

Министерство образования Российской Федерации  
Тамбовский государственный технический университет

**Е.Б. ВИНОКУРОВ**

# **ЭЛЕКТРОНИКА**

Учебное пособие

Тамбов

• Издательство ТГТУ •  
2004

УДК 621.38(075)  
ББК 3 85 я 73  
В 496

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук,  
профессор ТГУ им. Г.Р. Державина  
***В.А. Федоров***

Доктор технических наук, профессор ТГТУ  
***Ю.Л. Муромцев***

**Винокуров Е.Б.**

Электроника: Учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004, 80 с.

Настоящее пособие состоит из семи модулей, в которых рассматриваются устройство и принцип действия наиболее распространенных полупроводниковых приборов (полупроводниковых резисторов, биполярных и полевых транзисторов, тиристоров), а также основных типов электровакуумных и газоразрядных приборов.

Пособие посвящено изучению основ электроники и предназначено для обучающихся в системе начального профессионального образования по профессиям «Монтажник радиоэлектронной аппаратуры и приборов» и «Радиомеханик».

УДК 621.38(075)

ББК 3 85 я 73

ISBN 5-8265-0275-4

© Винокуров Е.Б., 2004

© Тамбовский государственный  
технический университет  
(ТГТУ), 2004  
**Е.Б. ВИНОКУРОВ****ЭЛЕКТРОНИКА**  


Учебное издание

**ВИНОКУРОВ Евгений Борисович**

**ЭЛЕКТРОНИКА**

Учебное пособие

Редактор Е.С. Мордасова

Компьютерное макетирование И.В. Евсеевой

Подписано к печати 16.03.2004

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Объем: 4,65 усл. печ. л.; 4,5 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 218<sup>М</sup>

Издательско-полиграфический центр ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ВВЕДЕНИЕ

Электроника – важнейшая отрасль науки и техники, изучающая взаимодействие заряженных частиц, в первую очередь электронов, с электромагнитными полями, а также методы разработки вакуумных, газоразрядных и полупроводниковых электронных приборов, используемых, в основном, для генерации и усиления сигналов, передачи, обработки и хранения информации. Началом возникновения электроники можно считать изобретение в 1904 г. электровакуумного диода. За 100 лет своего существования, пройдя несколько этапов революционных преобразований, она стала отраслью знаний, определяющей уровень развития цивилизации. Достижения современной электроники сделали ее неотъемлемой частью жизни современного человека. Поэтому подготовка специалистов всех уровней по разработке, производству, обслуживанию и ремонту радиоэлектронного оборудования является важной задачей современного профессионального образования.

Предлагаемое учебное пособие предназначено для изучения основ электроники на первой ступени обучения образовательного комплекса «профессиональный лицей – техникум – технический вуз» при подготовке квалифицированных рабочих по профессиям радиотехнического профиля.

Оно состоит из семи модулей, не равнозначных по объему и уровню представления материала. В модуле 1 формируется начальное представление об основных электрофизических свойствах полупроводников и более подробно излагается принцип действия и методы описания наиболее простых полупроводниковых приборов – нелинейных резисторов.

Модули 2, 3 и 4, в которых рассматриваются полупроводниковые приборы, являющиеся элементной базой многих радиоэлектронных устройств и основой изделий микроэлектроники, содержат материал на уровне второй (среднетехнической) ступени обучения.

Модули 5 и 7, в силу ряда причин, оговоренных в пособии, носят конспективный характер. Модуль 6 следует рассматривать как основу для дальнейшего подробного изучения электронно-лучевых приборов отображения графической информации, применяющихся в современной радиотелевизионной аппаратуре и вычислительной технике.

В конце каждого модуля приводятся вопросы, позволяющие обучающимся провести самоконтроль усвоения полученных знаний.

### Модуль 1 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ РЕЗИСТОРЫ

#### 1.1 Строение твердых тел

Все твердые тела, встречающиеся в природе, делятся на кристаллические и аморфные. В кристаллических телах слагающие их атомы и молекулы располагаются в строго определенном порядке, образуя симметричные кристаллы. В отличие от кристаллов, аморфные тела не имеют упорядоченной и многократно повторяемой структуры – атомы в них располагаются достаточно произвольно.

В радиоэлектронных приборах, выполненных на основе твердых тел, в настоящее время преимущественно используются кристаллы.

По способу связи между атомами, составляющими кристалл, принято различать *ионные, металлические, ковалентные* и *молекулярные* кристаллы.

При образовании кристаллов с ионной связью, являющихся, как правило, солями, происходит ионизация ранее нейтральных атомов путем обмена валентными электронами. Вследствие этого кристалл состоит из положительных и отрицательных ионов, располагающихся таким образом, что электростатическое притяжение разноименных ионов преобладает над отталкиванием одноименных. В отсутствие примесей в ионных кристаллах нет свободных носителей заряда, поэтому данный класс веществ относится к диэлектрикам.

**ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛОВ ПРОИСХОДИТ ОТТОРЖЕНИЕ И ОБОБЩЕСТВЛЕНИЕ ВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ У ВСЕХ АТОМОВ. В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭТОГО КРИСТАЛЛ МЕТАЛЛА ОКАЗЫВАЕТСЯ СОСТОЯЩИМ ИЗ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ И СООТВЕТСТВУЮЩЕГО ЧИСЛА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, ХАОТИЧЕСКИ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ПО ВСЕМУ ОБЪЕМУ КРИСТАЛЛА. МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ СВЯЗ ВЕСЬМА ПРОЧНА, ТАК КАК КАЖДЫЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ИОН ВЗАИМОДЕЙСТВУЕТ СО МНОГИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ, А СИЛЫ ВЗАИМНОГО ОТТАЛКИВАНИЯ ИОНОВ НЕ ПОЗВОЛЯЮТ ИМ СБЛИ-**

## ЖАТЬСЯ. БОЛЬШОЕ КОЛИЧЕСТВО СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ПРИВОДИТ К ТОМУ, ЧТО МЕТАЛЛЫ ЯВЛЯЮТСЯ ХОРОШИМИ ПРОВОДНИКАМИ.

При ковалентной связи между атомами кристалла обмена валентными электронами не происходит. Однако при сближении атомов образуются пары общих электронов, принадлежащие одновременно обоим атомам. Возникающие при этом силы притяжения достаточно велики, чтобы образовался прочный кристалл, например, кристалл *алмаза, кремния, германия* и другие, при этом при определенных условиях в них могут возникать свободные носители заряда.

В кристаллах многих органических веществ имеется молекулярная связь, обусловленная слабыми электрическими силами, называемыми силами Ван-дер-Ваальса. Они вызваны несимметричностью электронных оболочек атомов.

*Идеальных кристаллов практически не встречается; в каждом из них имеется несколько типов связей, одна из которых преобладает.*

В электротехнике и радиоэлектронике последний тип кристаллов не нашел практического применения, все остальные, напротив, применяются очень широко. Начало практического использования полупроводниковых материалов относится к двадцатым годам XX века. Но революционные преобразования в радиоэлектронике и начало твердотельной электроники связывают с изобретением в 1948 г. полупроводникового усилительного прибора – транзистора (У. Шокли, У. Браттейн, Дж. Бардин).

### 1.2 ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Полупроводниками называют широкий класс веществ, занимающих промежуточное положение между металлами и диэлектриками по ряду электрофизических свойств. Наиболее ярко черты сходства и отличия металлов и полупроводников проявляются при сравнении их удельного сопротивления. Удельное сопротивление металлов  $\rho_{Me}$  в некотором интервале температур, находящемся между  $T = 0$  и  $T = T_{\text{плавл}}$ , практически линейно и достаточно медленно увеличивается с ростом температуры; эта зависимость описывается следующим математическим выражением:

$$\rho_{Me} = \rho_{Me0}(1 + \alpha t),$$

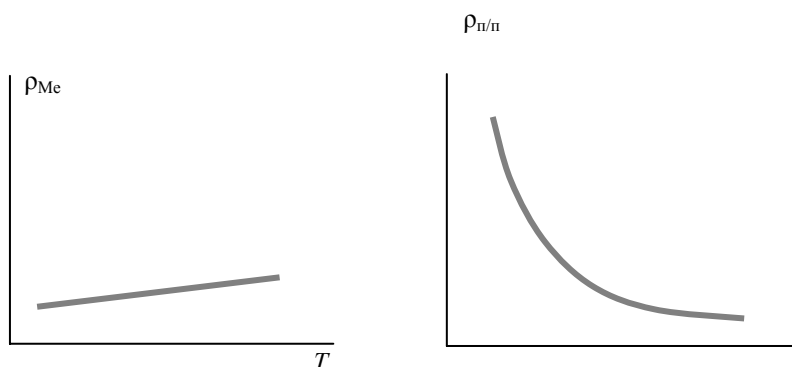
где  $\rho_{Me0}$  – удельное сопротивление при  $t = 20$  °С,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления,  $t$  – температура по шкале Цельсия.

Характерной особенностью полупроводников, отличающей их от металлов, является уменьшение удельного сопротивления с ростом температуры, как правило, экспоненциально в широком интервале температур:

$$\rho_{п/п} = \rho_{п/п0} \exp(E_a / kT).$$

Здесь  $E_a$  – так называемая энергия активации проводимости,  $\rho_{п/п0}$  – коэффициент, также зависящий от температуры, но гораздо слабее, чем  $\exp(E_a / kT)$ . Приведенная формула означает, что электроны в полупроводниках связаны с атомами, с энергией связи порядка  $E_a$ . С повышением температуры тепловое движение начинает разрывать связи электронов и часть их, пропорциональная  $\exp(E_a / kT)$ , становится свободными носителями заряда.

На рис. 1 а, б приведена качественная зависимость удельного сопротивления металлов и полупроводников от температуры. Столь резкое различие в температурной зависимости удельного сопротивления объясняется различным характером связей в кристаллах металлов и полупроводников.



а)

б)

**Рис. 1** Графики температурной зависимости удельного сопротивления для металлов и полупроводников

**ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛОВ ПРОИСХОДИТ ОТТОРЖЕНИЕ И ОБОБЩЕСТВЛЕНИЕ ВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ У ВСЕХ АТОМОВ. В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭТОГО КРИСТАЛЛ МЕТАЛЛА ОКАЗЫВАЕТСЯ СОСТОЯЩИМ ИЗ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ И СООТВЕТСТВУЮЩЕГО ЧИСЛА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, ХАОТИЧЕСКИ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ПО ВСЕМУ ОБЪЕМУ КРИСТАЛЛА. МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ СВЯЗ ВЕСЬМА ПРОЧНА, ТАК КАК КАЖДЫЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ИОН ВЗАИМОДЕЙСТВУЕТ СО МНОГИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ, А СИЛЫ ВЗАИМНОГО ОТТАЛКИВАНИЯ ИОНОВ НЕ ПОЗВОЛЯЮТ ИМ СБЛИЖАТЬСЯ. БОЛЬШОЕ КОЛИЧЕСТВО СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ПРИВОДИТ К ТОМУ, ЧТО МЕТАЛЛЫ ЯВЛЯЮТСЯ ХОРОШИМИ ПРОВОДНИКАМИ.**

Кристаллы полупроводников образованы *ковалентной связью*, при которой при сближении атомов образуются пары общих электронов, принадлежащие одновременно обоим атомам. Возникающие при этом силы притяжения достаточно велики, чтобы образовался прочный кристалл, например, кристалл алмаза, кремния, германия и т.д., при этом при определенных условиях ковалентная связь может быть разорвана, что приведет к возникновению свободных носителей заряда.

Разрыв ковалентной связи в кристаллах полупроводников в первую очередь обусловлен тепловым движением, но может происходить под действием других внешних воздействий: электромагнитного излучения, потока быстрых частиц, сильного электрического поля и т.д. Поэтому для полупроводников характерна высокая чувствительность электропроводности к внешним воздействиям, а также к содержанию примесей и дефектов в кристаллах, поскольку во многих случаях энергия  $E_a$  для электронов, локализованных вблизи примесей или дефектов, существенно меньше, чем в идеальном кристалле данного полупроводника.

*Возможность в широких пределах управлять электропроводностью полупроводников является основой их многочисленных и разнообразных применений.*

Приведенная формула относится в равной мере и к диэлектрикам, электропроводность которых может также стать заметной при высокой температуре. Различие между полупроводниками и диэлектриками является скорее количественным, чем качественным. Точнее было бы говорить о полупроводниковом состоянии неметаллических веществ, не выделяя полупроводники в особый класс, а к диэлектрикам относить лишь такие вещества, у которых в силу больших значений  $E_a$  и  $\rho_0$  электропроводность могла бы достигнуть заметных значений лишь при температурах, превышающих температуру их испарения.

Однако термин «полупроводники» обычно понимают в более узком смысле, как совокупность нескольких, наиболее типичных групп веществ, полупроводниковые свойства которых четко выражены уже при комнатной температуре (300 К). Ниже приведены примеры таких групп.

Элементы IV группы периодической системы Ge, Si, которые наиболее полно изучены и с которыми связаны многие успехи полупроводниковой электроники. Атомы этих элементов, обладая 4 валентными электронами, образуют кристаллические решетки с ковалентной связью атомов. Свойствами полупроводника обладает также алмаз; однако величина  $E_a$  для него значительно больше, чем у Ge и Si, поэтому при 300 К его собственная (не связанная с примесями или внешними воздействиями) проводимость мала.

Алмазоподобные полупроводники – соединение элементов III группы с элементами V группы (так называемые полупроводники типа  $A^{III}B^V$ , например, GaAs, InSb, GaP и т.п.). Связи в таких кристаллах не полностью ковалентные, а частично ионные. Однако ковалентная связь в них преобладает и определяет структуру, в результате чего эти кристаллы по многим свойствам являются ближайшими аналогами Ge и Si.

Соединения элементов II и VI групп (так называемые полупроводники типа  $A^{II}B^{VI}$ , например, ZnSe, CdTe, CdS и т.п.). Полупроводниковые свойства у них не так ярко выражены.

Соединения элементов IV и VI групп (так называемые полупроводники типа  $A^{IV}B^{VI}$ , например, PbS, SnTe, GeTe и т.п.) образуют одну из важных групп полупроводников, известных как приемники инфракрасного излучения.

Перечисление только известных на сегодняшний день полупроводников заняло бы несколько страниц, мы не будем на этом здесь специально останавливаться.

Чтобы создать проводимость в ковалентном кристалле, необходимо разорвать хотя бы одну из связей, удалив с нее электрон, перенести его в какую-либо другую ячейку кристалла, где все связи заполнены, и этот электрон будет лишним. Такой электрон в дальнейшем может свободно переходить из ячейки в ячейку (все они для него эквивалентны) и, являясь всюду лишним, переносит с собой избыточный отрицательный заряд, т.е. становится электроном проводимости. Разорванная же связь становится блуждающей по кристаллу дыркой. Недостаток электрона в одной из связей означает наличие у пары атомов единичного положительного заряда, который переносится вместе с дыркой.

*Электроны и дырки – свободные носители зарядов в полупроводниках.*

В идеальных кристаллах возбуждение одного из связанных электронов и превращение его в электрон проводимости неизбежно вызывает появление дырки, так что концентрации обоих типов носителей равны между собой. Но это не означает, что вклад их в электропроводность одинаков. Согласно классической электронной теории плотность электрического тока  $j = nev$ , где  $n$  – концентрация,  $e$  – заряд,  $v$  – средняя скорость направленного движения свободных носителей заряда. В полупроводниках электрический ток имеет как электронную, так и дырочную составляющие:

$$j = j_n + j_p = n_n e v_n + n_p e v_p.$$

Даже при равенстве концентраций  $n_n$  и  $n_p$  электронная и дырочная составляющие не будут равны, так как условия для перемещения электронов и дырок неодинаковы: электроны движутся между узлами кристаллической решетки, дырки – по ковалентным связям и поэтому  $v_n > v_p$ . Средняя скорость носителя заряда, находящегося под действием электрического поля, прямо пропорциональна его напряженности:  $v = \mu E$ . Коэффициент пропорциональности  $\mu$  называется *подвижностью носителей заряда*. Очевидно, что в полупроводниках подвижность электронов должна быть больше, чем подвижность дырок, так как свободные электроны движутся в пространстве между узлами кристаллической решетки, а дырки – по ковалентным связям.

Проводимость полупроводников, обусловленная только разрывом ковалентных связей и характеризующаяся равенством концентраций электронов и дырок, называется *собственной проводимостью*. Приведенная на рис. 1, б температурная зависимость удельного сопротивления характерна именно для такого типа проводимости.

В реальных кристаллах равенство концентраций электронов и дырок может нарушаться под влиянием различных факторов, например, примесей и дефектов кристаллической решетки. Электропроводность полупроводников, обусловленная наличием примесей, называется *примесной проводимостью*. Целенаправленное введение примесей в кристалл полупроводника называется *легированием* и является основным методом создания полупроводников с заданным типом проводимости (преимущественно электронным или дырочным) и заданной концентрацией свободных носителей заряда.

Примеси и дефекты делят на доноров и акцепторов. Доноры отдают в объем полупроводника избыточные электроны и создают таким образом электронную проводимость (*n*-типа). Акцепторы захватывают валентные электроны вещества, в которое они внедрены, в результате чего создаются дырки и возникает дырочная проводимость (*p*-типа).

Типичные примеры доноров – примесные атомы элементов V группы (P, As, Sb) в Ge и Si.

Аналогично атомы III группы (B, Al, Ga, In) – типичные акцепторы в Ge и Si.

*Введение определенных примесей (легирование) – эффективный метод получения полупроводников с различными требуемыми свойствами.*

На основе полупроводниковых материалов создано большое число различных радиоэлектронных приборов, отличающихся друг от друга по устройству, степени сложности и области применения. к числу простейших полупроводниковых приборов относятся *полупроводниковые резисторы*.

### 1.3 Дрейфовый и диффузионный токи в полупроводниках

Электрический ток может возникнуть в полупроводнике только при направленном движении носителей заряда, которое создается либо под воздействием электрического поля (дрейф), либо вследствие неравномерного распределения носителей заряда по объему кристалла (диффузия).

Если электрическое поле отсутствует и носители заряда имеют в кристалле равномерную концентрацию, то электроны и дырки совершают непрерывное хаотическое тепловое движение. В результате столкновения носителей заряда друг с другом и с атомами кристаллической решетки скорость и направление их движения все время изменяются, так что тока в кристалле не будет.

Под действием приложенного к кристаллу напряжения в нем возникает электрическое поле; движение носителей заряда упорядочивается: электроны перемещаются по направлению к положительному электроду, дырки – к отрицательному. При этом не прекращается и тепловое движение носителей заряда, вследствие которого происходят столкновения их с атомами полупроводника и примеси.

Направленное движение носителей заряда под действием сил электрического поля называют *дрейфом*, а вызванный этим движением ток – *дрейфовым током*. При этом характер тока может быть *электронным*, если он вызван движением электронов, или *дырочным*, если он создается направленным перемещением дырок.

В собственных полупроводниках концентрации электронов и дырок одинаковы, но вследствие их разной подвижности электронная составляющая тока больше дырочной. В примесных полупроводниках концентрации электронов и дырок существенно отличаются, характер тока определяется основными носителями заряда: в полупроводниках *p*-типа – дырками, а в полупроводниках *n*-типа – электронами.

При неравномерной концентрации носителей заряда вероятность их столкновения друг с другом больше в тех слоях полупроводника, где их концентрация выше. Совершая хаотическое тепловое движение, носители заряда отклоняются в сторону, где меньше число столкновений, т.е. движутся в направлении уменьшения их концентрации.

Направленное движение носителей заряда из слоя с более высокой их концентрацией в слой, где концентрация ниже, называют *диффузией*, а ток, вызванный этим явлением, – *диффузионным током*. Этот ток, как и дрейфовый, может быть электронным или дырочным.

Электроны, перемещаясь из слоя с высокой концентрацией в слой с более низкой концентрацией, по мере продвижения рекомбинируют с дырками, и наоборот, диффундирующие в слой с пониженной концентрацией дырки рекомбинируют с электронами. При этом избыточная концентрация носителей заряда уменьшается.

## 1.4 Полупроводниковые резисторы

Как следует из вышесказанного, полупроводники представляют собой особый класс веществ, обладающий целым рядом уникальных электрофизических свойств. На основе полупроводниковых материалов были разработаны многочисленные электронные приборы, являющиеся элементной базой современных радиоэлектронных и информационных систем. Наиболее простыми полупроводниковыми приборами, принцип действия которых основан на уникальных электрофизических свойствах полупроводников, являются *нелинейные полупроводниковые резисторы*.

Полупроводниковыми резисторами называют приборы, принцип действия которых основан на свойствах полупроводников изменять свое сопротивление под действием температуры, электромагнитного излучения, приложенного напряжения и других факторов. Рассмотрим три наиболее распространенных типа полупроводниковых резисторов.

**Терморезистор** представляет собой полупроводниковый нелинейный резистор, сопротивление которого значительно изменяется при изменении температуры. Терморезистор выполняют в виде бусинки, диска, цилиндрического стержня, плоской шайбы. В некоторых конструкциях предусмотрено помещение терморезистора в металлический или стеклянный герметизированный баллон.

Терморезисторы, обладающие отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, называют *термисторами*. Они нашли широкое применение в радиоэлектронном оборудовании самого различного назначения.

К важнейшим *параметрам термисторов* относятся: *холодное сопротивление* – сопротивление термистора при температуре окружающей среды 20 °С; *температурный коэффициент сопротивления ТКС*, выражающий в процентах изменение сопротивления термистора при изменении температуры на 1 °С; *максимальная рабочая температура* – температура, при которой характеристики термистора остаются стабильными в течение установленного срока службы; *наибольшая рассеиваемая мощность* – мощность, при которой термистор при протекании тока разогревается до максимальной рабочей температуры; *теплоемкость Н* – количество теплоты, необходимой для повышения температуры термистора



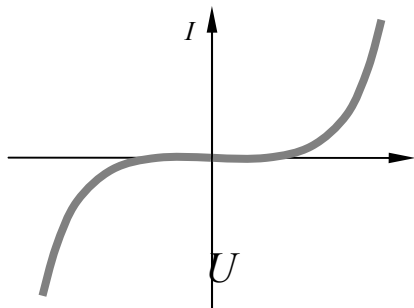
на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; коэффициент рассеяния  $b$  – мощность, рассеиваемая термистором при разности температур термистора и окружающей среды в  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; постоянная времени  $\tau$  – время, в течение которого температура термистора становится равной  $63\text{ }^{\circ}\text{C}$  при перенесении его из среды с температурой  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  в среду с температурой  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Постоянная времени определяется как отношение теплоемкости к коэффициенту рассеяния:  $\tau = H/b$ .

В устройствах промышленной электроники термисторы применяются достаточно широко для измерения и регулирования температуры, термокомпенсации различных элементов электрических схем, работающих в широком диапазоне температур, стабилизации напряжения в цепях переменного и постоянного токов, а также в качестве регулируемых бесконтактных резисторов в цепях автоматики.

В ряде специальных устройств находят применение так называемые *полупроводниковые болометры*, состоящие из двух термисторов. Один из термисторов (активный) непосредственно подвергается воздействию контролируемого фактора (температуры излучения), а другой (компенсационный) служит для компенсации влияния температуры окружающей среды.

*Позисторами* называют полупроводниковые термисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления. В качестве полупроводника в них используют титанат бария со специальными примесями, сопротивление которого увеличивается при повышении температуры.

Как и для термисторов с отрицательным ТКС, для позисторов основными характеристиками являются вольт-амперная и температурная. *Параметры позисторов* аналогичны параметрам термисторов с отрицательным ТКС.



**Варистор** представляет собой полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от приложенного напряжения. Примерный вид вольт-амперной характеристики варистора приведен на рис. 2. Симметричность характеристики позволяет использовать варистор в цепях как постоянного, так и переменного тока.

