

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

4. Полупроводниковые диоды

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

- ✗ **Полупроводниковым диодом** называют электропреобразовательный прибор, содержащий один или несколько переходов и два вывода для подключения к внешней цепи.
- ✗ Принцип работы большинства диодов основан на использовании физических явления в переходе.
- ✗ В диодах применяются электронно-дырочный переход, контакт металл–полупроводник, гетеропереход.
- ✗ Полупроводниковый диод как элемент электрической цепи является нелинейным двухполюсником: имеет два вывода и нелинейную ВАХ.
- ✗ Большинство полупроводниковых диодов выполняют на основе несимметричных р–n переходов. Низкоомная область диодов называется эмиттером, а высокоомная – базой.

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

- ✗ Полупроводниковые диоды классифицируются по роду исходного материала, конструкторско–технологическим особенностям, назначению и др.
- ✗ По типу исходного материала диоды бывают:
 - германиевые,
 - кремниевые,
 - селеновые,
 - карбид–кремниевые,
 - арсенид–галлиевые и др.

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

- ✗ По конструкторско–технологическим особенностям диоды бывают:
 - точечные,
 - сплавные,
 - микросплавные,
 - диффузионные,
 - эпитаксиальные,
 - с барьером Шоттки,
 - поликристаллические и др.

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

- ✗ По конструкторско–технологическим особенностям диоды бывают:
 - точечные,
 - сплавные,
 - микросплавные,
 - диффузионные,
 - эпитаксиальные,
 - с барьером Шоттки,
 - поликристаллические и др.

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

- ✗ По назначению диоды делятся на:
- ✗ 1. Выпрямительные (силовые), предназначенные для преобразования переменного напряжения источников питания промышленной частоты в постоянное.
- ✗ 2. Стабилитроны (опорные диоды), предназначенные для стабилизации напряжений, имеющие на обратной ветви ВАХ участок со слабой зависимостью напряжения от протекающего тока.
- ✗ 3. Варикапы, предназначенные для использования в качестве емкости, управляемой электрическим напряжением.

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

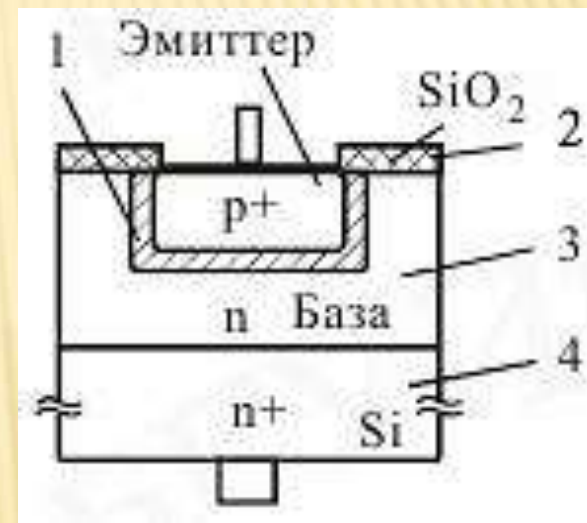
- ✗ 4. Импульсные диоды, предназначенные для работы в быстродействующих импульсных схемах.
- ✗ 5. Туннельные и обращенные диоды, предназначенные для усиления, генерирования и переключения высокочастотных колебаний.
- ✗ 6. Сверхвысокочастотные, предназначенные для преобразования, переключения, генерирования сверхвысокочастотных колебаний.
- ✗ 7. Светодиоды, предназначенные для преобразования электрического сигнала в световую энергию.
- ✗ 8. Фотодиоды, предназначенные для преобразования световой энергии в электрический сигнал.

4.2. ПРОИЗВОДСТВО

- ✗ Электронно-дырочный переход получается путём **легирования** примесями части монокристалла.
- ✗ Легирование осуществляется путём:
 - **диффузии** атомов примеси из внешней среды при высокой температуре,
 - **ионным внедрением** при бомбардировке кристалла пучком ионов примесей, ускоренных в электрическом поле,
 - **вплавлением** в полупроводник металла, содержащего нужные примеси,
 - методом **эпитаксии** – наращиванием на поверхность кристалла-подложки тонкой плёнки полупроводника с противоположным типом проводимости.
- ✗ Переходы металл-полупроводник формируются вакуумным напылением тонкой металлической плёнки на очищенную поверхность полупроводника.

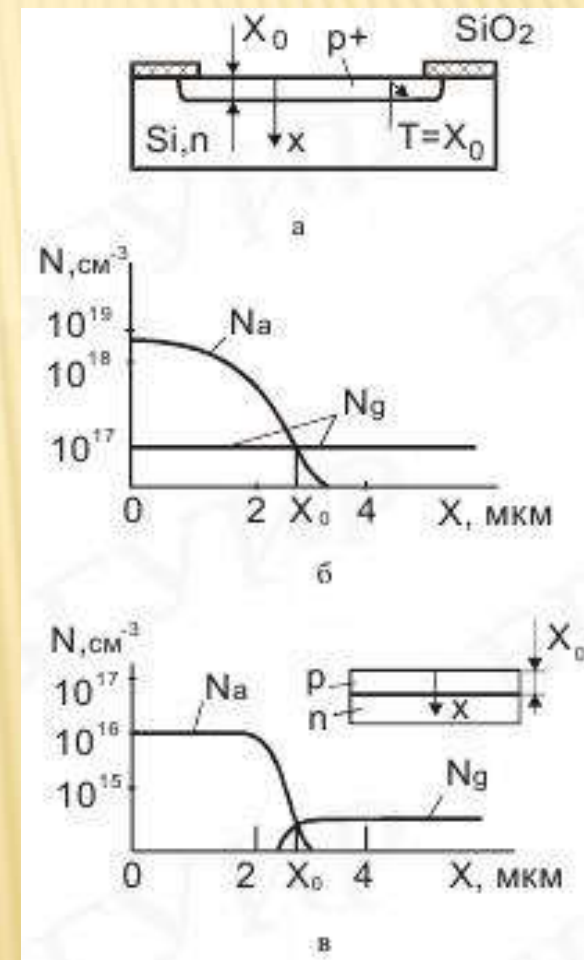
4.2. ПРОИЗВОДСТВО

- ✗ На рисунке показано устройство планарно-эпитаксиального диода. Базу изготавливают путём наращивания на подложке 4 из низкоомного кремния тонкого слоя 3 высокоомного полупроводника, повторяющего структуры подложки.
- ✗ Этот слой, называемый эпитаксиальным, покрывают плотной защитной плёнкой 2 двуокиси кремния SiO_2 толщиной до 1 мкм.
- ✗ В пленке протравливается окно, через которое путем диффузии бора или алюминия создается p-n-переход 1, вывод которого на поверхность защищен пленкой окисла.



4.2. ПРОИЗВОДСТВО

- ✗ На рисунке **а** приведена структура кремниевого р-п-перехода, полученного методом диффузии акцепторов в полупроводник n-типа через маску из плёнки двуокиси кремния. Распределение концентрации доноров N_D – на рис. **б** и акцепторов N_A по вертикали – рис. **в**.
- ✗ Поверхность, на которой $N_A = N_D$, называется металлургической границей X_0 .
- ✗ Эффективная концентрация примеси на ней равна нулю.

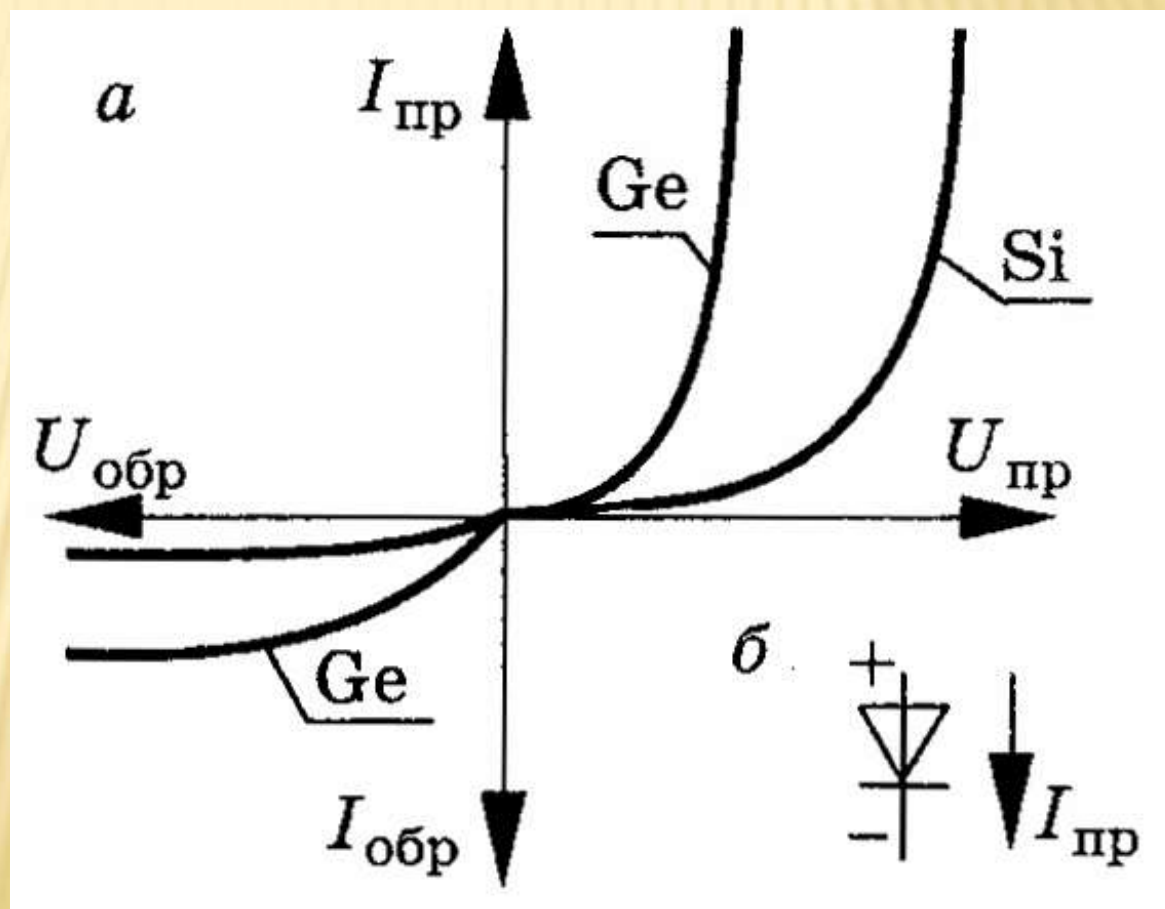


4.3. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ Выпрямительные диоды преобразуют переменный ток в пульсирующий.
- ✗ В связи с этим к емкости, быстродействию и стабильности параметров этих диодов не предъявляется жестких требований.
- ✗ Основой выпрямительного диода является несимметричный р-п переход с большой площадью поперечного сечения, которая необходима для получения большого прямого тока.
- ✗ Сопротивление базовой области у реальных диодов составляет единицы – десятки Ом.
- ✗ Работа выпрямительных диодов основана на вентильных свойствах перехода.

