф/Ф$. Коэффициент $K_Ф$ характеризует способность фотоэлемента реагировать на воздействие светового потока, содержащего световые колебания различных длин волн (от ультрафиолетового до инфракрасных).

Спектральной чувствительностью фотоэлемента называется чувствительность его к монохроматическому излучению определенной

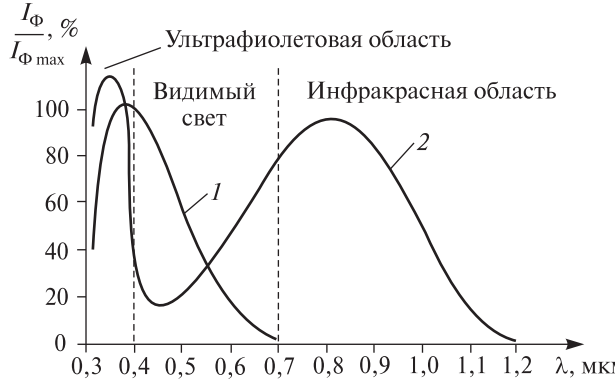



Рис. 8.53. Спектральные характеристики вакуумного и ионного фотоэлементов

длины волны λ. Спектральная чувствительность показывает значение тока, протекающего в цепи фотоэлемента, при облучении заданной длиной волны λ световым потоком в 1 лм и измеряется в мкА/лм. Таким образом, спектральная чувствительность равна отношению фототока $I_Ф$ в режиме насыщения к световому потоку монохроматического излучения $Ф_λ$, т.е. потоку определенной длины волны λ и определяется по формуле $K_{Фλ}=I_Ф/Ф_λ$.

2. *Темновой ток* — ток в фотоэлементе, включенном в цепь питания при полном затемнении (Ф = 0). Темновой ток состоит из тока термоэлектронной эмиссии катода и тока утечки по стеклу колбы при отсутствии освещения (Ф = 0).

3. *Максимально допустимое анодное напряжение* (В) — $U_{а\ доп}$.

4. *Термостойкость* — величина, определяющая диапазон рабочих температур (обычно от +50 до 20 °С).

5. *Стабильность фотокатодов* — свойство сохранять постоянство параметров фотокатода во времени. Зависит в основном только от материала, из которого изготовлен фотокатод. Наибольшее применение получили кислородно-серебряно-цинковые и сурьмяно-цезиевые фотокатоды как наиболее долговечные.

6. *Утомляемость* — уменьшение чувствительности при резком увеличении освещенности фотокатода. Проявляется в том, что при большом световом потоке чувствительность фотоэлементов резко уменьшается во времени, доходя иногда до 25 % первоначальной величины. Если такой фотоэлемент поместить на некоторое время в темноту, то его чувствительность восстанавливается почти до первоначального значения.

Электровакуумные и газонаполненные фотоэлементы применяются в различных устройствах автоматики, в аппаратуре звукового кино, в приборах для физических исследований. К их недостаткам относятся невозможность микроминиатюризации, довольно высокие анодные напряжения (десятки и сотни вольт) и малые токи фотоэмиссии. Для устранения последнего недостатка были разработаны фотоэлектронные умножители. В настоящие время фотоэлементы во многих видах аппаратуры заменены полупроводниковыми приемниками излучения.

## 8.8. Фотоэлектронные умножители

Малая интегральная чувствительность фотоэлементов не позволяет эффективно осуществлять регистрацию слабых потоков лучис-

той энергии без последующего усиления напряжения, получаемого на выходе фотоэлемента. Для этой цели применялись электронные усилители.

Внешние усилители не нужны для фотоприборов с внутренним усилением фотопотока, использующих явление вторичной эмиссии. Электровакуумный прибор, в котором фототок катода усиливается с помощью вторичной эмиссии дополнительных электронов с динодов, называется фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Фотоэлектронные умножители были созданы в 1934 г. советским ученым Л.А. Кубецким.

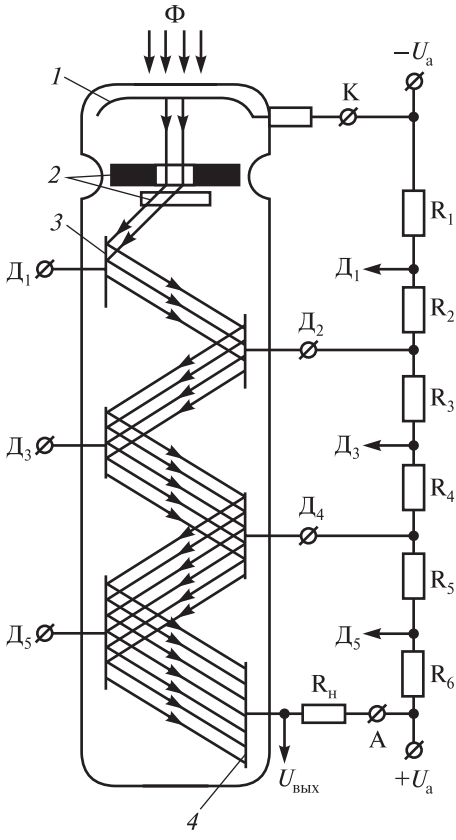



Рис. 8.54. Устройство, схема включения и работа многоступенчатого фотоэлектронного умножителя (ФЭУ):
*1* — фотокатод; *2* — фокусирующая система; *3* — диноды; *4* — анод

В зависимости от назначения и предъявляемых требований используют одно- и многоступенчатые ФЭУ.

Одноступенчатые ФЭУ имеют однократное усиление и служат для сравнительно небольшого усиления фототока. По конструкции одноступенчатые ФЭУ аналогичны вакуумным фотоэлементам и имеют фотокатод (в котором возникает эмиссия электронов за счет энергии падающего на него света), анод и дополнительный электрод — эмиттер (или динод), создающий усиленный вторичный ток. Диноды имеют большой коэффициент вторичной эмиссии $\delta > 1$. Катод и динод наносятся на внутреннюю поверхность стекла колбы, а анодом служит никелиевое кольцо, расположенное перед последним динодом.

Для получения большого усиления тока в конструкции ФЭУ имеется несколько динодов (многоступенчатая конструкция ФЭУ). Многоступенчатые ФЭУ имеют, кроме катода, анода и умножительной системы динодов, фокусирующую электронно-оптическую систему ФС (рис. 8.54, *а*). Таким образом, фотоумножители состоят из двух конструктивных частей — электронно-оптической системы входной камеры и динодной системы.

Входная камера содержит фотокатод, который выполнен в виде полупрозрачного слоя, нанесенного на стекло колбы, и ряда электродов (электронно-оптическую систему), обеспечивающих фокусировку потока электронов в направлении первого динода. Пример конструктивного выполнения входных камер показан на рис. 8.55, которые могут быть с кососрезанным цилиндром (рис. 8.55, *а*) и с цилиндрической фокусировкой (рис. 8.55, *б*). Фокусировка потока фотоэлектронов в камере с кососрезанным цилиндром осуществляется с помощью кососрезанного цилиндра, укрепленного на диафрагме. В камере с цилиндрическими фокусирующими электродами фокусировка осуществляется с помощью линз, образованных цилиндрическими электродами, расположенными между фотокатодом и диафрагмой.

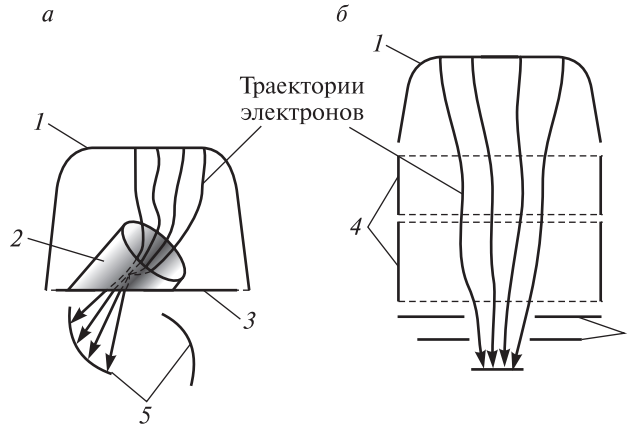



Рис. 8.55. Входные камеры фотоэлектронных умножителей:
*а* — с кососрезанным цилиндром; *б* — с цилиндрическими фокусирующими электродами; *1* — фотокатод; *2* — кососрезанный цилиндр; *3* — диафрагма; *4* — электроды электронно-оптической системы; *5* — динод

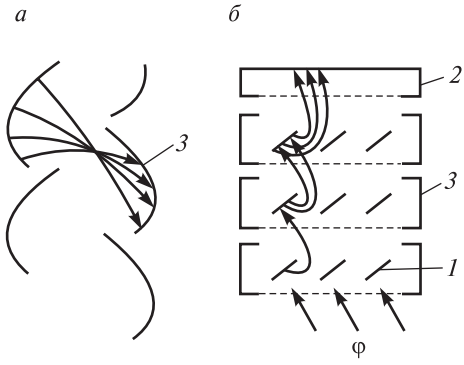



Рис. 8.56. Динодные системы фотоэлектронных умножителей:
*а* — с ковшеобразными динодами; *б* — сквозного действия; *1* — фотокатод; *2* — анод; *3* — диноды

Динодные системы весьма разнообразны по конструкции. Различают системы с электростатической фокусировкой, системы «сквозного» типа и системы с дополнительными электродами. Одним из вариантов динодной системы «сквозного» типа является конструкция с ковшеобразными динодами (рис. 8.56, *а*). Система сквозного действия изображена на рис. 8.56, *б*. Диноды в такой конструкции расположены в виде жалюзи. Вторичные электроны устремляются в последующую ступень через щели между динодами. Число динодов может быть от 10 до 14. Конструкция динодов представляет собой никелиевую пластинку, покрытую кислородно-цезиевым или сурмяно-цезиевым слоем.

Для создания ускоряющего поля между динодом, катодом и анодом включено напряжение через делитель напряжения (схема включения показана на рис. 8.54). На каждый последующий динод с делителя напряжения подается положительный потенциал больше, чем на предыдущий, в результате создается ускоряющая разность потенциалов между электродами.

Световой поток, попадая на полупрозрачный фотокатод, выбивает из фотокатода электроны (внешний фотоэффект), вызывая фотоэмиссию электронов, пропорциональную падающему световому потоку. Поток первичных электронов с фотокатода, сфокусированный электронной системой (ФС), под действием приложенного с делителя напряжения попадает на динод $Д_1$ и выбивает с него вторичный поток электронов. Вторичные электроны с динода $Д_1$ ускоряются еще большим потенциалом динода $Д_2$ и попадают на него, вызывая новый поток вторичных электронов. Этот процесс повторяется на всех последующих динодах. С последнего динода усиленный поток электронов поступает на анод, создавая анодный

ток $I_A$. Так как каждый последующий динод имеет более высокий потенциал, чем предыдущий, а анод — самый высокий, число электронов, летящих к аноду, непрерывно увеличивается и ток анода становится во много раз больше тока фотокатода (в $10^6$ и более раз). Это позволяет измерять очень малые световые потоки (вплоть до $10^{-5}$ лм). Абсолютное значение выходного тока фотоумножителя не может превышать 1—2 мА из-за возможной перегрузки, приводящей к переутомлению и разрушению эмиссионной поверхности ближайших к аноду динодов. Выходной ток зависит от анодного напряжения. Поскольку на каждом следующем диноде напряжение выше, чем на предыдущем, то анодное напряжение должно быть высоким (до 1—2 кВ), что является недостатком ФЭУ.

Световые, вольт-амперные и спектральные характеристики ФЭУ аналогичны характеристикам фотоэлементов.

Основными параметрами ФЭУ являются: световая анодная чувствительность (отношение анодного фототока к вызывающему его световому потоку при номинальных потенциалах динодов), спектральная чувствительность (диапазон длин волн), в которой можно применять данный ФЭУ, усиление динодной системы, темновой ток.