К основным параметрам варисторов относятся: *статическое сопротивление* при постоянных значениях напряжения и тока  $R_{ст} = U/I$ ; *динамическое сопротивление* переменному току  $R_{д} = \Delta U / \Delta I$ ; *коэффициент нелинейности* – отношение статического сопротивления к динамическому в данной точке характеристики  $p = R_{ст} / R_{д}$ ; *наибольшая амплитуда импульсного напряжения* и *допустимая рассеиваемая мощность*.

Исходя из двух последних параметров, выбирают рабочее эксплуатационное напряжение варистора.

В схемах промышленной электроники варисторы применяют для регулирования электрических величин, стабилизации токов и напряжений и для защиты приборов и элементов схем от перенапряжений.

**Фоторезистором** называют полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется под действием электромагнитного излучения видимой, а также инфракрасной и ультрафиолетовой частей спектра. Материалом для изготовления фоторезисторов служат обычно сульфиды и селениды свинца и кадмия. Светочувствительный проводящий слой полупроводника наносят на стеклянную пластинку с металлическими электродами и помещают в пластмассовый или металлический корпус с окном из фотостекла.

При отсутствии светового потока сопротивление фоторезистора, называемое *темновым*  $R_{темн}$ , весьма велико (в первом приближении  $R_{темн} \rightarrow \infty$ ), при этом через фоторезистор, включенный в схему, протекает малый *темновой ток*  $I_{темн}$ . Под воздействием светового потока сопротивление фоторезистора падает и через него протекает *световой ток*  $I_{св}$ . Разность между световым и темновым токами называют *первичным фототоком проводимости*:  $I_{\phi} = I_{темн} - I_{св}$ .

При увеличении светового потока часть электронов проводимости сталкивается с атомами, ионизирует их и создает дополнительный поток электронов – так называемый *вторичный фототок проводимости*.

Для выбора типа и режима работы фоторезистора используют ряд характеристик:

*вольт-амперная характеристика* – зависимость фототока (или темнового тока) от приложенного напряжения при постоянном световом потоке;

*световая характеристика* – зависимость фототока от падающего светового потока постоянного спектрального состава;

*спектральная характеристика* – зависимость чувствительности фоторезистора от длины волны светового излучения;

К основным *параметрам фоторезисторов*, наряду с указанными ранее темновым сопротивлением, темновым и световым токами, относятся *рабочее напряжение* – максимально возможное напряжение, не приводящее к изменению других параметров фоторезистора в течение всего срока службы и *допустимая мощность рассеяния* – максимальная мощность, рассеиваемая на фоторезисторе без его повреждения, а также некоторые другие параметры.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Какова структура кристаллов основных полупроводников, используемых в электронике?
- 2 Как создается электропроводность в кристаллах полупроводников?
- 3 Какие приборы называют полупроводниковыми резисторами?
- 4 Какими важнейшими параметрами характеризуются терморезисторы?
- 5 Чем отличаются термисторы от позисторов?
- 6 Какие приборы называют полупроводниковыми болометрами?
- 7 Какие приборы называют варисторами?
- 8 Какими параметрами характеризуются варисторы?
- 9 Каковы основные области применения варисторов?
- 10 На каком явлении основан принципа действия фоторезистора?

### Модуль 2 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

## 2.1 ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

### 2.1.1 Электронно-дырочный переход при отсутствии внешнего напряжения

*Электронно-дырочный переход*, или сокращенно *p-n-переход*, – это тонкий переходный слой в полупроводниковом материале на границе между двумя областями с различными типами электропроводности: одна – *n*-типа, другая – *p*-типа.

Электронно-дырочный переход, благодаря своим особым свойствам, является основным элементом многих полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Наряду с *p-n*-переходами в полупроводниковой технике используются и другие виды электрических переходов, например, металл – полупроводник, а также переходы между двумя областями полупроводника одного типа, отличающимися концентрацией примесей, а значит, и значениями удельной проводимости.

Электронно-дырочный переход получают в едином кристалле полупроводника, вводя в одну область донорную примесь, а в другую – акцепторную. Атомы примесей при комнатной температуре оказываются полностью ионизированными. При этом атомы акцепторов, присоединив к себе электроны, создают дырки (получается *p*-область), а атомы доноров отдают электроны, становящиеся свободными (создается *n*-область) (рис. 3, *а*).

Для простоты примем концентрации основных носителей заряда в обеих областях одинаковыми. Такой *p-n*-переход называют *симметричным*:  $n_n = n_p$ .

В каждой области кроме основных носителей заряда имеются неосновные носители, концентрация которых значительно меньше, чем основных. Наличие неосновных носителей определяется генерацией электронно-дырочных пар при разрыве ковалентной связи. Одни и те же носители заряда в одной области являются основными, а в другой – неосновными, так что дырок в *p*-области гораздо больше, чем в *n*-области, и наоборот, электронов в *n*-области значительно больше, чем в *p*-области.

Разность концентраций приводит к диффузии основных носителей заряда через границу между двумя областями. Дырки диффундируют из *p*-области в *n*-область, а электроны – из *n*-области в *p*-область. Попадая в *n*-область, дырки рекомбинируют с электронами, и по мере их продвижения вглубь концентрация дырок уменьшается. Аналогично электроны, углубляясь в *p*-область, постепенно рекомбинируют там с дырками, и концентрация их уменьшается (рис. 3, *б*).

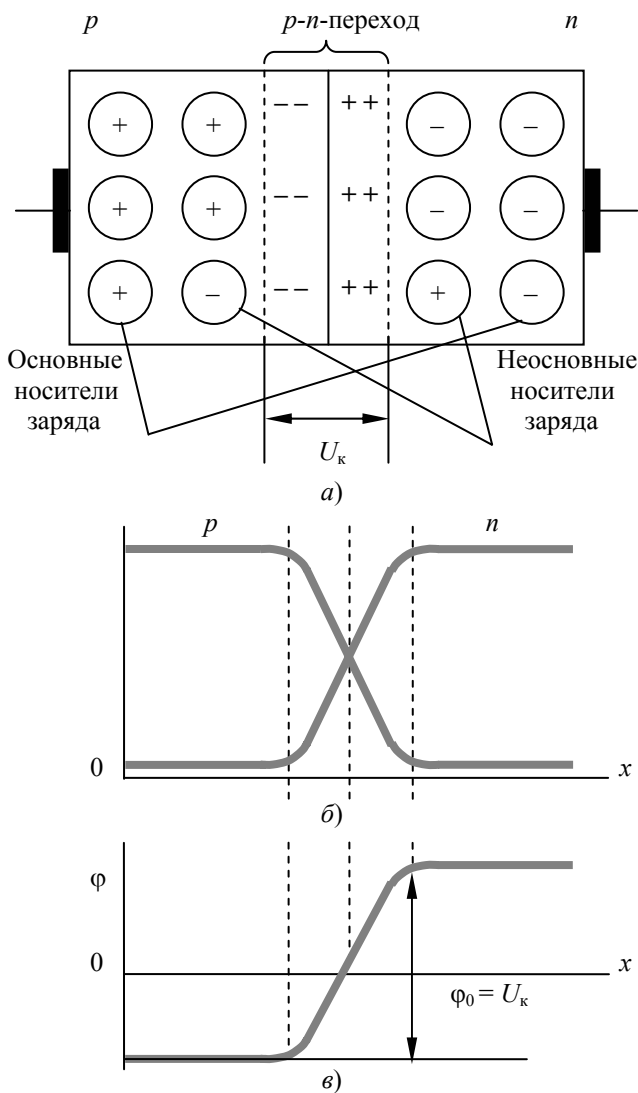


Рис. 3 Электронно-дырочный переход при отсутствии внешнего напряжения:

а – структура  $p$ - $n$ -перехода; б – распределение концентрации носителей заряда; в – потенциальный барьер в  $p$ - $n$ -переходе

Диффузия основных носителей заряда через границу раздела  $p$ - и  $n$ -областей создает ток диффузии в  $p$ - $n$ -переходе, равный сумме электронного и дырочного токов:

$$I_{\text{диф}} = I_{p \text{ диф}} + I_{n \text{ диф}}$$

Направление диффузионного тока совпадает с направлением диффузии дырок.

Уход основных носителей заряда из слоев вблизи границы в соседнюю область оставляет в этих слоях нескомпенсированный неподвижный объемный заряд ионизированных атомов примеси: уход электронов – положительный заряд ионов доноров в  $n$ -области, а уход дырок – отрицательный заряд ионов акцепторов в  $p$ -области (рис. 3, а). Эти неподвижные заряды увеличиваются еще и за счет рекомбинации основных носителей заряда с пришедшими из соседней области носителями заряда противоположного знака.

В результате образования по обе стороны границы между  $p$ - и  $n$ -областями неподвижных зарядов противоположных знаков в  $p$ - $n$ -переходе создается внутреннее электрическое поле, направленное от  $n$ -области к  $p$ -области. Это поле препятствует дальнейшей диффузии основных носителей заряда через границу, являясь для них так называемым *потенциальным барьером*. Его действие определяется *высотой потенциального барьера* (рис. 3, в). В результате появления потенциального барьера диффузион-

ный ток уменьшается. Преодоление потенциального барьера возможно только для основных носителей, обладающих достаточно большой энергией.

Слой, образованный участками по обе стороны границы, где выступили неподвижные заряды противоположных знаков, является переходным слоем и представляет собой собственно *p-n*-переход. Этот слой, из которого уходят подвижные носители заряда, называют *обедненным слоем*. Он обладает большим удельным сопротивлением.

Потенциальный барьер, уменьшая диффузию основных носителей заряда, в то же время способствует переходу через границу неосновных носителей. Совершая тепловое хаотическое движение, неосновные носители заряда попадают в зону действия электрического поля и переносятся им через *p-n*-переход. Движение неосновных носителей заряда под действием внутреннего электрического поля создает в *p-n*-переходе дрейфовый ток, равный сумме электронной и дырочной составляющих:

$$I_{др} = I_{p др} + I_{n др}.$$

Ток, созданный неосновными носителями заряда, очень мал, так как их количество невелико. Этот ток носит название *теплого тока*  $I_T$ , поскольку количество неосновных носителей заряда зависит от собственной электропроводности полупроводника, т.е. от разрушения ковалентных связей под действием тепловой энергии. Направление дрейфового тока противоположно диффузионному.

При отсутствии внешнего напряжения устанавливается динамическое равновесие, при котором уменьшающийся дрейфовый ток становится равным диффузионному:  $I_{диф} = I_{др}$ , т.е. ток через *p-n*-переход равен нулю. Это соответствует определенной высоте потенциального барьера  $\phi_0$ .

Установившаяся высота потенциального барьера  $\phi_0$  в электрон-вольтах численно равна контактной разности потенциалов  $U_k$  в вольтах, создаваемой между нескомпенсированными неподвижными зарядами противоположных знаков по обе стороны границы:  $\phi_0 = U_k$ .

В состоянии равновесия *p-n*-переход характеризуется также шириной  $d_0$ .

Величина  $\phi_0$  зависит в первую очередь от материала полупроводника, а также от температуры и концентрации примеси. С повышением температуры высота потенциального барьера несколько уменьшается. При комнатной температуре для германия  $\phi_0 \approx 0,2...0,3$  В, для кремния  $\phi_0 \approx 0,6...0,8$  В.

### 2.1.2 Электронно-дырочный переход при прямом напряжении

При подаче на *p-n*-переход внешнего напряжения процессы зависят от его полярности.

Внешнее напряжение, подключенное плюсом к *p*-области, а минусом к *n*-области, называют *прямым напряжением*  $U_{пр}$ . Напряжение  $U_{пр}$  почти полностью падает на *p-n*-переходе, так как его сопротивление во много раз превышает сопротивление *p*- и *n*-областей.

Полярность внешнего напряжения  $U_{пр}$  противоположна полярности контактной разности потенциалов  $U_k$ , поэтому электрическое поле, созданное на *p-n*-переходе внешним напряжением направлено навстречу внутреннему электрическому полю. В результате этого потенциальный барьер понижается и становится численно равным разности между напряжениями, действующими на *p-n*-переходе:  $\phi = U_k - U_{пр}$ .

Однако пока  $U_{пр}$  меньше  $U_k$ , еще существует потенциальный барьер; обедненными носителями заряда слой *p-n*-перехода имеет большое сопротивление, ток в цепи имеет малую величину.

При увеличении внешнего прямого напряжения до  $U_{пр} = U_k$  потенциальный барьер исчезает, ширина обедненного слоя стремится к нулю. Дальнейшее увеличение внешнего напряжения при отсутствии слоя *p-n*-перехода, обедненного носителями заряда, приводит к свободной диффузии основных носителей заряда из своей области в область с противоположным типом электропроводности. В результате этого через *p-n*-переход по цепи потечет сравнительно большой ток, называемый *прямым током*  $I_{пр}$ , который с увеличением прямого напряжения растет.

Введение носителей заряда через электронно-дырочный переход из области, где они являются основными, в область, где они являются неосновными, за счет снижения потенциального барьера называют *инжекцией*. Движение основных носителей заряда через *p-n*-переход создает электрический ток во внешней цепи. Дрейф неосновных носителей заряда теплового происхождения в сторону от *p-n*-перехода внутрь области создает тепловой ток  $I_T$ . Тепловой ток на несколько порядков меньше диффузионного тока основных носителей заряда, т.е. прямого тока  $I_{пр}$ , и имеет противоположное ему направление.

Прямой ток создается встречным движением дырок и электронов через *p-n*-переход, направление его соответствует направлению движения положительных носителей заряда – дырок. Во внешней цепи

прямой ток протекает от плюса источника прямого напряжения через полупроводниковый кристалл к минусу источника.

### 2.1.3 Электронно-дырочный переход при обратном напряжении

Обратным напряжением  $U_{обр}$  называют внешнее напряжение, полярность которого совпадает с полярностью контактной разности потенциалов; оно приложено плюсом к  $n$ -области, а минусом – к  $p$ -области. При этом потенциальный барьер возрастает: он численно равен сумме внутреннего и внешнего напряжений:  $\phi = U_k + U_{обр}$ .

Повышение потенциального барьера препятствует диффузии основных носителей заряда через  $p$ - $n$ -переход, и она уменьшается, а при некотором значении  $U_{обр}$  совсем прекращается. Одновременно под действием электрического поля, созданного внешним напряжением, основные носители заряда будут отходить от  $p$ - $n$ -перехода. Соответственно расширяются слой, обедненный носителями заряда, и  $p$ - $n$ -переход, причем его сопротивление возрастает.

Внутреннее электрическое поле в  $p$ - $n$ -переходе, соответствующее возросшему потенциальному барьеру, способствует движению через переход неосновных носителей заряда. При приближении их к  $p$ - $n$ -переходу электрическое поле захватывает их и переносит через  $p$ - $n$ -переход в область с противоположным типом электропроводности: электроны из  $p$ -области в  $n$ -область, а дырки – из  $n$ -области в  $p$ -область. Поскольку количество неосновных носителей заряда очень мало и не зависит от величины приложенного напряжения, то создаваемый их движением ток через  $p$ - $n$ -переход очень мал. Ток, протекающий через  $p$ - $n$ -переход при обратном напряжении, называют *обратным током*  $I_{обр}$ . Обратный ток по характеру является дрейфовым тепловым током  $I_{обр} = I_T$ , который не зависит от обратного напряжения.

Процесс захватывания электрическим полем  $p$ - $n$ -перехода неосновных носителей заряда и переноса их при обратном напряжении через  $p$ - $n$ -переход в область с противоположным типом электропроводности называют *экстракцией*.

### 2.1.4 Вольтамперная характеристика $p$ - $n$ -перехода

Вольтамперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода представляет собой зависимость прямого тока от прямого напряжения и обратного тока от обратного напряжения (рис. 4, а). Эта характеристика имеет две ветви: прямую, расположенную в первом квадранте графика, и обратную – в третьем квадранте. Прямой ток создается диффузией через  $p$ - $n$ -переход основных носителей заряда. С увеличением  $U_{пр}$  от 0 до значения, равного  $U_k$ , ток  $I_{пр}$  растет медленно и остается очень малым. Это объясняется наличием потенциального барьера, который препятствует, несмотря на снижение, диффузии основных носителей заряда, а также большим сопротивлением области  $p$ - $n$ -перехода, обедненной носителями заряда. С дальнейшим увеличением  $U_{пр}$  потенциальный барьер исчезает и прямой ток быстро нарастает. Это соответствует интенсивной диффузии через  $p$ - $n$ -переход основных носителей заряда при отсутствии области перехода, обедненной ими.

Обратный ток создается дрейфом через  $p$ - $n$ -переход неосновных носителей заряда. Поскольку концентрация неосновных носителей заряда на несколько порядков ниже, чем основных, обратный ток несоизмеримо меньше прямого. При небольшом увеличении обратного напряжения от 0 обратный ток сначала возрастает до значения, равного величине теплового тока  $I_T$ , а с дальнейшим увеличением  $U_{обр}$  ток остается постоянным. Это объясняется тем, что при очень малых значениях обратного напряжения еще есть незначительная диффузия основных носителей заряда, встречное движение которых уменьшает результирующий ток в обратном направлении. Когда эта диффузия прекращается, величина обратного тока определяется только движением через переход неосновных носителей, количество которых в полупроводнике не зависит от напряжения. Повышение обратного напряжения до определенного значения, называемого напряжением пробоя  $U_{обр.проб}$ , приводит к пробоем электронно-дырочного перехода, т.е. к резкому уменьшению обратного сопротивления и, соответственно, росту обратного тока.

Свойство  $p$ - $n$ -перехода проводить электрический ток в одном направлении значительно больший, чем в другом, называют *односторонней проводимостью*. Электронно-дырочный переход, электрическое сопротивление которого при одном направлении тока на несколько порядков больше, чем при другом, называют *выпрямляющим переходом*.

На рис. 4, а пунктирной линией показано влияние повышения температуры на прямую и обратную ветви вольтамперной характеристики  $p$ - $n$ -перехода. Прямая ветвь при более высокой температуре располагается левее, а обратная – ниже. Таким образом, повышение температуры при неизменном внешнем напряжении приводит к росту как прямого, так и обратного токов, а напряжение пробоя, как правило,

снижается. Причиной такого влияния повышения температуры является уменьшение прямого и обратного сопротивлений из-за термогенерации пар носителей заряда, а также из-за снижения потенциально-го барьера  $\phi_0$ .

### 2.1.5 Пробой и емкость $p$ - $n$ -перехода

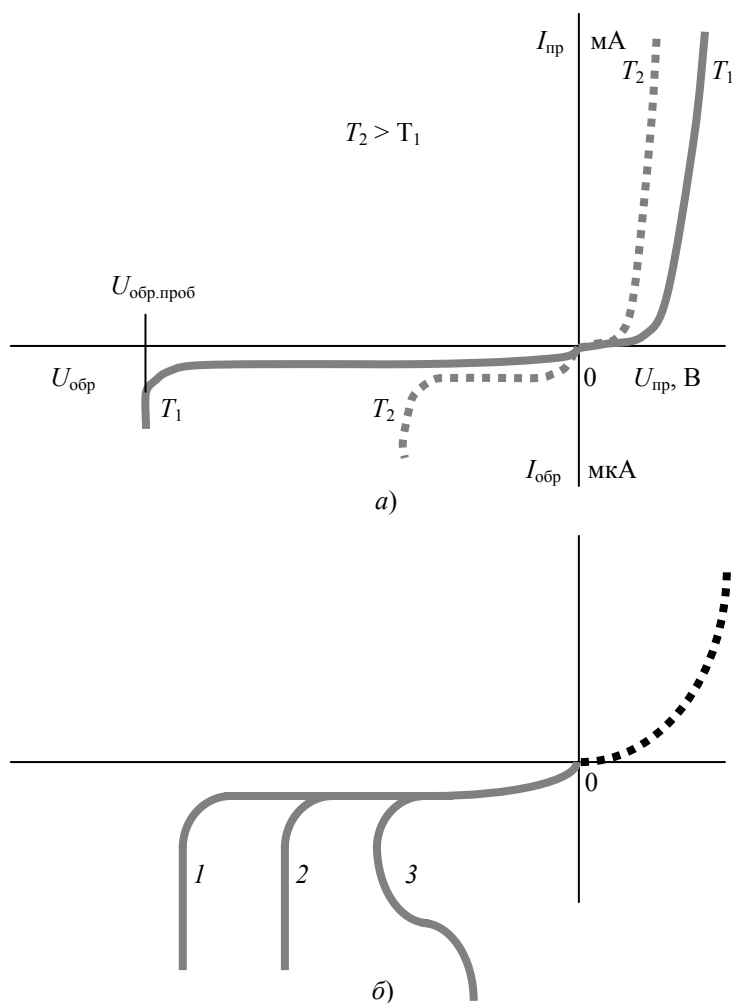


Рис. 4 Вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода:

*а* – влияние температуры на прямой и обратный токи перехода; *б* – виды пробоя  $p$ - $n$ -перехода (1 – лавинный, 2 – туннельный, 3 – тепловой)

чтобы при столкновении с атомами полупроводника отрывать валентные электроны из ковалентных связей кристаллической решетки. Движение образованных при такой ионизации атомов пар электрон-дырка также ускоряется электрическим полем, и они, в свою очередь, участвуют в дальнейшей ионизации атомов. Таким образом, процесс генерации дополнительных неосновных носителей заряда лавиноподобно нарастает, а обратный ток через переход увеличивается. Ток в цепи может быть ограничен только внешним сопротивлением.

Лавинный пробой возникает в высокоомных полупроводниках, имеющих большую ширину  $p$ - $n$ -перехода. В этом случае ускоряемые электрическим полем носители заряда успевают в промежутке между двумя столкновениями с атомами получить достаточную энергию для их ионизации.

Напряжение лавинного пробоя увеличивается с повышением температуры из-за уменьшения длины свободного пробега между двумя столкновениями носителей заряда с атомами. При лавинном пробое напряжение на  $p$ - $n$ -переходе остается постоянным, что соответствует почти вертикальному участку в обратной ветви *1* вольт-амперной характеристики (см. рис. 4, *б*).

*Туннельный пробой* – это электрический пробой  $p$ - $n$ -перехода, вызванный туннельным эффектом. Он происходит в результате непосредственного отрыва валентных электронов от атомов кристаллической решетки полупроводника сильным электрическим полем. Туннельный пробой возникает обычно в приборах с очень узким  $p$ - $n$ -переходом, где при сравнительно невысоком обратном напряжении (до 7 В) создается большая напряженность электрического поля. В результате генерации дополнительных неосновных носителей заряда возникает туннельный ток, превышающий обратный ток нормального режима в десятки раз. Напряжение на  $p$ - $n$ -переходе при туннельном пробое остается постоянным (вертикальный

Как было сказано ранее, пробоем  $p$ - $n$ -перехода называют резкое уменьшение обратного сопротивления, вызывающее значительное увеличение тока при достижении обратным напряжением критического для данного прибора значения  $U_{обр.проб}$ . Пробой  $p$ - $n$ -перехода происходит при повышении обратного напряжения вследствие резкого возрастания процессов генерации пар свободный электрон-дырка. В зависимости от причин, вызывающих дополнительную интенсивную генерацию пар носителей заряда, пробой может быть *электрическим* и *тепловым*. Электрический пробой в свою очередь делится на *лавинный* и *туннельный*.

*Лавинный пробой* – электрический пробой  $p$ - $n$ -перехода, вызванный лавинным размножением носителей заряда под действием сильного электрического поля. Он обусловлен ударной ионизацией атомов быстро движущимися неосновными носителями заряда. Движение этих носителей заряда с повышением обратного напряжения ускоряется электрическим полем в области  $p$ - $n$ -перехода. При достижении определенной напряженности электрического поля они приобретают достаточную энергию,

участок кривой 2 на рис. 4, б). При повышении температуры напряжение туннельного пробоя уменьшается.

