

## МОДУЛЬ 1. Электроника

Полупроводниковый диод – полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя выводами, в котором используется то или иное свойство выпрямляющего перехода.

### 1. Охарактеризовать свойства проводников, диэлектриков и полупроводников и указать на возможность их применения для построения электронных приборов.

**Электронный прибор** – приборы, в которых ток создается движением электронов в вакууме, газе или полупроводнике.

#### Проводник

Основная особенность проводников – наличие свободных носителей зарядов, которые участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по всему объему вещества. Как правило, к таким веществам относятся растворы солей, расплавы, вода (кроме дистиллированной), влажная почва, тело человека и, конечно же, металлы.

Все проводники обладают такими свойствами, как сопротивление и проводимость. Ввиду того, что электрические заряды, сталкиваясь с атомами или ионами вещества, преодолевают некоторое сопротивление своему движению в электрическом поле, принято говорить, что проводники обладают электрическим сопротивлением ( $R$ ). Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью ( $G$ ).  $G=1/R$ . То есть, проводимость – это свойство или способность проводника проводить электрический ток.

#### Диэлектрик

В отличие от проводников, в диэлектриках при низких температурах нет свободных электрических зарядов. Они состоят из нейтральных атомов или молекул. Предметы, изготовленные из диэлектриков, называют изоляторами.

Свойства диэлектриков:

- электрический пробой-установка большого тока, под действием высокого электрического напряжения к электроизоляционному материалу определенной толщины.

- электрическая прочность-это величина, равная напряжению, при котором может быть пробит электроизоляционный материал толщиной в единицу длины.

Применение (проводник и диэлектрик). Как проводники, так и изоляторы широко применяются в технике для решения различных технических задач. К примеру, все электрические провода в доме выполнены из металла (чаще всего медь или алюминий). А оболочка этих проводов или вилка, которая включается в розетку, обязательно выполняются из различных полимеров, которые являются хорошими изоляторами и не пропускают электрические заряды.

#### Полупроводник

Существуют вещества, которые по своей проводимости занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. Такие вещества называют полупроводниками. Они отличаются от проводников сильной зависимостью проводимости электрических зарядов от температуры, а также от концентрации примесей и могут иметь свойства, как проводников, так и диэлектриков.

Применение (полупроводник). В современной электронике на основе полупроводников производят активные элементы. То есть те, которые способны менять свои электрические характеристики в зависимости от подаваемого на них напряжения. Скажем, тот же транзистор является активным элементом, поскольку его значение внутреннего сопротивления будет меняться в зависимости от разных условий в электронной цепи.

## **2. Почему полупроводники широко применяются для изготовления электронных приборов?**

**Электронный прибор** – приборы, в которых ток создается движением электронов в вакууме, газе или полупроводнике.

**Полупроводники** – материалы, обладающие средней проводимостью между хорошими проводниками и хорошими диэлектриками. Особенностью полупроводников является уменьшение сопротивления с ростом температуры. В качестве полупроводников наиболее часто используют германий (Ge), кремний (Si), арсенид галлия, селен, различные оксиды, нитриды и карбиды.

В начал своего развития и в течение нескольких десятилетий электроника опиралась почти исключительно на электронные и ионные электровакуумные приборы.

Но(!) полупроводниковые приборы имеют существенные достоинства:

- 1) Малая масса и размеры
- 2) Отсутствие затрат энергии на накал
- 3) Более высокая надежность и срок службы (десятки тысяч часов и больше)
- 4) Большая механическая прочность
- 5) Более высокий КПД, так как потери энергии незначительны
- 6) Возможность использования в микроэлектронной аппаратуре
- 7) Низкая стоимость

### **3. Каким образом можно придать полупроводнику необходимые свойства? Какие?**

Примесной называют проводимость полупроводника, в который были введены легирующие добавки. Полупроводник с примесями не может быть  $i$ -типа. Легирование – это процесс дозированного внесения примесей в полупроводник для придания ему новых свойств, которых не было в исходном материале, например, для изменения типа проводимости. Если при введении примеси в полупроводнике доминировать начнёт дырочная проводимость, то есть дырки собственного полупроводника будут «сложены» с дырками примеси, то такой полупроводник называют дырочного, или  $p$ -типа. А если превалировать станет электронная проводимость, то полупроводник называют электронного, или  $n$ -типа. В полупроводнике дырочного типа основными носителями заряда являются дырки, а в полупроводнике электронного типа – электроны. В полупроводнике электронного типа дырки будут неосновными носителями заряда, а электроны – основными. В полупроводнике дырочного типа электроны будут неосновными носителями заряда, а дырки – основными. Если при введении примеси концентрация электронов превысит концентрацию дырок, то её называют донорной примесью. А если с введением примеси концентрация дырок станет больше концентрации электронов, то такую примесь называют акцепторной. В полупроводники, которые легируют при производстве электронных компонентов, обычно вводят в неодинаковых концентрациях и акцепторную, и донорную примеси.

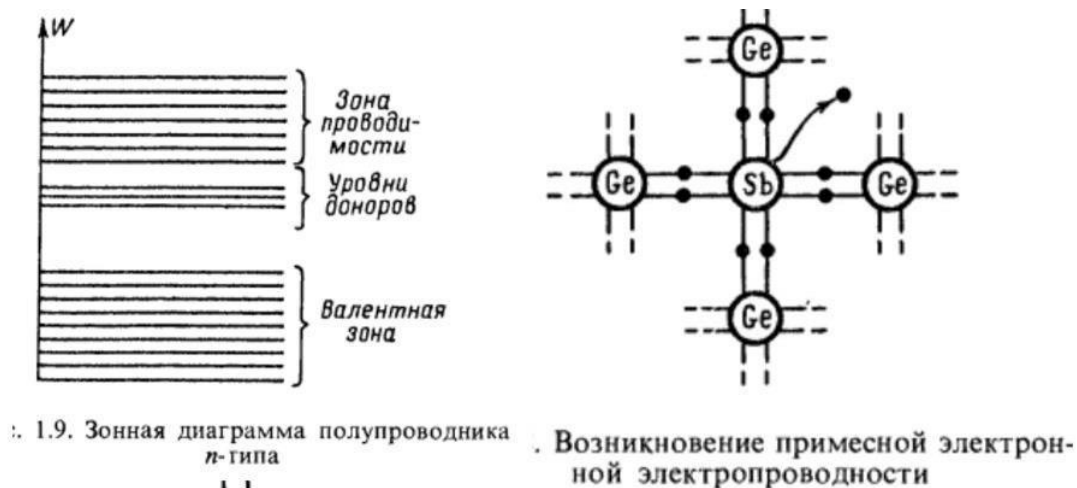
### **4. Изобразить зонную диаграмму для $n$ - и $p$ - полупроводника отдельно и для $p$ - $n$ перехода.**

**Доноры** – примеси, атомы которых отдают электроны. Атомы доноров, теряя электроны, сами заряжаются положительно.

**Полупроводники  $n$  – типа** – полупроводники с преобладанием электронной проводимости. Энергетические уровни атомов донора расположены лишь немного ниже зоны проводимости основного полупроводника. Поэтому из каждого атома донора один электрон легко переходит в зону проводимости, и таким образом в этой зоне появляется дополнительное число электронов, равное числу атомов донора. В самих атомах донора при этом дырки не образуются.