В полупроводниковой электронике нет пока приборов, заменяющих ФЭУ. Поэтому в настоящее время ФЭУ применяются во многих областях науки и техники — в астрономии, фототелеграфии и телевидении, оптической аппаратуре, измерительных устройствах.

### *Условное обозначение фотоэлектронного умножителя*

Основой системы обозначений фотоэлектронного умножителя, так же как и всех электровакуумных приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение используется для создания графических решений электрических схем и представлено на рис. 8.57.

Графическое обозначение фотоэлектронного умножителя содержит:

– общее обозначение — базовый символ баллона (корпуса) в виде овала с шириной $h = 10$ или 12 мм и длиной $L = 20$ или 24 мм; внутри баллона показаны: анод в виде отрезка $L = 8$—10 мм; фотокатод в виде дуги диаметром $D = 8$—10 мм на 1/4 длины окружности баллона (конструкция нанесена на баллон); диноды в виде отрезков

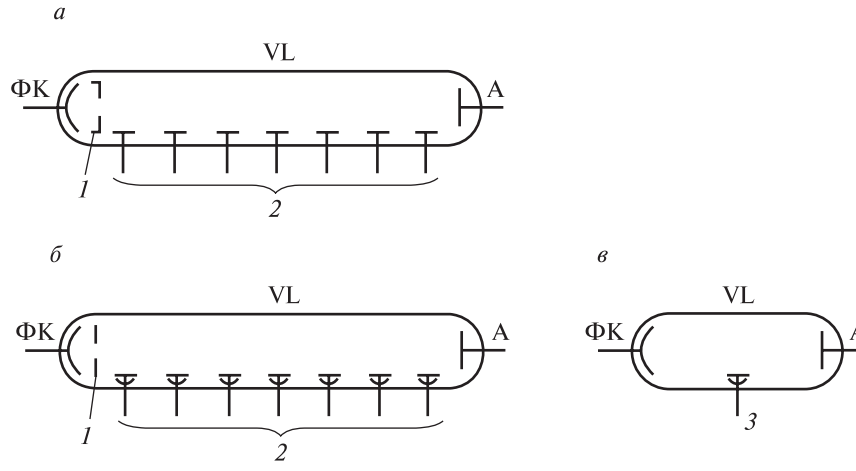



Рис. 8.57. Условное обозначение фотоэлектронных умножителей: *а*, *б* — многоступенчатые ФЭУ; *в* — одноступенчатый ФЭУ; *1* — фокусирующее устройство (ФЭ), модулятор (М) или диафрагма (Дф); ФК — фотокатод; *2* — динодная система сквозного действия с динодами в виде жалюзи; *3* — динодная система с ковшеобразными динодами

длиной $L = 6—8$ мм — для динодной системы «сквозного» действия, а также отрезок, под которым расположена дуга диаметром $D = 4—6$ мм — для динодной системы с ковшеобразными динодами; фокусирующая система, диафрагма или модулятор в виде двух штрихов длиной $L = 6—8$ мм; для фокусирующей системы предусмотрено также обозначение в виде двух Г-образных фигур;

– дополнительные обозначения, как отличительные особенности фотоэлектронного умножителя — две стрелки к символу баллона в сторону фотокатода под углом 45°, указывающие, что действие прибора основано на фотоэлектрическом эффекте.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения фотоэлектронного умножителя (маркировку), классифицирующий фотоэлектронный умножитель по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: VL1, где VL — прибор электровакуумный, 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Промышленность выпускает несколько типов фотоэлектронных умножителей, которые имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий фотоэлектронные умножители по определенным признакам в справочниках и состоящий из следующих элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81:

*первый элемент* — буквы, обозначающие наименование прибора ФЭУ — фотоэлектронный умножитель;

*второй элемент* — число, обозначающее порядковый номер разработки прибора 1 до 199;

*третий элемент* — буква, указывающая область применения (А — для телевизионной аппаратуры, Б — для сцинтилляционных счетчиков, В — для фототелеграфии, без буквенного обозначения — для сцинтилляционных спектрометров).

*Пример обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* ФЭУ-17А: ФЭУ — фотоэлектронный умножитель; 17 — порядковый номер разработки; А — фотоэлектронный умножитель, применяемый в телеметрической аппаратуре для астрофизических целей в спектрофотометрах.

## 8.9. Приборы отображения информации

### *8.9.1. Общие сведения*

Развитие современных информационных систем привело к разработке приборов визуального отображения информации. Эти приборы применяются в системах, где информацию требуется представить в форме удобной для визуального восприятия. Их основными компонентами служат элементы, обеспечивающие преобразование электрических сигналов в пространственное распределение яркости излучения или в распределение степени пропускания светового излучения. С помощью этих приборов из электрических сигналов получают видимое изображение букв различных алфавитов, цифр, геометрических фигур (в том числе и объемных), различных знаков, сплошных или дискретных полос (длина которых однозначно зависит от входного сигнала), мнемосхем и пр.

Преобразовательные приборы данной группы создаются на основе активных излучающих компонентов — электролюминесцентных, газонаполненных или накопительных, электронно-лучевых трубок,

в которых излучающие элементы выполнены в виде фигур или сегментов или образуют матричное поле, а также пассивных компонентов, моделирующих световой поток, — жидкокристаллических, в которых пропускание или отражение света различными участками поверхности зависит от напряженности электрического поля.

В зависимости от способа преобразования сигналов в видимое изображение приборы отображения информации могут быть электронно-лучевыми, электровакуумными катодолюминесцентными, газоразрядными и твердотельными — полупроводниковыми, к которым относят приборы, изготовленные на основе светоизлучающих диодов, жидкокристаллический прибор отображения информации, электролюминесцентный прибор отображения информации, электрохромный индикатор и др.

Приборы отображения информации выполняются на основе элементов индикации, непосредственно преобразующих электрические сигналы в визуальную информацию. Эти приборы относятся к одному из классов электроосветительных приборов.

По виду рабочей среды приборы отображения информации подразделяются на электровакуумные, газоразрядные, полупроводниковые и жидкокристаллические.

По форме представления сигнала приборы отображения информации подразделяются на:

1. Светосигнальные, отображающие сигнал свечением индикатора.

2. Цветосигнальные, отображающие каждый сигнал отдельным цветом свечения индикатора.

3. Знаковые, отображающие каждый сигнал буквой, цифрой или определенным символом. Имеются знаковые приборы отображения информации, где буквы, цифры и символы отображаются совокупностью отдельных элементов (знаков) и называются знакосинтезирущими индикаторами (приборами) отображения информации. Знакосинтезирующие индикаторы (ЗСИ) подразделяются на сегментные (мозаичные) и матричные приборы.

4. Экранные, представляющие принятую за определенный интервал времени совокупность сигналов в виде черно-белого или цветного изображения.

5. Шкальные, которые отображают поступивший сигнал местоположением светового пятна или границы светящейся линии.

Элементы индикации (отображения информации) различаются по физическим явлениям, используемым для получения изображения. В элементах индикации применяются следующие физические явления:

1) свечение нити накала при протекании тока (накальные индикаторы);

2) свечение некоторых кристаллических веществ под действием электрического поля (электролюминесцентные индикаторы);

3) свечение люминофорного покрытия или бомбардировка электронами (вакуумно-люминесцентные индикаторы и электронно-лучевые приборы);

4) свечение газа при электрическом разряде (газоразрядные индикаторы);

5) излучение квантов света при рекомбинации носителей заряда в кристаллических веществах (полупроводниковые светодиоды);

6) изменение оптических свойств вещества под действием электрического поля (жидкокристаллические индикаторы).

### *8.9.2. Электровакуумные приборы*

Электровакуумные приборы отображения информации подразделяются на электронно-световые, катодолюминесцентные и накаливаемые.

*Электронно-световой индикатор (электронный индикатор настройки)* — электровакуумный прибор, предназначенный для визуального определения (индикации) уровня электрического сигнала в цепях путем изменения ширины затемненного сектора экрана в зависимости от управляющего сигнала в электрической цепи. Электронно-световой индикатор — активный комбинационный прибор, конструктивно представляющий собой сочетание усилительного триода и индикаторной системы (рис. 8.58, *а*), смонтированных в одном баллоне. Управляющее устройство в виде усилительного триода усиливает поступающие электрические сигналы, а индикаторное — высвечивает определенные фигуры. Принцип действия индикаторного устройства основан на свечении люминофорного покрытия при бомбардировке его электронами.

Усиленный триод содержит катод К, сетку С и анод А. Индикаторная часть включает в себя тот же катод, световой экран Э и управляющий электрод УЭ, расположенный между ними и соединенный с

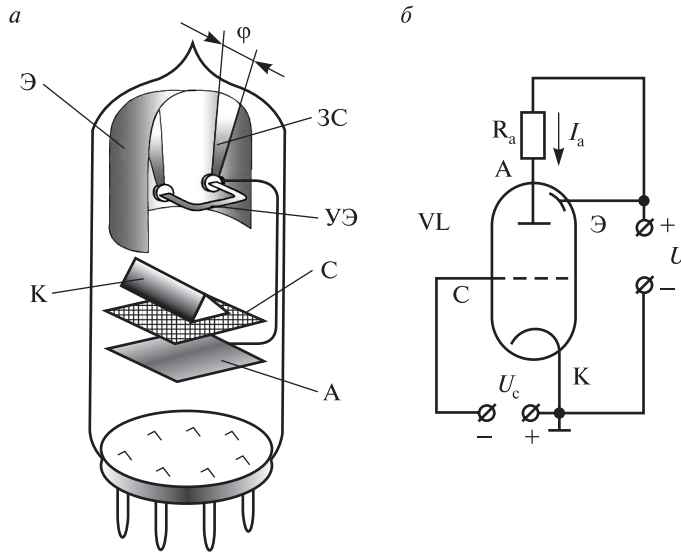



Рис. 8.58. Электронно-световой индикатор:
*а* — конструкция; *б* — схема включения

анодом. Таким образом, катод является общим для усилительного триода и индикаторной части и представляет собой конструкцию в виде трехгранной призмы и направлен одной плоскостью к триодной части лампы, а двумя другими — в сторону ее индикаторной части. Экран внутри покрыт флуоресцирующим веществом, которое под действием электронного облучения (бомбардировки) дает зеленое свечение. Управляющий электрод выполнен в виде двух стоек и соединен с анодом триодной части. Экран относительно катода имеет положительный потенциал.

Схема включения электронно-светового индикатора приведена на рис. 8.58, *б*. При подаче напряжения $U_a$ с поверхности катода в результате электростатической электронной эмиссии вылетают электроны. Эмитированные электроны под действием электрического поля, созданного внешним источником $U_a$, движутся к экрану и бомбардируют его поверхность, совершая рекомбинацию. В процессе рекомбинации выделяется энергия в виде квантов света — свечение поверхности экрана. Характер свечения зависит от потенциала на УЭ. Если на управляющую сетку триода подать

небольшой отрицательный потенциал, в анодной цепи потечет ток и создается падение напряжения на анодной нагрузке $R_a$. Падение напряжения на анодной нагрузке снижает потенциал на аноде и на соединенном с ним управляющем электроде (УЭ). В результате изменяется траектория движения электронов, которые не бомбардируют секторы экрана в местах подключения УЭ, и в них возникают затемненные секторы (ЗС).

С увеличением отрицательного потенциала на сетке триода уменьшаются его анодный ток и падение напряжения на нагрузке, возрастает потенциал на аноде и УЭ. При этом выравнивается потенциал всего экрана, и электроны будут равномерно бомбардировать его поверхность, а затемненные секторы сужаться.

Таким образом, угол раскрытия темного сектора экрана (φ) зависит от потенциала сетки ($U_c$) триодной части индикатора. Зависимость $\varphi = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ является одной из основных характеристик электронно-светового индикатора.

Электронно-световой индикатор может иметь два триода и использоваться для визуального контроля равенства двух изменяющихся по величине напряжений. В баллоне такого индикатора помещена индикаторная часть и два идентичных триода с общим катодом.

Электронно-световые индикаторы используются в радиоаппаратуре и измерительных устройствах в качестве индикаторов настройки, нулевых индикаторов состояния, установки необходимого уровня и т.д.