Оба вида электрического пробоя, как лавинного, так и туннельного, не разрушают  $p-n$ -переход и не выводят прибор из строя. Процессы, происходящие при электрическом пробое, обратимы: при уменьшении обратного напряжения свойства прибора восстанавливаются.

*Тепловой пробой* вызывается недопустимым перегревом  $p-n$ -перехода, в результате которого происходит интенсивная генерация пар носителей заряда – разрушение ковалентных связей за счет тепловой энергии. Этот процесс развивается лавинообразно, поскольку увеличение обратного тока за счет перегрева приводит к еще большему разогреву и дальнейшему росту обратного тока.

Тепловой пробой носит обычно локальный характер: из-за неоднородности  $p-n$ -перехода может перегреться отдельный его участок, который при лавинообразном процессе будет еще сильнее разогреваться проходящим через него большим обратным током. В результате данный участок  $p-n$ -перехода расплавляется; прибор приходит в негодность. Участок теплового пробоя на вольтамперной характеристике (кривая 3 рис. 4, б) соответствует росту обратного тока при одновременном уменьшении падения напряжения на  $p-n$ -переходе.

Тепловой пробой может наступить как следствие перегрева из-за недопустимого увеличения обратного тока при лавинном или туннельном пробое, при недопустимом увеличении обратного напряжения, а также в результате общего перегрева при плохом теплоотводе, когда выделяемое в  $p-n$ -переходе тепло превышает отводимое от него. Повышение температуры уменьшает напряжение теплового пробоя и может вызвать тепловой пробой при более низком, чем при возникновении электрического пробоя, напряжении.

*Емкость  $p-n$ -перехода.* Электронно-дырочный переход обладает определенной электрической емкостью, складывающейся из двух емкостей: *барьерной* и *диффузионной*.

Емкость, обусловленная *неподвижными* зарядами ионов доноров и акцепторов, создающих в  $p-n$ -переходе как бы плоскостной конденсатор, носит название *барьерной*, или *зарядной*. Она тем больше, чем больше площадь  $p-n$ -перехода и меньше его ширина. Ширина  $p-n$ -перехода зависит от величины и полярности приложенного напряжения. При прямом напряжении она меньше, следовательно, барьерная емкость возрастает. При обратном напряжении барьерная емкость уменьшается тем сильнее, чем больше  $U_{обр}$ . Это используется в полупроводниковых приборах – варикапах, служащих конденсаторами переменной емкости, величина которой управляется напряжением. Барьерная емкость в зависимости от площади  $p-n$ -перехода составляет десятки и сотни пикофард.

Емкость, обусловленная *объемными зарядами инжектированных электронов и дырок* по обе стороны от  $p-n$ -перехода, где их концентрация в результате диффузии через  $p-n$ -переход велика, носит название *диффузионной*. Она проявляется при прямом напряжении, когда происходит инжекция носителей заряда, и значительно превышает по величине барьерную емкость, составляя в зависимости от величины прямого тока сотни и тысячи пикофард. При обратном напряжении она практически отсутствует. Таким образом, при прямом напряжении следует учитывать диффузионную емкость, а при обратном – барьерную.

## 2.2 Полупроводниковые диоды

*Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним  $p-n$ -переходом и двумя выводами.* Упрощенная структура полупроводникового диода и его условное графическое обозначение показаны на рис. 5.

По конструкции полупроводниковые диоды разделяют на *плоскостные* и *точечные*. Плоскостные диоды имеют плоскостной переход, у которого линейные размеры, определяющие его площадь, значительно больше его ширины. У точечных диодов линейные размеры площади  $p-n$ -перехода очень малы и соизмеримы с его шириной. Точечный  $p-n$ -переход создается около контакта

острия металлической пружины

Точечные диоды имеют его небольшим размерам. Они сверхвысоких частот, но шие обратные напряжения.

Принцип действия выпрямительной электроподвести переменное напряжение

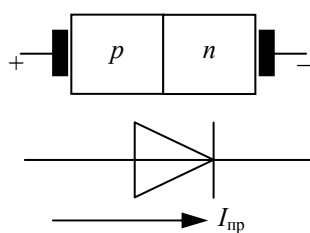


Рис. 5 Структура диода и направление тока через него при прямом напряжении

с полупроводниковым кристаллом  $n$ -типа. малую емкость  $p-n$ -перехода благодаря могут работать в диапазоне высоких и допускают только малые токи и неболь-

тельных диодов основан на свойстве водности  $p-n$ -перехода. Если к диоду (рис. 6), то в течение одного полупериода,

когда на аноде положительная полуволна, на  $p$ - $n$ -пере-ходе действует прямое напряжение. При этом со-

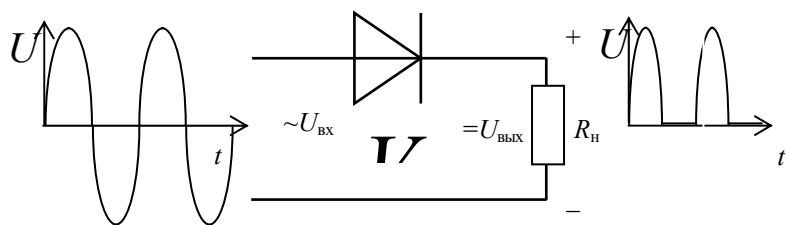


Рис. 6 Применение диода для выпрямления переменного тока

противление диода мало; через него протекает большой прямой ток. В следующий полупериод полярность напряжения на диоде меняется на обратную. Его сопротивление значительно увеличивается; через него проходит очень малый обратный ток. Нагрузку  $R_n$  включают в цепь источника питания последовательно с диодом. Практически ток через нагрузку проходит только в одном направлении, поскольку обратным током по сравнению с прямым можно пренебречь. Таким образом происходит выпрямление, т.е. преобразование переменного тока в постоянный по направлению (пульсирующий).

Схема выпрямления с одним диодом, в которой ток проходит через нагрузку в течение половины периода, является простейшей. На практике применяют более сложные схемы.

*Вольтамперная характеристика* диода представляет собой зависимость тока от величины и полярности приложенного напряжения. Ее вид определяется вольтамперной характеристикой  $p$ - $n$ -перехода. Реальные характеристики отличаются от идеальных из-за влияния различных факторов.

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

*прямое напряжение*  $U_{пр}$  – значение постоянного напряжения на диоде при заданном прямом токе;

*обратный ток*  $I_{обр}$  – значение постоянного тока, протекающего через диод в обратном направлении при заданном обратном напряжении;

*сопротивление диода в прямом направлении*  $R = U_{пр} / I_{пр}$ ; оно составляет единицы и десятки ом;

*сопротивление диода в обратном направлении*  $R = U_{обр} / I_{обр}$ ; оно составляет единицы мегаом;

*дифференциальное сопротивление диода*  $R_{диф}$  – отношение приращения напряжения на диоде к вызвавшему его малому приращению тока:  $R_{диф} = \Delta U / \Delta I$ .

Прямое и обратное сопротивления – это сопротивления в данной точке характеристики при постоянном токе соответствующего направления; дифференциальное сопротивление – это сопротивление при переменном токе; оно определяет наклон касательной, проведенной в данной точке вольтамперной характеристики к оси абсцисс.

При эксплуатации диодов в выпрямителях важное значение имеют предельно допустимые режимы их использования, характеризующиеся соответствующими параметрами. В целях обеспечения длительной и надежной работы диодов нельзя превышать ни при каких условиях:

– максимально допустимое обратное напряжение  $u_{обр.макс}$ ;

– максимально допустимую мощность, рассеиваемую диодом  $P_{макс}$ ;

– максимально допустимый постоянный прямой ток  $I_{пр.макс}$ ;

– диапазон рабочей температуры: германиевые диоды работают в диапазоне температур от  $-60$  до  $+70$  °С, кремниевые – до  $+120$  °С и более.

Кремниевые диоды имеют на несколько порядков меньший обратный ток, допускают гораздо большие обратные напряжения и плотности прямого тока, могут быть использованы при более высоких температурах. Поэтому выпрямительные диоды изготавливают главным образом из кремния, хотя падение напряжения на кремниевом диоде при прямом токе больше, чем на германиевом.

Кроме рассмотренных выше *выпрямительных диодов*, предназначенных для выпрямления переменного тока низкой частоты ( $f < 20$  кГц), существует много других разновидностей диодов.

*Высокочастотные диоды* – универсальные приборы, работающие в выпрямителях очень широкого диапазона частот (до нескольких гигагерц), а также в модуляторах, детекторах и других нелинейных преобразователях.

*Импульсные диоды* являются разновидностью высокочастотных и предназначены для использования в качестве ключевых элементов в быстродействующих импульсных схемах; помимо высокочастотных свойств должны обладать минимальным временем переходных процессов при переключении с прямой ветви вольтамперной характеристики на обратную и наоборот. В последнее время получили распространение *диоды Шоттки* [(по имени немецкого ученого В. Шоттки (W. Schottky)], действие



которых основано на свойствах *контакта металл-полупроводник*. Одно из преимуществ диодов Шоттки перед диодами с *p-n*-переходом – очень малая инерционность.

### 2.3 Стабилитроны

*Стабилитроном* называют полупроводниковый диод, вольтамперная характеристика которого имеет участок малой зависимости напряжения от протекающего тока. Стабилитроны предназначены для стабилизации напряжения постоянного тока.

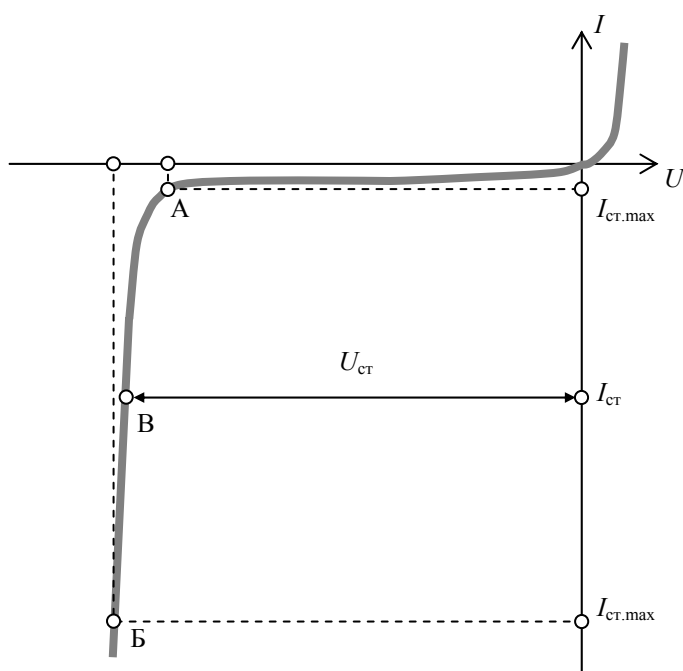
Принцип действия стабилитрона основан на использовании свойства *p-n*-перехода при электрическом пробое сохранять практически постоянную величину напряжения в определенном диапазоне изменения обратного тока. Как было сказано при рассмотрении видов пробоя *p-n*-перехода, электрический пробой является обратимым процессом и не приводит к выходу диода из строя при условии, что ток не превышает максимально допустимой величины.

Вольтамперная характеристика кремниевого стабилитрона приведена на рис. 7. В стабилитроне используется только обратная ветвь характеристики. Рабочим участком АБ является ее часть, соответствующая электрическому пробую и ограниченная минимальным и максимальным токами. В стабилитронах, как правило, присутствуют два вида пробоя – лавинный и туннельный; в низковольтных (с напряжением стабилизации менее 6,5 В) преобладает туннельный, в высоковольтных (с напряжением стабилизации более 6,5 В) – лавинный.

Параметрами стабилитрона являются:

*напряжение стабилизации*  $U_{ст}$  – напряжение на стабилитроне при заданном токе стабилизации  $I_{ст}$ ;

*минимальный ток стабилизации*  $I_{ст. min}$  – наименьший ток, при котором сохраняется устойчивое со-



**Рис. 7 Обратная ветвь**  
вольтамперной характеристики стабилитрона

стояние пробоя;

*максимальный ток стабилизации*  $I_{ст. max}$  – наибольший ток, при котором мощность, рассеиваемая на стабилитроне, не превышает максимально допустимого значения  $P_{max}$ ; превышение  $I_{ст. max}$  приводит к тепловому пробую *p-n*-перехода и выходу из строя стабилитрона;

*дифференциальное сопротивление*  $R_{диф} = \Delta U_{ст} / \Delta I_{ст}$  – отношение приращения напряжения стабилизации к вызвавшему его малому приращению тока:  $R_{диф}$  определяется в рабочей точке В и характеризует точность стабилизации; чем оно меньше, тем лучше осуществляется стабилизация;

*статическое сопротивление*  $R_{стат} = U_{ст} / I_{ст}$  – сопротивление стабилитрона в рабочей точке при постоянном токе;

*температурный коэффициент напряжения*  $\alpha_{U_{ст}}$  показывает изменение в процентах напряжения стабилизации при изменении температуры окружающей среды на 1 °С.

Выпускаемые промышленностью кремниевые стабилитроны имеют напряжение стабилизации в пределах 3...200 В, минимальный ток от 1 до 10 мА, максимальный ток от 2 мА до 2 А, дифференциальное сопротивление 0,5...500 Ом.

Существуют полупроводниковые диоды, предназначенные для стабилизации напряжения с использованием в качестве рабочего участка отрезка прямой ветви вольтамперной характеристики, на которой прямое напряжение слабо зависит от тока. Такой полупроводниковый диод носит название *стабистора*.

## 2.4 Варикапы

При подаче обратного напряжения любой *p-n*-переход представляет собой конденсатор, диэлектриком которого служит высокоомный обедненный слой с низкой концентрацией носителей заряда, а электродами – слои полупроводникового материала по обе стороны от него, сохраняющие высокую проводимость. Емкость такого конденсатора, являющаяся *барьерной емкостью p-n-перехода*, определяется обратным напряжением  $U_{обр}$  и уменьшается с его ростом, так как обедненный слой расширяется, что равносильно увеличению расстояния между электродами. Зависимость емкости варикапа от приложенного к нему напряжения описывается так называемой *вольтфарадной характеристикой* (рис. 8).

Полупроводниковые диоды, основанные на использовании управляемой барьерной емкости, называют *варикапами*.

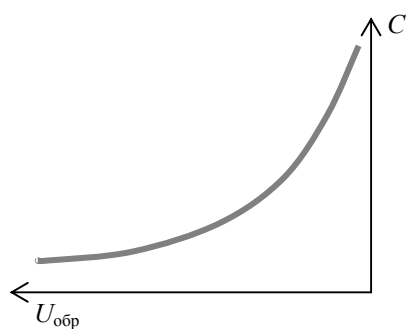


Рис. 8 Общий вид вольт-фарадной характеристики ва-

пазоне СВЧ.

Основными параметрами варикапов являются:

*емкость  $C_v$* , которая измеряется при определенном  $U_{обр}$ , обычно 4 В, и составляет от нескольких единиц до нескольких сотен пикофард;

*коэффициент перекрытия по емкости  $K_C$* , который лежит в пределах от 2 до 18 и представляет собой отношение максимальной емкости  $C_{v\ max}$  к минимальной  $C_{v\ min}$ , измеренной при напряжении, близком к максимально допустимому.

Варикапы используют, главным образом, для управления колебательными контурами в системах автоподстройки частоты радио- и телевизионных приемников, а также в возбуждателях передатчиков с частотной модуляцией и параметрических усилителях, работающих в диапазоне СВЧ.

## 2.5 Туннельные и обращенные диоды

Туннельные диоды изготовляют из полупроводниковых материалов с высокой концентрацией примеси, называемых *вырожденными полупроводниками*. Запирающий слой в них уже, чем в обычных диодах (0,1...0,2 мкм), чем объясняется значительно большая напряженность электрического поля, обусловленная контактной разностью потенциалов (до  $10^6$  В/см).

Туннельный диод, как и другие типы диодов, является полупроводниковым прибором с двумя электродами и одним *p-n*-переходом. Его отличие от других диодов состоит в том, что *p-n*-переход туннельного диода изготавливается из полупроводниковых материалов с очень высокой концентрацией примесей. Толщина обедненного слоя в таком переходе получается очень малой, и даже при незначительных напряжениях, приложенных к переходу, возникает электрическое поле очень высокой напряженности. При этом возникает явление, называемое туннельным эффектом (отсюда и название этого прибора). Электрическое поле высокой напряженности вызывает непосредственный отрыв валентных электронов от атомов кристаллической решетки полупроводника. Возникающие при этом электронно-дырочные пары могут создавать так называемые туннельные токи (прямой и обратный), которые оказывают существенное влияние на вольтамперную характеристику *p-n*-перехода (рис. 9).

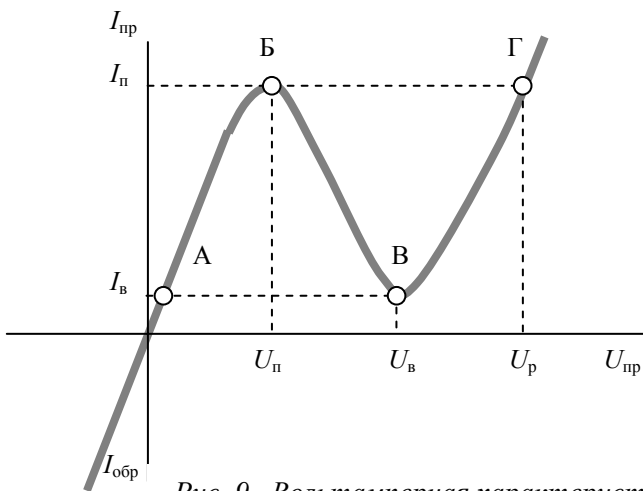


Рис. 9 Вольтамперная характеристика

Так, обратный туннельный ток во много раз превышает обратный ток  $p-n$ -перехода. При малых значениях прямого напряжения, когда переход еще закрыт, возникает прямой туннельный ток значительной величины. Этому соответствует участок ВАХ от начала координат до т. Б. Увеличение прямого напряжения приводит к ослаблению туннельного эффекта и уменьшению туннельного тока. Этому соответствует участок БВ. При дальнейшем росте прямого напряжения переход открывается, и его ВАХ соответствует прямой ветви характеристики  $p-n$ -перехода (участок от т. В и правее).

Прямая ветвь вольтамперной характеристики туннельного диода имеет две характерные точки – т. Б, называемую пиком туннельной характеристики, и т. В, называемую впадиной. Падающий участок ВАХ БВ характеризуется отрицательным дифференциальным сопротивлением:  $R_i = \Delta U_0 / \Delta I_0 < 0$  (уменьшение тока при возрастании напряжения). Благодаря наличию участка ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением туннельные диоды могут быть использованы в качестве активных элементов усилителей, генераторов и других устройств, традиционно выполняемых на других типах электронных приборов (электронных лампах или транзисторах).

Основными параметрами туннельного диода являются:

ток  $I_п$  и напряжение  $U_п$  пика ВАХ;

ток  $I_в$  и напряжение  $U_в$  впадины ВАХ;

напряжение раствора  $U_р$  при прохождении через диод тока, равного току пика на второй восходящей ветви ВАХ;

отношение тока пика к току впадины  $I_п / I_в$ ;

дифференциальное сопротивление диода на падающем участке ВАХ.

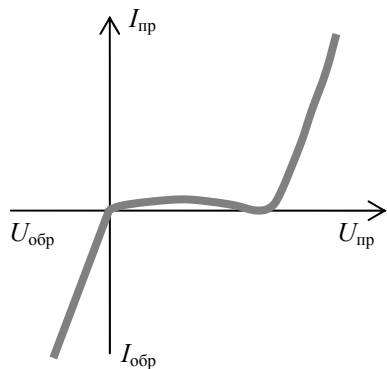


Рис. 10 Вольтамперная характеристика обращенного диода

Разновидностью туннельных диодов являются обращенные диоды. Они изготавливаются из полупроводниковых материалов с несколько меньшей, по сравнению с туннельными, концентрацией примесей. ВАХ обращенного диода имеет следующий вид (рис. 10). Обратный туннельный ток быстро нарастает с ростом обратного напряжения примерно также, как в туннельном диоде. При прямом напряжении, в отличие от туннельного диода, нарастание туннельного тока очень незначительно, и заметный прямой ток появляется после того, как переход откроется. Таким образом, при малых напряжениях обращенный диод будет работать как выпрямитель, причем проводящей будет не прямая, а обратная ветвь ВАХ (отсюда и его название).

## 2.6 Излучающие диоды. Фотодиоды

При подаче прямого напряжения в некоторых  $p-n$ -переходах при прохождении электрического тока генерируется оптическое излучение в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой области спектра. В соответствии с частотными диапазонами различают инфракрасные излучающие диоды и светоизлучающие диоды, или светодиоды. Действие излучающего диода основано на явлении *инжекционной электролюминесценции*: излучение возникает в результате рекомбинации неосновных носителей заряда

(электронов проводимости и дырок), инжектированных под действием приложенного напряжения в область полупроводника, прилегающую к  $p-n$ -переходу (так называемая активная область излучающего диода). Такое излучение, в отличие от тепловых источников света, имеет более узкий спектр (его ширина обычно не превышает 0,05 мкм), вследствие чего в видимой области воспринимается как одноцветное. Цвет излучения определяется как полупроводниковым материалом, так и легирующими примесями. Рекомбинационное излучение светоизлучающих диодов из карбида кремния, арсенида или фосфида галлия может быть весьма интенсивным и лежит в инфракрасной, красной, зеленой и синей частях спектра. Светодиод начинает испускать свет, как только подается прямое напряжение, причем с ростом тока интенсивность свечения увеличивается.

Основной параметр излучающего диода – КПД преобразования электрической энергии в энергию излучения ( $\eta$ ), максимальные значения  $\eta$  (1...5 %) получены в излучающих диодах, работающих в диапазоне длин волн от 0,8 до 1,3 мкм (инфракрасная область).

Важный параметр излучающего диода – инерционность, которая характеризуется постоянными времени нарастания и спада мощности излучения при его импульсном возбуждении. Инерционность излучающего диода достаточно мала (постоянные времени обычно не превосходят долей микросекунды), поэтому по быстродействию они значительно превосходят другие источники света (лампы накаливания, катодолуминесцентные, газоразрядные и т.п.).

Светоизлучающие диоды в основном применяют в устройствах визуального отображения информации и выпускают в виде одиночных приборов или полупроводниковых знаковых табло, состоящих из нескольких диодов, позволяющих получать свечение, форма которого соответствует каким-либо цифрам или знакам. Кроме того, используют полупроводниковые линейные шкалы и экраны, составленные из светоизлучающих диодов в виде одной или нескольких параллельных строк. Светоизлучающие диоды инфракрасного свечения применяют в оптронах.

Принцип действия фотодиодов основан на внутреннем фотоэффекте, состоящем в генерации под действием света электронно-дырочных пар в  $p-n$ -переходе, в результате чего увеличивается концентрация в его объеме. Обратный ток определяется концентрацией неосновных носителей и, следовательно, интенсивностью об-

Вольтамперные показывают, что каждому

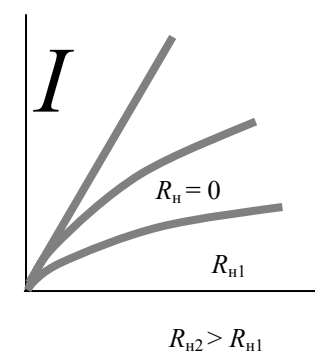


Рис. 12 Зависимость  $I$  от  $\Phi$

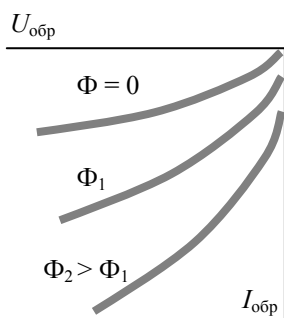


Рис. 11 Зависимость  $I_{обр}$  от  $U_{обр}$

фотодиода определяет носителей и, следовательно, интенсивность излучения.