4.3. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ На рисунке представлены:
ВАХ Ge и Si диодов (а),
их УГО (б).



4.3. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ В высоковольтных источниках питания применяют выпрямительные столбы и блоки.
- ✗ **Выпрямительные столбы** представляют собой последовательное соединение выпрямительных диодов, находящихся в одном корпусе, чем достигается повышение допустимого обратного напряжения. Для повышения $I_{\text{ПР}}$ несколько диодов включают параллельно.
- ✗ **Выпрямительные блоки** – это конструктивно завершённые устройства соединённых определённым образом выпрямительных диодов.

4.3. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ По мощности, рассеиваемой р-п переходом, диоды бывают:
 - малой ($I_{\text{пр ср}} \leq 0,3 \text{ A}$),
 - средней ($0,3 < I_{\text{пр ср}} \leq 10 \text{ A}$),
 - большой ($I_{\text{пр ср}} > 10 \text{ A}$) мощности.

4.3. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ Сравнение характеристик германиевых и кремниевых диодов показывает:
- ✗ 1. Значение обратного тока германиевых диодов на два–три порядка больше, чем у кремниевых, при одинаковой площади перехода. Это объясняется различной шириной запрещенной зоны.
- ✗ 2. Допустимое обратное напряжение, за счет этого, у кремниевых диодов больше, чем у германиевых.
- ✗ 3. Падение напряжения на кремниевых диодах больше, чем на германиевых при одинаковых токах нагрузки, что обусловлено большим сопротивлением базовой области кремниевых диодов.

4.3. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ На характеристики диодов влияние оказывает температура окружающей среды.
- ✗ При увеличении температуры на 10°C $I_{\text{ОБР}}$ германиевых диодов удваивается, а у кремниевых возрастает в два с половиной раза.
- ✗ Абсолютная величина приращения $I_{\text{ОБР}}$ у германиевых диодов с ростом температуры в несколько раз больше, чем у кремниевых, что приводит к увеличению мощности, потребляемой диодом, и уменьшению напряжения теплового пробоя.
- ✗ У кремниевых диодов $I_{\text{ОБР}}$ мало и мала вероятность теплового пробоя, в связи с чем вначале развивается электрический пробой, который при больших обратных напряжениях может перерасти в тепловой.

4.3. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ - ПАРАМЕТРЫ

- ✗ 1. **Средний выпрямленный ток $I_{\text{пр ср}}$** – среднее за период значение выпрямленного тока, который может длительно протекать через диод при допустимом его нагреве (сотни мА – десятки А).
- ✗ 2. **Среднее прямое напряжение диода $U_{\text{пр ср}}$** – среднее значение прямого падения напряжения, определяемое при среднем выпрямленном токе, для германиевых $U_{\text{пр ср}} < 1 \text{ В}$, для кремниевых $U_{\text{пр ср}} < 1,5 \text{ В}$.
- ✗ 3. **Максимально допустимое обратное напряжение диода $U_{\text{обр max}}$** – максимально допустимое обратное напряжение, которое длительно выдерживает диод без нарушения нормальной работы, $U_{\text{обр max}}$ на 20 % меньше напряжения пробоя $U_{\text{проб}}$.
 $U_{\text{проб}} = 100 \dots 400 \text{ В}$ для Ge диодов;
 $U_{\text{проб}} = 1000 \dots 1500 \text{ В}$ для Si диодов.

4.3. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ - ПАРАМЕТРЫ

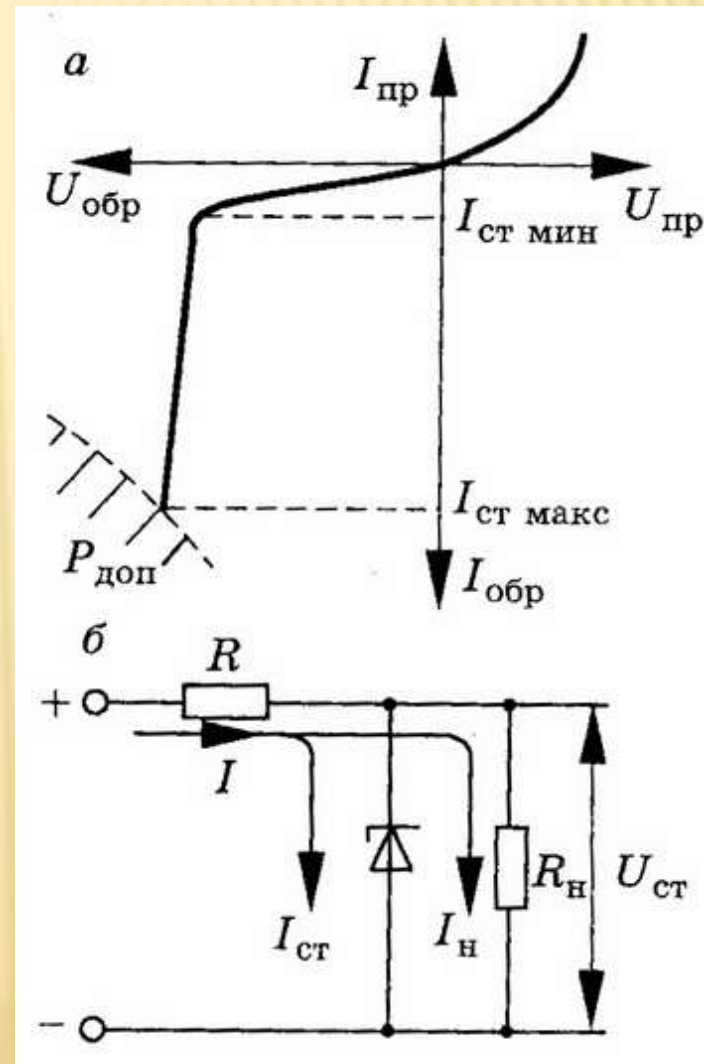
- ✗ 4. **Максимальный обратный ток** $I_{\text{ОБР } max}$ – максимальное значение обратного тока диода при $U_{\text{ОБР } max}$.
- ✗ 5. **Средняя рассеиваемая мощность диода** P_{CP} – средняя за период мощность, рассеиваемая диодом при протекании $I_{\text{ПР CP}}$ и $I_{\text{ОБР}}$ (сотни мВт – десятки Вт).
- ✗ 6. **Диапазон рабочих температур:**
для германиевых диодов $-60...+85$ °С;
для кремниевых диодов $-60...+125$ °С.

4.3. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ - ПАРАМЕТРЫ

- ✗ 7. Барьерная емкость диода при подаче на него номинального обратного напряжения составляет десятки пФ.
- ✗ 8. Диапазон рабочих частот.
- ✗ 9. Дифференциальное сопротивление диода $R_{\text{диф}}$ – сопротивление диода протекающему переменному току, которое вычисляется как отношение приращения напряжения на диоде к вызвавшему его малому приращению тока (единицы – сотни Ом).

4.3. СТАБИЛИТРОНЫ

- ✗ Стабилитроны предназначены для стабилизации напряжения в электрических цепях.
- ✗ Принцип работы стабилитрона основан на явлении электрического пробоя р-п перехода при подаче на диод обратного напряжения.
- ✗ В связи с этим на вольт-амперной характеристике имеется участок со слабой зависимостью напряжения от протекающего тока. На рисунке приведена ВАХ стабилитрона (а), УГО и схема включения (б).
- ✗ Стабилитрон всегда включается параллельно нагрузке.



4.3. СТАБИЛИТРОНЫ

- ✗ В качестве исходного материала для изготовления стабилитронов используется кремний, имеющий большую ширину запрещенной зоны и соответственно малый обратный ток, в связи с чем вероятность возникновения теплового пробоя очень мала.
- ✗ Величина пробоя р–n перехода зависит от удельного сопротивления базы диода. Низковольтные стабилитроны изготавливаются из сильнолегированного материала, и у них более вероятен туннельный пробой. Высоковольтные стабилитроны изготавливаются из слаболегированного материала, и у них вероятен лавинный вид пробоя.
- ✗ По величине допустимой мощности рассеивания P_{max} стабилитроны подразделяются на стабилитроны малой ($P_{max} < 0,3 \text{ Вт}$), средней ($0,3 \text{ Вт} < P_{max} < 5 \text{ Вт}$) и большой ($P_{max} > 5 \text{ Вт}$) мощности.

4.3. СТАБИЛИТРОНЫ

- ✗ Выпускаются следующие разновидности стабилитронов:
 - общего назначения,
 - прецизионные,
 - импульсные,
 - двухдиодные,
 - стабисторы.
- ✗ **Стабилитроны общего назначения** используются в схемах стабилизаторов источников питания, ограничителей, фиксаторов уровня напряжения. Прецизионные стабилитроны используются в качестве источников опорного напряжения с высокой степенью стабилизации и термокомпенсации.