Полупроводник  $n$ -типа или электронный полупроводник образуется из собственного полупроводника путём добавления пятивалентных атомов мышьяка, сурьмы, фосфора. В этом случае пятый валентный электрон не

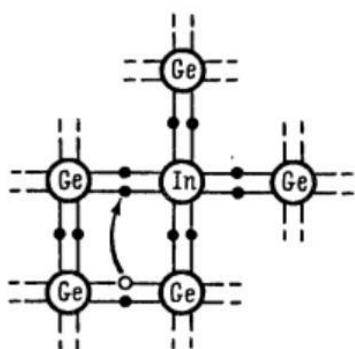
участвует в образовании ковалентной связи, уровень энергии этого электрона оказывается близок к энергии дна зоны проводимости. То есть, чтобы этот электрон освободился достаточно небольшого приращения энергии. Значительное количество атомов в примеси приводит к повышению энергии Ферми в сторону зоны проводимости.



**Акцепторы** – вещества, отбирающие электроны и создающие примесную дырочную электропроводность.

**Полупроводники p – типа** – полупроводники с преобладанием дырочной электропроводности. Энергетические уровни акцепторных атомов располагаются лишь немного выше валентной зоны. На эти уровни легко переходят электроны из валентной зоны, в которой при этом возникают дырки.

**Полупроводник p-типа** или дырочный полупроводник, обладающий дырочной проводимостью, образуется добавлением трехвалентных атомов алюминия, бора, индия или галлия. При этом при образовании ковалентных связей одна связь окажется недостроенной и какой-либо электрон, разрушая существующую ковалентную связь, достраивает данную связь, образуя неподвижный ион. Разрушенная ковалентная связь соответствует дырке. При этом уровень энергии Ферми смещается вниз относительно середины запрещенной зоны.



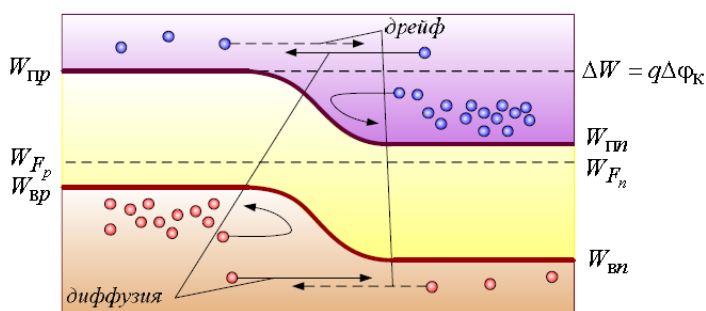
Концентрация свободных электронов в электронном полупроводнике обозначается символом  $n_n$ . Одновременно со свободными электронами в  $n$ -полупроводнике имеются свободные дырки, концентрация которых обозначается символом  $p_n$ . Дырки в электронном полупроводнике являются неосновными носителями заряда.

Концентрация свободных дырок в дырочном полупроводнике обозначается символом  $p_p$ . Одновременно со свободными дырками в  $p$ -полупроводнике имеются свободные электроны, концентрация которых обозначается символом  $n_p$ . Электроны в дырочном полупроводнике являются неосновными носителями заряда.

Для любого полупроводника справедливо соотношение:

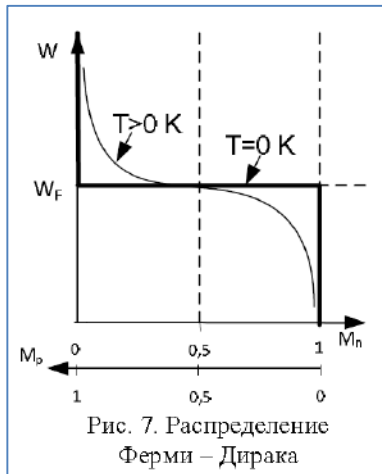
$$n_n p_n = p_p n_p = n_i p_i = n i^2 = p i^2$$

**Р-п переход** – область на границе двух полупроводников с различными типами электропроводимости. Электронно – дырочный переход обладает несимметричной проводимостью, т.е имеет нелинейное сопротивление.



**Рис. 1.14.** Зонная диаграмма  $p$ - $n$ -перехода, иллюстрирующая баланс токов в равновесном состоянии

#### 4. Статистика Ферми-Дирака. Как ее можно использовать?



Статистика Ферми — Дирака определяет статистическое распределение фермионов по энергетическим уровням системы, находящейся в термодинамическом равновесии.

Функция Ферми имеет физический смысл лишь для зон с разрешенным значением энергии, поэтому бессмысленно ожидание подвижных носителей с энергиями соответствующими запрещенной зоне полупроводника. Внутри запрещенной зоны ее применение недопустимо. Концентрация подвижных носителей в чистом полупроводнике может быть определена как интеграл плотности вероятности:

$$f_n(\varepsilon) = \frac{1}{e^{\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}} + 1} \approx e^{\frac{-\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}} \text{ с точностью до } 2\% \text{ для } \varepsilon > \varepsilon_F \text{ на}$$

несколько  $kT$ , т.е. при большой ширине запрещенной зоны (для германия её ширина составляет 0,72 эВ, а для кремния – 1,11 эВ).

Концентрация подвижных носителей заряда в чистом полупроводнике может быть определена как интеграл плотности вероятности:

$$n_i = \int_{\varepsilon_{пр}}^{\infty} S(\varepsilon) f_n(\varepsilon) d\varepsilon = N_n \exp\left(-\frac{\varepsilon_{пр} - \varepsilon_F}{kT}\right)$$

В полупроводнике n-типа, где концентрация носителей – свободных электронов  $n_n$  определяется концентрацией атомов донорной примеси  $N_D$ , происходит смещение уровня Ферми в сторону зоны проводимости:  $n_n = N_D$ ;  $p_n = \frac{N^2}{N_D}$

Физическое уменьшение концентрации дырок в донорном полупроводнике может быть объяснено их скоротечной рекомбинацией при подавляющей концентрации свободных электронов.

3. В полупроводнике p-типа, где концентрация носителей – дырок  $p_p$  определяется концентрацией атомов акцепторной примеси  $N_A$ , происходит смещение уровня Ферми в сторону валентной зоны  $p_p = N_A$ ;  $n_p = \frac{N^2}{N_A}$

Физическое уменьшение концентрации свободных электронов в акцепторном полупроводнике может быть объяснено их скоротечной рекомбинацией при подавляющей концентрации дырок. Смещение уровня Ферми пропорционально концентрации внесенной примеси.

В особо сильно легированных полупроводниках уровень Ферми может попадать внутрь зоны проводимости для полупроводника n-типа или внутрь валентной зоны для полупроводника p-типа, такие полупроводники называются вырожденными.

#### 6. Уравнение переноса. Какую информацию оно несет и как ее можно применить?

В полупроводниках процессы переноса зарядов могут наблюдаться при наличии электронов в зоне проводимости и при неполном заполнении валентной зоны. При выполнении этих условий и при отсутствии градиента

температуры перенос носителей зарядов возможен либо под действием ЭП, либо под действием градиента концентрации носителей заряда.