характеристики фотодиода (рис. 11) значению светового потока  $\Phi$  соответствует определенное значение обратного тока. Такой режим работы называют *фотодиодным*.

Кроме того, используют *фотогальванический режим*, который состоит в при освещении непосредственно  $p-n$ -перехода образующиеся в нем электронно-дырочные пары разделяются электрическим полем, обусловленным контактной разностью потенциалов. В результате на выводах прибора появляется фотоэлектродвижущая сила, а при его включении в замкнутую цепь – электрический ток.

Зависимости тока фотоэлемента от светового потока при различных сопротивлениях цепи показаны на рис. 12. Фотодиоды, работающие в фотогальваническом режиме, используют в преобразователях солнечной энергии в электрическую для питания различных устройств.

### Контрольные вопросы

- 1 Как образуется  $p-n$ -переход и какие токи проходят через него?
- 2 Что представляет собой статическая вольтамперная характеристика  $p-n$ -перехода?
- 3 Назовите основные виды пробоя  $p-n$ -перехода.
- 4 Какие из видов пробоя лежат в основе принципа действия некоторых полупроводниковых приборов?

- 5 Опишите устройство полупроводникового выпрямительного диода.
- 6 Как классифицируют полупроводниковые диоды?
- 7 Какие характеристики и параметры характеризуют свойства полупроводниковых диодов?
- 8 Охарактеризуйте основные группы полупроводниковых диодов.
- 9 На чем основана работа стабилитронов?
- 10 Для чего применяют варикапы, на чем основана их работа?
- 11 Какой эффект лежит в основе работы туннельных и обращенных диодов?
- 12 В чем заключается преимущество излучающих диодов перед другими источниками излучения?
- 13 В чем состоит основное отличие фотодиода от фоторезистора?

### Модуль 3 БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Транзистором называют электронный полупроводниковый прибор, имеющий три (или более) электрода и предназначенный для усиления, генерирования и преобразования электрических колебаний. Изобретен в 1948 г. американскими учеными У. Шокли, У. Браттейном и Дж. Бардином. В СССР первые транзисторы разработаны под руководством А.В. Красилова. Обычно выделяют два основных класса транзисторов: *биполярные транзисторы* и *полевые транзисторы*.

В *биполярных* транзисторах ток через кристалл обусловлен движением носителей заряда *обоих знаков* (и электронов, и дырок).

В *полевых* транзисторах (называемых также *униполярными*) протекание тока через кристалл обусловлено движением носителей заряда *одного знака* (электронов или дырок).

Транзисторы классифицируются по типам и группам в зависимости от физических, эксплуатационных и других параметров.

#### 3.1 Устройство биполярного транзистора

*Биполярным транзистором* называют полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими *p-n*-переходами и тремя выводами. Он имеет трехслойную структуру, состоящую из чередующихся областей с различными типами электропроводности: *n-p-n* или *p-n-p* (рис. 13, а, б).

Принцип работы транзисторов обеих структур одинаков, они отличаются только полярностью подключения источников питания, поэтому работу биполярного транзистора рассмотрим на примере структуры *n-p-n* (рис. 13, а).

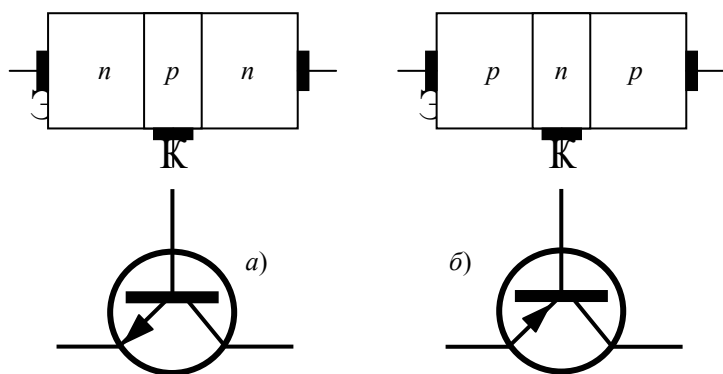


Рис. 13 Устройство и условные графические обозначения биполярных транзисторов:

а – *n-p-n*-структуры; б – *p-n-p*-структуры

Исходная пластина полупроводника *p*-типа с низкой концентрацией дырок является базовой. На нее наплавляются с двух сторон таблетки донорной примеси. В процессе термической обработки атомы донорной примеси проникают в кристалл, создавая *n*-области. Между *n*-областями и полупроводником *p*-типа образуются *p-n*-переходы. Процесс введения примесей контролируется таким образом, чтобы в одной *n*-области была большая их концентрация (на рисунке – в левой *n*-области), чем в другой. Наименьшая концентрация примеси остается в средней области *p*-типа.

Наружная область с наибольшей концентрацией примеси называется *эмиттером*, вторая наружная область – *коллектором*, а внутренняя область – *базой*. Электронно-дырочный переход между эмиттером и базой называют *эмиттерным переходом*, а между коллектором и базой – *коллекторным переходом*. В соответствии с концентрацией основных носителей заряда база является высокоомной областью, кол-

литор – низкоомной, а эмиттер – самой низкоомной. Толщина базы очень мала и составляет единицы микрон; площадь коллекторного перехода в несколько раз превышает площадь эмиттерного.

### 3.2 Принцип действия биполярного транзистора

Применение транзистора для усиления электрических колебаний основано на его принципе действия как управляемого электронного прибора.

В схеме включения транзистора (рис. 14) к эмиттерному переходу должно быть приложено прямое напряжение, а к коллекторному – обратное. Если на эмиттерном переходе нет напряжения, то через коллекторный переход протекает очень небольшой обратный ток  $I_{кобр}$ . По сравнению с рабочим током

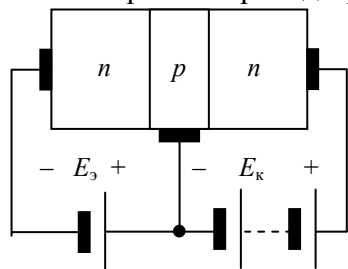


Рис. 14 Основная схема подключения биполярного транзистора к источникам питания

им можно пренебречь для упрощения рассуждений и считать, что в коллекторной цепи тока нет, т.е. транзистор закрыт.

При подаче на эмиттерный переход прямого напряжения от источника питания  $E_3$  происходит инжекция носителей заряда из эмиттера в базу, где они являются неосновными. Для транзистора  $n-p-n$  этими носителями заряда являются электроны. Движение электронов в процессе инжекции через эмиттерный переход создает ток эмиттера  $I_3$ . Электроны, перешедшие в базу, имеют вблизи  $p-n$ -перехода повышенную концентрацию, что вызывает диффузию их в базу. Толщина базы очень мала, поэтому электроны в процессе диффузии оказываются вблизи коллекторного перехода. Большая их часть не успевает рекомбинировать с дырками базы и втягивается ускоряющим

электрическим полем коллекторного перехода в область коллектора. Происходит экстракция электронов под действием обратного напряжения из базы в коллектор. Движение электронов в процессе экстракции из базы в коллектор создает ток коллектора  $I_k$ . Незначительная часть инжектируемых из эмиттера в базу электронов рекомбинирует в области базы с дырками, количество которых пополняется из внешней цепи от источника  $E_3$ . За счет этого в цепи базы протекает ток базы  $I_6$ . Он очень мал из-за небольшой толщины базы и малой концентрации основных носителей заряда – дырок. При этих условиях число рекомбинаций, определяющих величину тока базы, невелико.

Ток коллектора управляется током эмиттера: если увеличится ток эмиттера, то практически пропорционально возрастет ток коллектора. Ток эмиттера может изменяться в больших пределах при малых изменениях прямого напряжения на эмиттерном переходе.

Токи трех электродов транзистора связаны соотношением:  $I_3 = I_k + I_6$ . Ток базы значительно меньше тока коллектора, поэтому для практических расчетов часто считают ток коллектора приближенно равным току эмиттера:  $I_k \approx I_3$ .

Принцип действия  $p-n-p$ -транзистора аналогичен рассмотренному, но носителями заряда, создающими токи через  $p-n$ -переходы в процессе инжекции и экстракции, являются дырки; полярность источников  $E_3$  и  $E_k$  должна быть изменена на противоположную, соответственно изменятся и направления токов в цепях.

На основании рассмотренных процессов можно сделать вывод, что транзистор как управляемый прибор действует за счет создания *транзитного* (проходящего) потока носителей заряда из эмиттера через базу в коллектор и управления током коллектора путем изменения тока эмиттера. Таким образом, *биполярный транзистор управляется током*.

Ток эмиттера как прямой ток  $p-n$ -перехода значительно изменяется при очень малых изменениях напряжения на эмиттерном переходе и вызывает, соответственно, большие изменения тока коллектора.

На этом основаны усилительные свойства транзистора.

### 3.3 Статические характеристики транзисторов

Обобщенная схема включения транзистора для усиления электрических колебаний содержит две цепи (рис. 15): входную и выходную. Входная цепь является управляющей; в нее последовательно с источником питания  $E_1$  включается источник слабых электрических колебаний  $U_{вх}$ , которые надо усилить. Элек-

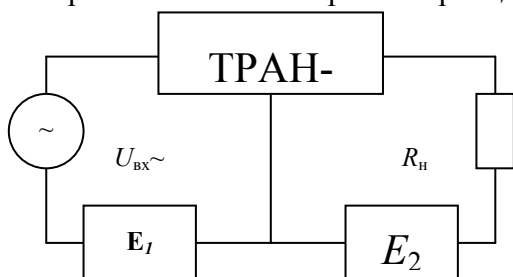


Рис. 15 Обобщенная схема включения транзистора для усиления электрических колебаний

трические колебания, подаваемые во входную цепь, называют *управляющим*, или *усиливаемым*, *сигналом*. Выходная цепь является *главной цепью*, в нее последовательно с источником  $E_2$  включается нагрузка  $R_H$ , на которой надо получить усиленный сигнал. Таким образом, обобщенная схема включения транзистора для усиления электрических колебаний представляет собой четырехполюсник.

Транзистор имеет три электрода, из которых в схеме включения один – входной, другой – выходной, а третий – общий для цепей входа и выхода. В зависимости от того, какой электрод является общим, возможны три схемы включения транзистора – с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК).

В схеме, на которой рассматривался принцип действия транзистора (рис. 14), входной электрод – эмиттер, выходной – коллектор, а общий, входящий и в цепь входа, и в цепь выхода, – база; следовательно, это была схема ОБ.

При любой схеме включения в каждой цепи постоянный ток проходит от плюса источника питания через соответствующие области транзистора к минусу источника питания. Стрелка эмиттера указывает направление проходящего через него тока.

Во всех трех схемах сохраняется рассмотренный принцип действия транзистора, но свойства схем различны; они также отличаются характеристиками и параметрами. В любой схеме включения в каждой из двух цепей действует напряжение между двумя электродами и протекает ток: во входной цепи –  $U_{вх}$  и  $I_{вх}$ , в выходной –  $U_{вых}$  и  $I_{вых}$ . Эти электрические величины определяют режим работы транзистора и взаимно влияют друг на друга.

Характеристики транзистора представляют собой зависимость одной из этих величин от другой при неизменной третьей величине. Для того чтобы одну из электрических величин можно было поддерживать постоянной, в схему для снятия характеристик надо включить только источники питания; нагрузку и источник усиливаемых колебаний (сигнала) не включают.

Характеристики, снятые без нагрузки, когда одна из величин поддерживается постоянной, называют *статическими*. Совокупность характеристик, снятых при разных значениях этой постоянной величины, представляет собой *семейство статических характеристик*.

Наибольшее значение при применении биполярных транзисторов имеют два вида характеристик – входные и выходные.

*Входной характеристикой* называют зависимость входного тока от входного напряжения при постоянном выходном напряжении:

$$I_{вх} = f(U_{вх}) \text{ при } U_{вых} = \text{const.}$$

*Выходной характеристикой* называют зависимость выходного тока от выходного напряжения при постоянном входном токе:

$$I_{вых} = f(U_{вых}) \text{ при } I_{вх} = \text{const.}$$

Вид характеристик транзистора зависит от способа его включения, но для схем ОЭ и ОК они практически одинаковы, поэтому пользуются обычно входными и выходными характеристиками для схем ОБ и ОЭ. На практике наибольшее распространение получила схема ОЭ, поэтому рассмотрим ее более подробно.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 16. В ее состав входят два источника питания с регулируемым от 0 до некоторого максимального значения выходным напряжением 1, микроамперметр 2 и миллиамперметр 3 для измерения токов базы и коллектора, вольтметры 4, 5 для измерения напряжений  $U_{бэ}$  и  $U_{кэ}$ . Балластный резистор 6 служит для ограничения тока базы исследуемого транзистора 7.

В этой схеме входным током является ток базы  $I_b$ , выходным – ток коллектора  $I_k$ , входное напряжение создается между базой и эмиттером  $U_{бэ}$ , а выходное – между коллектором и эмиттером  $U_{кэ}$ . Таким образом, входные характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ, представляют собой зависимость тока базы от напряже-

ния эмиттера  $U_{э}$ . Выходные характеристики представляют собой зависимость тока коллектора от напряжения коллектора  $U_{кэ}$ . Семейство статических характеристик транзистора получают, снимая входные и выходные характеристики при различных значениях входного напряжения  $U_{бэ}$  и выходного тока  $I_k$ .

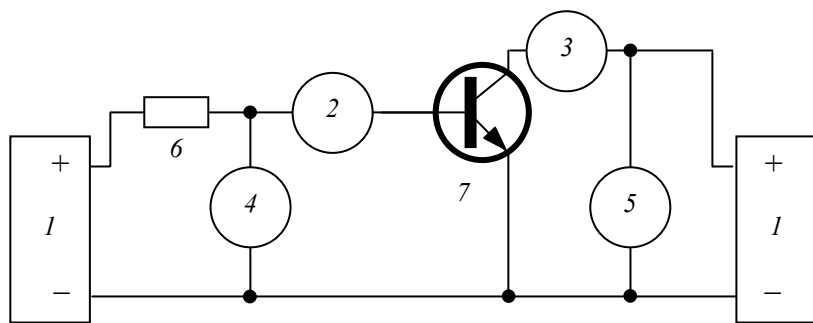


Рис. 16 Схема установки для снятия статических характеристик биполярного транзистора

ния база-эмиттер при постоянном напряжении коллектор-эмиттер:

$$I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}}) \text{ при } U_{\text{кэ}} = \text{const.}$$

Выходные характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ, представляют собой зависимость тока коллектора от напряжения коллектор – эмиттер при постоянном токе базы:

$$I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}}) \text{ при } I_{\text{б}} = \text{const.}$$

Примерный вид семейства входных и выходных характеристик биполярного транзистора приведен на рис. 17 и 23.

На рис. 17 изображено семейство из двух входных характеристик, снятых при различных напряжениях на коллекторе ( $U_{\text{кэ}1} < U_{\text{кэ}2}$ ). Даже при значительно отличающихся коллекторных напряжениях входные характеристики качественно одинаковы и незначительно смещаются вправо с ростом  $U_{\text{кэ}}$ . Это говорит о наличии слабой связи между входными и выходными цепями биполярного транзистора.

Начальный круто восходящий участок каждой из выходных характеристик биполярного транзистора (рис. 18) является нерабочим. Это участок малого напряжения  $U_{\text{кэ}}$ , изменяющегося в пределах от 0 до 0,5...1,5 В. При малых значениях  $U_{\text{кэ}}$ , соизмеримых с величиной  $U_{\text{бэ}}$ , следует учитывать, что напряжение

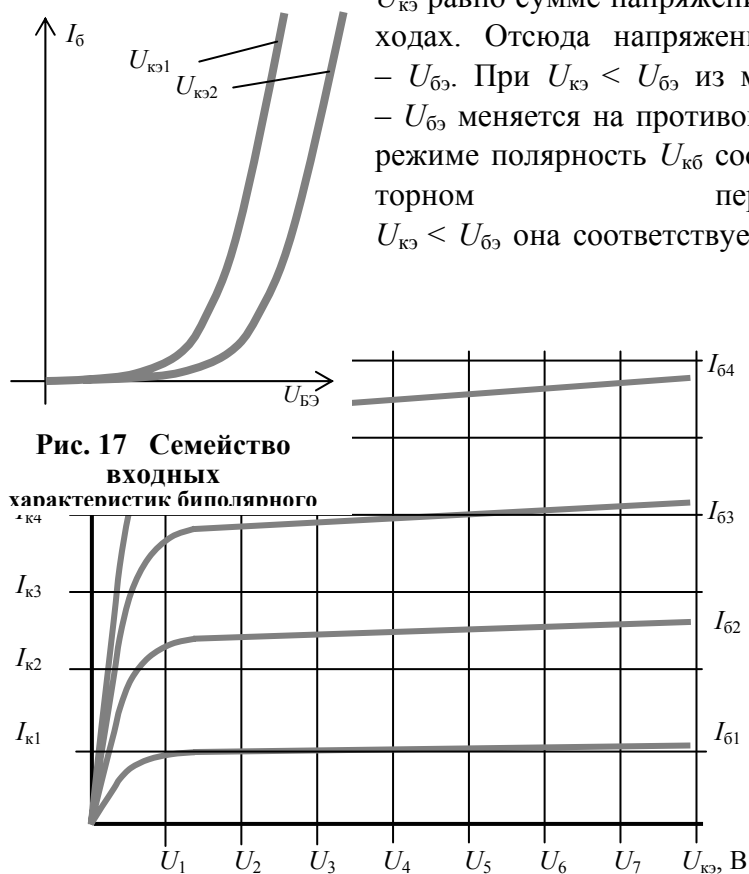


Рис. 17 Семейство входных характеристик биполярного транзистора

Рис. 18 Семейство выходных вольтамперных характеристик биполярного транзистора

$U_{\text{кэ}}$  равно сумме напряжений на коллекторном  $U_{\text{кб}}$  и эмиттерном  $U_{\text{бэ}}$  переходах. Отсюда напряжение на коллекторном переходе  $U_{\text{кб}} = U_{\text{кэ}} - U_{\text{бэ}}$ . При  $U_{\text{кэ}} < U_{\text{бэ}}$  из меньшего вычитается большее, т.е. знак  $U_{\text{кэ}} - U_{\text{бэ}}$  меняется на противоположный. А это означает, что если в рабочем режиме полярность  $U_{\text{кб}}$  соответствует обратному напряжению на коллекторном переходе, то при  $U_{\text{кэ}} < U_{\text{бэ}}$  она соответствует прямому напряжению. Наибольшее значение прямого напряжения  $U_{\text{кб}}$  на коллекторном переходе получается при  $U_{\text{кэ}} = 0$ , когда  $U_{\text{кб}} = U_{\text{бэ}}$ . По мере роста  $U_{\text{кэ}}$  это прямое напряжение уменьшается и становится равным нулю при  $U_{\text{кэ}} = U_{\text{бэ}}$ . Прямое напряжение на коллекторном переходе препятствует прохождению через него из базы в коллектор неосновных носителей заряда, которые инжектируются в базу из эмиттера. Поэтому уменьшение прямого напряжения на коллекторном переходе приводит к увеличению экстракции этих носителей из базы в коллектор, а это в свою очередь вызывает резкое возрастание тока коллектора.

При  $U_{\text{кэ}} > U_{\text{бэ}}$  полярность  $U_{\text{кб}}$  изменяется на обратную для коллекторного перехода. Изменение напряжения  $U_{\text{кэ}}$  на этом участке характеристик мало влияет на величину тока коллектора; рабочий участок характеристики идет полого.

Увеличение коллекторного напряжения выше максимально допустимого приводит к пробое коллекторного перехода.

Увеличение коллекторного напряжения выше максимально допустимого приводит к пробое коллекторного перехода.

Кроме рассмотренных семейств характеристик для некоторых практических расчетов представляют интерес еще две характеристики: проходная и прямой передачи.

Проходная характеристика – это зависимость выходного тока от входного напряжения при постоянном выходном напряжении. Для схемы ОЭ это зависимость тока коллектора от напряжения база-эмиттер при постоянном напряжении коллектор-эмиттер.



Характеристикой прямой передачи называют зависимость выходного тока от входного. Для схемы с ОЭ это зависимость тока коллектора от тока базы при постоянном напряжении коллектора.

### 3.4 Система $h$ -параметров биполярных транзисторов

Связь между малыми приращениями токов и напряжений, действующих в транзисторе, устанавливается так называемыми характеристическими параметрами. Эти параметры определяются схемой включения транзистора. Существует несколько систем характеристических параметров. Наибольшее распространение получила система  $h$ -параметров, называемая смешанной или гибридной, так как среди параметров этой системы имеется одно сопротивление, одна проводимость и две безразмерные величины.

$h$ -параметры связывают входные и выходные токи и напряжения. Зависимости между входным напряжением  $U_1 = U_{бэ}$ , входным током  $I_1 = I_б$ , выходным напряжением  $U_2 = U_{кэ}$  и выходным током  $I_2 = I_к$  могут быть выражены системой двух уравнений:

$$\Delta U_1 = h_{11}\Delta I_1 + h_{12}\Delta U_2,$$

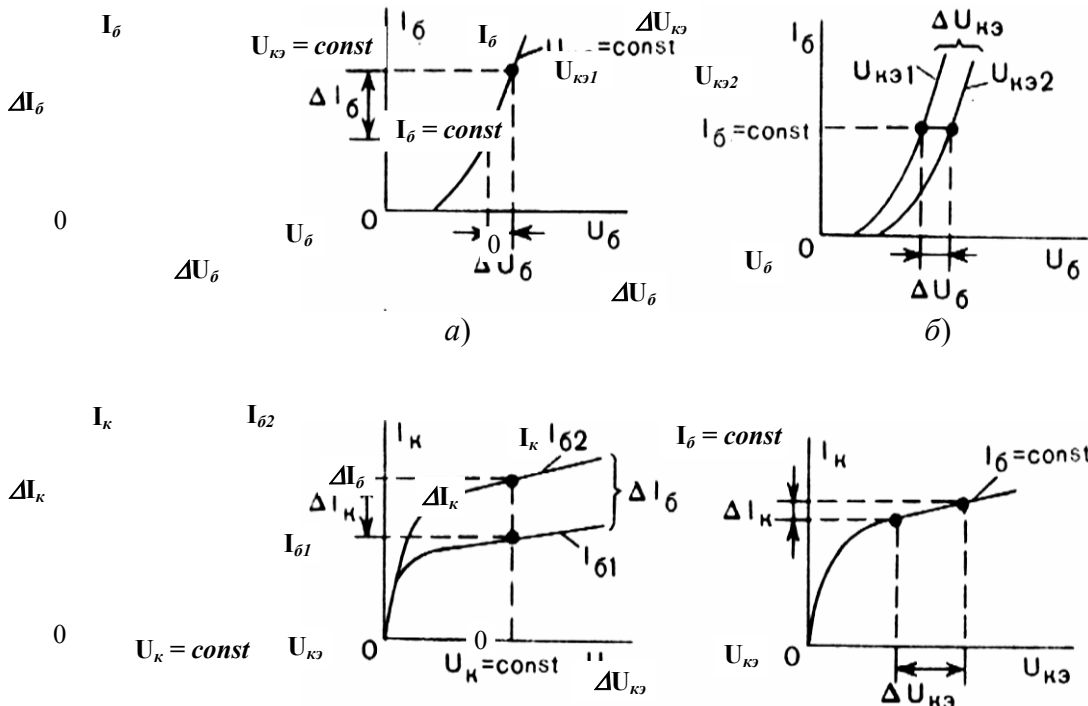
$$\Delta I_2 = h_{21}\Delta I_1 + h_{22}\Delta U_2,$$

где  $h_{11э}$  – входное сопротивление транзистора при коротком замыкании (по переменному току) на выходе транзистора;  $h_{12э}$  – коэффициент обратной связи по напряжению при холостом ходе (разомкнутом входе по переменному току);  $h_{21э}$  – коэффициент усиления по току при коротком замыкании (по переменному току) на выходе транзистора;  $h_{22э}$  – выходная проводимость транзистора при разомкнутом (по переменному току) входе.

$$h_{11э} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_б \text{ при } U_{кэ} = \text{const}; \quad h_{12э} = \Delta U_{бэ} / U_{кэ} \text{ при } I_б = \text{const};$$

$$h_{21э} = \Delta I_к / \Delta I_б \text{ при } U_{кэ} = \text{const}; \quad h_{22э} = \Delta I_к / U_{кэ} \text{ при } I_б = \text{const}.$$

Индекс «Э» обозначает, что данная система параметров относится к схеме с общим эмиттером. Для любой схемы включения транзисторов  $h$ -параметры могут быть определены по статическим характеристикам транзистора: параметры  $h_{11}$  и  $h_{12}$  – по входным (рис. 19, а, б), параметры  $h_{21}$  и  $h_{22}$  – по выходным (рис. 19, в, г).