Примером элекронно-светового индикатора служит электронная лампа 6Е1П.

Условное графическое и буквенное обозначение аналогично условному графическому и буквенному обозначению электровакуумных приборов. Отличие состоит только в том, что в схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: HL1, где HL — прибор световой сигнализации, 1 — порядковый номер прибора в схеме.

*Катодолюминесцентный индикатор (вакуумно-люминесцентный)* относится к группе знаковых — знакосинтезирующих индикаторов (ЗСИ), видимое изображение которых создается из совокупности дискретных элементов (сегментов). Является активным компонентом, который представляет собой низковольтный многоанодный

триод, имеющий оксидный катод прямого накала, сетку и аноды-сегменты, размещенные в одной плоскости.

Конструктивно (рис. 8.59) знакосинтезирующий индикатор выполнен в стеклянном баллоне *4* цилиндрической или плоской формы, в котором создан вакуум. С помощью газопоглотителя *7*, помещенного внутри баллона (геттера), поддерживается вакуум при работе индикатора. Внутренняя поверхность баллона покрыта токопроводящим слоем, электрически соединенным с катодом, который служит экраном. Внутри баллона имеются аноды, катод и сетка.

Аноды *1* изготовлены в форме сегментов, покрытых люминофором в сегментно-мозаичных ЗСИ или «точек» в матричных ЗСИ, изолированных друг от друга. В двухцветных приборах (обычно матричного типа) на соседние аноды наносят разные люминофоры, обеспечивающие свечение разного цвета. В трехцветных приборах на три соседних анода наносят люминофоры трех цветов. Комбинация трех цветов свечения при определенных яркостях соответствующих источников излучения позволяет получить любой цвет свечения. В сегментном ЗСИ каждый сегмент имеет вывод, к которому прикладывается положительный потенциал напряжения

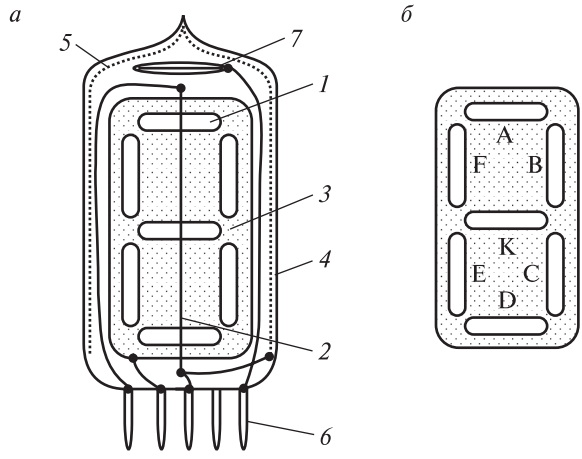



Рис. 8.59. Знакосинтезирующий вакуумно-люминесцентный индикатор: *а* — конструкция; *1* — аноды; *2* — катод; *3* — сетка; *4* — баллон; *5* — токопроводящий слой; *6* — выводы; *7* — геттер; *б* — расположение и нумерация сегментов

относительно катода. На рис. 8.59 показан катодолюминесцентный ЗСИ, имеющий семь сегментов — анодов, необходимых для отображения цифр, конфигурация которых показана на рис. 8.60. В других индикаторах число сегментов может быть увеличено до 10 для создания других конфигураций цифр, а также добавлены сегменты для изображения точки, запятой или выбрано другое расположение сегментов для отображения букв, знаков и символов и т.д.

Перед анодом располагается сетка *3*, имеющая мелкоячеистую структуру с тонкими токонесущими элементами. Сетка предназначена для управления током индикатора. Катод прямого накала *2*, выполненный в виде нити тугоплавкого металла (вольфрам, молибден), служит источником эмитируемых электронов. Для повышения эмиссионной способности на поверхность катода наносят специальное оксидное покрытие (оксидные катоды). Обычно применяют оксидный катод прямого подогрева, выполненный в виде нити, размещаемой перед сеткой. Нить катода нагревается проходящим через нее током накала при подключении напряжения накала $U_н$. Ток накала должен быть таким, чтобы катод нагревался до температуры 700 °С, что обеспечит малое собственное излучение, высокую механическую прочность и в то же время достаточно хорошие эмиссионные способности. Поэтому накаленные нити катода, находящиеся между анодом и баллоном, практически не видны. Также трудно различима и сетка.

При включении вакуумного сегментного ЗСИ по схеме, показанной на рис. 8.61, к выводам катода (К-К) подключено напряжение накала $U_н$. Между анодами и катодом подключено анодное напряжение ($U_а$), а между анодом и сеткой — сеточное напряжение ($U_с$), значения которых должны составлять 20—70 В при условии $U_а > U_с$. Оба напряжения ($U_а$, $U_с$) включаются так, чтобы на анодах был положительный потенциал относительно катода и сетки.

Под действием ускоряющего поля сетки и анода электроны, эмитированные катодом, пролетают крупноячеистую сетку и по-

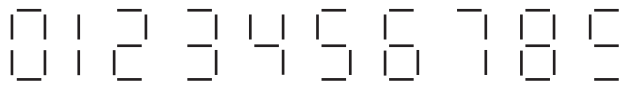


Рис. 8.60. Конфигурация воспроизводимых цифр знакосинтезирующим вакуумно-люминесцентным индикатором

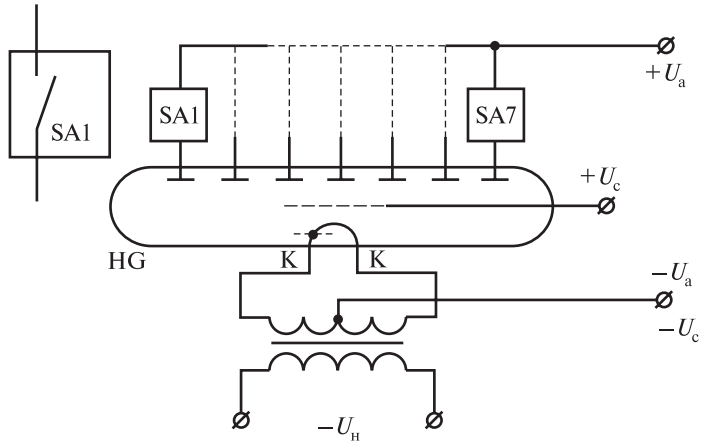



Рис. 8.61. Схема включения одноразрядного семисегментного вакуумного электролюминесцентного индикатора

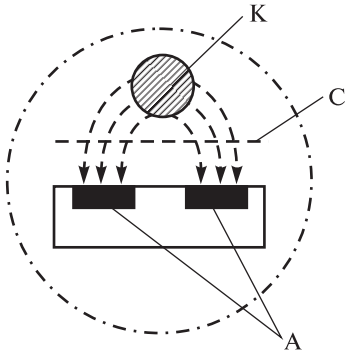



Рис. 8.62. Схема движения электронов в вакуумном люминесцентном ЗСИ

падают на сегменты анода, находящиеся под положительным потенциалом, который больше положительного потенциала сетки (рис. 8.62). При столкновении с поверхностью анодов электроны рекомбинируются с зарядами слоя люминофора, что вызывает его возбуждение и свечение. Если с помощью переключателей SA1—SA7 подать на определенные сегменты (аноды) потенциал, то набор светящихся сегментов образует хорошо видимые цифры (буквы, знаки, символы).

Люминофор способен светиться даже при небольшом (около 3 В) анодном напряжении. Яркость свечения люминофора зависит от его состава и потенциалов сетки и анода и достигает 500 кд/м$^2$. Управление свечением осуществляется либо напряжением анода $U_a$ сегмента, либо подачей на сетку отрицательного относительно катода напряжения (от −2 до −3 В), которое «отталкивает» электроны и препятствует их прохождению к аноду.

Таким образом, суть катодной люминесценции заключается в том, что люминофор бомбардируется электронами, которые «возбуждают» его и приводят к нарушению термодинамического равновесия. Появляются электроны, энергия которых больше энергии дна зоны проводимости, и дырки, имеющие энергию меньше энергии потолка валентной зоны. Из-за неустойчивости равновесного состояния электроны и дырки через некоторое время рекомбинируются между собой, излучая фотоны.

Промышленность выпускает также многоразрядные малогабаритные катодолюминесцентные ЗСИ (рис. 8.63). В многоразрядных ЗСИ одноименные сегменты (аноды) каждого разряда соединены вместе, что уменьшает число выводов. Управление свечением в таких ЗИС происходит при одновременном подключении соответствующего анодного напряжения и напряжения соответствующей сетки. Если подключить напряжение на сетку С1 и анод А1, то свечение будет в 1-м разряде сегмента А.

В зависимости от покрытия разными люминофорами можно создавать различный цвет светового излучения.

Промышленность выпускает также шкальные и мнемонические катодолюминесцентные индикаторы, высвечивающие определенную длину линии — шкалу, состоящую из отдельных светящихся участков, или знаковые указатели.

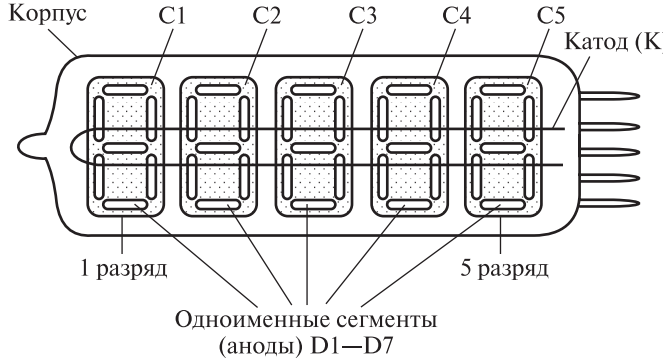



Рис. 8.63. Конструкция пятиразрядного знакосинтезирующего вакуумно-люминесцентного индикатора:
D1—D7 — сегменты (аноды) разрядов; C1—C5 — сетки разрядов; K — катод прямого накала

Основными параметрами катодолюминесцентных индикаторов являются:

1) напряжение накала $U_н = 5$ В;
2) ток накала $I_н = 20—300$ мА;
3) напряжение анода — сегмента $U_а = 20—70$ В;
4) ток анода — сегмента $I_а = 1—3$ мА;
5) ток сетки $I_с = 1—3$ мА.

Достоинства катодолюминесцентных ЗСИ — высокая яркость свечения, многоцветность, небольшое энергопотребление, быстродействие. Недостатки — необходимость иметь три источника и хрупкость корпуса.

Катодолюминесцентные ЗСИ применяются в контрольно-измерительной аппаратуре и счетно-решающих системах.

*Накаливаемые вакуумные знаковые индикаторы*

Накаливаемый вакуумный знаковый индикатор, как активный компонент, создает синтезированное изображение в виде цифр или букв, т.е. является знакосинтезирующим индикатором (ЗСИ). По принципу действия такие индикаторы аналогичны лампам накаливания. В них элементы отображения (знаки или сегменты) включены в виде нитей или тонких пленок, нагреваемых электрическим током до температуры 1400 °С.

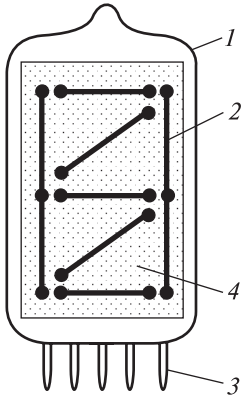



Рис. 8.64. Накаливаемый вакуумный ЗСИ:
*1* — баллон; *2* — нити накала (сегменты); *3* — выводы; *4* — изоляционная плата

Конструкция такого индикатора (рис. 8.64) состоит из стеклянного герметичного баллона *1* с вакуумом, внутри которого на теплостойкой изоляционной плате *3* расположены нити канала *2* на штырях. Число нитей накала (сегментов для синтеза цифр и букв или различных знаков) может достигать 10. Расстояние между штырями невелико, что позволяет уменьшить провисание нити накала при нагреве. Один вывод каждой нити подсоединен к общему выводу, а остальные выводы — индивидуальные. Все выводы от нитей накала подсоединены к выводам *4* (штырькам) на цоколе баллона.