Составляющая ЭТ под действием внешнего ЭП называется **дрейфовым током**. Полная плотность дрейфового тока при наличии свободных электронов и дырок равна сумме электронной и дырочной составляющих:

$$J_{\text{др}} = J_{n\text{др}} + J_{p\text{др}} = qE(n\mu_n + p\mu_p),$$

где  $E$  – напряженность приложенного ЭП;

$q$  – величина переносимого ЭЗ

$n$  – концентрация основных носителей

$\mu_n$  – подвижность основных носителей ЭЗ

$p$  – концентрация неосновных носителей

$\mu_p$  – подвижность неосновных носителей ЭЗ

Неравномерность концентрации носителей формирует **диффузионные составляющие тока**, описывающие перемещение носителей из областей с большей концентрацией в области с меньшей концентрацией.

Электроны диффундируют против вектора градиента концентрации и имеют отрицательный заряд. Вследствие этого направление вектора плотности диффузионного тока электронов должно совпадать с направлением вектора градиента концентрации электронов

$$J_{n\text{диф}} = qD_n \frac{dn}{dx},$$

где  $D_n$  – коэффициент диффузии электронов,  $\frac{dn}{dx}$  – градиент концентрации электронов

Плотности диффузионного тока дырок:

$$J_{p\text{диф}} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

Где  $D_p$  – коэффициент диффузии дырок,  $\frac{dp}{dx}$  – градиент концентрации дырок

Знак «минус» в выражении означает противоположную направленность электрических токов в полупроводнике при диффузионном движении электронов и дырок в сторону уменьшения их концентраций.

Полная плотность диффузионного тока, обусловленная направленным перемещением носителей ЭЗ из мест с большей концентрацией в места, где их концентрация меньше, определяется как

$$J_{\text{диф}} = \left( -D_p \frac{dp}{dx} + D_n \frac{dn}{dx} \right) * q$$

Если в полупроводнике существует и электрическое поле, и градиент концентрации носителей, проходящий ток будет иметь дрейфовую и

диффузионную составляющие. В таком случае плотности токов рассчитываются по следующим уравнениям:

$$j_p = \left( -D_p \frac{dp}{dx} + \mu_p p E \right) * q; j_n = \left( D_n \frac{dn}{dx} + \mu_n n E \right) * q$$

## 7. Уравнение непрерывности. Его смысл и назначение.

Динамика изменения неравновесных носителей по времени при наличии генерации и рекомбинации в полупроводнике, а также при протекании электрического тока определяется уравнением непрерывности.

Уравнение непрерывности (базовое уравнение):  $\frac{\partial p_n}{\partial t} = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + \frac{1}{q} \frac{\partial j_p}{\partial x}$ , где

$p_n$  – неравномерная концентрация;

$p_{n0}$  – равномерная концентрация;

$p_n - p_{n0}$  – избыточная концентрация;

$\tau_p$  – среднее время жизни неосновного носителя;

$\frac{1}{q} \frac{\partial j_p}{\partial x}$  – концентрация носителей переноса;

$\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$  – рекомбинация.

Уравнение непрерывности - это уравнение сохранения числа частиц в единице объема. Это уравнение показывает, как и по каким причинам изменяется концентрация неравновесных дырок со временем.

## 8. Уравнение Пуассона. С какой целью его можно использовать?

Вектор напряженности электростатического поля по величине равен, а по направлению противоположен градиенту электростатического потенциала  $E = -grad \Psi$ , или для одномерного случая  $E = -\frac{d\Psi}{dx}$

Согласно одному из уравнений Максвелла, расхождение вектора электрической индукции пропорционально плотности ЭЗ  $div \epsilon E = \rho'$ , или для одномерного случая  $\frac{dE}{dx} = \frac{\rho'}{\epsilon}$ . Объединение приведенных двух уравнений позволяет связать распределение потенциалов и концентрацию примесей, определяющих плотность пространственного заряда в p-n переходе

Уравнение Пуассона имеет вид:

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} = -\frac{\rho'}{\epsilon}$$

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость



**Проинтегрировав дважды это уравнение, получим связь между разностью потенциалов на переходе и шириной объединенной области и концентрацией примесей.**

## **9. Для чего создан р-п переход? Каковы его свойства?**

Переходы между двумя областями полупроводника с различным типом электропроводности называется р - п- переходами.

р - п переход обладает несимметричной проводимостью, т.е. имеет нелинейное сопротивление и работа большинства полупроводных приборов (диоды, транзисторы и др.) основана на использовании свойств одного или нескольких р - п - переходов.

Свойства р-п перехода. К основным свойствам р-п перехода относятся:

- свойство односторонней проводимости;
- температурные свойства р-п перехода;
- частотные свойства р-п перехода;
- пробой р-п перехода.

Свойство односторонней проводимости р-п перехода нетрудно рассмотреть на вольтамперной характеристике. Вольтамперной характеристикой (ВАХ) называется графически выраженная зависимость величины протекающего через р-п переход тока от величины приложенного напряжения.  $I=f(U)$ . Будем считать прямое напряжение положительным, обратное – отрицательным. Ток через р-п переход может быть определён следующим образом:

$I = I_0(e^{\frac{qU}{kT}} - 1)$ , где  $I_0$  - ток, вызванный прохождением собственных носителей заряда;  $e$  – основание натурального логарифма;  $q$  – заряд электрона;  $T$  – температура;  $U$  – напряжение, приложенное к р-п переходу;  $k$  – постоянная Больцмана.

Температурное свойство р-п перехода показывает, как изменяется работа р-п перехода при изменении температуры. На р-п переход в значительной степени влияет нагрев, в очень малой степени – охлаждение. При увеличении температуры увеличивается термогенерация носителей заряда, что приводит к увеличению как прямого, так и обратного тока.

Частотные свойства р-п перехода показывают, как работает р-п переход при подаче на него переменного напряжения высокой частоты. Частотные свойства р-п перехода определяются двумя видами ёмкости перехода.

Первый вид ёмкости – это ёмкость, обусловленная неподвижными зарядами ионов донорной и акцепторной примеси. Она называется зарядной, или барьерной ёмкостью.

$$C_{\text{бар}}^U = C_{\text{бар}}^0 \left( \frac{\Psi_k}{\Psi_k + U_{\text{бар}}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Второй тип ёмкости – это диффузионная ёмкость, обусловленная диффузией подвижных носителей заряда через р-п переход при прямом включении.

$$C_{\text{диф}} = \frac{dQ_{\text{инж}}}{dU_{\text{пр}}} = \frac{\tau(I_{\text{пр}} + I_{\text{р}})}{\varphi_T}$$

Чем меньше величина ёмкости р-п перехода, тем на более высоких частотах он может работать. На частотные свойства основное влияние оказывает барьерная ёмкость, т. к. диффузионная ёмкость имеет место при прямом включении, когда внутреннее сопротивление р-п перехода мало.