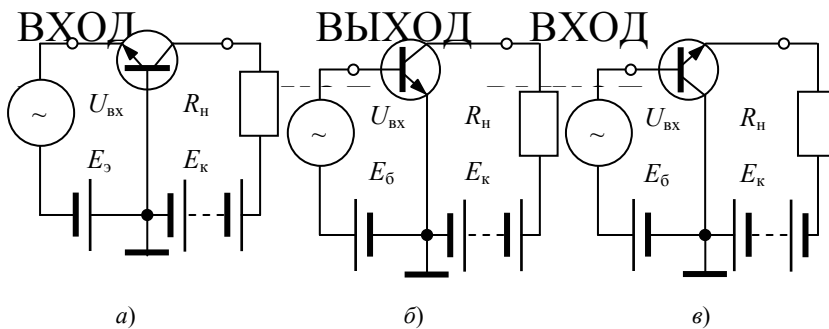


**Рис. 19** Определение  $h$ -параметров биполярного транзистора по семействам входных и выходных характеристик

### 3.5 Схемы включения биполярных транзисторов

Как отмечалось выше, обобщенная схема включения транзистора для усиления электрических колебаний представляет собой четырехполюсник; из трех его электродов один – входной, другой – выходной, а третий – общий для цепей входа и выхода, и в зависимости от того, какой электрод является общим, возможны три схемы включения транзистора – с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК) (рис. 20 а, б и в, соответственно).

На всех схемах кроме источников питания  $E_3$ ,  $E_6$  и  $E_K$  присутствует источник сигнала  $\sim U_{ВХ}$  (источник переменного тока), включенный последовательно с источником  $E_3$  или  $E_6$ , причем  $E_K \gg E_3$  или  $E_6$ , а амплитуда  $\sim U_{ВХ} < E_6$  или  $E_3$ . Рассмотрим работу каждой из схем в качестве усилителя сигнала  $\sim U_{ВХ}$ .



а)

б)

в)

**Рис. 20** Схемы включения транзистора структуры  $n-p-n$ :  
а – с общей базой; б – с общим эмиттером; в – с общим коллектором

#### 3.5.1 Схема с общей базой

В схеме (рис. 20, а) к эмиттеру транзистора относительно общей базы приложены напряжения  $\sim U_{ВХ}$  и  $E_3$ . При положительном полупериоде  $\sim U_{ВХ}$  напряжение  $U_{36} = E_3 - U_{ВХ}$ , т. е. напряжение  $U_{36}$  уменьшается. Это вызовет уменьшение  $I_3$ , а следовательно, и  $I_K$ , что приведет к уменьшению падения

напряжения на  $R_n$ , при этом выходное напряжение (напряжение на коллекторе) увеличится. Рассуждая аналогично, можно показать, что при отрицательном полупериоде  $\sim U_{ВХ}$  выходное напряжение будет уменьшаться. Таким образом, в схеме ОБ входной и выходной сигналы синфазны (сдвиг фаз между входным и выходным сигналами равен 0).

Входным током является ток эмиттера, выходным – ток коллектора. С учетом соотношения  $I_3 = I_K + I_6$  можно сказать, что  $I_{ВХ} > I_{ВЫХ}$  (с учетом малого значения  $I_6$  можно считать  $I_{ВХ} \approx I_{ВЫХ}$ ). Таким образом, в схеме ОБ усиления тока не происходит.

При малых напряжениях во входной цепи возникают токи значительной величины. Это возможно, если входное сопротивление схемы ОБ низкое.

Выходной ток, практически равный входному, протекает через большое сопротивление нагрузки  $R_n$ , при этом в выходной цепи должны действовать напряжения, значительно превышающие входные. Таким образом, в схеме ОБ происходит значительное усиление напряжения при высоком выходном сопротивлении схемы ОБ.

#### 3.5.2 Схема с общим эмиттером

В схеме (рис. 20, б) к базе транзистора относительно общего эмиттера приложены напряжения  $\sim U_{ВХ}$  и  $E_6$ . При положительном полупериоде  $\sim U_{ВХ}$  напряжение  $U_{63} = E_6 + U_{ВХ}$ , т. е. напряжение  $U_{63}$  увеличивается. Это вызовет увеличение  $I_6$ , а следовательно,  $I_3$  и  $I_K$ , что приведет к увеличению падения напряжения на  $R_n$ , при этом выходное напряжение (напряжение на коллекторе) уменьшится. Рассуждая аналогично, можно показать, что при отрицательном полупериоде  $\sim U_{ВХ}$  выходное напряжение будет увеличиваться. Таким образом, в схеме ОЭ входной и выходной сигналы паразитны (сдвиг фаз между входным и выходным сигналами равен  $180^\circ$ ).

Входным током является ток базы, выходным – ток коллектора. Так как  $I_6 \ll I_K$ , можно сказать, что  $I_{ВХ} \ll I_{ВЫХ}$ . Таким образом, в схеме ОЭ происходит значительное усиление тока.

При малых напряжениях во входной цепи токи также малы. Это говорит о том, что *входное сопротивление схемы ОЭ значительно выше, чем у схемы ОБ*.

Выходной ток протекает через большое сопротивление нагрузки  $R_H$ , при этом в выходной цепи должны действовать напряжения, значительно превышающие входные. Таким образом, *в схеме ОЭ происходит значительное усиление напряжения при высоком выходном сопротивлении схемы ОЭ (при этом оно ниже, чем у схемы ОБ)*.

Одновременное усиление напряжения и тока обеспечивает максимальный коэффициент усиления мощности по сравнению с другими схемами. Поскольку величины входного и выходного сопротивлений имеют приемлемые для большинства случаев значения, схема ОЭ получила наибольшее распространение при построении различных радиоэлектронных устройств на биполярных транзисторах.

### 3.5.3 Схема с общим коллектором

В схеме (рис. 20, в) к следует рассматривать взаимное действие  $E_B$ ,  $E_K$  и  $\sim U_{вх}$  на переход база-эмиттер. При положительном полупериоде  $\sim U_{вх}$  напряжение  $U_{бэ} = E_B + U_{вх}$ , т.е. напряжение  $U_{бэ}$  увеличивается. Это вызовет увеличение  $I_b$ , а следовательно,  $I_c$  и  $I_k$ , что приведет к увеличению падения напряжения на  $R_H$ , при этом выходное напряжение (теперь это напряжение на эмиттере) также увеличится. Это напряжение, появившееся под действием входного сигнала, приложено к переходу база-эмиттер в полярности, противоположной напряжению  $\sim U_{вх}$ , поэтому оно будет вызывать уменьшение  $I_b$  и выходного напряжения. В результате такого взаимодействия входного и выходного сигналов входное сопротивление схемы ОК получается очень высоким, а выходное напряжение почти равно входному (реально незначительно меньше). Выходное сопротивление в схеме ОК получается очень низким. Перечислим основные свойства последней схемы.

*В схеме ОК входной и выходной сигналы синфазны.*

*В схеме ОК усиления напряжения не происходит.*

*В схеме ОК происходит значительное усиление тока.*

*Входное сопротивление схемы ОК очень высокое.*

*Выходное сопротивление схемы ОК очень низкое.*

Схема ОК носит второе название «эмиттерный повторитель» и используется, как правило, для согласования источника сигнала с высоким внутренним сопротивлением и нагрузки с низким сопротивлением.

Отметим в заключение, что *любая схема обеспечивает усиление мощности сигнала.*

### Контрольные вопросы

- 1 Какие полупроводниковые приборы называют биполярными транзисторами?
- 2 Как связаны постоянные токи в цепях транзистора?
- 3 Какие возможны схемы включения транзистора?
- 4 Как связаны переменные составляющие токов и напряжений в схеме включения транзистора с общей базой?
- 5 Какими статическими характеристиками принято определять свойства транзисторов?
- 6 Какими характеристическими параметрами связаны токи и напряжения на выходе транзистора?
- 7 Как измеряют  $h$ -параметры на низких частотах?

## МОДУЛЬ 4 ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Полевым транзистором (ПТ) называют трехэлектродный полупроводниковый прибор, в котором изменение тока происходит под действием перпендикулярного току электрического поля, создаваемого входным сигналом. Движение носителей заряда через канал – (область управляемой проводимости) от истока (области, являющейся источником дырок или электронов в зависимости от типа проводимости канала) к стоку (области, собирающей эти заряды из канала) управляет затвор.

*Исток, сток и затвор по назначению эквивалентны соответственно эмиттеру, коллектору и базе в биполярном транзисторе или катоду, аноду и управляющей сетке в электронной лампе.*

По физическим эффектам, лежащим в основе управления носителями заряда, ПТ условно делят на две группы – ПТ с управляющим  $p$ - $n$ -переходом и ПТ с изолированным затвором (так называемой МДП- или МОП-транзисторы).

#### 4.1 Полевые транзисторы с управляющим $p$ - $n$ -переходом

Рассмотрим устройство и принцип действия прибора этой группы, выполненного по современной планарной технологии (рис. 21). В исходном кристалле кремния  $p$ -типа создается область  $n$ -типа, из которой в дальнейшем будет сформирован канал полевого транзистора.

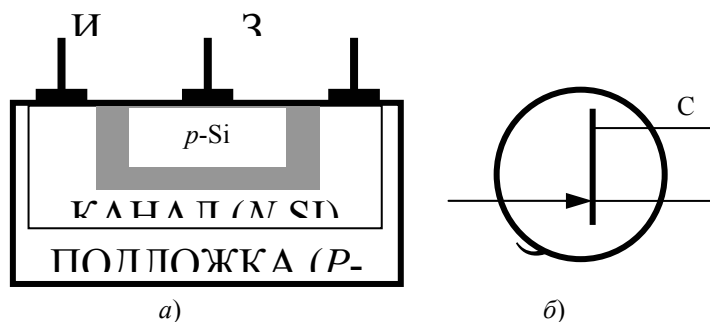


Рис. 21 Устройство и условное графическое изображение полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$ -типа

На верхнюю грань пластины, имеющую электронную проводимость, вводится акцептор, создающий дырочную проводимость. От вновь созданной  $p$ -области с помощью низкоомного невыпрямляющего контакта делается вывод, образующий управляющий электрод полевого транзистора – затвор. Такие же выводы делаются от начала и конца сформированного в толще подложки канала, являющиеся соответственно истоком и стоком.

Таким образом, в подложке в процессе изготовления полевого транзистора были сформированы два  $p$ - $n$ -перехода: первый – между подложкой и каналом, второй – между каналом и затвором (на рисунке закрашен серым цветом). Первый переход изолирует канал от подложки и не принимает дальнейшего участия в работе транзистора.

При включении полевого транзистора на сток относительно истока подается напряжение  $U_{си}$  такой полярности, чтобы основные носители заряда (электроны в канале  $n$ -типа) двигались по каналу в направлении от истока к стоку. При этом через канал и по внешней цепи протекает ток стока  $I_c$ . Цепь между стоком и истоком является главной. На затвор относительно истока подается напряжение  $U_{зи}$ , обратное для  $p$ - $n$ -перехода. Оно создает *поперечное* по отношению к каналу *электрическое поле*, напряженность которого зависит от величины приложенного напряжения. Чем больше это напряжение, а следовательно, сильнее электрическое поле, тем шире обедненный слой и уже канал. С уменьшением поперечного сечения канала увеличивается его сопротивление, что приводит к уменьшению тока  $I_c$  в цепи. Цепь между затвором и истоком является управляющей. Таким образом, *принцип действия полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом основан на изменении сопротивления канала за счет изменения ширины области  $p$ - $n$ -перехода под действием поперечного электрического поля*, которое создается напряжением затвор-исток.

Из принципа действия полевого транзистора следует, что, в отличие от биполярного транзистора, он *управляется не током, а напряжением  $U_{зи}$* . Поскольку это напряжение обратное, то в цепи затвора ток не протекает, входное сопротивление остается очень большим, на управление потоком носителей заряда, а значит, и выходным током  $I_c$  не затрачивается мощность.

Такой процесс происходит при небольшом напряжении  $U_{си}$ . При его дальнейшем увеличении потенциалы точек канала относительно истока неодинаковы по его длине: они возрастают по мере приближения к стоку от нуля до полного напряжения  $U_{си}$ . В связи с этим увеличивается и обратное напряжение на  $p$ - $n$ -переходе в направлении от истока к стоку от значения, равного  $U_{зи}$  около истока, до суммы  $U_{зи} + U_{си}$  у стока. Это вызывает постепенное расширение обедненного слоя по мере приближения к стоку и соответствующее сужение канала в направлении от истока к стоку.

#### 4.2 Статические вольтамперные характеристики полевых транзисторов с управляющим $p$ - $n$ -переходом

Полевые транзисторы с  $p$ - $n$ -переходом, в отличие от биполярных, не имеют входных характеристик в связи с отсутствием входного тока. Основными их характеристиками являются выходные (стоковые) и переходные (сток-затворные).

*Выходные характеристики* полевого транзистора представляют собой зависимость тока стока от напряжения сток-исток при постоянном напряжении затвор-исток:

$$I_c = f(U_{си}) \text{ при } U_{зи} = \text{const.}$$

Характеристики, снятые при разных значениях неизменной величины  $U_{зи}$ , составляют семейство выходных статических характеристик.

*Переходные (стоко-затворные) характеристики* полевого транзистора представляют собой зависимость тока стока от напряжения затвор-исток при постоянном напряжении сток-исток:

$$I_c = f(U_{зи}) \text{ при } U_{си} = \text{const.}$$

Поскольку наклон выходных характеристик невелик, для практических целей можно ограничиться одной переходной характеристикой.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 22. В ее состав входят источник питания с выходным напряжением 5 В 1, потенциометр 2 для задания напряжения затвор-исток  $U_{зи}$  и вольтметр 3 для его измерения; источник питания с регулируемым от 0 до некоторого максимального значения выходным напряжением 7 для задания напряжения сток-исток  $U_{си}$  и вольтметр 6 для измерения напряжений  $U_{си}$ .

На рис. 23, а, приведено семейство выходных характеристик полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом и каналом *n*-типа. Каждая из характеристик имеет два принципиально различных участка.

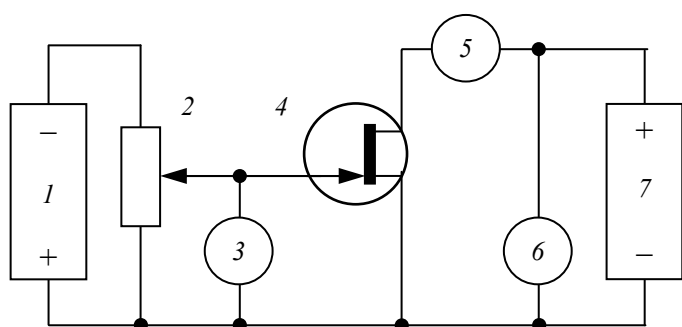


Рис. 22 Схема установки для снятия статических характеристик полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом и каналом *n*-типа

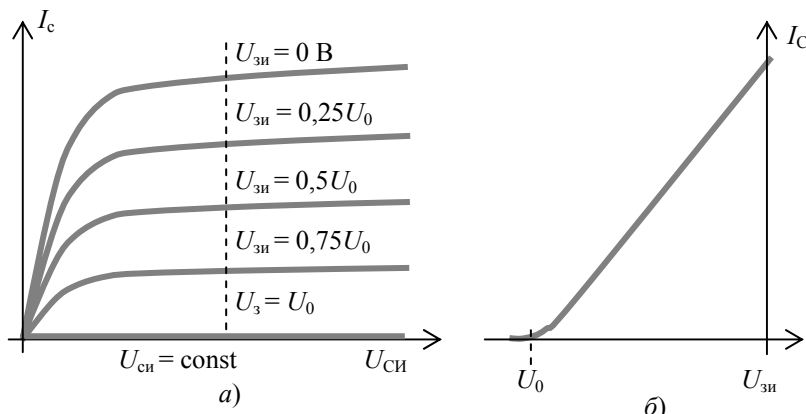
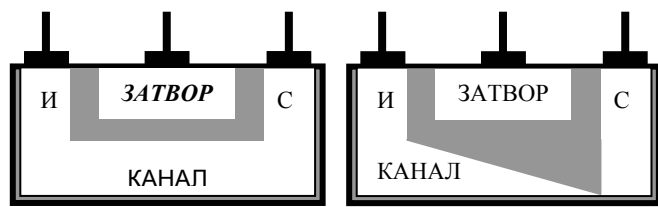


Рис. 23 Статические характеристики полевого транзистора

ка.



а) б)

Рис. 24 Сужение канала полевого транзистора

Начальный участок характеризуется быстрым ростом тока стока при возрастании напряжения сток-исток. При дальнейшем увеличении этого напряжения рост тока замедляется, и характеристика переходит на другой, почти горизонтальный участок.

Такое поведение выходных характеристик объясняется явлением *сужения канала* при возрастании падения напряжения на канале в направлении от истока к стоку, что вызывает рост обратного напряжения на управляющем *p-n*-переходе. Начальная и конечная стадии этого процесса приведены на рис. 24, а, б. Максимальное сужение канала называется *перекрытием канала*.

а, а такой режим работы транзистора – *режимом насыщения*. Именно ему соответствует пологий, почти горизонтальный участок характеристики.

Режим насыщения используется при работе полевого транзистора в схемах усиления, где они позволяют получать параметры, недостижимые в усилителях на биполярных транзисторах. На начальном крутом участке выходной характеристики полевой транзистор работает в режиме управляемого напряжением омического сопротивления. Такой режим широко применяется в различных системах автоматического регулирования.

Полевые транзисторы с *p-n*-переходом и каналом *p*-типа имеют такое же устройство и принцип действия; по сравнению с транзисторами с каналом *n*-типа они требуют противоположной полярности источников питания.

### 4.3 ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ (МОП-ТРАНЗИСТОРЫ)

Основой полевого транзистора данной структуры является подложка – монокристалл кремния с относительно небольшой дырочной (Si-p) или электронной (Si-n) электропроводимостью. На одной из сторон подложки технологически формируют тонкий слой диэлектрика с высоким удельным сопротивлением, обычно двуокиси кремния, толщиной 0,2...0,3 мкм. На часть внешней поверхности диэлектрика осаждают слой алюминия – этот электрод называют затвором транзистора.

Такую структуру характеризуют аббревиатурой МОП: металл-окисел-полупроводник (существуют также транзисторы, изготовленные по несколько отличной технологии, которой более соответствует структура металл-диэлектрик-полупроводник, сокращенно МДП). У некоторых транзисторов структуры МОП два затвора. Такие транзисторы называют иногда МОП-тетрами.

В подложке (рис. 25, а) непосредственно под диэлектриком формируют канал – область, электропроводность которой противоположна по знаку и больше по значению, чем остальной объем подложки. Канал с электронной проводимостью называют для краткости *n*-каналом, а с дырочной – *p*-каналом. Различают каналы *встроенные* – сформированные в процессе производства транзисторов – и *индуцированные* (подробнее о них ниже). Концы канала обладают большей удельной электропроводностью, образуя электроды исток и сток транзисторов. Электроды принято обозначать буквами: подложка – П, исток – И, сток – С, затвор – З. Носители движутся в канале от истока к стоку. В одних типах полевых транзисторов подложка имеет отдельный вывод, в других – ее соединяют с истоком.

Встроенный *n*-канал транзисторов (серии КП305, КП313) создают при их изготовлении введением в часть объема подложки под диэлектриком донорной примеси. Между каналом и остальным объемом подложки образуется *p-n*-переход.

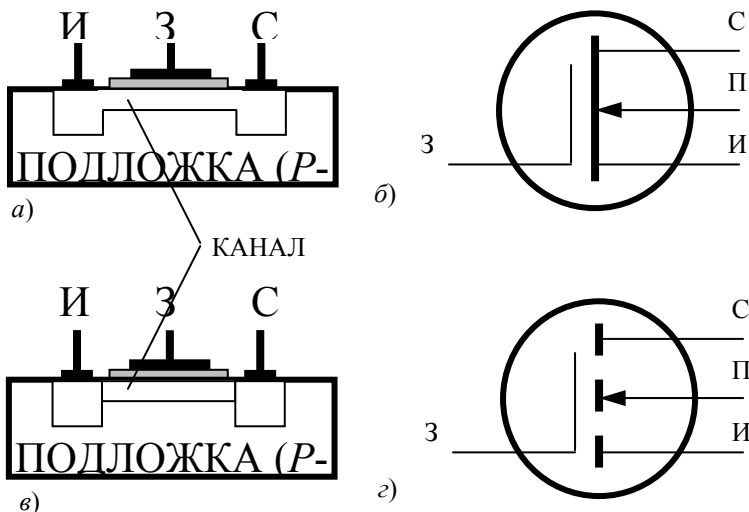


Рис. 25 Устройство и условные графические изображения полевых транзисторов с изолированным затвором и отдельным выводом от подложки:

а, б – со встроенным каналом *n*-типа;  
в, г – с индуцированным каналом *n*-типа

При наличии между стоком и истоком постоянного напряжения  $U_{си}$  (плюсом к стоку) электроны в канале начинают перемещаться. Этот ток называют током стока  $I_c$ . Если теперь между затвором и истоком приложить постоянное напряжение  $U_{зи}$ , то в диэлектрике возникнет электрическое поле, изменяющее ширину и электропроводность канала. В результате будет изменяться и ток стока. Электропроводность канала и ток стока увеличиваются при уменьшении отрицательного напряжения на затворе до нуля и далее при увеличении положительного напряжения. Увеличение электропроводности канала называют обогащением канала, а уменьшение – обеднением. В транзисторе структуры МОП с двумя затворами (КП306, КП350) каждый из них влияет на

ток стока независимо от другого.

В транзисторах с индуцированным каналом (рис. 25, в) в отсутствие напряжения на затворе канала нет – вся подложка (кроме истока и стока) имеет однородную электропроводность.

У транзистора с подложкой из кремния *p*-Si (КП901, КП904) на стоке, как у транзистора со встроенным каналом, должно быть положительное по отношению к истоку напряжение. Если и на затворе напряжение будет положительным, в диэлектрике возникнет электрическое поле, в прилегающей к диэлектрику области подложки будут индуцироваться электроны, тип проводимости подложки в этой области начнет изменяться с дырочного на электронный – будет формироваться *n*-канал и начнется перемещение электронов от истока к стоку. При увеличении напряжения  $U_{зи}$  канал будет расширяться, а его электропроводность и ток стока увеличиваться.