4.3. СТАБИЛИТРОНЫ

- ✗ **Импульсные стабилитроны** используются для стабилизации постоянного и импульсного напряжения, а также ограничения амплитуды импульсов напряжения малой длительности.
- ✗ **Двухдиодные стабилитроны** работают в схемах стабилизации, ограничителях напряжения различной полярности, в качестве источников опорного напряжения.
- ✗ **Стабисторы** используются для стабилизации малых значений напряжения, причем рабочим является прямое смещение диода.

4.3. СТАБИЛИТРОНЫ - ПАРАМЕТРЫ

- ✗ 1. **Номинальное напряжение стабилизации $U_{\text{СТ ном}}$** – падение напряжения на стабилитроне в области стабилизации при номинальном значении тока $I_{\text{СТ ном}}$ (единицы – десятки В).
- ✗ 2. **Минимальный ток стабилизации $I_{\text{СТ min}}$** – минимальное значение тока, протекающего через стабилитрон при устойчивом пробое перехода (доли мА – десятки мА).
- ✗ 3. **Максимальный ток стабилизации $I_{\text{СТ max}}$** – максимально допустимый ток стабилизации, ограничиваемый допустимой мощностью рассеивания (единицы мА – единицы А).

4.3. СТАБИЛИТРОНЫ - ПАРАМЕТРЫ

- ✗ 4. **Номинальный ток стабилизации**

$$I_{СТ\ НОМ} = \frac{I_{СТ\ max} - I_{СТ\ min}}{2}$$

- ✗ 5. **Дифференциальное сопротивление** – отношение приращения напряжения стабилизации к вызвавшему его приращению тока (единицы – десятки Ом). $R_{ДИФ} = \frac{dU_{СТ}}{dI_{СТ}}$

Чем меньше $R_{ДИФ}$ – тем лучше стабилизация напряжения.

- ✗ 6. **Статическое сопротивление** стабилитрона в данной рабочей точке, характеризует омические потери в заданной рабочей точке $R_{СТ} = \frac{U_{СТ}}{I_{СТ}}$

4.3. СТАБИЛИТРОНЫ - ПАРАМЕТРЫ

✗ 7. Коэффициент качества стабилизатора

$Q = \frac{R_{\text{ДИФ}}}{R_{\text{СТ}}}$ – определяет не только наклон ВАХ, но и отношение изменения напряжения стабилизации к напряжению стабилизации ($Q = 0,01 \dots 0,05$ и ниже).

✗ 8. Температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКН) $\alpha_{\text{СТ}}$ – отношение относительного изменения напряжения стабилизации $\Delta U_{\text{СТ}}/U_{\text{СТ}}$ при изменении температуры окружающей среды ΔT и постоянном токе стабилизации к изменению температуры, вызвавшему это изменение

$$\alpha_{\text{СТ}} = \frac{\Delta U_{\text{СТ}}}{U_{\text{СТ}}} \frac{1}{\Delta T} 100\%$$

4.3. СТАБИЛИТРОНЫ - ПАРАМЕТРЫ

- ✗ У низковольтных стабилитронов с ростом температуры вероятность туннельного переноса возрастает, а напряжение пробоя падает. Поэтому низковольтные стабилитроны имеют отрицательный ТКН. У слаболегированных р-п переходов с ростом температуры скорость носителей заряда уменьшается, поскольку уменьшается их подвижность. Поэтому, чтобы носителю сообщить необходимую скорость для ударной ионизации, необходимо увеличить напряженность электрического поля в обедненном слое.
- ✗ Таким образом, у высоковольтных стабилитронов $U_{\text{проб}}$ увеличивается с возрастанием температуры, и они имеют положительный ТКН.
- ✗ Для уменьшения ТКН последовательно со стабилитроном включают полупроводниковые диоды в прямом направлении или терморезисторы с ТКС противоположного знака.

4.3. СТАБИЛИТРОНЫ

- ✗ Для уменьшения температурного коэффициента напряжения стабилизации используют прецизионные стабилитроны, у которых имеются три последовательно соединенных р–п перехода. Один из них – стабилизирующий и включен в обратном направлении, а два других – термокомпенсирующие и включены в прямом направлении.
- ✗ Для стабилизации или ограничения коротких импульсов напряжения используют импульсные стабилитроны. Они должны обладать большим быстродействием, которое определяется временем перезарядки барьерной емкости.

4.3. СТАБИЛИТРОНЫ

- ✗ Двуханодные стабилизаторы применяются в схемах стабилизации и двухстороннего ограничения напряжения, устройствах защиты элементов электрических цепей от перенапряжений обеих полярностей. Они имеют два р-п перехода, включенных встречно, а их внешние выводы сделаны от р-областей.
- ✗ Стабисторами называют диоды, у которых для стабилизации напряжения используется прямая ветвь ВАХ. Особенностью стабисторов является малое напряжение стабилизации $U_{СТ} \approx (0,35 \dots 1,9) \text{ В}$, которое определяется прямым падением напряжения на диоде. Для увеличения напряжения стабилизации используют последовательное соединение нескольких стабисторов, смонтированных в одном корпусе или в одном кристалле.

4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ Импульсный полупроводниковый диод – это диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для работы в импульсных режимах работы.
- ✗ Основное назначение импульсных диодов – работа в качестве коммутирующих элементов электронных схем, детектирования высокочастотных сигналов и др.
- ✗ УГО импульсного диода идентично обозначению выпрямительного диода

4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ

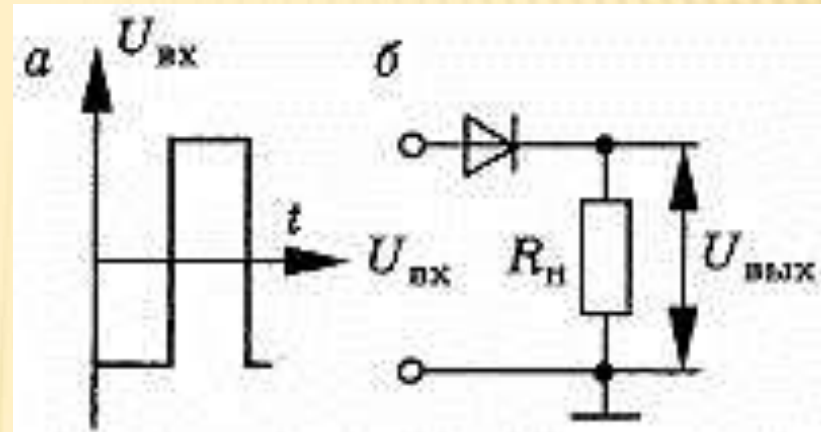
- ✗ Переходные процессы в диодах связаны в основном с двумя явлениями, происходящими при быстром изменении напряжения на диоде или тока через диод.
- ✗ Первое из них – это накопление неосновных носителей заряда в базе при его прямом включении и их рассасывание при уменьшении напряжения.
- ✗ Второе явление – это перезарядка барьерной ёмкости, что также влияет на свойства диода.

4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ При больших плотностях прямого тока переходные процессы определяются в основном накоплением неосновных носителей в базе, а перезарядка барьерной ёмкости является второстепенным процессом.
- ✗ При малых плотностях тока существенное влияние на переходные процессы оказывает перезарядка барьерной ёмкости. Напряжение и ток, характеризующие переходные процессы в диоде, зависят также от сопротивления внешней цепи, в которую включён диод.

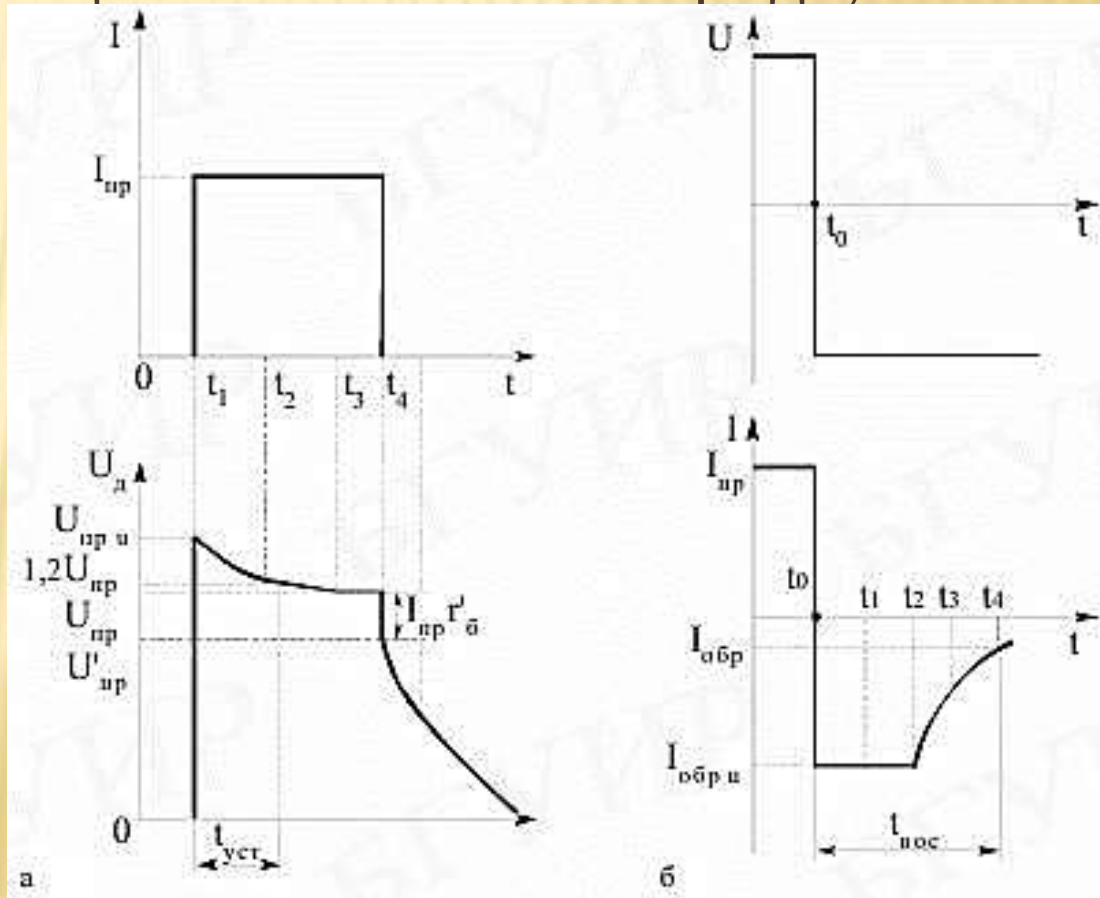
4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ На рисунке приведена простейшая схема диодного ключа, работающего на активную нагрузку.
- ✗ Сопротивление нагрузки обычно значительно больше прямого сопротивления диода и принято считать, что схема питается от генератора тока. При таком генераторе ток не зависит от сопротивления внешней по отношению к нему цепи, т.е. от сопротивления диода и нагрузки.