Пробой р-п перехода.  $I_{\text{обр}} = - I_0$

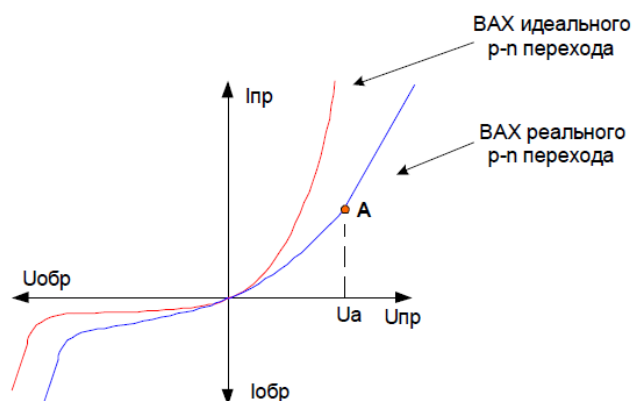
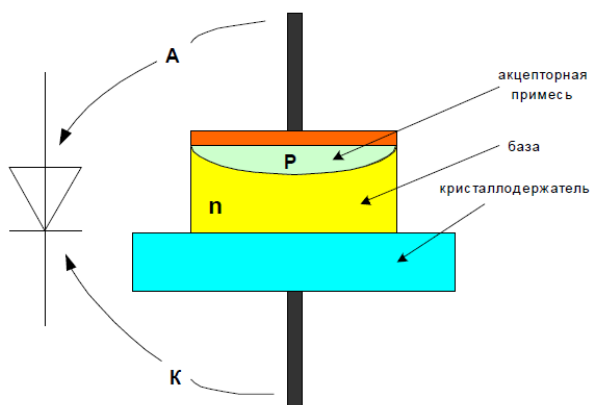
При увеличении обратного напряжения энергия электрического поля становится достаточной для генерации носителей заряда. Это приводит к сильному увеличению обратного тока. Явление сильного увеличения обратного тока при определённом обратном напряжении называется электрическим пробоем р-п перехода. Электрический пробой – это обратимый пробой, т. е. при уменьшении обратного напряжения р-п переход восстанавливает свойство односторонней

проводимости. Если обратное напряжение не уменьшить, то полупроводник сильно нагреется за счёт теплового действия тока и р-п переход сгорит. Такое явление называется тепловым пробоем р-п перехода. Тепловой пробой необратим.

## 10. Назвать приборы, в которых есть р-п переход.

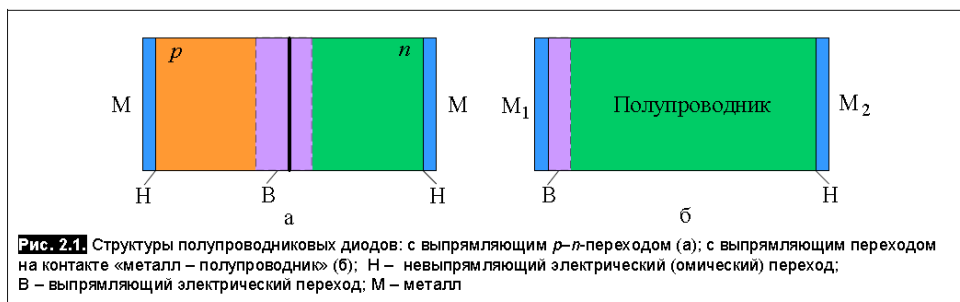
**Основные приборы, в которых есть р-п переход:** полупроводниковые диоды, транзисторы

**Полупроводниковый диод** — двухэлектродный электропреобразовательный прибор, принцип работы которого основан на использовании свойств одного р-п перехода.



Вольт-амперная характеристика реального диода проходит ниже, чем у идеального р-п перехода: сказывается влияние сопротивления базы. После точки A вольт-амперная характеристика будет представлять собой прямую линию, так как при напряжении  $U_a$  потенциальный барьер полностью компенсируется внешним полем. Кривая обратного тока ВАХ имеет наклон, так как за счёт возрастания обратного напряжения увеличивается генерация собственных носителей заряда.

В большинстве случаев полупроводниковые диоды с р-п-переходами делают несимметричными, т.е. концентрация примесей в одной из областей значительно больше, чем в другой. Поэтому количество неосновных носителей, инжектируемых из сильно легированной (низкоомной) области, называемой эмиттером диода, в слабо легированную (высокоомную) область, называемую базой диода, значительно больше, чем в противоположном направлении.



Классификация диодов производится по различным признакам: по типу полупроводникового материала – кремниевые, германиевые, из арсенида галлия; по назначению – выпрямительные, импульсные, стабилитроны, варикапы и др.; по технологии изготовления электронно-дырочного перехода – сплавные, диффузионные и др.; по типу электронно-дырочного перехода – точечные и плоскостные.

Основными классификационными признаками являются тип электрического перехода и назначение диода.

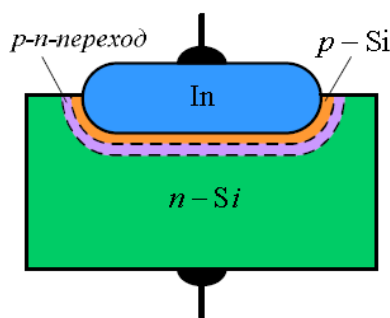
В зависимости от геометрических размеров  $p$ - $n$ -перехода диоды подразделяют на плоскостные и точечные. Плоскостными называют такие диоды, у которых размеры, определяющие площадь  $p$ - $n$ -перехода, значительно больше его ширины. У таких диодов площадь  $p$ - $n$ -перехода может составлять от долей квадратного миллиметра до десятков квадратных сантиметров. Плоскостные диоды (рис. 2.2) изготавливают методом сплавления или методом диффузии. Плоскостные диоды имеют сравнительно большую величину барьерной емкости (до десятков пикофарад), что ограничивает их предельную частоту до 10 кГц. Промышленностью выпускаются плоскостные диоды в широком диапазоне токов (до тысяч ампер) и напряжений (до тысяч вольт), что позволяет их использовать как в установках малой мощности, так и в установках средней и большой мощности.

Точечные диоды имеют очень малую площадь  $p$ - $n$ -перехода, причем линейные размеры ее меньше толщины  $p$ - $n$ -перехода. Точечные  $p$ - $n$ -переходы (рис. 2.3) образуются в месте контакта монокристалла полупроводника и острия металлической проволоочки – пружинки. Для обеспечения более надежного контакта его подвергают формовке, для чего уже через собранный диод пропускают короткие импульсы тока.

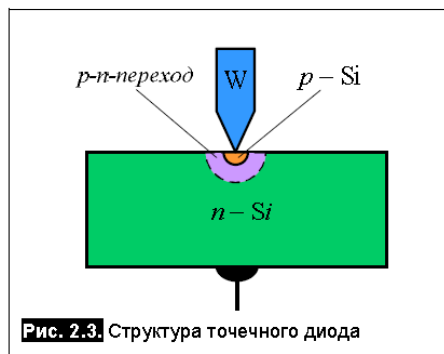
В результате формовки из-за сильного местного нагрева материал острия пружинки расплавляется и диффундирует в кристалл полупроводника, образуя слой иного типа электропроводности, чем полупроводник. Между этим слоем и кристаллом возникает  $p$ - $n$ -переход полусферической формы. Благодаря малой

площади  $p$ – $n$ -перехода барьерная ёмкость точечных диодов очень незначительна, что позволяет использовать их на высоких и сверхвысоких частотах.

По аналогии с электровакуумными диодами, ту сторону диода, к которой при прямом включении подключается отрицательный полюс источника питания, называют катодом, а противоположную – анодом.