В транзисторе с подложкой из кремния *n*-Si (КП301, КП304) процессы протекают аналогично, если на стоке напряжение отрицательно. Канал *p*-типа индуцируется при отрицательном напряжении на затворе, а ток стока определяет перемещение дырок.

Подчеркнем, что транзисторы структуры МОП с индуцированным каналом работают в режиме обогащения; при некотором пороговом напряжении  $U_{зи\ пор}$  ток стока практически прекращается. Следовательно, транзистор работает в линейном режиме только при условии, что на его затвор подано постоянное напряжение смещения.

На схемах структурные разновидности транзисторов МОП изображают по-разному, однако у всех вариантов есть общий элемент: затвор и подложка гальванически разобщены. Это хорошо согласуется с другим, также часто применяемым названием приборов рассматриваемой группы – полевые транзисторы с изолированным затвором.

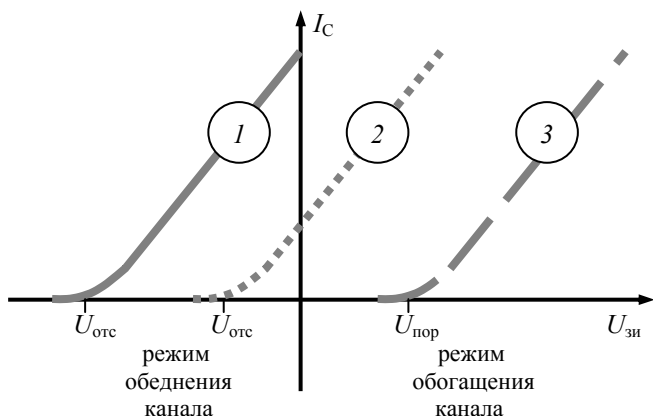
Необходимо отметить, что тонкий слой диэлектрика на подложке имеет очень малую электрическую прочность. Поэтому транзисторы структуры МОП надо оберегать от наводок и статического электричества. В частности, при хранении и транспортировке выводы транзисторов должны быть замкнуты между собой.

Выходные характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором аналогичны характеристикам полевых транзисторов с управляющим  $p-n$ -переходом. При этом между тремя типами полевых транзисторов есть и существенные отличия.

Канал транзисторов с управляющим  $p-n$ -переходом полностью открыт при нулевом напряжении на затворе, при возрастании отрицательного напряжения на затворе канал сужается, при некотором отрицательном напряжении, называемом напряжением отсечки  $U_{отс}$ , канал полностью перекрывается.

Встроенный канал МОП-транзистора при нулевом напряжении на затворе имеет некоторую среднюю ширину, расширяется при положительных напряжениях на затворе и сужается вплоть до перекрытия при отрицательных напряжениях на затворе. Поэтому говорят, что он работает в режимах обогащения и обеднения.

Индукцированный канал МОП-транзистора при нулевом напряжении на затворе отсутствует и формируется при некотором положительном пороговом напряжении  $U_{пор}$ . Поэтому говорят, что он работает только в режиме обогащения. Этим различиям соответствуют три различные переходные характеристики, изображенные на рис. 26. Характеристика 1 соответствует



**Рис. 26** Обобщенные переходные характеристики полевых транзисторов:

1 – с управляющим  $p-n$ -переходом; 2 – с изолированным затвором и встроенным каналом; 3 – с изолированным затвором и индуцированным каналом

полевому транзистору с управляющим  $p-n$ -переходом, характеристика 2 – МОП-транзистору со встроенным каналом, характеристика 3 – МОП-транзистору с индуцированным каналом (все каналы имеют электронную проводимость).

В заключение отметим, что основным параметром, характеризующим полевой транзистор как усилительный прибор, является крутизна переходной (стоко-затворной) характеристики

$$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$$

Она может быть определена как по семейству входных характеристик при заданном напряжении сток-исток  $U_{си}$ , так и по переходной характеристике.

## Контрольные вопросы

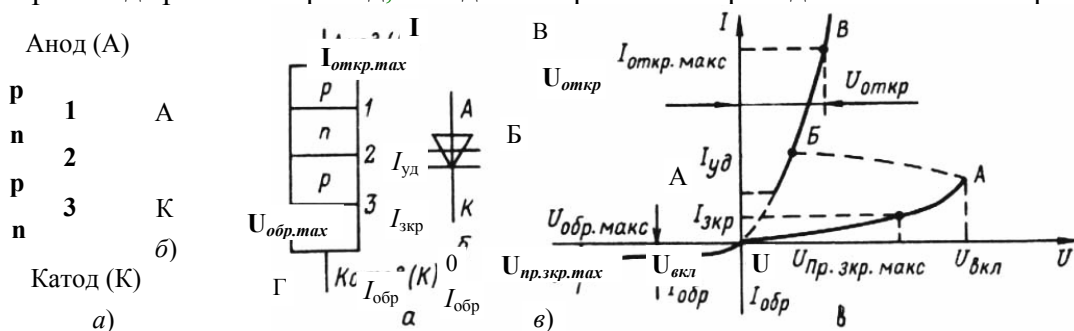
- 1 Опишите принцип работы полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом.

- 2 Чем отличаются полевые транзисторы с управляющим  $p-n$ -переходом от полевых транзисторов с изолированным затвором?
- 3 Чем отличаются полевые транзисторы с изолированным затвором с индуцированным каналом от транзисторов со встроенным каналом?
- 4 Какими характеристиками и параметрами описывают свойства полевых транзисторов?
- 5 В чем заключается основное отличие полевых транзисторов от биполярных?

## МОДУЛЬ 5 ТИРИСТОРЫ

Особую группу полупроводниковых приборов составляют многослойные приборы с тремя и более  $p-n$ -переходами, используемые в качестве электронных переключателей. Они объединяются общим названием – *тиристоры*. В зависимости от числа наружных выводов различают двухэлектродный тиристор, или *динистор*, и трехэлектродный – *тринистор*.

**Динисторы.** Структура и условное графическое обозначение динистора приведены на рис. 27, а, б. Прибор содержит четыре полупроводниковые области с чередующимися типами электрической проводимости:  $p-n-p-n$ . Крайняя  $p$ -область называется анодом, а крайняя  $n$ -область – катодом. Так как между двумя прилегающими друг к другу областями с различными типами электропроводности образуется электронно-дырочный переход, то в динисторе таких переходов оказывается три: 1, 2 и 3.



**Рис. 27 Структура, условное графическое изображение и вольтамперная характеристика динистора**

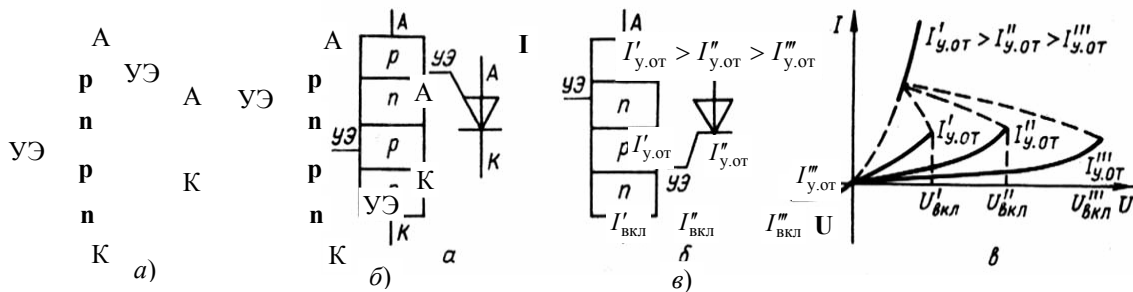
Если динистор подключен к источнику напряжения так, что «минус» подается на анод, а «плюс» – на катод, то крайние  $p-n$ -переходы оказываются включенными в обратном направлении и через динистор протекает небольшой обратный ток (участок ОГ) – рис. 27, в.

При изменении полярности источника внешнего напряжения переходы 1 и 3 включаются в прямом направлении, а средний переход 2 в обратном. Сопротивление между анодом и катодом динистора в этом случае также велико (сотни килоом), и через него протекает небольшой ток  $I_{зкр}$ , измеряемый при напряжении  $U_{пр.зкр.макс}$ , которое называют максимально допустимым постоянным прямым напряжением на закрытом тиристоре.

При некотором значении прямого напряжения, называемого напряжением включения  $U_{вкл}$ , средний переход открывается, сопротивление между анодом и катодом уменьшается до десятых долей ома. Такое состояние динистора называют открытым. Падение напряжения на открытом динисторе составляет всего 1...2 В (участок ББ) и мало зависит от величины тока, протекающего через динистор. В справочных данных обычно указывается значение напряжения открытого тиристора  $U_{откр}$  при максимально допустимом постоянном токе  $I_{откр.макс}$ . Напряжение включения для динисторов составляет, как правило, десятки-сотни вольт. В открытом состоянии динистор находится до тех пор, пока через него протекает ток, не меньший, чем ток удержания  $I_{уд}$ . Для перевода динистора из открытого состояния в закрытое следует уменьшить напряжение внешнего источника примерно до 1 В или отключить его.

**Трехэлектродные тиристоры (тринисторы).** Тринистор отличается от динистора наличием третьего вывода от одной из средних областей. Благодаря третьему – управляющему – электроду тринистор можно открывать при напряжениях меньших, чем  $U_{вкл}$  и даже  $U_{пр.зкр.макс}$ .



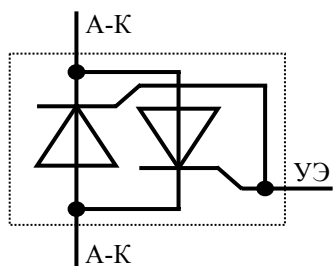


**Рис. 28 Структура, условное графическое изображение и вольтамперная характеристика тристора**

Для этого нужно на управляющий электрод тристора подать короткий (длительностью в несколько микросекунд) управляющий импульс положительной (если управляющий вывод электрода сделан от *p*-области) или отрицательной (при выводе от *n*-области) полярности (рис. 28, а, б). Семейство вольтамперных характеристик тристора, снятых при различных токах управляющего электрода, приведено на рис. 28, в.

Для перевода тристора из открытого состояния в закрытое необходимо уменьшить основной ток до значения меньшего, чем  $I_{уд}$ . В цепях постоянного тока это осуществляется пропусканием через открытый тристор короткого импульса обратного тока, превышающего прямой, для чего используется специальное коммутирующее устройство.

Тристор, работающий в цепях переменного тока, запирается автоматически в момент окончания положительной полуволны основного тока. Этим объясняется широкое применение тристоров в устройствах переменного тока – для управления электродвигателями переменного тока, в выпрямителях и инверторах, импульсных схемах, устройствах автоматики и др.

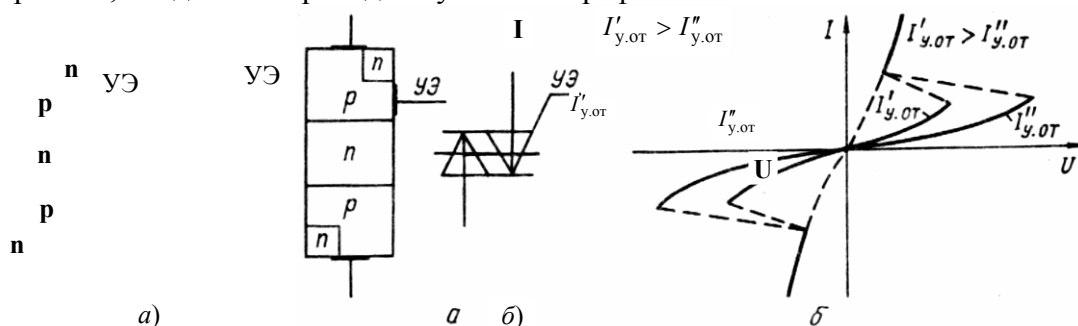


**Рис. 29 Встречно-параллельное включение тиристоров для работы на переменном токе**

Ток и напряжение цепи управления небольшие, а основной ток может составлять единицы, десятки и сотни ампер при анодных напряжениях от десятков-сотен до нескольких тысяч вольт. Поэтому коэффициент усиления по мощности у тристоров достигает  $10^4 \dots 10^5$ .

**Симметричные тиристоры.** Динисторы и тристоры пропускают рабочий (основной) ток только в одном направлении. Для того чтобы основной ток протекал в обоих направлениях, можно использовать встречно-параллельное включение двух тиристоров (рис. 29).

Эту же задачу можно решить и более простым способом, применив двухсторонние полупроводниковые ключи. Структура таких приборов значительно сложнее, чем у несимметричных, и в простейшем случае содержит пять областей с различными типами проводимости, как показано на рис. 30, а. Здесь же приведено условное графическое обозначение этого типа тиристоров.



**Рис. 30 Структура и условное графическое изображение симистора**

Такой симметричный тиристор по принципу действия аналогичен несимметричному тиристоры и имеет аналогичную вольтамперную характеристику. Электрическая симметрия относительно его крайних выводов, называемых символическими анодом и катодом, приводит к симметричной вольтамперной характеристике относительно начала координат, общий вид которой приведен на рис. 30, б.

Такие приборы называют *симисторами*, или *триаками*. Они широко применяются в устройствах силовой электроники, работающих на переменном токе.

Следует отметить основные особенности данного класса полупроводниковых приборов. По способу управления (управление током) они аналогичны биполярным транзисторам. При этом они имеют весьма существенное отличие от транзисторов: в них практически отсутствует *активный режим*, т.е. возможность плавного управления выходным током. Все типы тиристоров работают в так называемом *ключевом режиме*, который характеризуется двумя противоположными состояниями прибора – открытым и закрытым. В промежуточном состоянии тиристор находится в течение очень короткого отрезка времени, при этом процесс перехода из одного состояния в другое практически неуправляем. Поэтому при анализе работы тиристоров не используют *статические* характеристики (характеристики, снятые без нагрузки в выходной цепи). Очевидно, что подключение открытого тиристора непосредственно к выходу источника питания соответствует короткому замыканию, что неизбежно приведет к выходу из строя оборудования. Эти особенности тиристоров необходимо учитывать при разработке и расчете устройств на их основе. Следует также отметить, что принципы управления тиристорами в значительной степени отличаются от схемотехнических решений, использующихся при работе с другими типами электронных приборов, и изучаются в рамках специальных дисциплин.

### Контрольные вопросы

- 1 Какие полупроводниковые приборы называют тиристорами?
- 2 Опишите устройство и принцип работы двухэлектродного тиристора.
- 3 Поясните вольтамперную характеристику тиристора.
- 4 Перечислите статические параметры тиристора.
- 5 Какими параметрами характеризуется быстрое действие тиристора?
- 6 **В ЧЕМ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ РАЗЛИЧИЕ МЕЖДУ ТРИНИСТОРОМ И СИМИСТОРОМ?**

## МОДУЛЬ 6 ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

### 6.1 Общие сведения

*Электривакуумные приборы – это электронные приборы, в которых проводимость осуществляется посредством электронов или ионов, движущихся между электродами через вакуум или газ.*

Электривакуумные приборы подразделяют на электронные и ионные. В *электронных* приборах, к которым в первую очередь относятся электронные лампы, прохождение электрического тока осуществляется только за счет свободных электронов, в *ионных* – как за счет свободных электронов, так и за счет ионов.

Электронные лампы применяют в выпрямительных, усилительных и генераторных устройствах, а также в автоматике, вычислительной и измерительной технике. В настоящее время масштабы применения электронных ламп ограничены в связи с бурным развитием полупроводниковой техники и особенно микроэлектроники. Однако при больших частотах и мощностях электронные лампы еще находят широкое применение.

Во всех электронных лампах источником свободных электронов является специальный электрод, называемый катодом. Катод испускает электроны за счет явления электронной эмиссии.

### 6.2 Электронная эмиссия

Металлы характеризуются наличием большого количества свободных электронов, которые беспорядочно перемещаются в междоатомном пространстве.

При обычных условиях только отдельные электроны выходят из металла, преодолевая притягивающее действие его положительно заряженных ионов. В результате на поверхности металла формируется двойной электрический слой (рис. 31).

Этот слой образует электрическое поле, препятствующее дальнейшему выходу электронов из металла. Разность потенциалов в

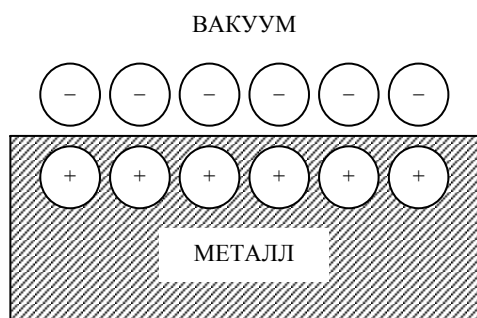


Рис. 31 Образование двойного электрического слоя на границе вакуум-металл

этом поле между электрическими слоями называют потенциальным барьером.

Для преодоления этого барьера электроны металла должны получить извне определенную энергию, равную работе, которую надо совершить, чтобы преодолеть потенциальный барьер. Эта работа называется *работой выхода* и обозначается  $W_a$ . Отношение работы выхода к заряду электрона называется потенциалом выхода  $\phi_a = W_a/q_0$ .

Существуют различные способы сообщения дополнительной энергии электронам металла и в зависимости от этого различные виды электронной эмиссии. Остановимся на двух: термоэлектронной и вторичной.

*Термоэлектронной эмиссией* называют явление испускания электронов нагретым металлом (катодом). При нагревании катода скорости хаотического движения электронов увеличиваются, что приводит к возрастанию их кинетической энергии. В результате число электронов, выходящих из металла, увеличивается. Эти электроны скапливаются около катода за счет притягивающего действия положительных ионов металла. Таким образом, вокруг катода образуется электронное облако, внутри которого электроны перемещаются в различных направлениях.

При этом определенная часть их возвращается обратно на катод. С увеличением числа вышедших электронов плотность облака растет и дальнейший выход их затрудняется, а число возвращающихся на катод электронов увеличивается до тех пор, пока не наступит динамическое равновесие: число вышедших электронов окажется равным числу возвратившихся.

Плотность электронного облака (объемного заряда) зависит от температуры катода. Если на электронное облако действует внешнее ускоряющее поле, то электроны облака перемещаются от катода, т.е. появится ток  $I_e$ , называемый током эмиссии.

*Вторичной эмиссией* называется явление выхода электронов из «холодного» металла под действием бомбардировки его первичными электронами. Первичные электроны, обладающие относительно большой скоростью, встречая на своем пути поверхность металла, тормозятся и отдают свою энергию его электронам (например, аноду электронной лампы).

Электроны анода, получив дополнительную энергию, выходят за его пределы, образуя ток вторичной эмиссии.

### 6.3 Катоды электронных ламп

*Катодом называют специальный электрод электровакуумного прибора, который является источником электронной эмиссии.* Их различают по видам эмиссии.

Рассмотрим термокатоды и будем их для краткости называть просто катодами. В зависимости от способа подогрева различают катоды прямого и косвенного накала. Нагревание катодов прямого накала происходит за счет тока, проходящего по самому катоду, который обычно изготавливают из тугоплавких материалов (вольфрам, тантал) в виде нитей, спиралей или лент. При простоте конструкции, эти катоды имеют существенную особенность: имея малую массу, они обладают очень малой тепловой инерцией и поэтому их необходимо питать либо постоянным током, либо переменным током повышенной, по сравнению с промышленной, частоты.

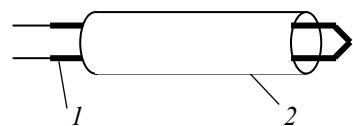


Рис. 32 Устройство катода косвенного накала:  
1 – подогреватель, 2 – катод

Катоды косвенного накала представляют собой полый цилиндр 2 из тугоплавкого металла. Нагрев его осуществляют нитью накала (подогревателем) 1, помещенной внутри катода и изолированной от него (рис. 32). Эти катоды благодаря относительно большой массе имеют заметную тепловую инерцию и, следовательно, их можно питать переменным током.

Катоды, выполненные из чистого металла (простые), имеют малую экономичность  $H$ , которая определяется как отношение тока эмиссии в миллиамперах к одному ватту накальной мощности  $H = I_e / P_n$  при высокой рабо-

чей температуре. Например, у вольфрамовых катодов  $H = 2...10$  мА/Вт при рабочей температуре порядка 2300...2600 К.

Для увеличения экономичности и понижения рабочей температуры применяются активированные катоды. На поверхность таких катодов наносят слой активных металлов (например, бария). Активированный слой создает ускоряющее поле и потенциал выхода уменьшается. Экономичность бариевых катодов  $H = 5...150$  мА/Вт при рабочей температуре порядка 800...900 К.

Наряду с бариевыми катодами широко применяют оксидные, в которых активный слой состоит из оксидов щелочно-земельных металлов: бария, стронция и кальция. Большим недостатком оксидных ка-

тодов является испарение с их поверхности активного слоя. При этом атомы активного слоя осаждаются на других электродах лампы, нарушая ее нормальную работу.

## 6.4 Электровакуумный диод

**Устройство и принцип действия.** Диод представляет собой электронную лампу, имеющую два электрода: катод и анод. Диод, применяемый как выпрямитель переменного тока, называют кенотроном. Он может выполнять и ряд других важных преобразовательных функций.

Конструктивно вакуумный диод оформлен в виде стеклянного или металлического баллона, внутри которого создан высокий вакуум ( $\sim 10^{-5}$  Па). В баллоне размещают два электрода: анод и катод. Катод является источником свободных электронов, анод служит приемником испускаемых катодом электронов.

Для выяснения принципа действия диода воспользуемся схемой (рис. 33). Цепь питания катода косвенного накала на схемах обычно не указывается. С потенциометра  $R_{\Pi}$  на участок анод-катод диода подается напряжение  $U_a$ , называемое анодным. Когда это напряжение положительно, между анодом и катодом создается ускоряющее электрическое поле. Под его действием электроны, испускаемые катодом,

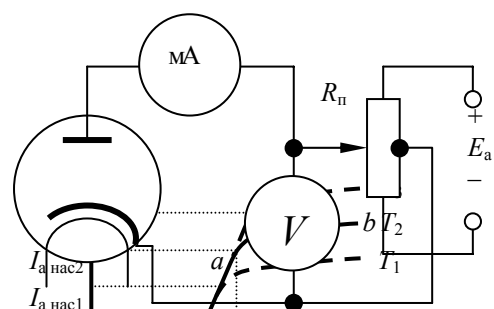


Рис. 33 Схема установки для снятия вольтамперной характеристики диода

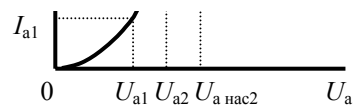


Рис. 34 Вольтамперная характеристика диода

устремляются на анод, замыкая цепь анодного тока  $I_a$ . Необходимо иметь в виду, что здесь использовано условное направление тока.

Если анодное напряжение отрицательно, электрическое поле между анодом и катодом становится для электронов тормозящим и практически ни один электрон электронного облака, возникающего вокруг катода, не попадает на анод. Цепь анодного тока разорвана, и  $I_a = 0$ . Отсюда следует важный вывод: *диод обладает свойством односторонней проводимости.*

Для расчета схем, в которых применяют диоды, необходимо использовать вольтамперные характеристики (рис. 34). Ход характеристики объясняется следующим. При отсутствии анодного напряжения анодный ток лампы равен нулю, хотя вокруг катода и существует электронное облако. С увеличением анодного напряжения  $U_a$  анодный ток увеличивается и электронное облако рассасывается. Точка  $a$  характеристики соответствует такому режиму работы, когда анодный ток оказывается равным эмиссионному току, т.е. электронное

облако полностью рассосалось. Для диодов с простыми катодами этот ток называется током насыщения. Ему соответствует анодное напряжение  $U_{a \text{ нас}}$ .

Для изменения тока насыщения необходимо менять температуру катода. Активированные катоды не имеют ярко выраженного участка насыщения характеристики (участок  $ab$ , рис. 34).