4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ В момент включения импульса прямого тока сопротивление базы диода определяется равновесной концентрацией носителей заряда, и на диоде происходит максимальное падение напряжения $U_{\text{пр max}}$.



4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ По мере увеличения инжектированных носителей в базе, сопротивление базы уменьшается, что приводит к уменьшению падения напряжения на диоде до установившегося значения $U_{\text{пр}}$.
- ✗ Промежуток времени с момента подачи входного импульса до момента, когда напряжение на диоде уменьшится до $1,2U_{\text{пр}}$, называется **временем установления** прямого сопротивления диода $t_{\text{уст}}$.
- ✗ При выключении прямого тока падение напряжения на сопротивлении базы становится равным нулю, и напряжение на диоде скачком уменьшается до значения $U_{\text{пр}}$.
- ✗ Инжектированные носители рекомбинируют и напряжение на диоде уменьшается.

4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ При переключении диода с прямого напряжения на обратное в начальный момент через диод идёт большой обратный ток, создаваемый неосновными носителями в базе, накопленными вблизи р-п-перехода при прямом напряжении.
- ✗ Этот ток ограничивается в основном объёмным сопротивлением базы и нагрузки, поэтому некоторое время обратный ток остаётся постоянным (при идеальном генераторе напряжения). С течением времени накопленные в базе неосновные носители заряда рекомбинируют или уходят из базы через р-п-переход, после чего обратный ток уменьшается до своего стационарного значения.

4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ Интервал времени от момента прохождения тока через нуль после переключения диода с прямого тока в состояние заданного обратного напряжения до момента достижения обратным током заданного значения называется **временем восстановления** обратного сопротивления $t_{\text{вос}}$.
- ✗ Время установления прямого напряжения и время восстановления обратного сопротивления определяют быстродействие диода, поэтому их стремятся уменьшать.

4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ Производство импульсных диодов основано на современных производительных и контролируемых методах формирования р-n-перехода с использованием планарной технологии, эпитаксиального наращивания, а также ионнолучевой технологии.
- ✗ Основными исходными материалами служат кремний и арсенид галлия.
- ✗ Для ускорения переходных процессов и увеличения быстродействия в исходный полупроводник вводят примесь, например золото, уменьшающую время жизни неосновных носителей.

4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ - ПАРАМЕТРЫ

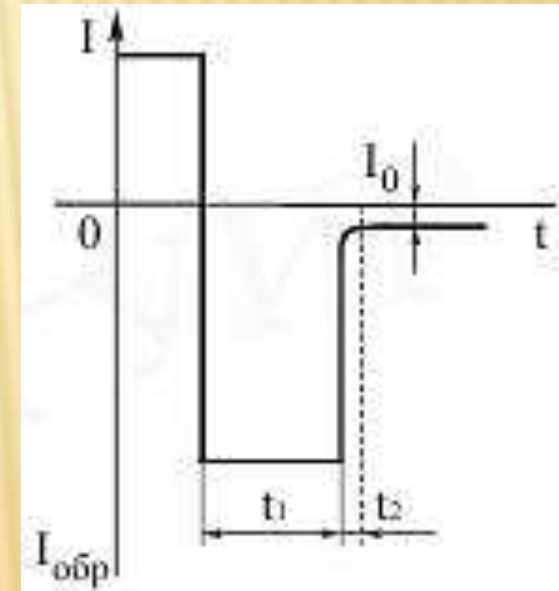
- ✗ 1. **Максимальное импульсное прямое падение напряжения** $U_{\text{ПР max}}$ – максимальное падение напряжения на диоде в прямом направлении при заданном прямом токе.
- ✗ 2. **Время установления прямого сопротивления** $t_{\text{уст}}$ – время от момента включения прямого тока диода до момента достижения заданного уровня прямого напряжения на диоде.
- ✗ 3. **Время восстановления обратного сопротивления** $t_{\text{вос}}$ – время с момента переключения диода с прямого на обратное импульсное напряжение до достижения обратным током заданного значения.
- ✗ 4. **Емкость диода** C_d – емкость между выводами диода при заданном обратном напряжении.

4.4. ИМПУЛЬСНЫЕ ДИОДЫ - ПАРАМЕТРЫ

- ✗ 5. *Постоянный обратный ток* $I_{\text{ОБР}}$ – ток диода при заданном обратном напряжении.
- ✗ 6. *Постоянное прямое напряжение* $U_{\text{ПР}}$ – падение напряжения на диоде при заданном прямом токе.
- ✗ 7. *Заряд переключения* Q – избыточный заряд, вытекающий во внешнюю цепь при изменении направления тока с прямого на обратный.

4.4. ДИОДЫ С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА

- ✗ Разновидностью импульсных диодов являются диоды с накоплением заряда (ДНЗ) или диоды с резким восстановлением обратного тока (сопротивления).
- ✗ Импульс обратного тока имеет почти прямоугольную форму.
- ✗ При этом значение t_1 может быть значительным, но t_2 должно быть чрезвычайно малым.



4.4. ДИОДЫ С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА

- ✗ Получение малой длительности t_2 связано с созданием внутреннего электрического поля в базе около обеднённого слоя р-п-перехода путём неравномерного распределения примесей.
- ✗ Это поле является тормозящим для неосновных носителей, пришедших при прямом напряжении, и поэтому препятствует уходу инжектированных носителей от границы обеднённого слоя, заставляя их накапливаться, концентрироваться вблизи границы.
- ✗ При подаче обратного напряжения на диод внутреннее поле будет способствовать дрейфу неосновных носителей и обеднению слоя р-п-перехода.

4.4. ДИОДЫ ШОТТКИ

- ✗ В качестве переключающих диодов используются диоды с барьером Шоттки (ДБШ), выполненные на основе контакта металл-полупроводник (МДП). В этих диодах процессы прямой проводимости определяются только основными носителями заряда. В них отсутствует диффузионная ёмкость, связанная с накоплением и рассасыванием носителей заряда в базе, чем определяются хорошие высокочастотные свойства.
- ✗ Вольт–амперная характеристика диодов Шоттки такая же, как и у обычных диодов, а обратные токи составляют сотни пА – десятки нА

4.4. ДИОДЫ ШОТТКИ

- ✗ Диоды Шоттки обладают следующими преимуществами:
- ✗ 1. Для получения того же тока требуется более низкое прямое напряжение.
- ✗ 2. Электропроводность создается только основными носителями (электронами). Отсутствует накопление неосновных носителей, и время восстановления диода при переключении напряжения с прямого на обратное очень мало.

- ✗ Недостатки:
- ✗ 1. Ток утечки немного больше, чем у обычных диодов, использующих р-п переход.
- ✗ 2. Максимальное обратное напряжение ниже, чем у обычных кремниевых диодов.

4.4. P-I-N-ДИОДЫ

- ✗ Широкое применение в качестве переключающих получили диоды с *p-i-n-структурой*, в которой сильнолегированные области p- и n-типа разделены достаточно широкой областью с проводимостью, близкой к собственной (i-область).
- ✗ i-область с низкой концентрацией примеси можно рассматривать как конденсатор, обкладками которого служат узкие (из-за большой концентрации носителей в p- и n-областях) слои зарядов доноров и акцепторов.

4.4. P-I-N-ДИОДЫ

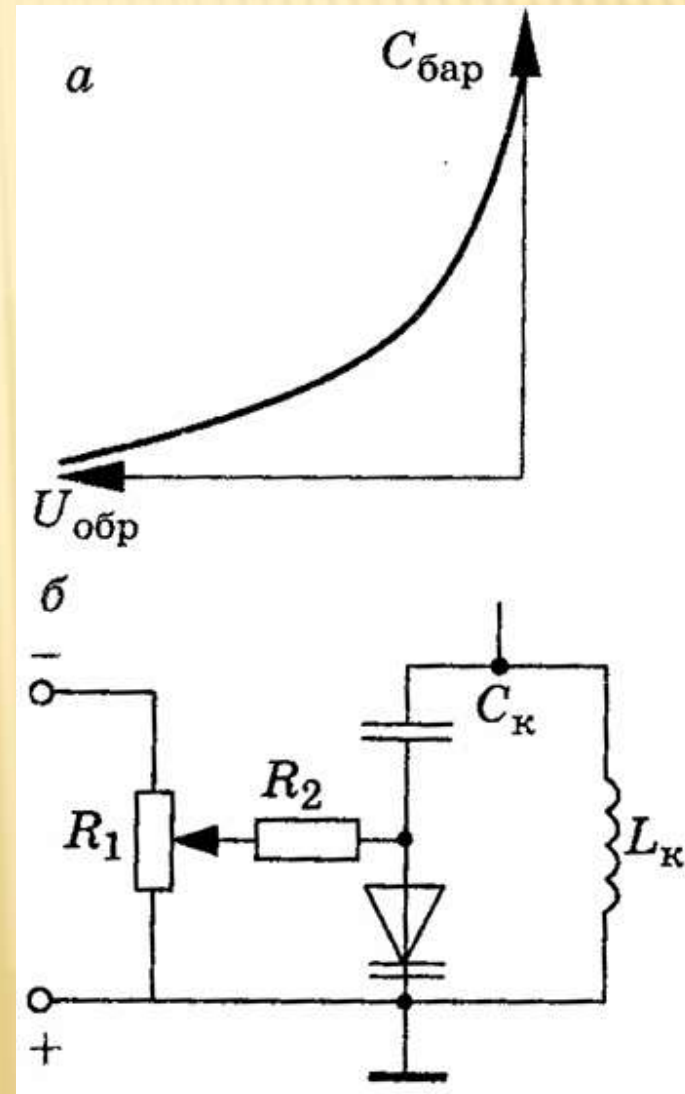
- ✗ Барьерная ёмкость р-і-п-диода определяется размерами і-слоя и практически не зависит от приложенного постоянного напряжения.
- ✗ При прямом напряжении вследствие инжекции дырок и электронов прямое сопротивление мало, а при обратном – резко возрастает по сравнению с равновесным состоянием.
- ✗ Поэтому для р-і-п-диодов характерно очень большое отношение прямого и обратного сопротивлений, что важно при использовании их в переключающих режимах.