**Рис. 2.2.** Структура плоскостного диода, изготовленного методом сплавления



**Рис. 2.3.** Структура точечного диода

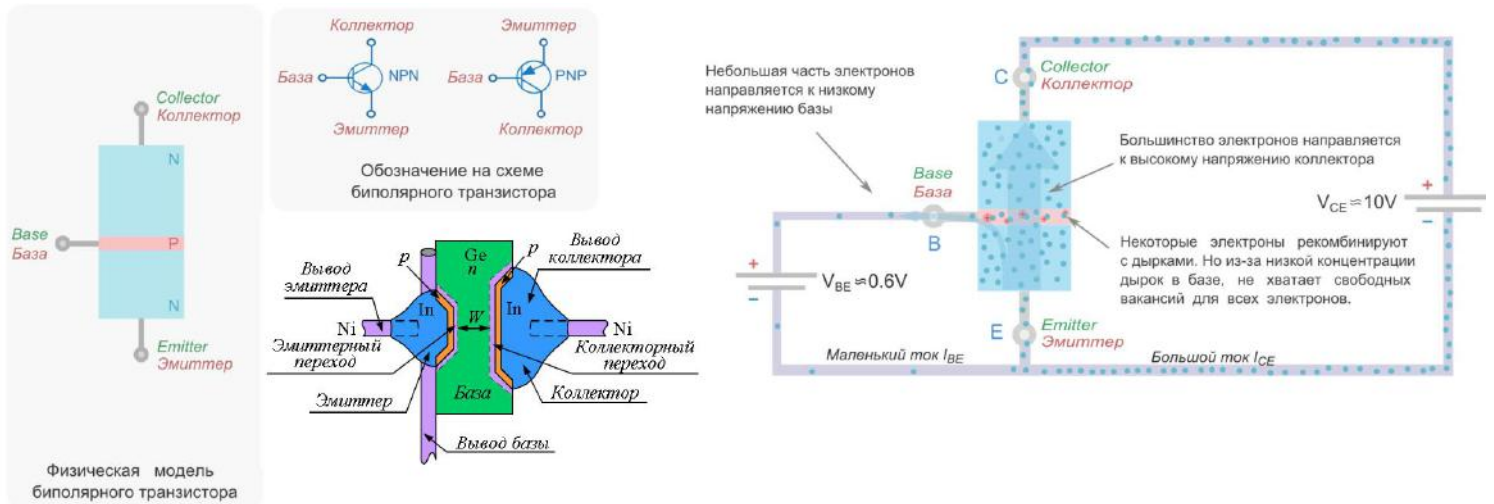
**Биполярный транзистор (или просто транзистор)** – полупроводниковый прибор с двумя или более взаимодействующими выпрямляющими электрическими переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических зарядов

БТ представляет собой монокристалл полупроводника, в котором созданы три области с чередующимися типами электропроводности.

На границах этих областей возникают электронно-дырочные переходы. От каждой области полупроводника сделаны токоотводы (омические контакты). Среднюю область транзистора, расположенную между электронно-дырочными переходами, называют базой (Б). Примыкающие к базе области обычно делают неодинаковыми. Одну из областей делают так, чтобы из неё наиболее эффективно проходила инжекция носителей заряда в базу, а другую – так, чтобы  $p$ – $n$ -переход между базой и этой областью наилучшим образом собирал инжектированные в базу носители заряда, то есть осуществлял экстракцию носителей заряда из базы.

Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей заряда в базу, называют эмиттером (Э), а  $p$ – $n$ -переход между базой и эмиттером – эмиттерным (ЭП). Область транзистора, основным назначением которой является собирание, экстракция носителей заряда из базы, называют

коллектором (К), а р–n-переход между базой и коллектором – коллекторным (КП). В зависимости от типа электропроводности крайних слоев (эмиттера и коллектора) различают транзисторы р–n–р и n–р–n типа. В обоих типах транзисторов физические процессы аналогичны, они различаются только типом инжектируемых и экстрагируемых носителей и имеют одинаково широкое применение.



## 11. Какие свойства р-п перехода и как используются в различных электронных приборах?

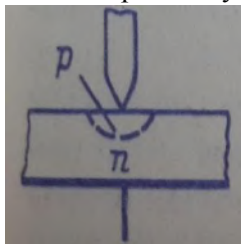
Свойства р-п перехода. К основным свойствам р-п перехода относятся:

- свойство односторонней проводимости;
- температурные свойства р-п перехода;
- частотные свойства р-п перехода;
- пробой р-п перехода.

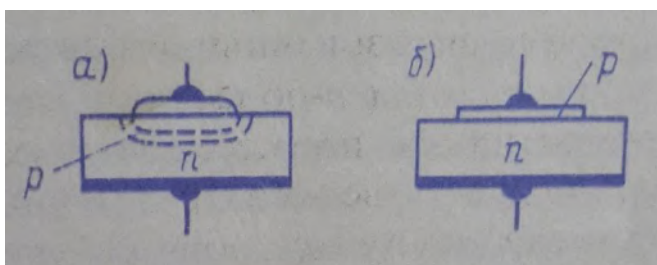
р-п перехода используется в различных электронных приборах, например, в различных типах диодах. Полупроводниковые диоды подразделяются на группы по многим признакам. Бывают диоды из различных материалов, предназначенные для низких или высоких частот, для выполнения различных функций и отличающиеся друг от друга по конструкции. В зависимости от структуры различают точечные и плоскостные диоды.

Точечные диоды имеют малую емкость р-п перехода (обычно менее 1 пФ) и поэтому применяются на любых частотах вплоть до СВЧ.

Принцип устройства



Тонкая заостренная проволочка (игла) с нанесенной на нее примесью приваривается при помощи импульса тока к пластинке полупроводника с определенным типом электропроводности. при этом из иглы в основной полупроводник диффундируют примеси, которые создает область с другим типом электропроводности. Таким образом, около иглы образуется миниатюрный р - n переход полусферической формы.



Плоскостные диоды изготавливаются методами сплавления (вплавления) или диффузии. Диффузионный метод изготовления

p-n перехода основан на том, что атомы примеси диффундируют в основной полупроводник.

-Большинство полупроводниковых диодов выполняют на основе несимметричных p - n переходов.

Низкоомную область диодов называют эмиттером, а высокую базой.

## 12. Выпрямительные диоды. Их свойства, назначение и способы применения. Система параметров.

**Выпрямительные диоды** предназначены для преобразования переменного тока в однонаправленный. В качестве В.Д. используют плоскостные диоды.

Выпрямительные свойства диода характеризует его вольтамперная характеристика (ВАХ), т.е зависимость тока через диод от напряжения на нем. Нелинейность ВАХ создается потенциальным барьером, возникающим между полупроводниковыми областями p- и n-типа: pn-переходом.