Питание нитей накала накаливаемых ЗСИ осуществляется напряжением накала от 2,5 до 5 В. При подключении к источнику напряжения накала группы сегментов возникает светящееся изображение цифры или буквы. Свечение желтого цвета соответствует температуре накала примерно 1200 °С. Срок службы составляет до 10 тысяч часов. Высокая яркость свечения (несколько тысяч кандел на 1 м$^2$) — основное преимущество этих индикаторов, применяемых при высоком уровне внешней освещенности и небольшой температуре баллона. Кроме того, эти ЗСИ просты по конструкции и имеют малую стоимость.

Накаливаемые знаковые индикаторы находят применение в тех же приборах, что и катодолюминесцентные индикаторы.

### *8.9.3. Газоразрядные индикаторы*

Газонаполненные приборы — активные компоненты в приборах для отображения информации. Представляют собой источники излучения, зона свечения в которых имеет определенную форму и управляется электрическими сигналами. Эти приборы — безнакальные, многоэлектродные, тлеющего разряда с газовым наполнением.

Конструкция простейшего устройства этих широко распространенных приборов показана на рис. 8.65. В стеклянном баллоне *1*

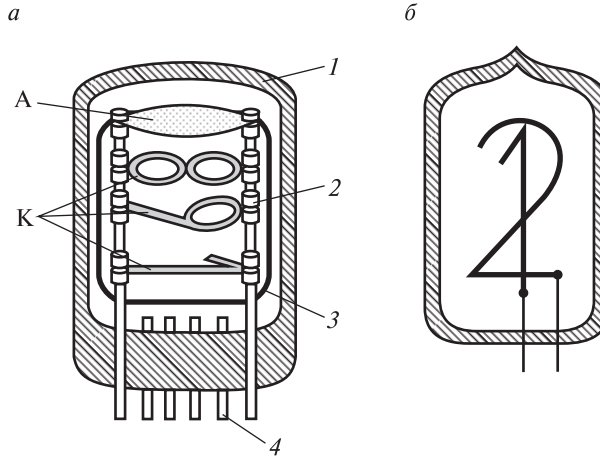



Рис. 8.65. Газоразрядный индикатор:
*а* — торцевой индикации; *б* — боковой индикации; *1* — баллон; *2* — траверсы; *3* — экран; *4* — выводы

с неоном или смесью инертных газов при давлении значительно ниже атмосферного находятся катоды К, выгнутые из проволоки в виде цифр или других знаков, расположенные один за другим на траверсах *2* и связаны с внешними выводами прибора *4*. Катоды, выполненные из титана или вольфрама, располагаются параллельно боковой стенке баллона (боковая индикация рис. 8.65, *а*) или параллельно торцу баллона (торцевая индикация на рис. 8.65, *б*) на расстоянии примерно 1 мм друг от друга.

Число катодов не превышает 10, что определяет число высвечиваемых знаков. Форму катодов, их размеры и последовательность расположения выбирают из условия минимального затемнения позади расположенных знаков. В зависимости от способа формирования изображения газоразрядные индикаторы делятся на индикаторы с целостным представлением информации (рис. 8.65), которые также называются фигурными или пакетными и в которых катоды имеют форму отображаемого символа, и индикаторы с синтезируемым изображением (ЗСИ), в которых катоды располагаются в одной плоскости и состоят из отдельных элементов, имеющих форму сегментов, полосок и т.д. (рис. 8.66).

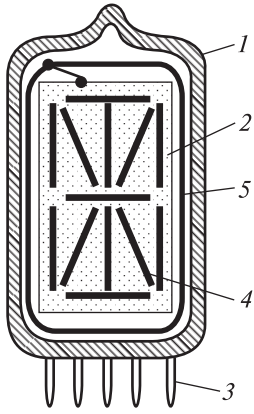



Рис. 8.66. Газоразрядный индикатор из отдельных сегментов:
*1* — баллон; *2* — анод; *3* — выводы; *4* — катоды; *5* — экран

Анод (А) выполняется в виде сетки из тонкой никелевой проволоки. Для обеспечения нормальных расстояний взаимодействия между анодом и каждым катодом при числе анодов более 5 сетчатый анод разделяют на две части и располагают в двух уровнях (рис. 8.67) между катодами. Это позволяет уравнять напряжение зажигания на всех катодах и предотвратить переход зарядов на боковые траверсы *1*. Таким образом, приборы могут быть одноанодные и двуханодные. Двуханодная конструкция позволяет упростить схему управления индикатором.

Действие газоразрядных индикаторов основано на возникновении оптического излучения (свечения) при прохождении электрического тока через газ. Свечение тлеющего газового разряда связано с возбуждением атомов ударами электронов и с последующим возвратом

атомов в нормальное (невозбужденное) состояние с выделением энергии в виде квантов света либо с рекомбинацией положительных ионов с электронами в объеме или на стенках прибора, при этом также может происходить выделение энергии в виде оптического излучения. Для исключения свечения на стенках прибора все катоды в индикаторе окружены боковой металлической сеткой — экраном *3* (см. рис. 8.65), который соединен с анодом. Излучение, сопровождающее газовый разряд в газоразрядных индикаторах, может располагаться как в видимой, так и в ультрафиолетовой области спектра. В последнем случае для преобразования излучения в видимое излучение применяют люминофоры, возбуждаемые ультрафиолетовым излучением.

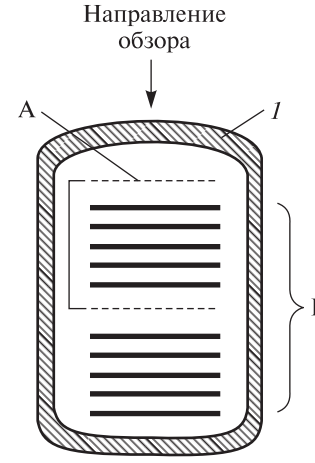



Рис. 8.67. Структура расположения анодов в газоразрядном индикаторе при числе катодов более 5

При подаче напряжения зажигания между анодом и одним из катодов около этого катода возникает свечение газа (т.е. виден светящийся знак), наблюдаемое с торца или через боковую стенку баллона. Толщина светящейся линии составляет примерно 1-2 мм. Цвет свечения газа зависит от его состава. В фигурных (пакетных) газоразрядных индикаторах высвечивается цифра (знак) полностью, а в сегментных индикаторах группа светящихся анодов (сегментов) создает изображение цифры (знака).

На основе сегментных газоразрядных индикаторов строятся индикаторные газоразрядные панели, с помощью которых отображается многоразрядная цифровая информация (до 17 разрядов) (рис. 8.68).

Наряду с цифровыми, буквенными и символьными газоразрядными индикаторами разработаны шкальные газоразрядные индикаторы (дискретные и аналоговые), которые обеспечивают отсчет измеряемой величины. Отсчет производится по положению светящейся области относительно начала шкалы (индикаторы с движущейся точкой) либо по длине светящегося столбца (полосковые индикаторы).

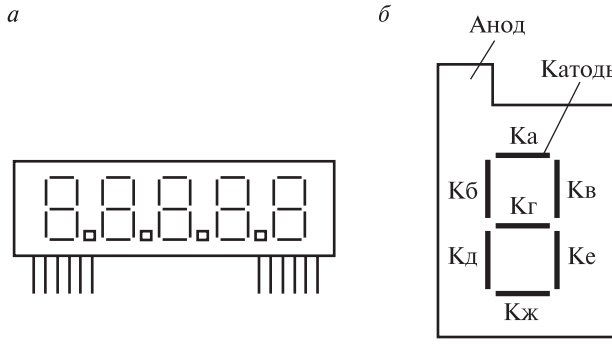



Рис. 8.68. Многоразрядный газонаполненный ЗСИ (*а*) и расположение катодов и анода в одном разряде (*б*)

Особый класс газоразрядных индикаторов составляют тиратроны тлеющего разряда — многоэлектродные приборы, содержащие одну или несколько сеток и позволяющие управлять возникновением разряда при низких напряжениях (5—10 В). Индикаторные тиратроны работают в режимах запоминания и без запоминания информации в виде свечения.

Основные параметры газоразрядных индикаторов:

1) напряжение зажигания $U_З$ = 90—200 В;

2) рабочий ток — от 1,5 до 8 мА;

3) диапазон рабочей температуры окружающей среды составляет 60—70 °С;

4) гарантийный срок службы — до 5000 ч.

Достоинства газоразрядных индикаторов (постоянная готовность к работе, малая потребляемая мощность и низкая стоимость) обусловили широкое применение их в измерительной и вычислительной технике до появления светодиодных и жидкокристаллических индикаторов. Шкальные индикаторы применяются в устройствах автоматики для индикации и сигнализации, а также в измерительной аппаратуре контроля и управления на транспорте. Индикаторные тиратроны применяются в качестве составных элементов экранов коллективного пользования. Газоразрядные панели — наиболее быстро развивающийся класс индикаторных устройств отображения сложной информации.

### *8.9.4. Полупроводниковые приборы отображения информации*

Полупроводниковые приборы отображения информации основаны на использовании свойств светоизлучающего *p-n*-перехода. Принцип действия полупроводниковых элементов индикации основывается на излучении кванта света при рекомбинации носителей зарядов, прошедших электронно-дырочный переход, смещенный в прямом направлении. Представителем полупроводниковых элементов индикации является светодиод. На основе светодиодов выполняются знакосинтезирующие индикаторы, в которых требуемая конфигурация свечения обеспечивается за счет выполнения соответствующих участков в виде единого *p-n*-перехода (набора переходов). Часть эффекта свечения зоны достигается благодаря отражению света от специально созданных отражающих поверхностей. Полупроводниковые приборы отображения информации могут быть электролюминесцентными и светодиодными приборами (светодиодные индикаторы).

### *8.9.5. Электролюминесцентные полупроводниковые индикаторы (ЭЛИ)*

Электролюминесцентные полупроводниковые индикаторы (ЭЛИ) — активные компоненты. Построены на основе электролюминесцентных плоских конденсаторов (индикаторов), представляющих собой многослойную структуру, в которой используется явление электролюминесценции. Электролюминесценция состоит в том, что некоторые полупроводниковые приборы способны излучать свет под действием электрического поля. Конструкция такого плоского электролюминесцентного конденсатора, как индикатора, представляет собой (рис. 8.69) стеклянную или органическую подложку (основание) *1*, на которую нанесен проводящий слой — прозрачный электрод *2* (оксид олова или оксид цинка). Поверх прозрачного электрода нанесен слой люминофора *3*. В качестве электролюминофоров используют монокристалический фосфор и соединения третьей и пятой групп Периодической системы элементов (соединения типа $A^{III}$ $B^{V}$) с примесями элементов четвертой и шестой групп. В первую очередь это соединение цинка и кадмия с серой и селеном или сульфид цинка с медью или алюминием. Добавление к люминофору активаторов позволяет получить различ-

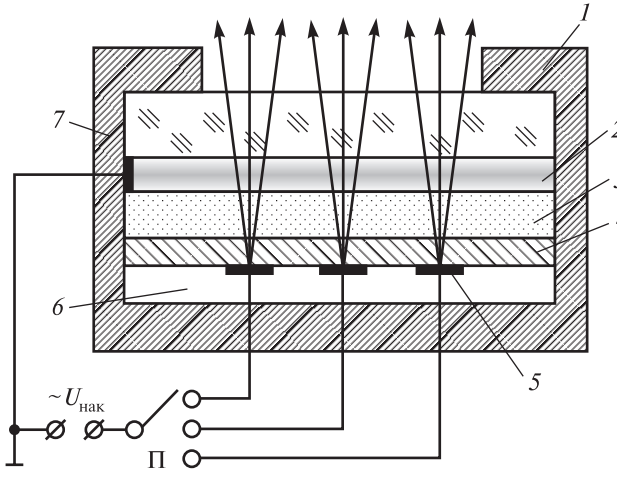



Рис. 8.69. Устройство электролюминесцентного индикатора

ный цвет свечения — зеленый, голубой, желтый, красный, белый. Слой люминофора покрыт изолирующим защитным слоем *4* (органическая смола), на который нанесены непрозрачные электроды *5*, выполненные в форме высвечивающихся знаков.