4.5. ВАПРИКАПЫ

- ✗ Варикапами называются полупроводниковые диоды, в которых используется зависимость барьерной ёмкости р-п-перехода от обратного напряжения. Электрический переход варикапов имеет структуру типа p^+-n-n^+ , $p-i-n$, МДП и др.
- ✗ Варикапы применяют в устройствах управления частотой колебательного контура, в параметрических схемах усиления, деления и умножения частоты, в схемах частотной модуляции, управляемых фазовращателях и др.
- ✗ Предпочтение отдаётся варикапам на основе барьерной ёмкости р-п-перехода.

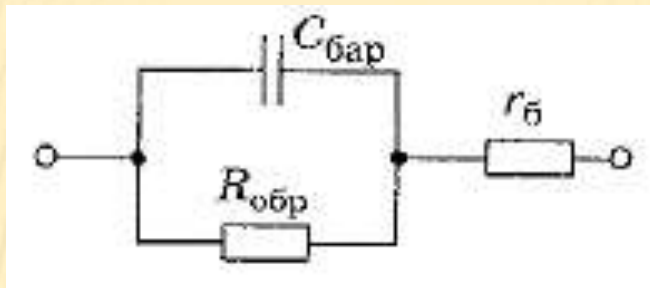
4.5. ВАПРИКАПЫ

- ✗ На рисунке представлена вольт–фарадная характеристика и одна из схем включения.
- ✗ При изменении напряжение смещения, подаваемого на варикап с помощью резистора R_1 , изменяется емкость диода.
- ✗ Изменение емкости варикапа приводит к изменению частоты колебательного контура при изменении емкости диода включается резистор R_2 .



4.5. ВАПРИКАПЫ

- ✗ На рисунке показана эквивалентная схема варикапа,



где $r_б$ – объемное сопротивление базы;

$R_{обр}$ – учитывает дифференциальное сопротивление и сопротивление утечки перехода;

$C_{бар}$ – эквивалент барьерной емкости диода.

- ✗ На частотах до нескольких десятков МГц индуктивность выводов и емкость корпуса диода не учитываются из-за их малых значений.

4.5. ВАПРИКАПЫ

- ✗ Анализ эквивалентной схемы варикапа в частотном диапазоне показывает на изменение сопротивления потерь, которые определяют добротность варикапа Q_V

- ✗ $Q_V = \frac{X_C}{R_{\text{ПОТ}}}$

где X_C – реактивная составляющая сопротивления варикапа;

$R_{\text{ПОТ}}$ – сопротивление потерь.

- ✗ На высоких частотах $X_C = \frac{1}{\omega C_{\text{бар}}} \ll R_{\text{обр}},$

поэтому шунтирующим действием обратного сопротивления р–п перехода можно пренебречь.

4.5. ВАПРИКАПЫ - ПАРАМЕТРЫ

- ✗ 1. **Максимальная емкость** $C_{B\ max}$ – емкость варикапа при заданном минимальном U_{OBR} и ограничена значением емкости C_0 .
- ✗ 2. **Минимальная емкость** $C_{B\ min}$ – емкость варикапа при заданном максимальном U_{OBR} и ограничивается обратным допустимым напряжением р-п перехода $U_{OBR\ доп.}$
- ✗ 3. **Коэффициент перекрытия по емкости**
$$K = \frac{C_{B\ max}}{C_{B\ min}}$$

K = единицы – десятки.
- ✗ 4. **Сопротивление потерь** $R_{ПOT}$ – суммарное активное сопротивление, включая сопротивление кристалла, контактных соединений и выводов.

4.5. ВАПРИКАПЫ - ПАРАМЕТРЫ

- ✗ 5. **Температурный коэффициент емкости** ТКЕ – представляет собой отношение относительного изменения емкости к вызвавшему его абсолютному изменению температуры окружающей среды.

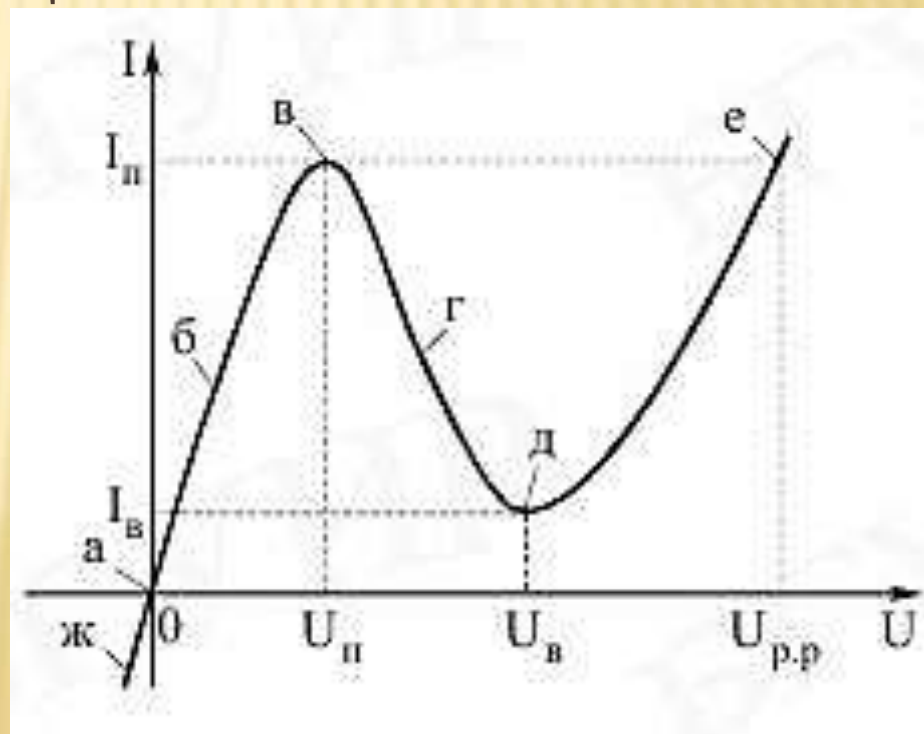
$$ТКЕ = \frac{\Delta C}{C} \frac{1}{\Delta T}$$

- ✗ 6. **Номинальная емкость** $C_{В\text{ ном}}$ – представляет собой барьерную емкость перехода при заданном номинальном $U_{ОБР}$.

- ✗ 7. **Добротность** варикапа Q_B – отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала к сопротивлению потерь при заданном значении емкости или обратного напряжения
- $$Q_B = \frac{X_C}{R_{ПOT}} .$$

4.6. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ Туннельные диоды – это полупроводниковые приборы на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на прямой ветви вольт–амперной характеристики области с отрицательным дифференциальным сопротивлением (характеристика N-образного типа).
- ✗ Туннельные диоды используются для усиления, генерирования и переключения сигналов.