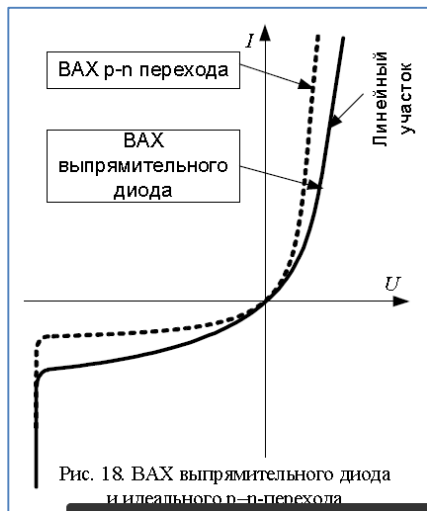


Рис. 18. ВАХ выпрямительного диода и идеального p-n-перехода

### Основные параметры:

А) параметры номинального режима

1.  $U_{пр}$  при заданном  $I_{пр}$ . У идеального выпрямителя  $U_{пр} = 0$ , у реальных диодов  $U_{пр}$  равны десятым долям вольта

2.  $I_{обр}$  при заданном  $U_{обр}$ . У идеального  $I_{обр} \cong 0$ , у реальных – от долей микроампера до миллиампер. Задание этих параметров есть задание сопротивлений  $R_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}}$ ;  $R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}}$

3. Максимальная частота работы диода  $f_d$  – частота, на которой  $U_o$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с  $U_0$  на низких частотах для вполне определенной схемы выпрямителя. Обычно значение не выше 50кГц

4. Параметры, характеризующие температурные зависимости: ТКН ( $\alpha_n = 2 \frac{мВ}{°C}$ ) для  $U_{пр}$ ,  $\alpha_i, °C$  для  $I_{обр}$ . Для зависимости тока от температуры используются две аппроксимации:  $I_{обр}(t) = I_{обр}(20°C) \exp\left(\frac{\Delta t}{\alpha_i}\right)$ ,  $\alpha_i = 11 \dots 14°C$  или  $I_{обр}(t) = I_{обр}(20°C) * 2 * \frac{\Delta t}{10}$

Б) предельные эксплуатационные параметры

1.  $T_{макс}$ ,  $U_{обр макс}$ ,  $I_{ср макс}^{пр}$  – наибольшее значение выпрямленного тока в однополупериодной схеме

2.  $I_{макс}$  – максимальное амплитудное значение тока

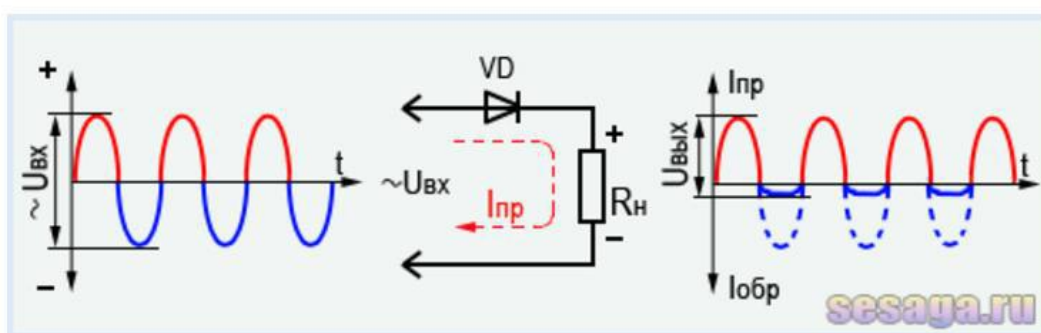
3.  $U_{\text{обр макс}} = f(t, ^\circ\text{C})$  – максимальное обратное напряжение для нормальной температуры. Это десятки – сотни вольт
4.  $I_{\text{ср макс}}$  – десятки мА – десятки А
5.  $T_{\text{макс}}$  – 70 – 85 для Ge и 120-170 для Si

Если  $U_{\text{обр макс}} < U_{\text{обр}}$ , то применяют последовательное включение диодов

Если  $I_{\text{ср макс}} < I_{\text{ср}}$  выпрямителя, то применяют параллельное включение диодов.

## Применение:

### 1) Выпрямитель



На вход выпрямителя подадим сетевое **переменное** напряжение, в котором **положительные** полупериоды выделены красным цветом, а **отрицательные** – синим. К выходу выпрямителя подключим нагрузку (**Rн**), а функцию выпрямляющего элемента будет выполнять диод (**VD**).

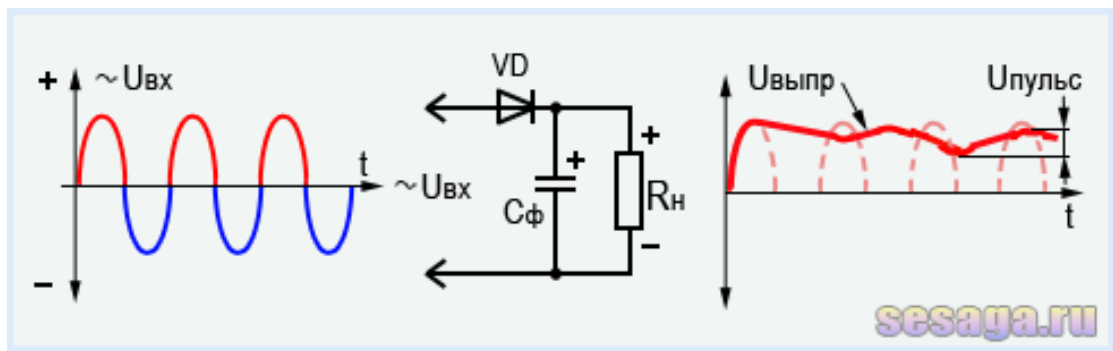
При **положительных** полупериодах напряжения, поступающих на анод диода диод **открывается**. В эти моменты времени через диод, а значит, и через нагрузку (**Rн**), питающуюся от выпрямителя, течет **прямой ток** диода **Iпр** (на правом графике волна полупериода показана красным цветом).

При **отрицательных** полупериодах напряжения, поступающих на анод диода диод **закрывается**, и во всей цепи будет протекать незначительный **обратный ток** диода (**Iобр**). Здесь, диод как бы отсекает **отрицательную** полуволну переменного тока (на правом графике такая полуволна показана синей пунктирной линией).

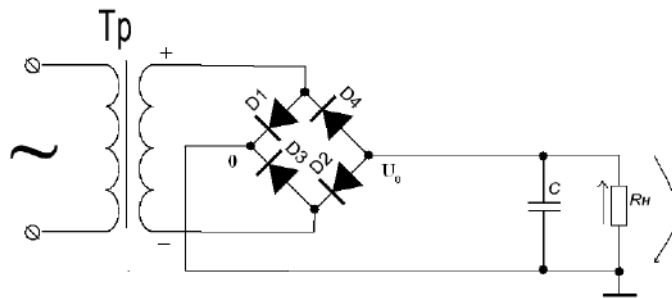
В итоге получается, что через нагрузку (**Rн**), подключенную к сети через диод (**VD**), течет уже не переменный, поскольку этот ток протекает только в положительные полупериоды, а **пульсирующий** ток – ток одного направления. Это и есть выпрямление переменного тока.

Этот недостаток можно частично устранить, если параллельно нагрузке подключить фильтрующий электролитический конденсатор (**Сф**) большой емкости.