Знак непрозрачного электрода может иметь форму цифр, букв или сегментов для получения ЗСИ или геометрических фигур. В соответствии с этим число электродов может достигать 19. Вся система помещена в герметизированный компаунд *6* в корпус *7*. Конструктивно электролюминесцентные ЗСИ представляют собой группу конденсаторов, у которых одна обкладка выполнена прозрачной, а другая — непрозрачной. Между обкладками помещен люминофор.

В основе действия ЭЛИ лежит способность некоторых полупроводниковых веществ (люминофоров) давать свечение в переменном электрическом поле. При увеличении напряженности электрического поля атомы примеси люминофора возбуждаются, а при уменьшении часть поглощенной ими энергии излучается в виде квантов света.

Между прозрачным и одним или несколькими непрозрачными электродами подается от специального источника переменное напряжение накачки $U_{нак}$ требуемой амплитуды и частоты. Для по-

лучения достаточной яркости свечения необходимо подать переменное напряжение $U_{нак}$ с амплитудой 220—250 В при частоте от 40 Гц до 10 кГц.

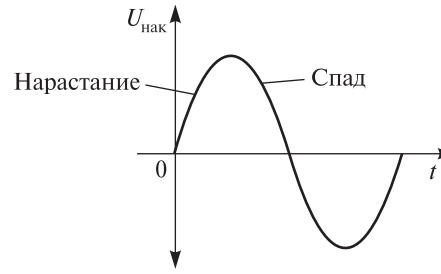



Рис. 8.70. Характеристика, поясняющая процесс нарастания и спада накала при работе электролюминесцентного полупроводникового индикатора

При воздействии переменного электрического поля в полупроводнике (люминофоре) при нарастании напряженности поля (рис. 8.70) возникает ударная ионизация атомов свободными электронами зоны проводимости, которые при кинетической энергии больше ширины запрещенной зоны, переходят в валентную зону и выбивают электроны в ковалентных связях атомов. В результате концентрация свободных носителей зарядов превысит равновесную и полупроводник окажется в возбужденном состоянии. Небольшая часть из них успевает рекомбинироваться, вызвав при этом небольшое свечение. При уменьшении напряженности поля (спад напряжения накачки $U_{нак}$ на рис. 8.70) большая часть ионизированных (возбужденных) электронов рекомбинируется, отдавая часть поглощенной ими энергии в виде квантов светового излучения со стороны стеклянной подложки.

На основе ЭЛИ могут быть реализованы значительные по площади мнемосхемы (устройства отображения информации в виде схем с меняющимся состоянием), точечные индикаторные панели.

К недостаткам ЭЛИ следует отнести необходимость иметь мощный источник напряжения накачки $U_{нак}$ повышенной частоты, сложность управления, а к достоинствам — сравнительно небольшая потребляемая мощность (30 мВт на 1 см$^2$ светящейся поверхности), сильная яркость изображения, прочность, компактность (плоскость конструкции), большой срок службы.

Основные параметры электролюминесцентных индикаторов:

1) яркость свечения ($B$) от приложенного напряжения и его частота $f$ связаны линейной зависимостью $B = \varphi(U)$ до $U_{max}$ при $f = 40—10^4$ Гц;

2) максимальное напряжение $U_{max} = 250$ В;

3) долговечность 1000—5000 ч.

Применяются для создания малогабаритных индикаторных панелей и табло, дисплеев для ЭВМ.

### *8.9.6. Светодиодные индикаторы*

В светодиодных индикаторах (активных компонентах) используются принципы действия светодиодов, которые имеют свечение в видимой области спектра. Размеры кристалла светодиода очень малы и поэтому он представляет собой светящуюся точку. На практике десятки и сотни светодиодов объединяют в индикаторах в единые системы, применяя линзы и рефлекторы для увеличения масштаба излучающего кристалла.

Различают три основных типа светодиодных индикаторов: знаковые, сегментные (цифровые), матричные и механические.

Сегментный знакосинтезирующий индикатор (ЗСИ) позволяет воспроизвести все десять цифр и буквы. С помощью знаковых можно высветить различные знаки. Матричные ЗСИ (графические) обеспечивают высвечивание символов и графиков, а также букв и цифр. С помощью механических ЗСИ получают светящиеся мнемосхемы.

В сегментных ЗСИ каждый сегмент выполнен в виде отдельного светодиода (рис. 8.71, *а*). В одноразрядных ЗСИ выводы всех сегментов расположены на корпусе (рис. 8.71, *б*). В многоразрядных ЗСИ одноименные сегменты всех разрядов электрически соединены между собой (рис. 8.71, *в*). В матричных ЗСИ высвечивание какого-либо символа достигается соответствующим выключением напряжения на вертикальные и горизонтальные шины (рис. 8.71, *г*).

Параметры светодиодных индикаторов аналогичны параметрам светодиодов. Низкое напряжение питания, малый ток, небольшие габариты и масса, высокая долговечность сделали светодиодные индикаторы одним из наиболее перспективных индикаторов отображения информации индивидуального пользователя.

### *8.9.7. Жидкокристаллические индикаторы*

Жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ) относятся к числу пассивных приборов, так как не излучают собственный свет, как все рассмотренные выше индикаторные приборы, а преломляют падающее или проходящее сквозь них излучение. Основой их работы служит свойство некоторых веществ изменять свои оптические

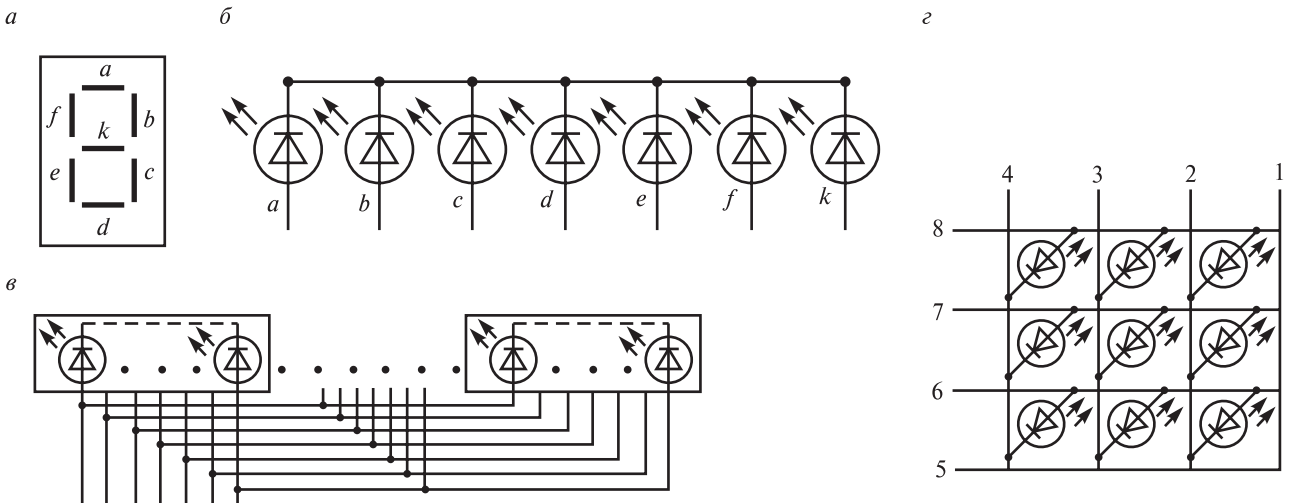



Рис. 8.71. Сегментный одноразрядный полупроводниковый ЗСИ (*а*); условное обозначение (*б*); соединение выводов сегментов в многоразрядном индикаторе (*в*); условное обозначение матричного ЗСИ (*г*)

показатели (коэффициент поглощения, отражения, рассеивания, показатель преломления, спектральное отражение или пропускание, оптическую анизотропию, оптическую разность хода) под влиянием внешнего электрического поля.

В качестве веществ, имеющих подобные свойства, используют жидкие кристаллы. Жидкокристаллическое состояние вещества является промежуточным между жидким и твердым его состоянием. Жидкокристаллическим (мезоморфным) состоянием, т.е. бесформенной структурой, называют термодинамически устойчивое состояние, при котором вещество сохраняет анизотропию физических свойств, присущих жидкости (текучесть, способность к каплеобразованию) и твердому кристаллу (упорядоченность расположения молекул и правильную геометрическую решетку молекулы, как кристалла). Благодаря этому ряд физических свойств вещества зависит от направления измерения. Общим признаком жидкокристаллических веществ служит удлиненная (сигарообразная) форма их молекул. Кроме того, молекулы жидких кристаллов обладают дипольным моментом — положительные и отрицательные заряды каждой молекулы расположены на ее противоположных концах. Молекула жидкого кристалла имеет сравнительно большую длину и относительно малую ширину. Центры тяжести молекул жидких кристаллов расположены хаотически, но молекулы стремятся ориентироваться параллельно друг другу своими длинными осями. При температуре 10—55 °С молекулы жидких кристаллов располагаются параллельно цепочками, образуя упорядоченную кристаллическую структуру. Тонкий слой жидких кристаллов при этом прозрачен.

Способностью находиться в жидкокристаллическом состоянии чаще всего обладают органические соединения, причем это свойство проявляется при комнатной температуре. Для расширения температурного интервала (от –40 до +80 °С) в жидкие кристаллы вводят примеси. Каждое вещество имеет свой диапазон температуры. За пределами этого диапазона вещество принимает свойство либо твердого тела, либо изотропной жидкости. По характеру взаимной ориентации молекул различают три типа жидкокристаллических веществ — *нематические, холестерические и смектические.*

Интерес к жидким кристаллам (ЖК) для элементов индикации вызван тем, что при изменении ориентации их молекул под действием электрического поля происходит изменение светопропуск-

ной способности (прозрачности) жидкокристаллических веществ, и при этом практически не потребляется ток. В таких индикаторах используются нематические и холестерические ЖК. Смектические жидкокристаллические вещества из-за высокой вязкости широкого применения в ЖКИ не нашли.

В жидких кристаллах возникает много электрооптических эффектов, влияющих на их светопропускную способность. Электрооптические эффекты в жидких кристаллах — изменение оптических свойств тонкого слоя жидкого кристалла в результате переориентации молекул за счет изменения направления внешнего электрического поля. Электрооптические эффекты в жидких кристаллах могут вызываться проводимостью ЖК полевым эффектом за счет слабого электрического поля (для этого не требуется электрический ток). Из электрооптических эффектов, обусловленных проводимостью, наибольшее применение для элементов индикации нашло динамическое рассеивание света, а из полевых эффектов — скручивание нематической фазы жидкого кристалла.

Жидкие кристаллы прозрачны для световых лучей, но под действием электрического поля напряженностью 2—5 кВ/см правильная структура этих жидкостей нарушается, молекулы располагаются беспорядочно, т.е. изменяется ориентация дипольного момента в зависимости от направления электрического поля. В этом случае жидкость становится непрозрачной и рассеивает падающий на нее свет во всех направлениях. Это состояние называют динамическим рассеиванием и на этом явлении основано создание и работа ЖКИ.

Простейший ЖК-индикатор, основанный на эффекте динамического рассеивания света (рис. 8.72), состоит из двух параллельных стеклянных пластин *1* с нанесенными на внутренней поверхности прозрачными электродами *2* из окиси олова или двуокиси цинка (при работе на просвет) и слоя жидкокристаллического вещества *3* между ними толщиной 10—25 мкм. При работе в режиме отражения света один из электродов выполняется зеркально отра-

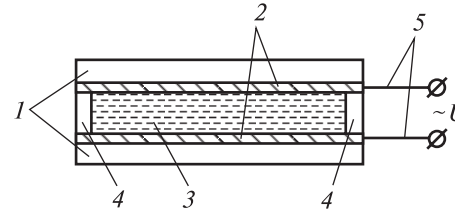


Рис. 8.72. Конструкция ЖК-индикатора

жающим (алюминий, никель). Уплотнительные прокладки *4* изолируют объем и определяют зазор между пластинами. Проводящие электроды связаны с внешними выводами *5* прибора. Индикатор требует внешнего освещения или подсветки.