**Параметры диодов.** Внутреннее сопротивление  $R_i = \Delta U_a / I_a$ , т.е. отношение приращения анодного напряжения к приращению анодного тока на рабочем участке характеристики (участок  $0a$ , рис. 34). Для выпрямительных ламп (кенотронов) его значения порядка нескольких сотен ом. Допустимая мощность рассеяния на аноде  $P_{a \text{ доп}}$  выделяется при бомбардировке его электронами и при разогревании анода до некоторой допустимой температуры. Превышение  $P_{a \text{ доп}}$  может привести к расплавлению анода. Для современных анодов  $P_{a \text{ доп}}$  колеблется в пределах от долей ватт до десятков ватт.

Максимальный анодный ток  $I_{a \text{ max}}$  ограничен током эмиссии катода, а также перегревом катода и анода. Значения  $I_{a \text{ max}}$  обычно лежат в пределах от 0,01 до 1 А.

Максимальное обратное напряжение  $U_{\text{обр. max}}$  — это такое максимальное анодное напряжение обратной полярности, при котором еще не наступает пробой промежутка между анодом и катодом. Оно зависит от электрической прочности диода и лежит в пределах от десятков вольт до десятков киловольт.

## 6.5 ТРИОД

**Устройство и принцип действия.** Триод представляет собой электронную лампу, имеющую три электрода: катод, анод и управляющий электрод — сетку. В триоде используется термоэлектронная эмиссия с катода и движение электронов в результирующем электрическом поле, создаваемом анодом и сеткой. Принцип действия триода обусловлен влиянием электрического поля сетки на поток электронов, идущих от катода к аноду.

Рассмотрим влияние сетки при разных напряжениях на ней относительно катода и постоянном положительном напряжении анода. Для этого воспользуемся установкой, собранной по схеме рис. 35.

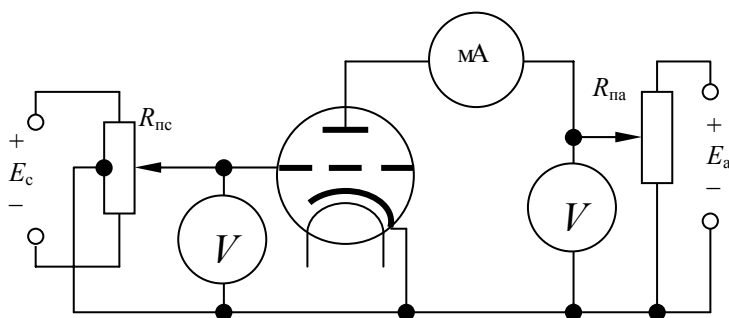


Рис. 35 Схема установки для снятия семейств анодных и анодно-сеточных характеристик триода

Если напряжение на сетке относительно катода равно 0 (движок потенциометра  $R_{пс}$  установлен в среднее положение), то она не создает своего электрического поля и не оказывает влияния на величину тока анода. При накаленном катоде и отсутствии анодного напряжения эмиттируемые электроны заполняют междуэлектродное пространство у катода. Заряд, созданный этими электронами, называют *отрицательным объемным зарядом*. Этот заряд создает тормозящее электрическое поле для выходящих из катода электронов. Он тем больше, чем больше количество эмиттируемых электронов, т.е. чем больше напряжение накала. При подаче положительного анодного напряжения на анод попадают только электроны, обладающие достаточной энергией, чтобы преодолеть тормозящее поле около катода.

Если напряжение сетки положительное (движок потенциометра  $R_{пс}$  перемещен в верхнее положение), то между ней и катодом создается для электронов ускоряющее электрическое поле, которое складывается с ускоряющим полем анода; результирующее ускоряющее поле для электронов в промежутке сетка-катод увеличивается, и больше электронов уходит из объемного заряда сквозь сетку на анод. В результате ток анода возрастает тем больше, чем выше положительное напряжение сетки. Однако такой режим работы триода практически не используется, так как часть электронов притягивается к положительно заряженной сетке, создавая в ее цепи ток сетки  $I_c$ , который вредно сказывается на работе лампы. При отрицательном напряжении сетки (движок потенциометра  $R_{пс}$  установлен в нижнее положение) создается тормозящее электрическое поле для эмиттируемых катодом электронов; ток анода уменьшается тем сильнее, чем больше величина отрицательного напряжения сетки.

Отрицательное напряжение сетки, при котором ток анода становится равным нулю при положительном напряжении анода, называют *запирающим напряжением*  $U_{зап}$ , при этом лампа оказывается запертой, поскольку ток через нее не проходит. Это объясняется тем, что тормозящее поле сетки полностью компенсирует ускоряющее поле анода. При дальнейшем увеличении отрицательного напряжения сетки лампа остается запертой. Таким образом, изменяя напряжение сетки, можно изменять величину тока анода, иначе говоря, управлять анодным током. Поэтому сетка в триоде называется *управляющей*.

Обычно для управления током анода используют изменение отрицательного напряжения сетки, чтобы исключить появление тока сетки. С уменьшением отрицательного напряжения сетки ток анода увеличивается, а с увеличением отрицательного – уменьшается.

Из сказанного следует, что благодаря экранирующему действию сетки, ослабляющему влияние анодного поля на анодный ток, а также меньшему расстоянию между сеткой и катодом, чем между анодом и катодом, *изменения напряжения сетки гораздо сильнее влияют на ток анода, чем такие же изменения напряжения анода*. На этом основаны усилительные свойства триода и использование его для усиления электрических сигналов.

**Характеристики триода.** Анодный ток в триоде зависит от трех напряжений – накала, сетки и анода. Напряжение накала всегда поддерживается неизменным, равным номинальному, поэтому рассматривают два вида статических характеристик триода:

*анодные* – зависимость тока анода от напряжения анода при постоянном напряжении сетки

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_c = \text{const};$$

*анодно-сеточные* – зависимость тока анода от напряжения сетки при постоянном напряжении анода

$$I_a = f(U_c) \text{ при } U_a = \text{const}.$$

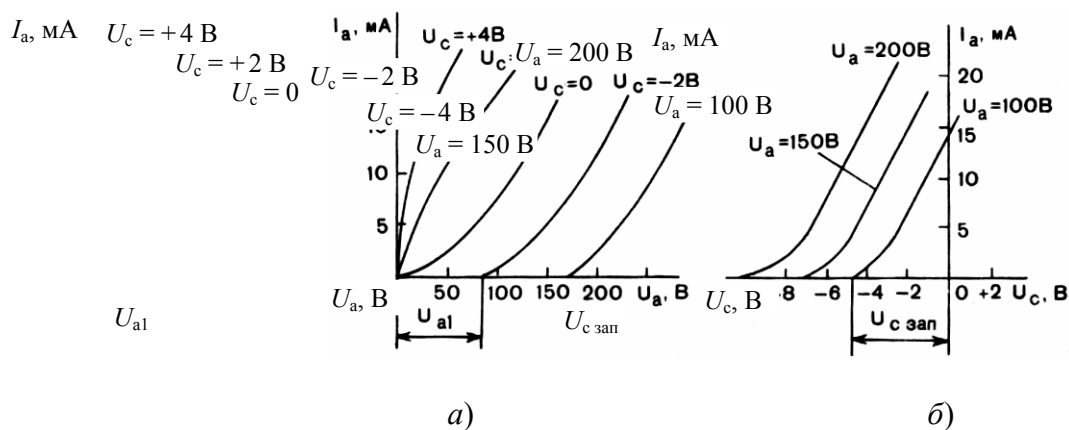
Схема установки для снятия статических характеристик триода (рис. 35) включает источники постоянных напряжений  $E_a$  и  $E_c$ , потенциометры  $R_{па}$  и  $R_{пс}$  для изменения напряжений анода и сетки, приборы для измерения напряжений анода и сетки и тока анода.

Анодные характеристики, снятые при разных значениях постоянного напряжения сетки, составляют *семейство статических анодных характеристик* (рис. 36, а). Анодные характеристики – это *выходные* характеристики триода.

Анодная характеристика, снятая при  $U_c = 0$ , выходит из начала координат; при отсутствии напряжения анода тока в цепи анода нет. Анодная характеристика нелинейна: с увеличением  $U_a$  ток растет сначала медленно (из-за тормозящего действия отрицательного объемного заряда), а затем (по мере рассеивания этого заряда) – все быстрее.

Характеристика, снятая при постоянном отрицательном напряжении сетки, например при  $U_c = -2$  В, начинается не из нуля, а правее, при некотором значении напряжения анода  $U_{a1}$ . Это объясняется тем, что с увеличением напряжения анода от нуля ток будет оставаться равным нулю до тех пор, пока ускоряющее поле анода не скомпенсирует около катода тормозящее действие поля сетки. Лампа остается запертой, если действующее напряжение отрицательно или равно нулю.

Чем больше абсолютная величина отрицательного напряжения сетки, при котором снимается анодная характеристика, тем сильнее тормозящее поле сетки; следовательно, тем сильнее должно быть ускоряющее поле анода для его компенсации. Поэтому при увеличении отрицательного постоянного напряжения сетки анодные характеристики все больше сдвигаются вправо.



**Рис. 36 Семейства вольтамперных характеристик триода:**

а – анодные; б – анодно-сеточные

При постоянном положительном напряжении сетки все анодные характеристики выходят из начала координат, так как даже при малом напряжении анода поле у катода ускоряющее и часть электронов попадает на анод. При большем положительном напряжении сетки анодные характеристики будут круче.

Анодно-сеточные характеристики, снятые при разных значениях постоянного напряжения анода, составляют *семейство статических анодно-сеточных характеристик* (рис. 36, б). Анодно-сеточные характеристики являются *передаточными* характеристиками триода.

С повышением напряжения анода отрицательное запирающее напряжение увеличивается, поэтому анодно-сеточные характеристики, снятые при более высоком постоянном напряжении анода, сдвигаются влево. Анодно-сеточные характеристики начинаются только в области отрицательных напряжений сетки, поскольку при положительном анодном напряжении лампу можно запереть только тормозящим полем сетки. Участки анодно-сеточных характеристик в области положительных напряжений сетки обычно не используются: хотя анодный ток с увеличением положительного напряжения сетки растет, но появляется и растет ток сетки, который приводит к искажению усиливаемых колебаний.

**Параметры триода.** Основными параметрами триода являются: крутизна анодно-сеточной характеристики, внутреннее сопротивление, коэффициент усиления, а также максимально допустимое значение мощности, рассеиваемой анодом.

**Крутизна анодно-сеточной характеристики триода  $S$**  – это параметр, показывающий, на сколько миллиампер изменится ток анода при изменении напряжения сетки на 1 В при постоянном напряжении анода:

$$S = \Delta I_a / \Delta U_c \quad \text{при} \quad U_a = \text{const.}$$

Крутизна определяет наклон анодно-сеточной характеристики и измеряется в миллиамперах на вольт (мА/В). Крутизна в разных точках характеристики различна. Для данной точки крутизну характеристики можно определить по анодно-сеточной характеристике, найдя приращение тока анода  $\Delta I_a$  и на-

пряжения сетки  $\Delta U_c$  как разность, соответственно, токов анода и напряжений сетки для двух близлежащих точек характеристики.

Для разных типов триодов крутизна характеристики может иметь значение от 1...2 до 30...40 мА/В.

*Внутреннее сопротивление триода*  $R_i$  – это параметр, показывающий, на сколько вольт надо изменить напряжение анода, чтобы ток анода изменился на 1 А при постоянном напряжении сетки:

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a \text{ при } U_c = \text{const.}$$

Внутреннее сопротивление характеризует сопротивление лампы изменению тока; это сопротивление при переменном токе. Его называют также *дифференциальным сопротивлением*.

Внутреннее сопротивление, определяемое для разных точек, различно. В данной точке его можно определить, взяв на анодной характеристике близко расположенную вторую точку и найдя приращения напряжения анода  $\Delta U_a$  и тока анода  $\Delta I_a$ .  $R_i$  может иметь значения от сотен ом до десятков килоом.

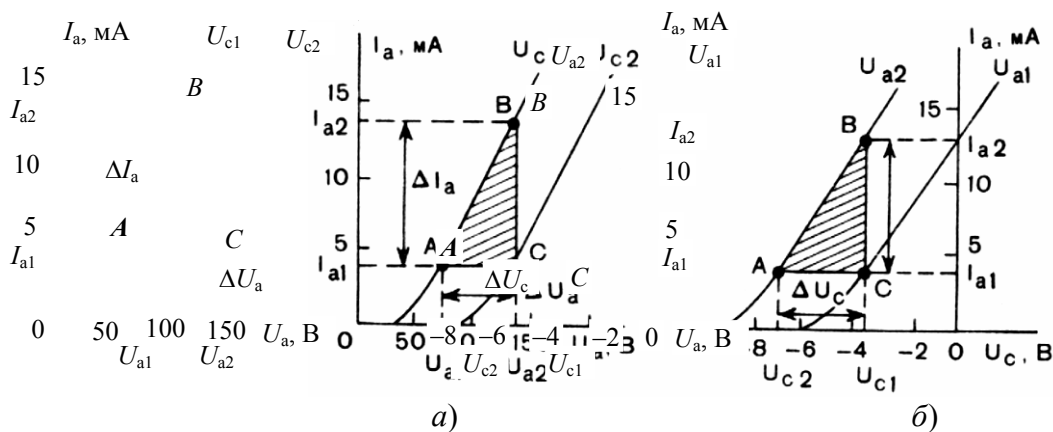
*Коэффициент усиления триода*  $\mu$  – это параметр, показывающий, во сколько раз изменение напряжения сетки сильнее влияет на ток анода, чем такое же по величине изменение напряжения анода. Его можно вычислить по двум анодным или анодно-сеточным характеристикам как отношение приращения напряжения анода к приращению напряжения сетки при одном и том же значении тока анода:

$$\mu = \Delta U_a / \Delta U_c \text{ при } I_a = \text{const}$$

В анодной системе координат приращение напряжения сетки определяется как разность постоянных значений  $U_{c1}$  и  $U_{c2}$ , при которых снимались характеристики. В системе анодно-сеточных координат аналогично определяется  $\Delta U_a$ . Коэффициент усиления триода в зависимости от конструкции электродов может иметь значения от 5 до 30.

Для определения всех трех главных параметров для данной точки  $A$  на семействе статических характеристик строят прямоугольный характеристический треугольник  $ABC$  так, чтобы его вершины лежали на двух соседних характеристиках, катеты были параллельны осям координат, а гипотенузой служил отрезок  $AB$  характеристики (рис. 37).

Это можно сделать как на анодных, так и на анодно-сеточных характеристиках. На семействе анодных характеристик (рис. 37, *a*) катет  $AC$  соответствует приращению анодного напряжения  $\Delta U_a$ , катет  $BC$  –



**Рис. 37 Определение главных параметров триода с помощью характеристического треугольника:**

*a* – на семействе анодных характеристик;

*б* – на семействе анодно-сеточных характеристик

приращению тока анода  $\Delta I_a$ , а разность напряжений  $U_{c2}$  и  $U_{c1}$  – приращению напряжения сетки. По найденным приращениям определяют параметры:

$$S = \Delta I_a / \Delta U_c = BC / (U_{c2} - U_{c1});$$

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a = AC / BC;$$

$$\mu = \Delta U_a / \Delta U_c = AC / (U_{c2} - U_{c1}).$$

Аналогично можно определить параметры по анодно-сеточным характеристикам (рис. 37, *б*).

Рассмотренные параметры, вычисленные для одной точки характеристики, связаны между собой соотношением, которое носит название *уравнения параметров*:

$$\mu = SR_i.$$

Рассеиваемая анодом мощность  $P_a$  – это энергия, приносимая на анод электронами за одну секунду. Она равна произведению тока анода на напряжение анода:

$$P_a = I_a U_a.$$

Для каждого типа ламп существует максимально допустимое значение рассеиваемой анодом мощности  $P_{a \max}$ , при котором анод не перегревается выше допустимой температуры.

**Недостатки триода.** Во-первых, недостатком триода является относительно малый коэффициент усиления. Это объясняется большим деуправляющим действием анода, так как управляющая сетка слабо экранирует пространство между сеткой и катодом от действия поля анода на электронный поток.

Во-вторых, триоды имеют большую междуэлектродную емкость  $C_{ac}$  (емкость между анодом и управляющей сеткой), которая вредно влияет на работу триода на высоких частотах за счет образования паразитной обратной связи между анодной и сеточной цепями.

## 6.6 Тетрод

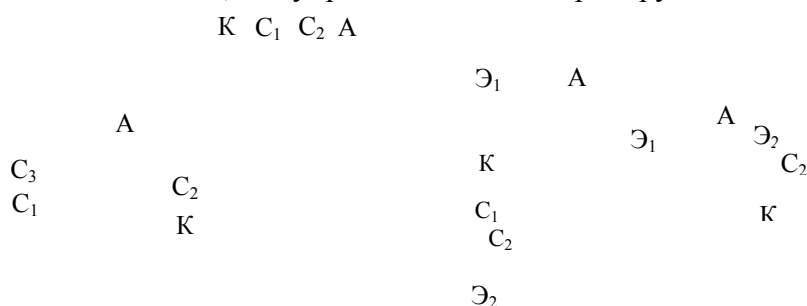
**Четырехэлектродная лампа – тетрод** – имеет две сетки: управляющую и экранирующую. Экранирующая расположена между анодом и управляющей сеткой и выполнена в виде плотной спирали. На экранирующую сетку подается постоянное положительное напряжение, составляющее примерно  $0,5E_a$ . По переменному напряжению экранирующая сетка заблокирована конденсатором достаточно большой емкости. Переменное электрическое поле анода в основном замыкается на экранирующую сетку. В результате его деуправляющее действие на электронный поток резко снижается и, следовательно, усиительные свойства тетрода значительно выше, чем у триода.

Одновременно с этим значительно уменьшается вредная емкость анод – управляющая сетка, так как число силовых линий анодного поля, попадающих на управляющую сетку, также сокращается. Таким образом, недостатки, присущие триоду, в тетроде отсутствуют. Однако появление экранирующей сетки приводит к возникновению нового недостатка, связанного с *динатронным эффектом*, суть которого заключается в следующем.

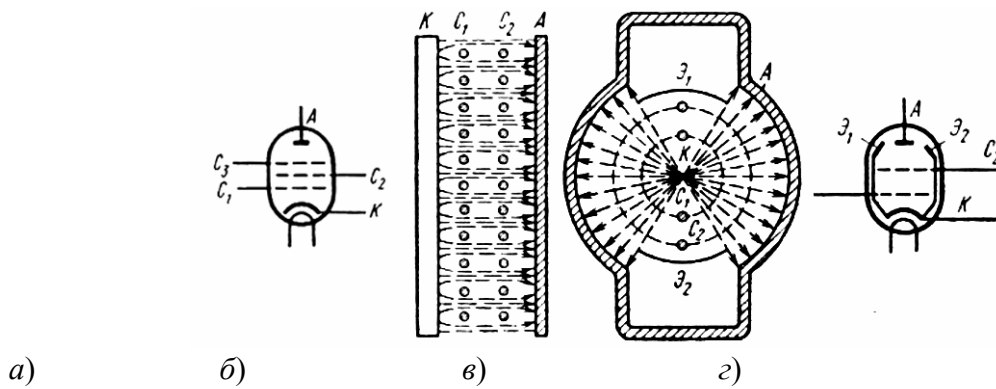
При некоторой скорости электронов, летящих на анод, из анода выбиваются вторичные электроны. При работе тетрода напряжение на аноде может стать меньше напряжения на экранирующей сетке, при этом вторичные электроны притягиваются этой сеткой. Это вызывает уменьшение анодного тока при одновременном увеличении тока экранирующей сетки, т.е. на анодной характеристике тетрода появляется провал. Это приводит к искажению формы усиливаемого сигнала, что весьма нежелательно. В результате практическое применение тетродов в качестве усилительных ламп ограничено.

## 6.7 Пентод и лучевой тетрод

Для того чтобы устранить динатронный эффект, необходимо создать тормозящее поле в пространстве между анодом и экранирующей сеткой. Это поле обеспечит возвращение вторичных электронов на анод. Существует два способа создания тормозящего поля в пространстве между анодом и экранирующей сеткой. Первый заключается в том, что между анодом и экранирующей сеткой размещается еще одна сетка, соединенная, как правило, с катодом и поэтому обладающая отрицательным потенциалом относительно анода. Третья сетка называется *защитной* или *антидинатронной* и конструктивно выполняется так же, как управляющая или экранирующая.







**Рис. 38** *а* – условное графическое изображение пентода; *б* – разрез в вертикальной и *в* – в горизонтальной плоскостях лучевого тетрода; *г* – его условное графическое изображение

В пентоде, условное графическое изображение которого приведено на рис. 38, *а*, вторичные электроны, летящие от анода с малой скоростью, возвращаются тормозящим полем защитной сетки  $C_3$  обратно на анод. Следовательно, динаatronный эффект полностью отсутствует. Наряду с этим наличие дополнительной сетки приводит к еще большему экранированию от анодного поля электронного потока в пространстве между катодом и управляющей сеткой. Это вызывает значительное увеличение внутреннего сопротивления  $R_i$ , а следовательно, и коэффициента усиления  $\mu$ . Одновременно с этим значительно снижается емкость между анодом и управляющей сеткой  $C_{ac1}$ . У пентодов значения  $R_i$  обычно порядка 1...2 МОм;  $\mu$  достигает 1000 и более;  $C_{ac1} = 0,002...0,005$  пФ.

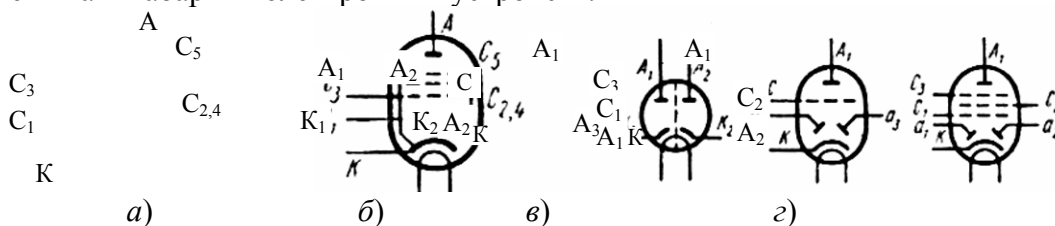
В лучевых тетрадах динаatronный эффект устраняют вторым способом, который основан на использовании пространственного заряда большей плотности, создаваемого электронным потоком между экранной сеткой и анодом. Электронный поток большой плотности создают за счет особой конструкции лампы. Во-первых, управляющая и экранирующая сетки имеют одинаковый шаг, причем их витки расположены друг против друга. В результате этого электроны летят от катода к аноду уплотненными «лучами», как показано на рис. рис. 38, *б*. Во-вторых, в лампе имеются специальные экраны Э, соединенные с катодом, в результате чего электронный поток сжимается в два сектора, как это показано на рис. рис. 38, *в*, и его плотность значительно увеличивается. Таким образом, попадание вторичных электронов на экранирующую сетку практически исключено.

Необходимо заметить, что экранирующая сетка в лучевом тетраде не может быть очень плотной. Поэтому емкость  $C_{ac1}$  относительно большая, порядка 0,3...1 пФ. По этой же причине невелики внутреннее сопротивление  $R_i$  и коэффициент усиления  $\mu$ . Внутренне сопротивление  $R_i$  имеет значения порядка десятков килоом,  $\mu$  около 100.

### 6.8 Многоэлектродные и комбинированные лампы

Многоэлектродные лампы имеют четыре сетки и более. При этом две сетки являются управляющими и, т.е. позволяют осуществлять одновременно двойное управление анодным током. Такое управление используют, например, в преобразователях частоты приемных устройств. На рис. 39, *а* показано условное обозначение пятисеточной лампы – гептода, в котором сетки  $C_1$  и  $C_3$  являются управляющими,  $C_2$  и  $C_4$  – экранирующими, а  $C_5$  – защитной.