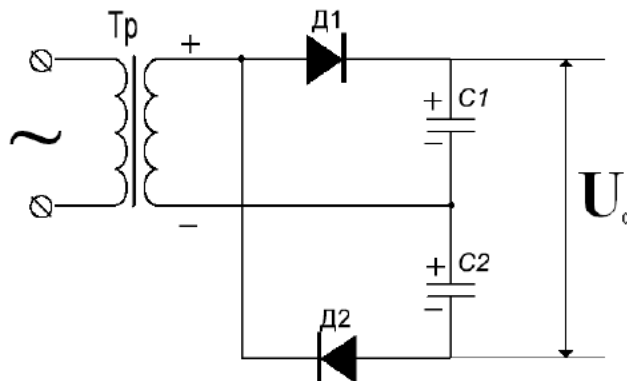




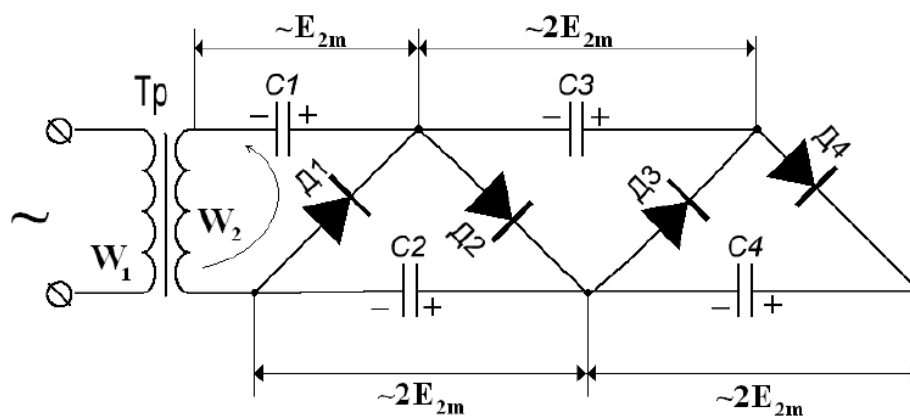
## 2) Мостовая схема



## 3) Схема удвоения напряжения



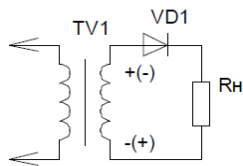
## 4) Схема умножения напряжения





### 13. Одно- и двухполупериодные выпрямители. Особенности поведения и параметры.

Диоды в схемах выпрямителей включаются по одно- и двухполупериодной схемам. Если взять один диод, то ток в нагрузке будет протекать за одну половину периода, поэтому такой выпрямитель называется однополупериодным. Его недостаток – малый КПД.



Значительно чаще применяются двухполупериодные выпрямители.

В течение положительного полупериода напряжения  $U_a$  (+) диоды VD1 и VD4 открыты, а VD2 и VD3 – закрыты. Ток будет протекать по пути: верхняя ветвь (+), диод VD1, нагрузка, диод VD4, нижняя ветвь (-). В течение отрицательного полупериода напряжения  $U_a$  диоды VD1 и VD4

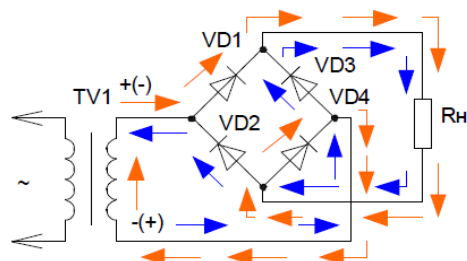


Рис. 37

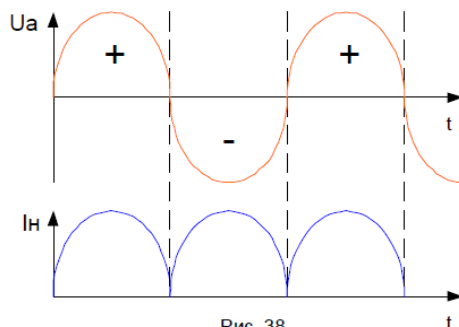


Рис. 38

закрываются, а диоды VD2 и VD3 открываются. Ток будет протекать от (+), нижняя ветвь, диод VD3, нагрузка, диод VD2, верхняя ветвь (-). Поэтому ток через нагрузку будет протекать в одном и том же направлении за оба полупериода. Схема выпрямителя называется двухполупериодной. Если понижающий трансформатор имеет среднюю точку, то есть вывод от середины вторичной обмотки, то двухполупериодный выпрямитель может быть выполнен на двух диодах.

Параметры:

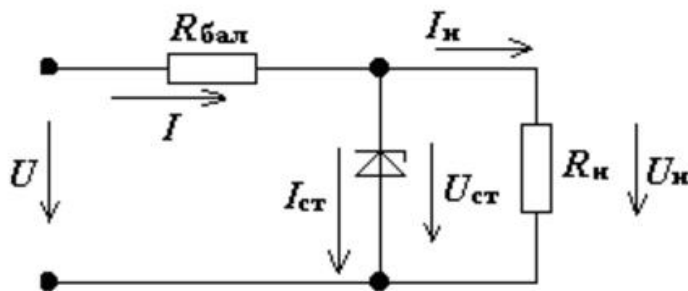
- Номинальное выходное напряжение постоянного тока и допустимый диапазон его изменения;
- Номинальный ток нагрузки;
- Диапазон эффективного входного напряжения переменного тока (например  $220 \text{ В} \pm 10\%$ );
- Допустимая выходная пульсация, её амплитудно-частотные характеристики;
- Нагрузочная характеристика.
- Эквивалентное внутреннее комплексное (в первом приближении активное) сопротивление.

Коэффициент использования габаритной мощности трансформатора.

### 14. Параметрический стабилизатор. Принцип действия. Параметры.

**Параметрический стабилизатор напряжения** - это устройство, в котором стабилизация выходного напряжения достигается за счет сильной нелинейности ВАХ электронных компонентов, использованных для построения стабилизатора (т.е. за счет внутренних свойств электронных компонентов, без построения специальной системы регулирования напряжения).

**Простейший параметрический стабилизатор напряжения, построенный на основе стабилитрона (схема приведена ниже):**



$I_{ст}$  - ток через стабилитрон

$I_н$  - ток нагрузки  $U_{вых}=U_{ст}$  выходное стабилизированное напряжение

$U_{вх}$  - входное нестабилизированное напряжение

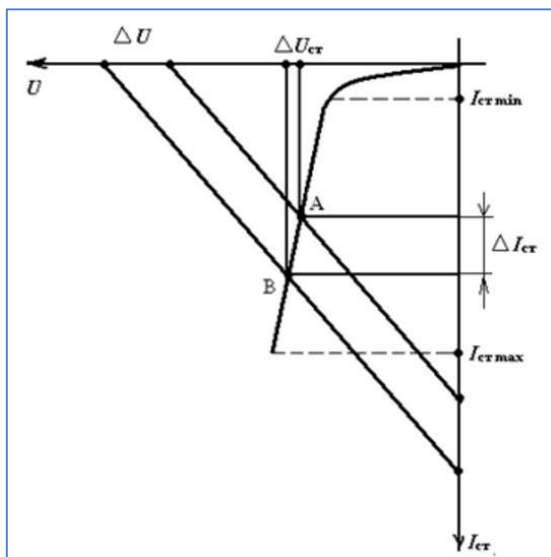
$R_0$  - балластный (ограничительный, гасящий) резистор

$$I = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{R_0}$$

**Основные соотношения токов и напряжений в стабилизаторе определяются первым и вторым законами Кирхгофа:**

$$\begin{aligned} I &= I_{ст} + I_н \\ U &= I * R_{бал} + U_н \\ U_н &= U_{ст} \end{aligned}$$