В индикаторы с эффектом динамического рассеивания света в нематических ЖК вносится добавка небольшого количества ионных соединений (электролита). При отсутствии напряжения ориентация вытянутых молекул ЖК упорядочена (рис. 8.73, *а*), молекулы располагаются перпендикулярно плоскости обоих электродов или могут иметь небольшой наклон. Под действием электрического поля напряженностью 2—5 кВ/см правильная структура этих жидкостей нарушается (рис. 8.73, *б*). Беспорядочное движение молекул жидкого кристалла (турбулентное движение) создает неустойчивость ориентации молекул ЖК, и их упорядоченная ориентация нарушается. Молекулы создают сильное рассеивающее действие падающему свету, ЖК теряет прозрачность и цвет его становится молочно-белым. При снятии напряжения питания молекулы ЖК возвращаются в исходное состояние ориентации, прозрачность слоя восстанавливается.

Присутствие ионов в ЖК обусловливает проводимость индикаторов с динамическим рассеиванием света и протекание через жидкий кристалл тока при наличии напряжения. Ионная проводимость создает опасность электролитического распада жидкокристаллического вещества, особенно при электропитании от источника постоянного напряжения. Для повышения срока службы ЖК-ин-

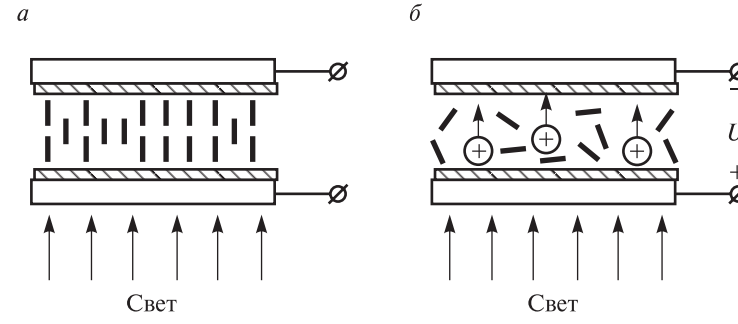



Рис. 8.73. Ориентация молекул в ЖК-индикаторе при отсутствии (*а*) и наличии (*б*) напряжения

дикаторов их электропитание осуществляется от источников переменного напряжения (обычно прямоугольной формы) частотой 25—200 Гц. Амплитуда рабочих напряжений равна 15—30 В. Изменение оптических свойств наступает при пороговом напряжении 5—10 В. Время изменения оптического состояния после подачи или снятия напряжения питания составляет 50—300 мс. Максимально достигаемая контрастность равна 20—40. Потребляемый ток лежит в пределах 5—25 мкА/см$^2$, а мощность — 50—550 мкВт/см$^2$. Срок службы достигает 10 тыс. часов.

В индикаторах со скручиванием нематической фазы исходному состоянию отвечает скрученная структура молекул нематического ЖК в межэлектродном промежутке (рис. 8.74, *а*). По мере удаления от одной плоскости электрода к другой угол поворота молекул увеличивается и достигает 90°. Одним из методов создания такой ориентации молекул является полировка внутренних поверхностей стеклянных пластин в одном направлении и затем установка их с поворотом на 90° относительно друг друга по направлению полировки. При работе «на просвет» на внешние поверхности стеклянных пластин наносят поляризационные пленки. Плоскости поляризации поляризаторов взаимно перпендикулярны (скрещены). Если индикатор должен работать в режиме отражения, то за вторым поляризатором помещают отражатель.

На рис. 8.74, *а*, приведена модель ЖК-ячейки, помещенной между двумя поляризаторами со скрещенными направлениями поляризации (показаны стрелками). В отсутствие возбуждающего напряжения плоскополяризованнная световая волна, образованная первым поляризатором, поворачивается на 90° при прохождении слоя жидкого кристалла. Ее пропускает второй поляризатор, поскольку плоскость световой волны, прошедшей ЖК, совпадает с плоскостью поляризации этого поляризатора. ЖК-ячейка оказывается светлой и прозрачной.

Приложенное к индикатору напряжение (рис. 8.74, *б*) вызывает поворот молекул и установку их параллельно вектору электрического поля. Скрученная молекула исчезает. Слой ЖК не создает поворота плоскополяризованной световой волны. Проходящий через ЖК поляризованный свет не пропускается вторым поляризатором. ЖК-ячейка становится темной и непрозрачной. При снятии возбуждающего напряжения скрученная структура молекул восста-

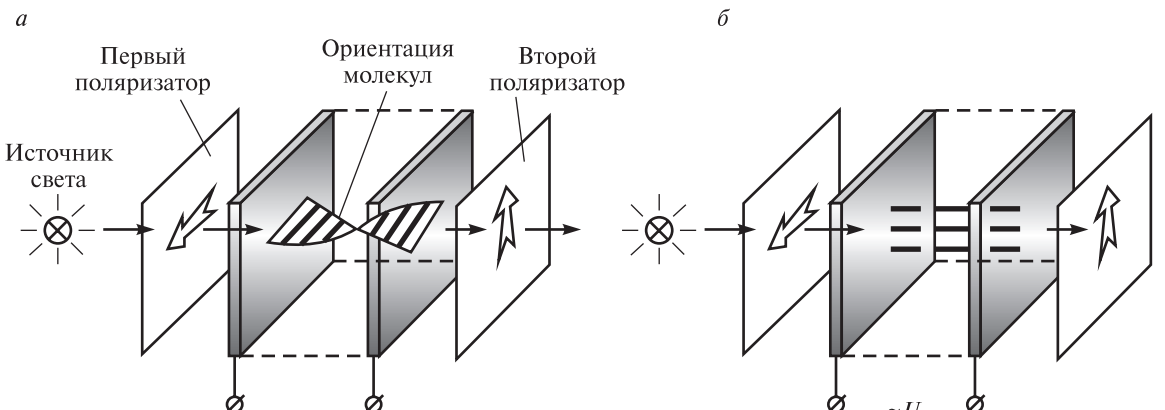



Рис. 8.74. Ориентация молекул в ЖК-индикатора со скручиванием нематической фазы:
*а* — при отсутствии напряжения; *б* — при включении напряжения

навливается. Второй поляризатор пропускает свет, и ячейка вновь становится светлой.

Эффект скручивания нематической фазы в отличие от эффекта динамического рассеивания света является чисто полевым. Для его реализации не надо пропускать ток через ЖК-ячейку, благодаря чему достигается существенный выигрыш в энергопотреблении.

Индикатором управляют также переменным напряжением. Рабочее напряжение составляет 5—10 В, а пороговое напряжение — 0,9—1,5 В. Время изменения оптического состояния после подачи или снятия напряжения питания составляет 50—300 мс. Максимально достигаемая контрастность значительно выше и равна 30—100. Потребляемый ток лежит в пределах 1—10 мкА/см$^2$, а мощность — 5—50 мкВт/см$^2$, что существенно меньше, чем в индикаторах с динамическим рассеиванием света. Срок службы достигает 50—100 тыс. часов.

Таким образом, жидкокристаллические индикаторы с различными конструкциями и способами создания электрооптических эффектов могут работать по принципу либо пропускания света, либо отражения света.

Рассмотрим конструкцию жидкокристаллических индикаторов, работающих с эффектом динамического рассеивания света по принципу пропускания света (на просвет) (рис. 8.75, *а*) и по принципу отражения света (рис. 8.75, *б*). Конструкция состоит из двух стеклянных пластин *1* и *2*, которые склеены с помощью полимерной смолы *5* и образуют корпус. Внутренняя поверхность стеклянной пластины *2* покрыта сплошным прозрачным слоем — электродом *3*, а на внутреннюю поверхность стеклянной пластины *1* нанесены прозрачные слои — фигурные электроды А, Б, В, ..., которые имеют форму цифр, или букв, или сегментов для синтезирования различных знаков необходимого количества. От всех электродов, нанесенных на внутренние поверхности стеклянных пластин, сделаны выводы *6* на внешний разъем. Прозрачные электроды выполнены из окиси олова или двуокиси цинка. Для ЖК-индикатора, работающего в режиме отражения, сплошной электрод *3* — не прозрачный, а зеркально отражающий, и выполнен из алюминия или никеля (рис. 8.75, *б*). Электроды выполнены в виде тонких, почти не видных на стекле, токопроводящих полосок. Между двумя стеклянными пластинами с нанесенными на их внутреннюю

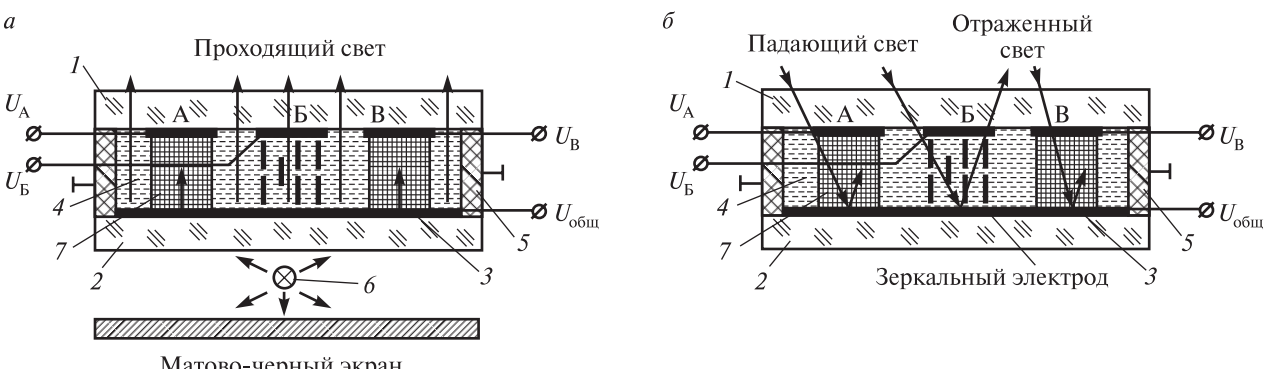



Рис. 8.75. Жидкокристаллические индикаторы, работающие с эффектом динамического рассеивания по принципу пропускания света (на просвет) (*а*) и по принципу отражения света (*б*)

поверхность электродами находится слой жидкокристаллического вещества *4* толщиной 10—20 мкм. Уплотнительные склеивающие прокладки *5* герметизируют объем, занимаемый жидким кристаллом, и определяют зазор между стеклянными пластинами.

Жидкокристаллические индикаторы требуют внешнего освещения или подсвета. Внешнее освещение применяется в ЖК-индикаторах, работающих по принципу отражения света (рис. 8.75, *б*). Для ЖК-индикаторов, работающих по принципу пропускания света (на просвет) (рис. 8.75, *а*) за задней стеклянной пластиной *2* размещают источник света *6* и матово-черный экран для исключения рассеивания светового потока.

Рассмотрим работу жидкокристаллических индикаторов, работающих с эффектом динамического рассеивания света по принципу пропускания света (на просвет) (рис. 8.75, *а*) и по принципу отражения света (рис. 8.75, *б*). Для получения изображения на фигурные электроды (сегменты индикатора) подают напряжение 10—15 В относительно сплошного электрода *3*. Для примера рассмотрим, что напряжение подается на фигурные электроды А и В относительно сплошного электрода *3*. Прозрачность жидкого кристалла под фигурными электродами А и В, к которым подано напряжение относительно электрода *3*, снижается, а остальная часть жидкого кристалла, в том числе и под фигурным электродом Б, остается прозрачной и пропускает световой поток и знака фигурного электрода Б не видно. Лучи света не проходят через непрозрачную часть жидкости *7* под фигурными электродами А и В и тогда на светлом фоне становится виден темный знак по форме электродов А и В. В жидкокристаллическом индикаторе, работающем по принципу отражения света (рис. 8.75, *б*), где сплошной нижний электрод *3* — прозрачный, световые лучи, прошедшие через прозрачную структуру жидкого кристалла под электродом Б, отражаются от сплошного электрода *3* и и выходят обратно и также никаких знаков не видно.