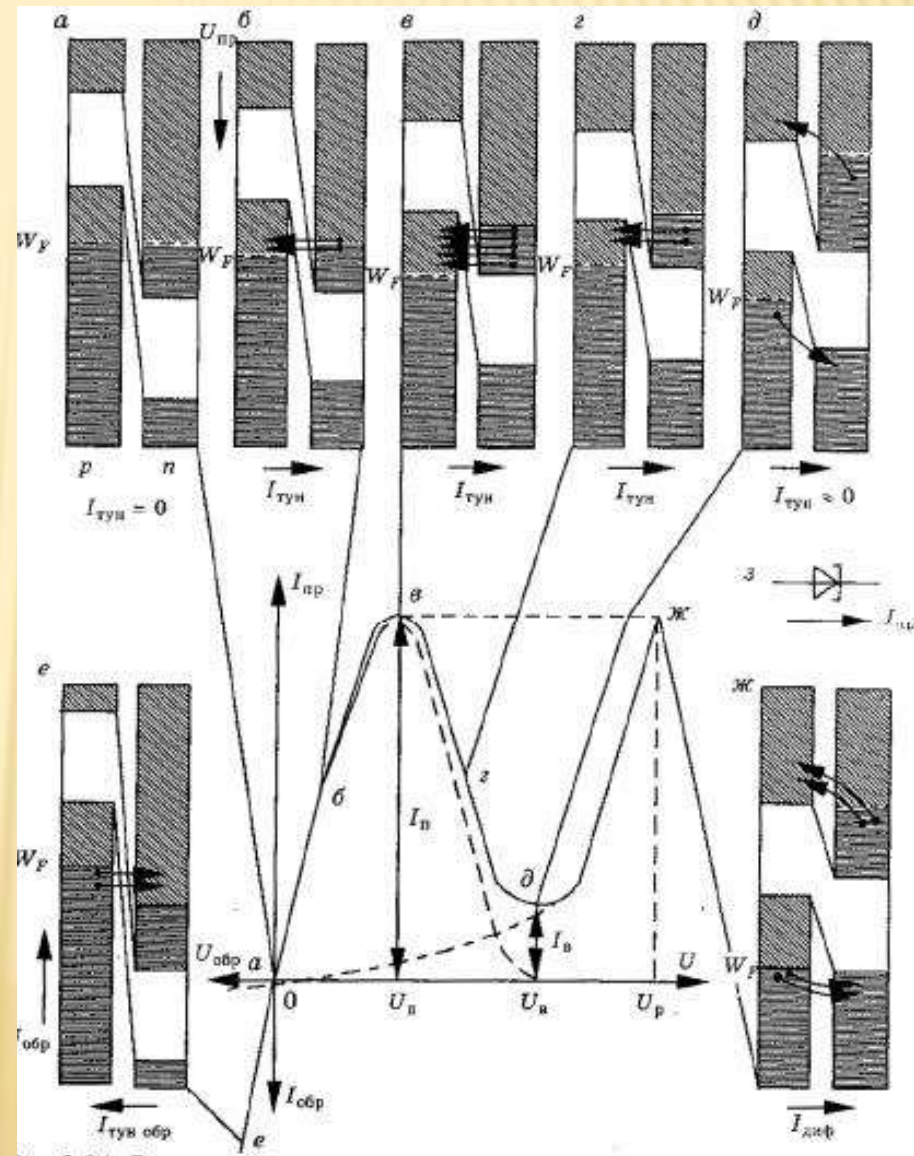


4.6. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ и эта многофункциональность прибора объясняется наличием на ВАХ участка с отрицательным сопротивлением.
- ✗ Для изготовления туннельных диодов используется полупроводниковый материал с очень большой концентрацией примесей (10^{18} - 10^{20} см⁻³) и следствием этого является:
 - ✗ 1. Малая толщина перехода (около 0,01 мкм), что на два порядка меньше, чем у обычных диодов.
 - ✗ 2. Расщепление примесных энергетических уровней с образованием примесных энергетических зон, которые примыкают к зоне проводимости в n-области и к валентной зоне в p-области.
 - ✗ 3. Уровень Ферми располагается у электронного полупроводника в зоне проводимости, а у дырочного – в валентной зоне.

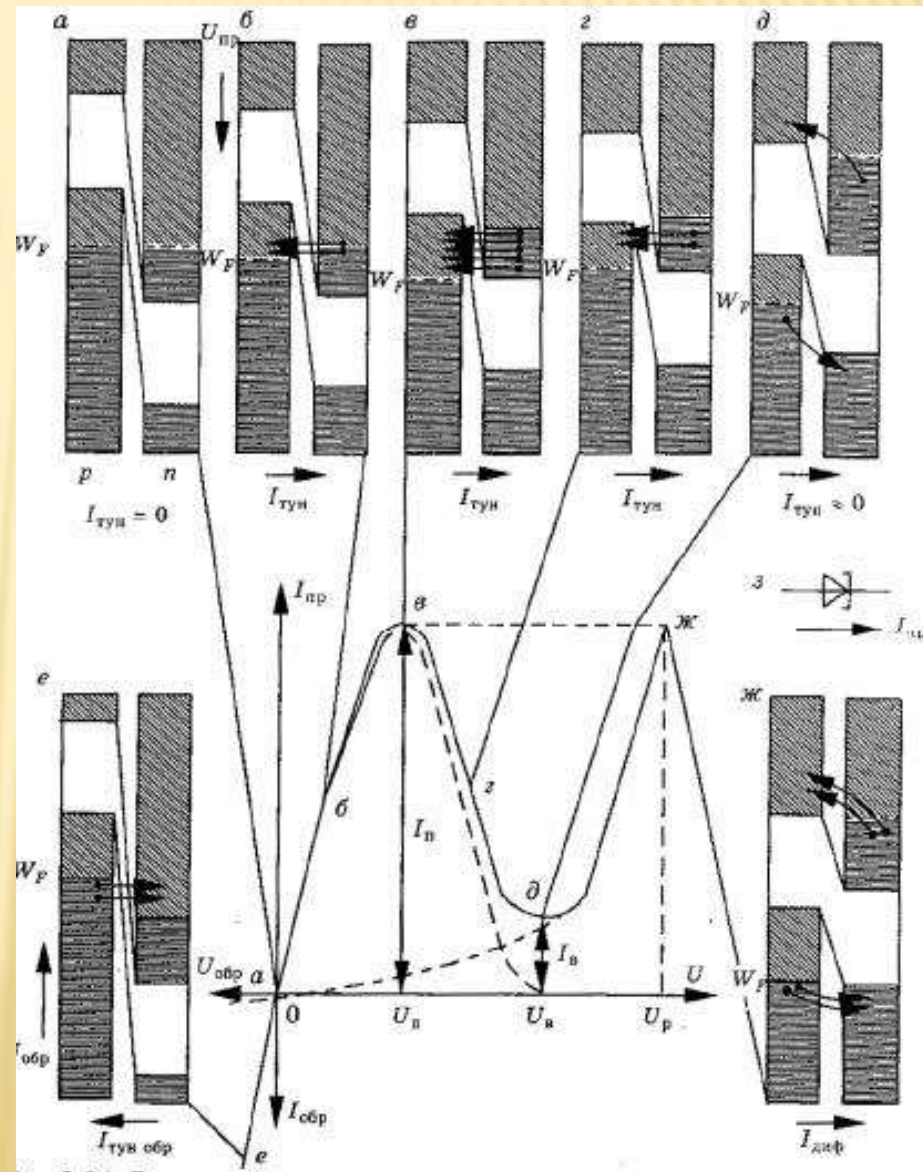
4.6. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ Для простоты рассуждений обычно считают, что все разрешенные уровни, расположенные ниже уровня Ферми, заняты электронами, а расположенные выше него – свободны. На рисунке представлены вольт-амперная характеристика, энергетические диаграммы и условное обозначение туннельного диода.



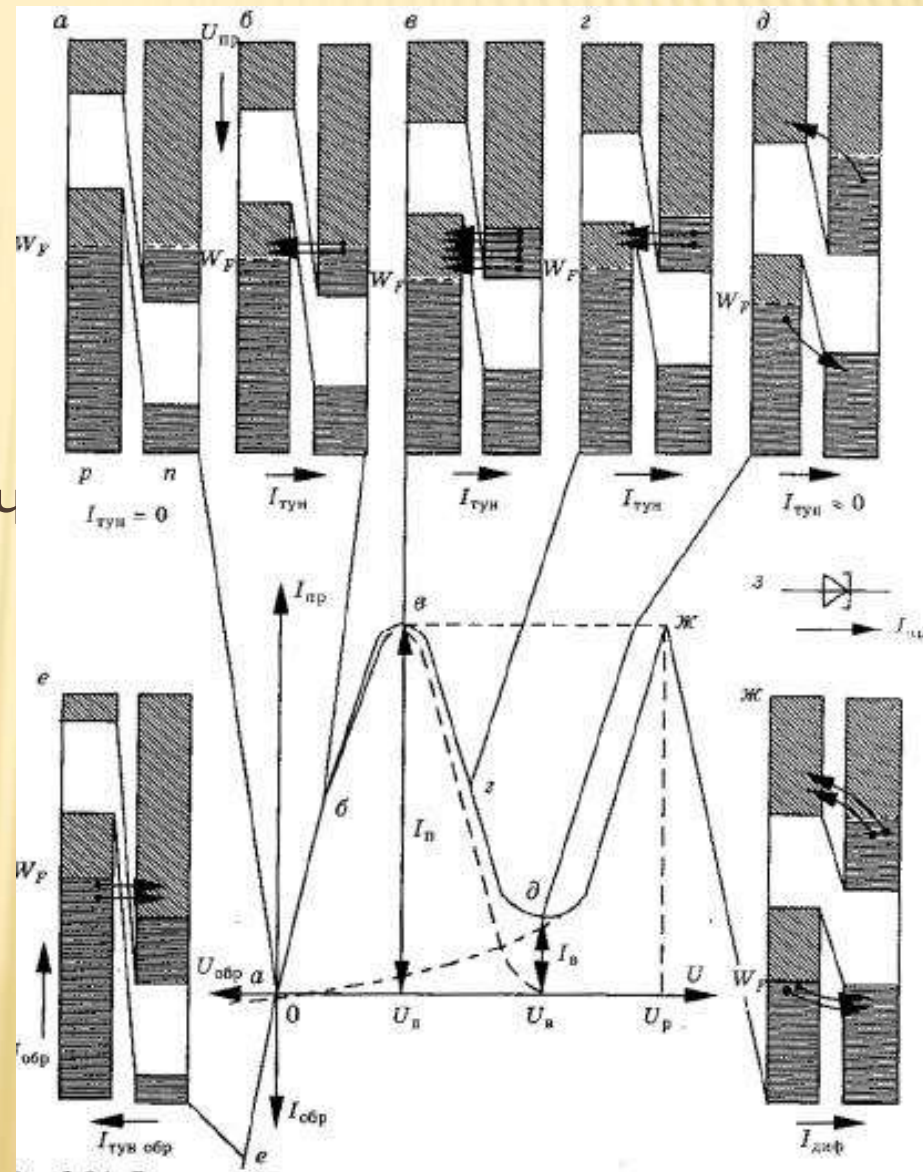
4.6. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ В тонких р-н переходах вследствие большей напряженности электрического поля увеличивается вероятность туннельного прохождения электронов сквозь тонкий потенциальный барьер. В диоде при отсутствии внешнего напряжения происходит туннелирование электронов из n-области в p-область и обратно. Встречные потоки электронов равны, поэтому суммарный ток через диод равен нулю (рис. а).