Широко применяются также комбинированные лампы, использование которых дает возможность уменьшать габариты электронных устройств.



**Рис. 39** Условные графические изображения: *а* – семиэлектродной лампы; *б* – *г* – комбинированных ламп

При этом упрощается монтаж и снижается стоимость всего устройства. Комбинированная лампа состоит из нескольких ламп, размещенных в одном баллоне, причем каждая лампа выполняет самостоятельные функции. На рис. 39, б, в, г приведены условные обозначения некоторых комбинированных ламп: б – двойного диода; в – двойного диода-триода; г – двойного диода-пентода.

В настоящее время большинство электровакуумных приборов практически вытеснено более совершенными полупроводниковыми приборами – биполярными и полевыми транзисторами. Электронные лампы находят применение в современной радиоэлектронной аппаратуре в качестве усилителей высокочастотных колебаний мощностью от нескольких сотен ватт и выше, а также генераторов диапазона СВЧ.

## 6.9 Электроннолучевые приборы

Характерной особенностью большой группы электровакуумных приборов является наличие в них сфокусированного пучка электронов – *электронного луча*. В электронных лампах длина пробега электронов между электродами измеряется в большинстве случаев миллиметрами, длина электронного луча имеет длину 20...30 см и более. В электронных лампах осуществляется управление интенсивностью потока электронов между электродами, в электроннолучевых приборах, кроме управления интенсивностью электронного луча, осуществляется также управление направлением этого луча.

Электроннолучевые приборы подразделяются на две большие группы. Первую из них составляют приборы СВЧ, к которым, в первую очередь, относятся клистроны, лампы бегущей и обратной волны. Вторую составляют электронно-оптические преобразователи, причем с помощью электронного луча осуществляется как преобразование оптических сигналов в сигналы электрического тока, так и обратное преобразование. Приборы именно такого принципа действия до настоящего времени широко применяются в бытовой и радиоизмерительной аппаратуре.

Рассмотрим более подробно устройство и принцип действия электроннолучевых трубок, преобразующих электрические сигналы в видимое светящееся изображение на экране.

Электроннолучевая трубка представляет собой электронный вакуумный прибор, основными частями которого в большинстве случаев являются: *электронный прожектор*, устройства, управляющие направлением луча, которые носят название *отклоняющей системы*, и люминесцирующий *экран*, на котором под действием электронного луча возникает светящееся пятно, смещающееся по экрану под воздействием электрического или магнитного поля отклоняющей системы.

Электронный прожектор служит для получения электронного луча необходимой интенсивности. Он состоит из источника свободных электронов – обычно оксидного подогретого катода. Катод этот имеет форму стаканчика, на торцевую поверхность которого нанесен оксидный слой.

Катод помещен внутри цилиндра управляющего электрода – модулятора.

В середине дна этого цилиндра сделано отверстие, которое служит диафрагмой для электронного луча. Модулятору сообщается напряжение, обычно отрицательное по отношению к катоду. Отрицательный заряд модулятора отталкивает часть электронов катодной эмиссии обратно на катод; остальные пролетают через отверстие диафрагмы, образуя относительно сжатый пучок, благодаря воздействию электрического поля модулятора. Роль модулятора в электроннолучевой трубке в общем та же, что и роль управляющей сетки в электронной лампе. Изменение потенциала модулятора дает возможность изменять интенсивность электронного луча; а при определенном, достаточно большом по абсолютной величине отрицательном потенциале модулятора луч запирается.

Электрическое поле, ускоряющее электроны луча, возбуждается напряжением, приложенным между катодом и анодами, расположенными вдоль пути луча.

Придав специальную форму этим анодам, можно сфокусировать электронный луч на экране трубки. Но если нужно обеспечить весьма малые размеры пятна на экране (например, в приемных трубках телевизоров), то применяется магнитная фокусировка луча посредством воздействия специальных фокусирующих катушек, надетых на узкую часть трубки. Соответственно принято различать трубки с электростатической фокусировкой и трубки с магнитной (точнее, с электромагнитной) фокусировкой.

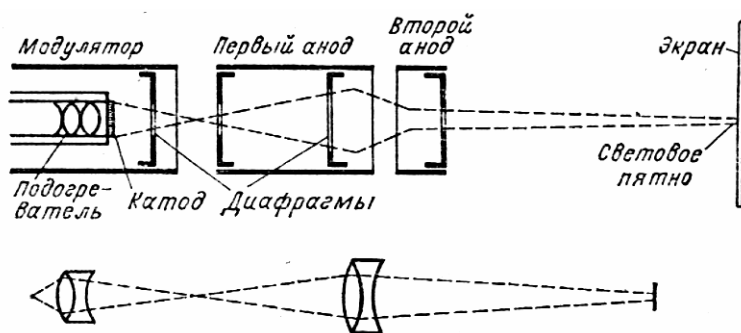
При электростатической фокусировке два анода (рис. 40) выполняются в виде полых цилиндров с диафрагмами в форме перегородок с отверстиями. Между вторым анодом и катодом включается источник постоянного высокого напряжения. На первый анод, посредством делителя подается напряжение, составляющее только 10...30 % напряжения второго анода.

Электрическое (или магнитное) поле может воздействовать на поток электронов совершенно так же, как оптическая линза на световой поток, в соответствии с чем принято называть электронными и магнитными линзами электрические и магнитные поля соответствующей конфигурации. Это так называемая электронная оптика.

В электронном прожекторе две электронные линзы, образуют фокусирующую систему. Роль первой линзы играет электрическое поле, создаваемое между первым анодом, модулятором и катодом. Эта электронная линза собирает луч в первый фокус между модулятором и первым анодом. Пройдя через первый фокус, траектории электронов вновь несколько расходятся. Для их фокусирования на экран трубки служит вторая электронная линза, образуемая полем между первым и вторым анодами. На рис. 40 две электронные линзы сопоставлены с линзами оптической системы, также дважды фокусирующей луч света. Рабочая фокусировка луча осуществляется регулированием напряжения первого анода. Такое регулирование изменяет радиусы кривизны электронных линз.

Существует большое количество различных вариантов конструкций фокусирующей электростатической системы. Например, между первым анодом и модулятором помещается ускоряющий электрод, соединенный со вторым анодом и, следовательно, находящийся под высоким напряжением.

При магнитной фокусировке применяется по существу смешанная система линз; сохраняется упомянутая первая электростатическая электронная линза, но вторая линза делается магнитной.

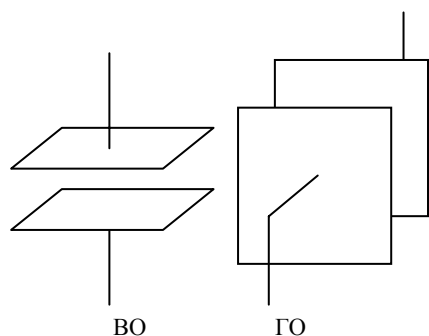


**Рис. 40 Устройство и оптический аналог электростатической фокусирующей системы**

Второй анод при этом осуществляется часто в виде слоя графита, нанесенного на часть цилиндрического участка трубки и на ее конусную составляющую, прилегающую к экрану.

Магнитная линза возбуждается постоянным током, пропускаемым по катушке. Последняя надевается на цилиндрическую часть баллона трубки. Благодаря большому диаметру магнитной линзы, по сравнению с электростатической, она обеспечивает меньшую сферическую aberrацию, а следовательно, меньшие размеры пятна на экране. Посредством изменения постоянного тока регулируется радиус кривизны магнитной линзы, а, следовательно, осуществляется фокусировка луча на экране.

Для управления положением луча на экране применяются электростатические и магнитные отклоняющие системы. Они изменяют направление луча, а, следовательно, и положение светящегося пятна на экране воздействием на этот луч поперечным к его направлению электрическим или магнитным полем.



**Рис. 42 Устройство электростатической отклоняющей системы**

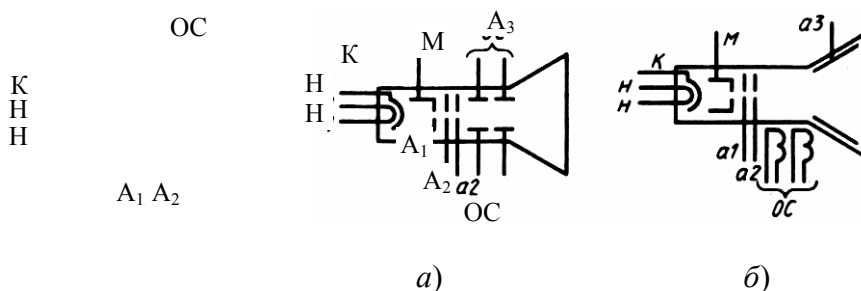
Простейшая электростатическая отклоняющая система состоит из двух пар плоских параллельных пластин (рис. 41), между которыми возбуждаются два взаимно перпендикулярных электрических поля (ВО – пластины вертикального отклонения луча, ГО – пластины горизонтального отклонения луча). Посредством изменения напряжений на этих двух парах пластин можно сместить светящееся пятно в любую точку экрана. Смещение пятна на экране пропорционально напряжению между пластинами, но оно же обратно пропорционально анодному напряжению  $U_{a2}$ . Последняя зависимость имеет простую физическую причину: анодному напряжению пропорциональна скорость  $V$  электрона, и чем выше эта скорость, тем кратковременнее воздействие отклоняющей силы на электрон, а следовательно, и меньше отклоняющая скорость. Практически в большинстве случаев простые плоскопараллельные пластины заме-

няются пластинами более сложной формы – изогнутыми, с расходящимися краями и т.п. Это делается для получения больших углов отклонения луча, для уменьшения расфокусировки луча при отклонении и т.п.

Магнитное отклонение луча осуществляется посредством магнитного поля, поперечного по отношению к оси трубки. Это поле возбуждается током, проходящим по отклоняющим катушкам, устанавливаемым снаружи цилиндрической части баллона трубки. Таким образом, оси отклоняющих катушек должны быть нормальны к оси фокусирующей катушки.

Магнитное управление требует значительно большей затраты мощности, чем электростатическое. Но из-за значительной индуктивности самих катушек предельная частота для отклоняющего тока примерно на два порядка ниже, чем частота отклоняющего напряжения в трубке с электростатической фокусировкой.

**Электронно-лучевые трубки с электростатической фокусировкой и электростатическим отклонением луча** (рис. 42, а) применяются в основном в электроннолучевых осциллографах для наблюдения формы быстроменяющихся электрических сигналов.



**Рис. 42** Условные графические обозначения:  
а – осциллографической трубки, б – кинескопа

**Кинескопы** (рис. 42, б) – это электроннолучевые трубки, предназначенные для воспроизведения сигналов графической информации, применяемые в основном в телевизионных приемниках и мониторах персональных компьютеров. Существует множество типов кинескопов, различающихся главным образом размерами экрана по диагонали и разрешающей способностью. Экраны кинескопов обычно прямоугольные; угол отклонения луча в большинстве кинескопов составляет 90°. Современные кинескопы имеют электростатическую фокусировку и магнитное отклонение луча.

### Контрольные вопросы

- 1 **КАКОВА РОЛЬ ВАКУУМА В ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРАХ?**
- 2 С какой целью активируют катоды электронных ламп?
- 3 Назовите основное назначение электровакуумного диода, основываясь на его вольтамперной характеристике.
- 4 Каково назначение сетки в триоде?
- 5 Какую роль выполняет вторая сетка в четырехэлектродной лампе – тетроде?
- 6 Какую роль выполняет третья сетка в пятиэлектродной лампе – пентоде?
- 7 В чем состоит основное отличие между тетродом и лучевым тетродом?
- 8 Объясните различие между многоэлектродными и комбинированными электронными лампами.
- 9 В чем состоит основное отличие между электроннолучевыми приборами и электронными лампами?
- 10 Назовите основные типы электроннолучевых приборов, служащих для получения изображения.

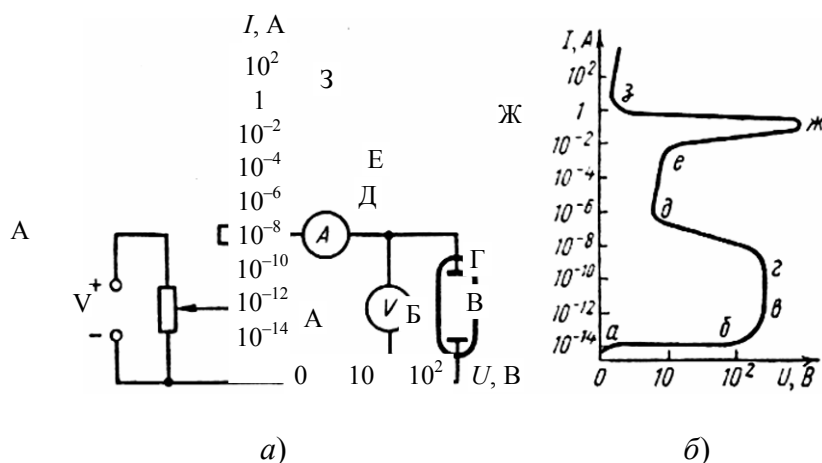
## МОДУЛЬ 7 ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

### 7.1 Основные разновидности электрических разрядов в газе

Принцип действия газоразрядных или ионных приборов основан на физических процессах, протекающих при прохождении электрического тока через газ. Прохождение тока через газовую среду называют газовым разрядом. При этом ток создается не только направленным перемещением электронов, но и встречным движением ионов.

Различают несамостоятельный и самостоятельный газовые разряды. Если заряженные частицы в разрядном промежутке образуются за счет внешних факторов (нагрев катода, радиоактивное облучение и т.д.), то газовый разряд называют несамостоятельным. Если газовый разряд поддерживается только за счет энергии электрического поля, возникающего при подаче напряжения на электроды, то разряд называют самостоятельным. Возникновение и особенности основных видов газового разряда удобно проследить, анализируя зависимость между напряжением на электродах и током в цепи газоразрядной трубки (вольтамперную характеристику). Схема для получения такой зависимости приведена на рис. 43, а, а вольтамперная характеристика газового разряда – на рис. 43, б.

С увеличением напряжения, подводимого к электродам газоразрядной трубки, ток  $I$ , протекающий через нее, увеличивается, так как все большее количество свободных электронов и ионов, образующихся, например, при космическом облучении, достигает поверхности электродов. При напряжении в несколько вольт (точка А) уже все носители зарядов участвуют в образовании тока и дальнейшее повышение напряжения до сотни вольт (участок 0Б) не приводит к увеличению  $I$ . Этот ток, называемый током насыщения, зависит от интенсивности ионизирующих факторов и конструктивных особенностей газоразрядной трубки. Его значение порядка  $10^{-14}$  А.



**Рис. 43 Исследование разряда в газе:**

а – схема установки; б – вольтамперная характеристика газового разряда

При дальнейшем увеличении напряжения скорость дрейфа электронов навстречу электрическому полю (к аноду) возрастает и они приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа при столкновениях.

Количество заряженных частиц в газовой среде растет, что приводит к новому увеличению тока (участок БВ). При этом скорость дрейфа положительных ионов к катоду возрастает настолько, что ионы, попадая на катод, могут, в свою очередь, выбить из него электроны. Точка Б соответствует такому состоянию процесса, когда излученные катодом электроны порождают столько ионов, что они, падая на катод, вновь выбивают не меньшее количество электронов. При этом разряд из несамостоятельного переходит в самостоятельный и способен поддерживаться в отсутствие внешней ионизации. Напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд, зависит от многих факторов. Чтобы снизить это напряжение, в некоторых ионных приборах катод покрывают веществами, уменьшающими работу выхода электронов (оксидами бария, цезия и др.).

На участке ВГ ток возрастает при постоянном напряжении только за счет размножения носителей заряда. На участке ГД лавинообразный рост количества заряженных частиц приводит к тому, что увеличение тока сопровождается снижением напряжения на электродах. Участок АБВГ соответствует темному разряду, который можно наблюдать только по показаниям амперметра.

На участке ГД осуществляется переход к тлеющему разряду. Насыщение разрядного промежутка большим количеством положительных ионов вызывает большой перепад потенциалов в небольшой области, непосредственно примыкающей к катоду. Это создает большую напряженность электрического поля вблизи поверхности катода. Именно в этой области электроны приобретают значительную энергию и интенсивно ионизируют газ. Одновременно с ионизацией идет процесс рекомбинации: часть ионов захватывает электроны и превращается в нейтральные молекулы. Процесс рекомбинации сопровождается излучением квантов света, и газ начинает светиться.

Поверхность катода всегда имеет небольшие структурные неоднородности, вблизи которых интенсивность ионизации газа несколько различна. Локальное увеличение ионизации вызывает некоторое повышение температуры малого участка катода, что приводит к дальнейшему возрастанию количества ионов над этим участком. В результате разряд «стягивается» в трубку, основание которой размещается на ограниченном (рабочем) участке катода. Тонкий слой светящегося газа над этим участком образует катодное пятно.

Интервал ДЕ вольтамперной характеристики соответствует нормальному тлеющему разряду. Особенность этого разряда заключается в том, что рост тока происходит только за счет увеличения площади катодного пятна (при постоянной плотности тока).

В точке Е катодное пятно захватывает всю площадь катода и для дальнейшего роста тока необходимо снова увеличивать напряжение (участок ЕЖ). Разряд, соответствующий этому интервалу вольтамперной характеристики, называется аномальным тлеющим разрядом.

В точке Ж напряженность электрического поля вблизи катода достигает значений порядка  $10^8$  В/м, при этом становится возможной автоэлектронная эмиссия, т.е. вырывание электрическим полем электронов из анода. Возникает дуговой разряд, сопровождаемый резким увеличением тока при снижении напряжения на электродах до нескольких вольт (точка З). Образуется яркое катодное пятно дугового разряда, и последующий рост тока происходит за счет увеличения площади этого пятна.

Если токи тлеющего разряда измеряются единицами миллиампер, то токи дугового разряда – десятками и сотнями ампер. Поэтому при работе в режиме дугового разряда в цепь газоразрядной трубки должно быть включено ограничительное сопротивление (рис. 43, а). Без этого сопротивления небольшие колебания питающего напряжения могут привести к такому росту тока, что катод расплавится.

Кроме напряжения на ток газоразрядной трубки существенно влияют состав и плотность газонаполнителя, размеры и конфигурация электродов, расстояние между электродами и материал, из которого они изготовлены.

Следует отметить, что в технике высоких напряжений существенную роль играют другие виды разрядов, в частности *коронный* и *искровой*.

## 7.2 ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

На основе перечисленных основных разновидностей электрических разрядов в газе было создано достаточно большое число электронных приборов, применявшихся как в бытовой радиоэлектронной аппаратуре, так и в устройствах силовой электроники. Их основные типы можно определить следующим образом.

**Газотрон** – двухэлектродный газоразрядный прибор с подогревным катодом, работающий в режиме несамостоятельного дугового разряда при токах в сотни ампер и обратных напряжениях в десятки киловольт.

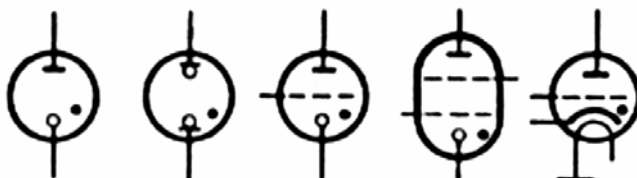
**Тиратрон** – газоразрядный прибор с тремя или четырьмя электродами, моментом зажигания которого можно управлять. Различают тиратроны с горячим катодом (работающие в режиме несамостоятельного дугового разряда) и с холодным катодом (работающие в режиме самостоятельного тлеющего разряда).

**Стабилитрон** – двухэлектродная лампа тлеющего разряда с холодным катодом. Используется в стабилизаторах напряжения постоянного тока при напряжениях в десятки-сотни вольт и токах единицы-десятки миллиампер.

**Газосветные сигнальные лампы** работают в режиме тлеющего разряда в цепях как постоянного, так и переменного тока. Газосветные цифровые индикаторы имеют анод, изготовленный в виде сетки, через которую легко просматриваются десять катодов, выполненных в виде цифр от 0 до 9. Каждый катод имеет свой вывод. Подавая напряжение на анод и один из катодов, высвечивают нужную цифру.

На рис. 44 приведены условные графические изображения некоторых газоразрядных приборов.

К настоящему времени они практически полностью вытеснены полупроводниковыми приборами. Например, светоизлучающие диоды



а)        б)                      в)        г)                      д)

**Рис. 44** Условные графические обозначения газоразрядных приборов:

а – стабилитрон; б – сигнальная лампа; в – трехэлектродный тиратрон с холодным катодом; г – четырехэлектродный тиратрон с холодным катодом; д – тиратрон с горячим катодом

**И СВЕТОДИОДНЫЕ МАТРИЦЫ ЗАМЕНИЛИ ГАЗОСВЕТНЫЕ СИГНАЛЬНЫЕ ЛАМПЫ; ОСНОВНОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗОЙ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА СЕГОДНЯШНИЙ ДЕНЬ ЯВЛЯЮТСЯ ТИРИСТОРЫ И СИМИСТОРЫ. ОДНАКО В ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ПОЛУЧИЛО НОВОЕ РАЗВИТИЕ В СОВРЕМЕННЫХ УСТРОЙСТВАХ ОТОБРАЖЕНИЯ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ – ПЛАЗМЕННЫХ ПАНЕЛЯХ. ОСНОВНУЮ КОНКУРЕНЦИЮ ИМ НА СЕГОДНЯШНЕМ ЭТАПЕ СОСТАВЛЯЮТ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПАНЕЛИ. КАКОЕ ИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ОКАЖЕТСЯ БОЛЕЕ ПЕРСПЕКТИВНЫМ, ПОКАЖЕТ ВРЕМЯ.**

### Контрольные вопросы

- 1 В ЧЕМ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ СХОДСТВО И РАЗЛИЧИЕ МЕЖДУ ГАЗОРАЗРЯДНЫМИ И ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫМИ ПРИБОРАМИ?**
- 2 ДЛЯ КАКИХ ЦЕЛЕЙ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА?**
- 3 НАЗОВИТЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРОВ ДУГОВОГО РАЗРЯДА.**
- 4 КАКОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ПРИБОР ЯВЛЯЕТСЯ АНАЛОГОМ ГАЗОТРОНА?**
- 5 В ЧЕМ ЗАКЛЮЧАЮТСЯ ПРЕИМУЩЕСТВА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ ПЕРЕД ГАЗОСВЕТНЫМИ СИГНАЛЬНЫМИ ЛАМПАМИ?**

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Винокуров Е.Б. Лабораторный практикум по радиоэлектронным приборам и устройствам: Учебно-метод. пособ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001.
- 2 Власов А.Д., Мурин Б.П. Единицы физических величин в науке и технике. М., 1990.
- 3 Горохов П.К. Толковый словарь по радиоэлектронике. М., 1993.
- 4 Грамматикати В.М. Преподавание радиоэлектроники. М., 1991.
- 5 Гуревич Б.М., Иваненко Н.С. Справочник по электронике для молодого рабочего. М., 1987.
- 6 Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники. М., 1989.
- 7 Колонтаевский Ю.Ф. Радиоэлектроника. М., 1988.
- 8 Федосеева Е.О., Федосеева Г.П. Основы электроники и микроэлектроники. М., 1990.
- 9 Харченко В.М. Основы электроники. М., 1982.
- 10 Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Т. 2 «Электроника» / Под общей редакцией проф. Д.И. Панфилова. М.: «Додэка», 2000.
- 11 Электроника. Энциклопедический словарь / Под ред. В.Г. Колесникова. М.: «Советская энциклопедия», 1991.