Широкое распространение получили цифровые, буквенно-цифровые и мнемонические ЖК-индикаторы сегментного типа (рис. 8.76). В них прозрачные электроды *2* выполнены в виде сегментов, от которых сделаны отдельные выводы *3*. Непрозрачный электрод *7* изготавливается единым с одним выводом *4*. При подаче напряжения между общим выводом *4* и выбранными сегментами *2* под со-

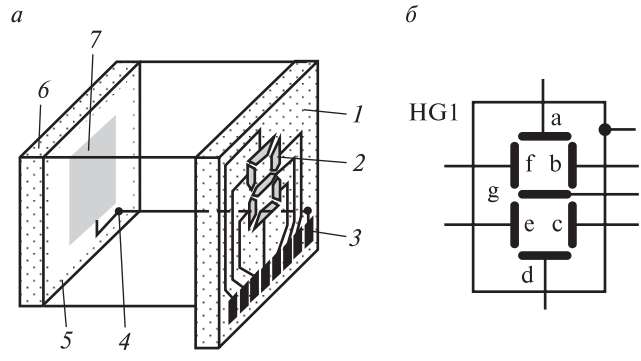



Рис. 8.76. Жидкокристаллический цифровой индикатор сегментного типа: *а* — конструкция; *б* — условное графическое обозначение

ответствующими сегментами появятся полосы, цвет которых резко отличается от окружающего фона. Сочетание этих полос образует требуемую цифру, букву или знак. Меняя сегменты, подключенные к источнику напряжения, изменяют отображаемые цифры, буквы или мнемосхемы.

ЖК-индикаторы просты по конструкции, дешевы, имеют низкую потребляемую мощность, хорошую контрастность изображения, хорошо совместимы с интегральными микросхемами управления за счет низкого напряжения.

К их недостаткам следует отнести необходимость иметь подсветку в темноте, узкий температурный диапазон (−15 до +55 °С), инерционность.

ЖК-индикаторы характеризуются основными параметрами:

– коэффициент контрастности знака по отношению к фону $K = ((L_Ф - L_З)/L_Ф)\cdot 100$ %, где $L_Ф$, $L_З$ — яркость фона и знака, $K =$ = 80—90 %;

– время включения;

– время выключения;

– напряжение управления ($U_{упр}$ = 2—20 В) и ток управления ($I_{упр}$ = 1—100 мкА);

– частота переменного напряжения ($f$ = 30—1000 Гц).

Область применения — устройства и системы с буквенно-цифровой, графической или мнемонической системой отражения информации.

### *8.9.8. Условное обозначение знаковых и знакосинтезирующих индикаторов (ЗСИ)*

Основой системы обозначений знаковых и знакосинтезирующих индикаторов отображения информации, так же как и всех электронных приборов, служат два вида обозначений: графическое и символическое (буквенно-числовой код). Эти обозначения установлены отраслевым стандартом и базируются на ряде классификационных признаков.

Графическое обозначение знаковых и знакосинтезирующих индикаторов (ЗСИ) отображения информации используется для создания графических решений электрических схем.

Графическое обозначение *катодолюминесцентного вакуумного ЗСИ* приведено на рис. 8.77, *а* и *б*. Оно содержит:

– общее обозначение — базовый символ баллона (корпуса) в виде овала шириной $h = 10$ или 12 мм и длиной $L = 40$ или 60 мм для одноразрядных индикаторов, и шириной $h = 20$ или 25 мм для многоразрядных индикаторов;

– дополнительное обозначение — внутри баллона показаны аноды-сегменты в виде отрезков $L = 4$—5 мм, расположенных в одну линию для одноразрядных индикаторов и в несколько линий для многоразрядных индикаторов. Число линий зависит от количества разрядов. Рядом с анодами указаны индицируемые ими цифры, буквы, символы или номера сегментов для синтезирования цифр, букв или символов; катод в виде дуги диаметром $D = 6$—8 мм; сетки в виде отрезков штриховой линии длиной $L = 8$—10 мм; экран в виде отрезка штриховой линии, соединенной с катодом.

Обозначение *накаливаемого вакуумного ЗСИ* приведено на рис. 8.77, *в*. Оно содержит:

– общее обозначение — базовый символ баллона (корпуса) в виде овала шириной $h = 10$ или 12 мм и длиной $L = 40$ или 60 мм;

– дополнительное обозначение — внутри баллона показаны нити накала (сегменты) в виде дуги диаметром $D = 4$—6 мм с выводами; выводы от анодов-сегментов обозначены буквами.

Обозначение *газоразрядного ЗСИ индикатора* приведено на рис. 8.78. Оно содержит:

– общее обозначение — базовый символ баллона (корпуса) в виде овала с шириной $h = 10$ или 12 мм и длиной $L = 40$ или 60 мм

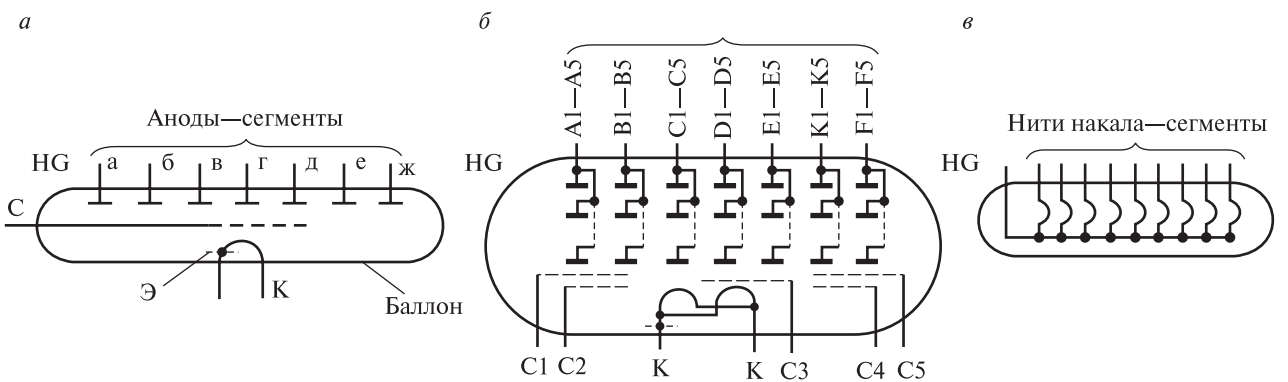



Рис. 8.77. Условное обозначение вакуумного индикатора:
*а* — одноразрядного; *б* — многоразрядного катодолюминесцентного; *в* — накаливаемого

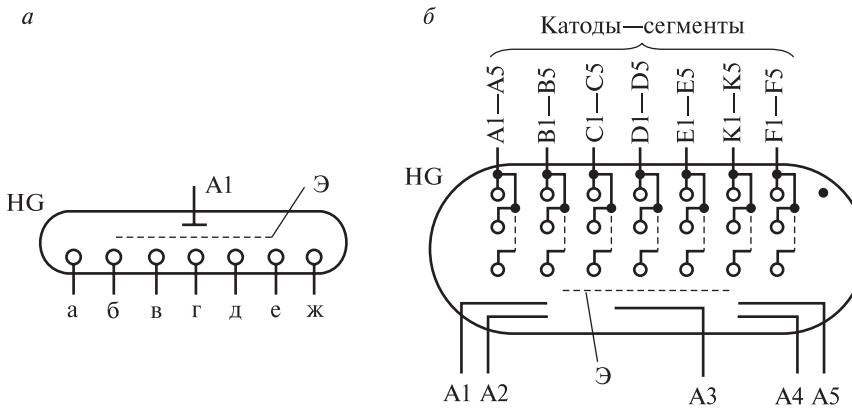



Рис. 8.78. Условное обозначение газоразрядного индикатора:
*а* — одноразрядного; *б* — многоразрядного

для одноразрядных индикаторов и шириной $h = 20$ или 25 мм для многоразрядных индикаторов;

– дополнительное обозначение — внутри баллона показаны катоды в виде окружности диаметром $D = 2$-3 мм, расположенные в одну линию для одноразрядных индикаторов и в несколько линий для многоразрядных индикаторов. Число линий зависит от количества разрядов. Рядом с катодами указаны индицируемые ими цифры, буквы, символы или номера сегментов для синтезирования цифр, букв или символов; аноды в виде отрезков $L = 8$—10 мм расположены напротив катодов; экран в виде штриховой линии — между анодами и катодами; точка обозначает газовое наполнение баллона.

Обозначение *электролюминесцентного ЗСИ индикатора (ЭЛИ)* приведено на рис. 8.79. Оно содержит:

– общее обозначение — базовый символ электролюминесцентного конденсатора (два параллельных отрезка длиной 8—10 мм на расстоянии друг от друга 4-5 мм; промежуток между отрезками имеет перекрестную штриховку); электролюминесцентные конденсаторы одним выводом соединены между собой на общий вывод; число конденсаторов зависит от числа сегментов.

Обозначение *светодиодного индикатора ЗСИ* приведено на рис. 8.77. Оно содержит:

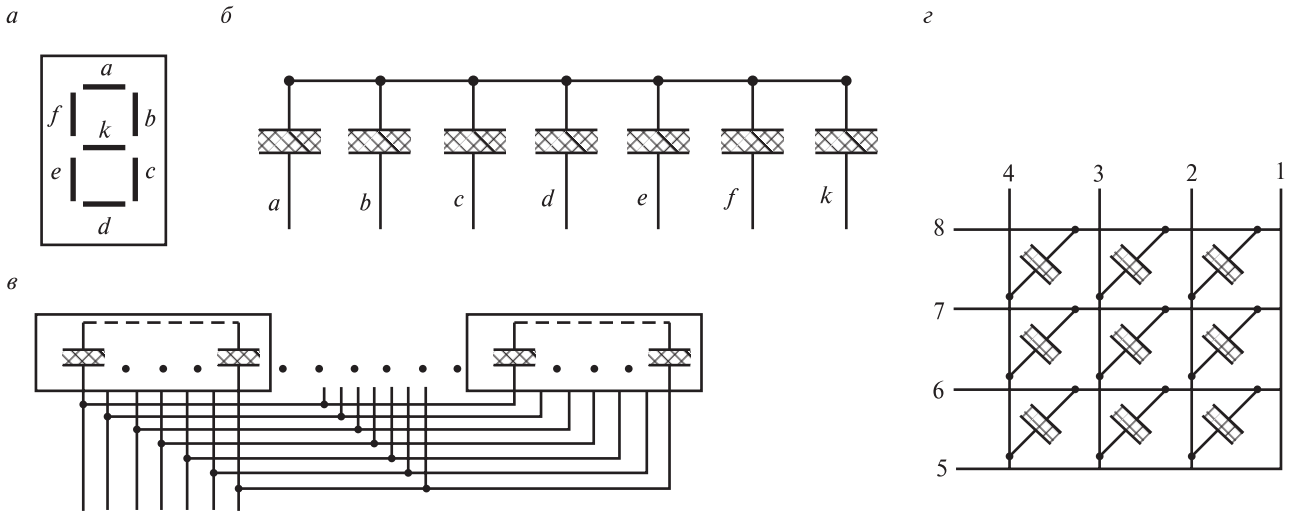



Рис. 8.79. Сегментный одноразрядный электролюминесцентный ЗСИ (*а*); условное обозначение (*б*); соединение выводов сегментов в многоразрядном индикаторе (*в*); условное обозначение матричного ЗСИ (*г*)

– общее обозначение — базовый символ светодиода; светодиоды одним выводом (катодом) соединены между собой на общий вывод; число светодиодов зависит от числа сегментов; в многоразрядных индикаторах каждый разряд выделен прямоугольником с шириной $h$ = 10 или 12 мм и длиной $L$ = от 40 до 60 мм; светодиоды одноименных сегментов всех разрядов соединены между собой и имеют один вывод; в матричных индикаторах светодиоды соединены с вертикальными и горизонтальными линиями (шинами).