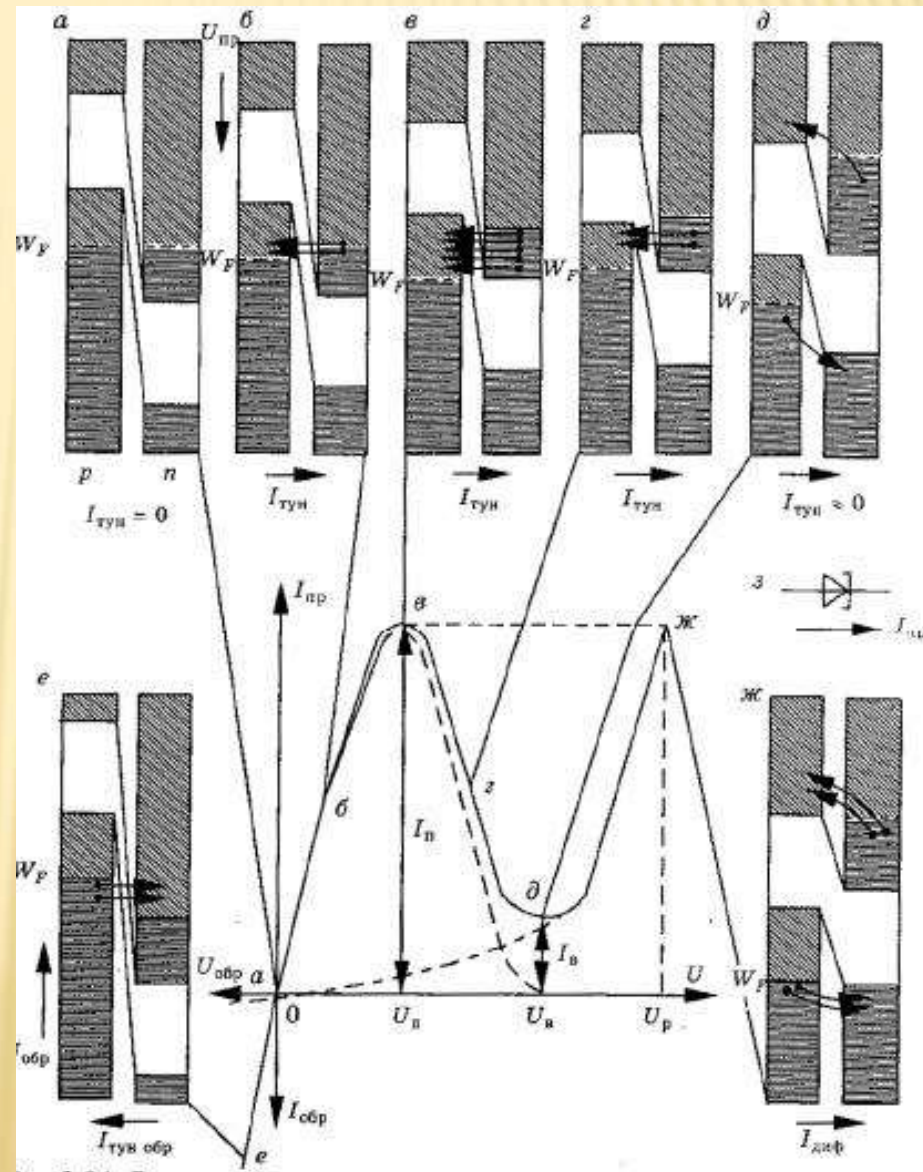
4.6. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ При небольшом прямом напряжении происходит смещение энергетических зон, так что часть энергетических уровней, занятых электронами проводимости n -области, находится напротив свободных уровней p -области. Это приводит к туннельному переносу электронов из n -области в p -область и протеканию прямого туннельного тока (рис. б).



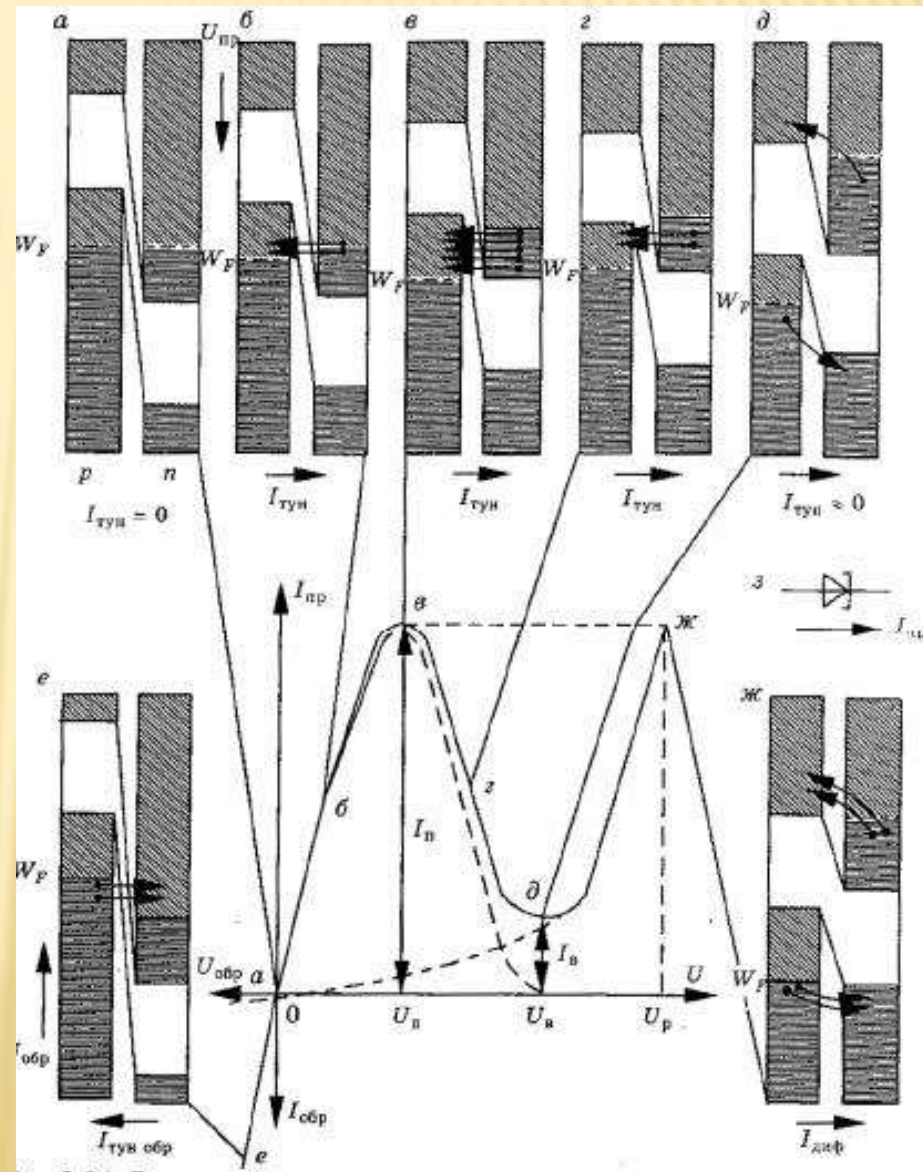
4.6. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ С увеличением прямого напряжения туннельный ток достигает максимального значения, когда все заполненные энергетические уровни n -области располагаются напротив свободных уровней p -области (рис. **B**).



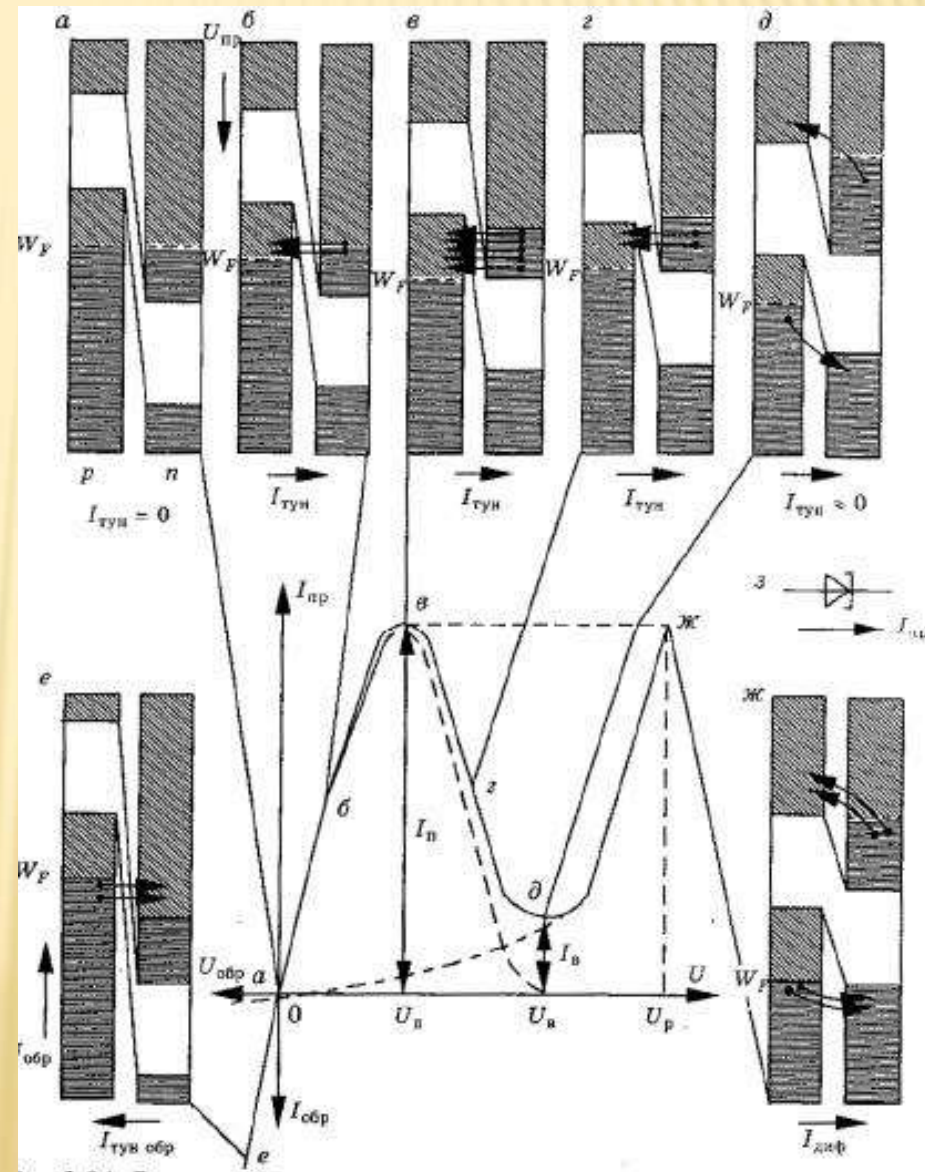
4.6. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ Дальнейшее увеличение прямого напряжения приводит к тому, что часть заполненных энергетических уровней n -области начинает располагаться против запрещенной зоны p -области, и туннельный ток убывает (рис. г)