Обозначение *жидкокристаллического индикатора ЗСИ* приведено на рис. 8.76. Оно содержит:

– общее обозначение — электроды в виде цифр, букв или сегментов с выводами; сегменты изображены в виде отрезков длиной $L$ = 8—10 мм и расположены в соответствующей конфигурации; число отрезков зависит от числа сегментов; в одноразрядных индикаторах каждый разряд выделен прямоугольником, имеющим вывод, с шириной $h$ = 15 или 20 мм и длиной $L$ = от 40 до 60 мм, который отображает общий электрод.

Буквенно-числовой код (символическое обозначение) имеет два вида: буквенно-символическое обозначение возле графического обозначения и буквенно-числовой код обозначения знаковых и знакосинтезирующих индикаторов отображения информации, классифицирующий знаковые и знакосинтезирующие индикаторы отображения информации по определенным признакам в справочниках.

В схемах рядом с графическим обозначением указываются символы: HG1, где HG — индикатор символьный, 1 — порядковый номер прибора в схеме.

Промышленность выпускает несколько типов знаковых и знакосинтезирующих индикаторов отображения информации, которые имеют буквенно-числовой код в системе обозначений (маркировку), классифицирующий знаковые и знакосинтезирующие индикаторы отображения информации по определенным признакам в справочниках и состоящий из следующих элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11 336.919—81:

*первый элемент* — буква И, обозначающая принадлежность прибора к группе знаковых, и ЗСИ — знакосинтезирующих индикаторов;

*второй элемент* — буква, характеризующая принцип действия прибора (Н — накаливаемый; Л — вакуумный люминесцентный;

Г — газоразрядный; Ж — жидкокристаллический; П — полупроводниковый; Э — электролюминесцентный);

*третий элемент* — буква, указывающая на вид отображаемой информации (Д — единичный знак; Ц — цифра; В — буквенно-цифровой; Т — шкальный; М — мнемонический; Г — графический; П — панель);

*четвертый элемент* — число, обозначающее порядковый номер разработки:

– при отсутствии встроенного управления выбираются числа из ряда 1—69;

– со встроенным управлением — из ряда 70—99;

*пятый элемент* — для единичных индикаторов буква, указывающая цвет свечения (К — красный; Л — зеленый; С — синий; Ж — желтый; Р — оранжевый; Г — голубой):

– для полупроводниковых ЗСИ это буква указывает на группу по значению параметров (от А до Я);

– у ряда компонентов этот элемент обозначения может отсутствовать;

*шестой (пятый) элемент* — для сегментных ЗСИ приводится в виде дроби двух чисел. В числителе указывается число разрядов, в знаменателе — число сегментов в разряде.

Для матричных элементов, сгруппированных в определенных местах (с фиксированным знако-местом), в знаменателе стоит произведение, обозначенное знаком «×», числа элементов в строке и в столбце.

Для матричных ЗСИ без фиксированных знако-мест (преобразователи сигнала света расположены равномерно по полю на пересечении строк и столбцов) в обозначении указывается произведение числа элементов в строке на число элементов в столбце.

Для панелей ЗСИ указывается информационная емкость знако-мест (разрядов).

*Примеры обозначения по отраслевому стандарту ОСТ 11 336.919—81.* ИЛВ1-18/5×7: И — знакосинтезирующий; Л — вакуумный люминесцентный; В — буквенно-цифровой; 1 — порядковый номер разработки, без встроенного управления; 18 — число разрядов, каждый разряд матричный; 5 — число строк; 7 — число столбцов; ИНЦ1-16/5×7: И — знакосинтезирующий; Н — накаливаемый; Ц — цифровой; 1 — порядковый номер разработки,

без встроенного управления; 16 — количество разрядов; 5 — пять строк; 7 — столбцов; ИГП-17: И — знакосинтезирующий; Г — газоразрядный; П — панель; 17 — информационная емкость знако-мест (разрядов); ИЭД1-Л: И — знаковый; Э — электролюминесцентный; Д — единичный знак (цифра, буква или символ); 1 — порядковый номер разработки без встроенного управления; Л — зеленого цвета свечения; ИПЦ-70А-1/7: И — знакосинтезирующий; П — полупроводниковый; Ц — цифровой; 70 — порядковый номер разработки с встроенным управлением; А — группа по значению параметров; 1 — число разрядов; 7 — число сегментов; ИГГ1-32×32: И — знакосинтезирующий; Г — газоразрядный; Г — графический; 1 — порядковый номер разработки без встроенного управления; 32 — число строк; 32 — число столбцов.

Поскольку ОСТ 11 336.919—81 введен в действие в 1982 г., для ранее разработанных приборов используется другая система обозначений.

Условное обозначение приборов, разработанных до 1964 г., состоит из трех элементов:

*первый элемент* — буква И, обозначающая принадлежность прибора к группе знаковых или ЗСИ — знакосинтезирующих индикаторов;

*второй элемент* — буква, характеризующая принцип действия прибора (Н — наполненный газом газоразрядный — тлеющего разряда; В — вакуумный — люминесцентный или накаливания);

*третий элемент* — число, обозначающее порядковый номер разработки прибора от 1 до 99.

*Например:* ИВ-3: И — знакосинтезирующий; В — вакуумный; 3 — порядковый номер разработки; ИН-4: И — знаковый индикатор; Н — наполненный газом газоразрядный — тлеющего разряда; 4 — порядковый номер разработки.

## Рекомендуемая литература


1. *Акимова Г.Н.* Электронная техника: учеб. для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта. — М.: Маршрут, 2003.

2. *Берикашвили В.Ш., Черепанов А.К.* Электронная техника. — 5-е изд., перераб. — М.: Академия, 2010.

3. *Бирюков С.А.* Применение цифровых микросхем серии ТТЛ и КМОП. — М.: ДМК, 2000.

4. *Бобровников Л.З.* Электроника: учеб. для вузов. — СПб.: Питер, 2004.

5. *Гальперин М.В.* Электронная техника. — М.: Форум-Инфра, 2005.

6. *Горшков Б.С., Горшков А.Б.* Электронная техника. — 3-е изд., стер. — М.: Академия, 2010.

7. *Горшков Б.И.* Электронная техника: учеб. пособие для студ. сред. проф. образования. — М.: Академия, 2005.

8. *Гусев В.Г.* Электроника и микропроцессорная техника: учеб. для вузов. — М.: Высшая школа, 2004.

9. *Калабеков Б.А.* Цифровые устройства и микропроцессорные системы: учеб. для техникумов связи. — М.: Горячая линия — Телеком, 2000.

10. *Лачин В.И., Савелов Н.С.* Электроника. — 4-е изд. — Ростов-н/Д.: Феникс, 2004.

11. *Мизерная З.А.* Электронная техника. — М.: Маршрут, 2006.

12. *Новиков Ю.В.* Основы цифровой схемотехники. — М.: Мир, 2001.

13. *Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И.* Аналоговая и цифровая электроника. — М.: Горячая линия — Телеком, 2000.

14. *Сиренький И.В., Рябин В.В., Голощапов С.Н.* Электронная техника: учеб. пособие для среднего профессионального образования. — СПб.: Питер, 2006.

15. *Степаненко И.П.* Основы микроэлектроники. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2003.

16. *Щука А.А.* Электроника. — СПб.: БХВ, 2005.

17. Электроника: энциклопедический словарь / Гл. ред. В.Г. Колесников. — М.: Советская энциклопедия, 1991. — 688 с.

## Оглавление

Введение ..... 3
Раздел 1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ ..... 6
Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ..... 6
1.1. Полупроводниковые материалы ..... 6
1.2. Электрические переходы ..... 38
1.3. Свойства *p-n*-перехода при смещении ..... 49
Глава 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ ..... 73
2.1. Общие сведения и классификация полупроводниковых диодов ..... 73
2.2. Устройство полупроводниковых диодов ..... 74
2.3. Система обозначений полупроводниковых диодов ..... 77
2.4. Выпрямительные диоды ..... 80
2.5. Импульсные диоды ..... 81
2.6. Стабилитроны и стабисторы ..... 88
2.7. Варикапы ..... 92
2.8. Туннельные и обращенные диоды ..... 93
Глава 3. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ ..... 109
3.1. Основные определения, устройство и принцип действия ..... 109
3.2. Классификация биполярных транзисторов ..... 116
3.3. Система обозначений транзисторов ..... 123
3.4. Режимы работы и схемы включения транзистора ..... 125
3.5. Принцип работы и токи в биполярном транзисторе при нормальном включении ..... 129
3.6. Физические параметры транзистора ..... 143
3.7. Особенности режимов включения транзистора ..... 146
3.8. Статические характеристики транзисторов ..... 150
3.9. Внешние малосигнальные статические параметры транзистора (*h*-параметры) ..... 171

3.10. Динамические характеристики и параметры транзистора ... 184
3.11. Работа транзистора с импульсными сигналами ... 196
3.12. Зависимость параметров транзисторов от температуры и режима электропитания ... 199
3.13. Частотные свойства биполярного транзистора ... 201
3.14. Однопереходный транзистор ... 202
Глава 4. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ ... 206
4.1. Общие сведения о полевых транзисторах ... 206
4.2. Классификация полевых (униполярных) транзисторов ... 208
4.3. Устройство и принцип действия полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом ... 211
4.4. Полевой транзистор с переходом Шоттки ... 222
4.5. Полевые транзисторы с изолированным затвором от канала ... 225
4.6. Основные параметры полевых транзисторов и их ориентировочные значения ... 255
4.7. МДП(МОП)-структуры специального назначения ... 259
Глава 5. ТИРИСТОРЫ ... 275
5.1. Общие сведения и классификация ... 275
5.2. Условное обозначение тиристоров ... 277
5.3. Устройство тиристора ... 280
5.4. Физические процессы в динисторе ... 282
5.5. Вольт-амперная характеристика динистора ... 288
5.6. Симметричный диодный тиристор (диак-симистор) ... 294
5.7. Триодный тиристор (тринистор) ... 297
5.8. Симметричный триодный тиристор (триак) ... 303
5.9. Основные параметры тиристоров ... 313
Глава 6. НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ ... 315
6.1. Терморезистор ... 315
6.2. Варисторы ... 317
6.3. Позисторы ... 319
6.4. Условное обозначение нелинейных полупроводниковых приборов ... 320
6.5. Болометры ... 322

Глава 7. ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ ..... 326
7.1. Общие сведения и классификация электровакуумных приборов ..... 326
7.2. Электронные лампы ..... 328
7.3. Двухэлектродные лампы — диоды ..... 347
7.4. Трехэлектродные лампы — триоды ..... 353
7.5. Экранированные и специальные лампы ..... 376
7.6. Электронно-лучевые приборы ..... 381
7.7. Ионные приборы ..... 397
Глава 8. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И ПРИБОРЫ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ..... 415
8.1. Общие сведения ..... 415
8.2. Фотоэлектрические и светоизлучающие приборы ..... 418
8.3. Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов ..... 420
8.4. Полупроводниковые фотоэлектрические (оптоэлектронные) приборы ..... 422
8.5. Светоизлучающие полупроводниковые приборы ..... 461
8.6. Оптроны ..... 470
8.7. Электровакуумные фотоэлектронные приборы ..... 478
8.8. Фотоэлектронные умножители ..... 487
8.9. Приборы отображения информации ..... 493
Рекомендуемая литература ..... 528

*Учебное издание*

Фролов Владимир Александрович

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

В двух частях

Часть 1

Электронные приборы и устройства

*Учебник*

Подписано в печать 11.11.2013 г.
Формат 60×84/16. Печ. л. 33,25. Тираж 1400 экз. Заказ
ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию
на железнодорожном транспорте»
105082, Москва, ул. Бакунинская, д. 71
Тел.: +7 (495) 739-00-30,
e-mail: info@umczdt.ru,
http://www.umczdt.ru