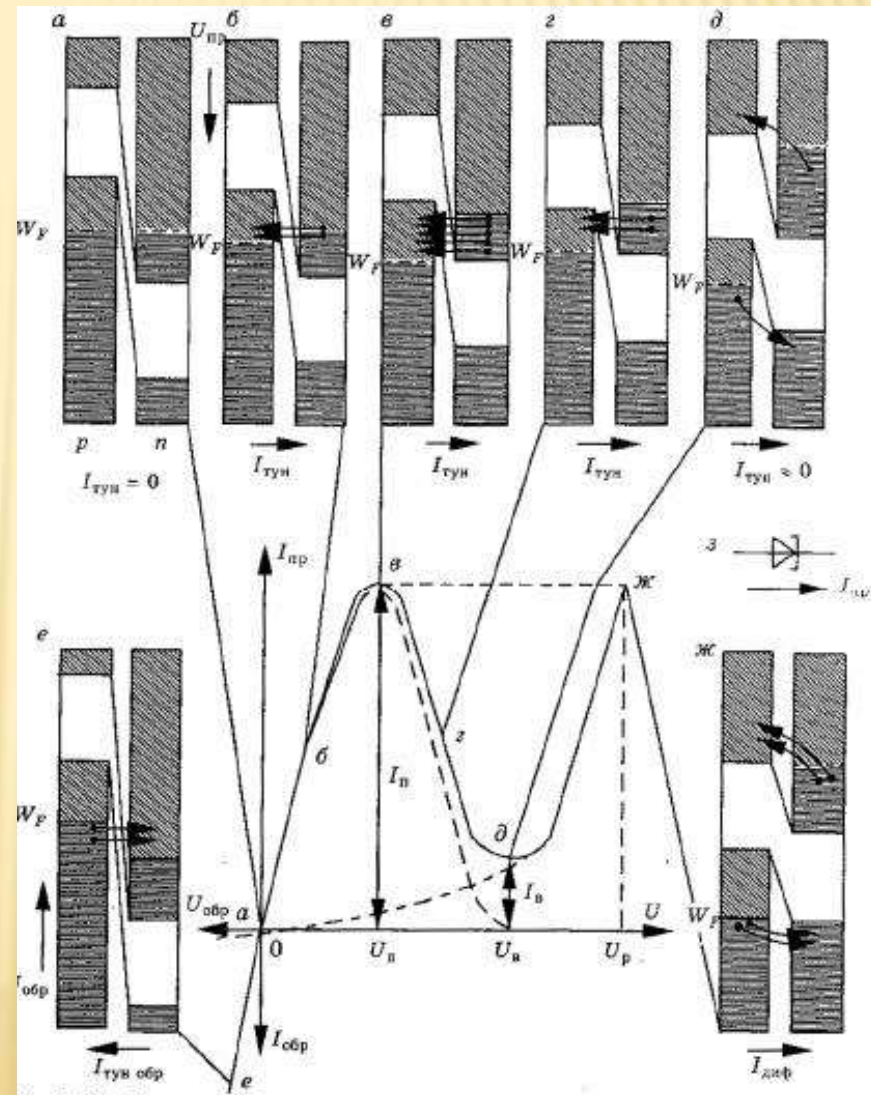
4.6. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ Когда зона проводимости n -области и валентная зона p -области перестанут перекрываться, туннельный ток прекращается (рис. д).



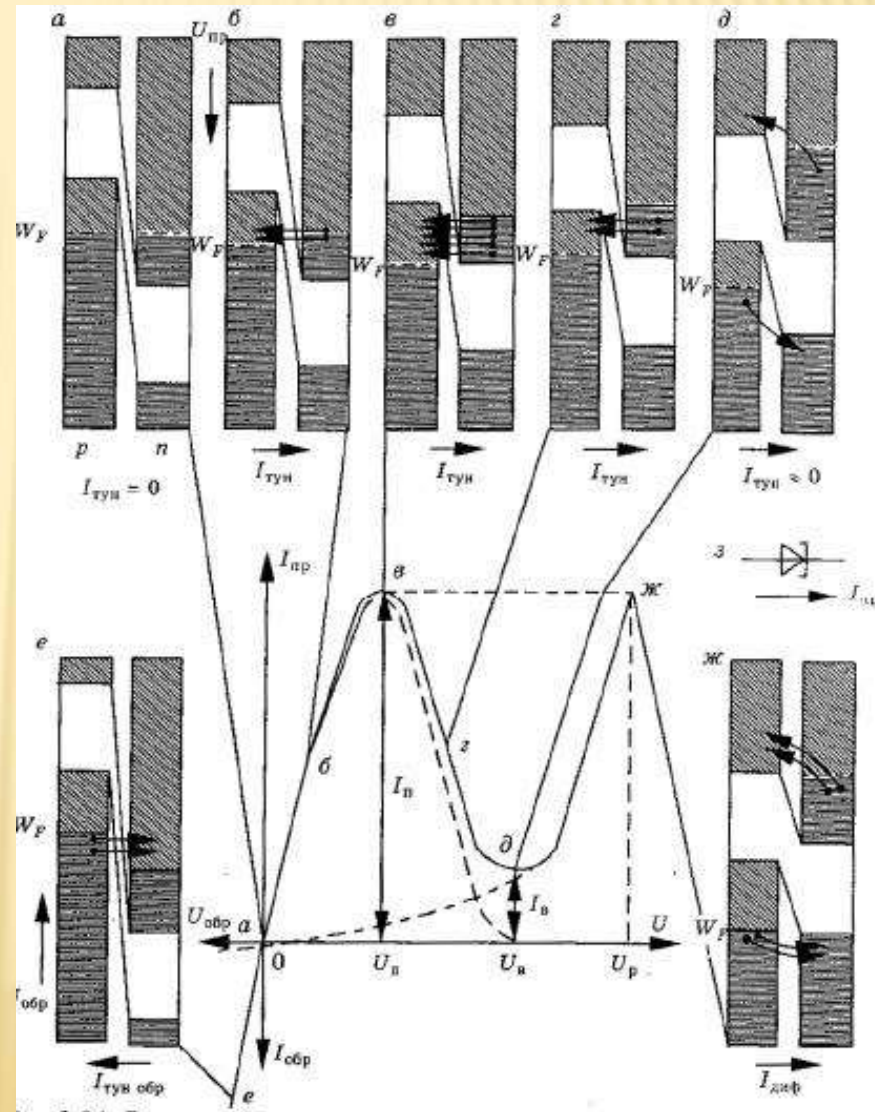
4.6. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ Наряду с туннельным переходом электронов в переходе туннельного диода течет и обычный диффузионный ток.
- ✗ Таким образом ток туннельного диода имеет две составляющие: туннельную и диффузионную. При напряжениях на диоде, когда туннельная составляющая тока не протекает, туннельный диод представляет собой обычный диод, прямой ток которого определяется током диффузии (рис. ж).



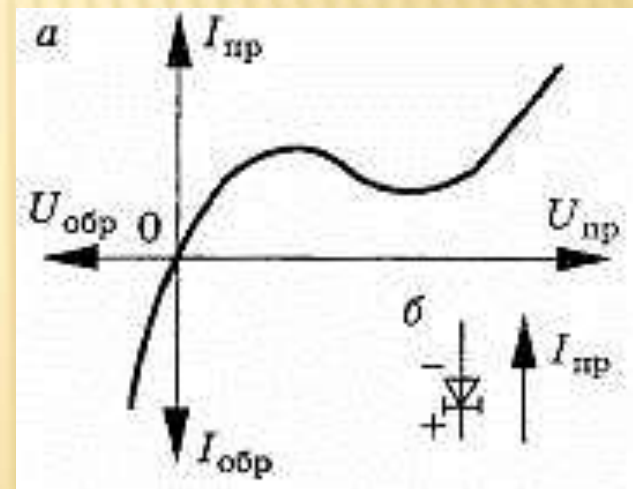
4.6. ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

- ✗ При обратном напряжении энергетические уровни р-области смещаются вверх, и верхние уровни валентной зоны оказываются напротив разрешенных незаполненных уровней зоны проводимости п-области (рис. е). При этом электроны из валентной зоны р-области туннелируют в зону проводимости п-области.
- ✗ Обратный ток диода растет с увеличением обратного напряжения по абсолютному значению.



4.6. ОБРАЩЕННЫЕ ДИОДЫ

- ✗ Обратные диоды выполняются на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором проводимость при обратном смещении значительно больше, чем при прямом напряжении.
- ✗ На рисунке изображены:
 - а)** ВАХ обратного диода;
 - б)** УГО.



4.6. ОБРАЩЕННЫЕ ДИОДЫ

- ✗ При концентрации примесей порядка 10^{18} см^{-3} уровень Ферми находится на потолке валентной зоны р-области и на дне зоны проводимости n-области.
- ✗ При подаче обратного напряжения происходит туннельный перенос электронов из валентной зоны р-области на свободные уровни зоны проводимости n-области, и через диод протекает большой обратный ток.

4.6. ОБРАЩЕННЫЕ ДИОДЫ

- ✗ При прямом смещении диода, перекрытия зон не происходит и прямой ток определяется только диффузионным током.
- ✗ Рабочим участком обращенного диода является обратная ветвь ВАХ, что отражено в его названии.
- ✗ Данный тип диодов используется в детекторах, смесителях СВЧ диапазона и переключающих устройствах.