### Принцип действия параметрического стабилизатора



Принцип действия параметрического стабилизатора постоянного напряжения удобно объяснять с помощью рис. 5, на котором изображены вольтамперная характеристика (ВАХ) стабилитрона и «опрокинутая» ВАХ балластного резистора. Работа стабилизатора напряжения происходит следующим образом. При изменении на напряжения на входе стабилизатора  $U$ , происходит соответствующее изменение тока  $I$ , а, следовательно изменятся токи

стабилитрона и нагрузки. Однако при изменении тока стабилитрона напряжение на нем изменится на очень маленькую величину в соответствии с ВАХ стабилитрона (рис.5), т.е. почти не изменится. Согласно второму закону Кирхгофа, при изменении входного напряжения, падение напряжения на балластном сопротивлении изменится пропорционально току, оказывается равным приращению входного напряжения. Другими словами, все приращение входного напряжения падает на балластном сопротивлении, а напряжение на

стабилитроне и на нагрузке почти не изменится. Запишем математически выше сказанное:  $U \pm \Delta U = (I_{ст} + I_n \pm \Delta I_{ст}) \cdot R_{бал} + U_n$ . Принимая,  $U = const$  и  $R_n = const$ , получаем  $I_n = const$ , при этом условие сохранения рабочей точки стабилитрона на участке АВ вольтамперной характеристики (рис.5) определяется по формуле:  $U \pm \Delta U = \pm \Delta I_{ст} R_{бал}$

Из этого следует, что нормальная работа быть обеспечена соответствующим выбором величины балластного сопротивления. Тогда, при изменении напряжения на входе стабилизатора, не нарушаются нормальные пределы стабилизации выходного напряжения  $U_n$ .

При стабилизации напряжения принимая,  $I_n = var$  и  $R_n = var$  и  $U = const$ , на входе стабилизатора происходит перераспределение токов между нагрузкой и стабилитроном с сохранением неизменным напряжения на стабилитроне и падения напряжения на балластном сопротивлении в соответствии с уравнением:  $U = I \cdot R_{бал} + U_n = ((I_n \pm \Delta I_n) + (I_{ст} \pm \Delta I_{ст})) \cdot R_{бал} + U_n$

Для нормальной работы стабилизатора, при изменяющейся нагрузке, изменение тока не должно приводить к выходу тока стабилитрона за пределы максимального и минимального допустимых его значений.

При условии  $U = const$  и  $R_n = const$ , расчет стабилизатора сводится к тому, чтобы выбрать стабилитрон и выбрать величину  $R_{бал}$ , тогда из системы уравнений (1) получаем формулу для расчета  $R_{бал}$ :

$$R_{бал} = \frac{U_{min} - U_n}{I_{стmin} + I_n}$$

Сопротивление резистора должно быть таким, чтобы ток стабилитрона был бы не менее  $I_{ст min}$ , т.е. не выходил за пределы рабочего участка АВ (рис.5) ВАХ стабилитрона.

Балластное сопротивление определяет основные потери стабилизатора, поэтому параметрические стабилизаторы используют только в маломощных схемах.

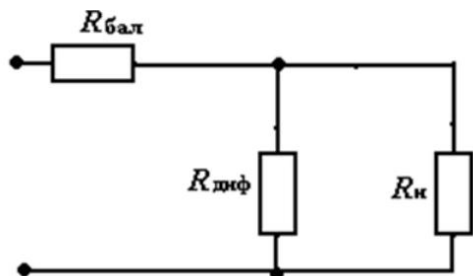
### Основные параметры стабилизатора:

1. Коэффициент стабилизации, равный отношению приращений входного и выходного напряжений. Коэффициент стабилизации характеризует качество работы стабилизатора.

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta U_{вых} / U_{вых}}$$

## 2. Выходное сопротивление стабилизатора: $R_{\text{вых}} = R_{\text{диф}}$

Для нахождения  $K_{\text{ст}}$  и  $R_{\text{вых}}$  рассматривается схема замещения стабилизатора. Нелинейный элемент работает на участке стабилизации, где его сопротивление переменному току  $R_{\text{диф}}$  является параметром стабилизатора.



Дифференциальное сопротивление  $R_{\text{диф}}$  определяется из уравнения:

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}}$$

Для схемы замещения получаем коэффициент стабилизации с учетом, что  $R_{\text{н}} \gg R_{\text{диф}}$  и  $R_{\text{бал}} \gg R_{\text{диф}}$ ,

$$K_{\text{ст}} = \frac{U * R_{\text{бал}}}{U_{\text{ст}} * R_{\text{диф}}}$$

Коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора напряжения  $K_{\text{ст}} = 5 \div 30$

Для получения повышения стабилизированного напряжения применяют последовательное включение стабилитронов.

Параллельное включение стабилитронов не допускается. С целью увеличения коэффициента стабилизации возможно каскадное включение нескольких параметрических стабилизаторов напряжения.

## 15. Что общего между выпрямительными, ВЧ и импульсными диодами? А в чем различие?

Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока низкой частоты (50-100 000 Гц). Основной характеристикой такого диода является коэффициент выпрямления равный отношению прямого и обратного токов при одном и том же напряжении. Чем выше коэффициент выпрямления, тем меньше потери выпрямителя.

Высокочастотные диоды являются приборами универсального назначения. Они могут работать в выпрямителях переменного тока широкого диапазона частот (до нескольких сотен мегагерц), а также в модуляторах, детекторах и других нелинейных преобразователях электрических сигналов. Отличия: а) в численных значениях много больше, и много меньше; б) параметр не всегда удобен. Поэтому в справочниках может приводиться непосредственно барьерная емкость перехода (при оговоренном).

Импульсные диоды являются разновидностью высокочастотных диодов и предназначены для использования в качестве ключевых элементов в быстродействующих импульсных схемах. УГО импульсных диодов такое же, как у выпрямительных диодов. Отличительное требование к ним – малое время перехода из закрытого состояния в открытое и обратно (типичное время 0,1 - 100 мкс). От выпрямительных диодов они отличаются малыми емкостями-перехода (доли пикофарад) и рядом параметров, определяющих переходные характеристики диода.

## 16. Может ли диод использоваться в качестве конденсатора? Если да, то как?

**Может. Варикап** – это полупроводниковый диод, в работе которого используется зависимость емкости р-п перехода от обратного напряжения.

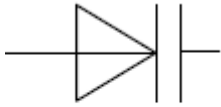


Рис. 31.

Варикап

Варикапы применяются в качестве элементов с электрически управляемой емкостью в схемах перестройки частоты колебательного контура, деления и умножения частоты, частотной модуляции и т.д.

Таким образом, варикап можно рассматривать как конденсатор, емкость которого можно регулировать при помощи электрического сигнала. Максимальное значение емкости варикап имеет при нулевом обратном

напряжении. При увеличении обратного напряжения емкость варикапа уменьшается. На рис показана зависимость емкости варикапа от приложенного напряжения.

Барьерная емкость перехода уменьшается по мере увеличения приложенного обратного напряжения за счет увеличения толщины перехода:

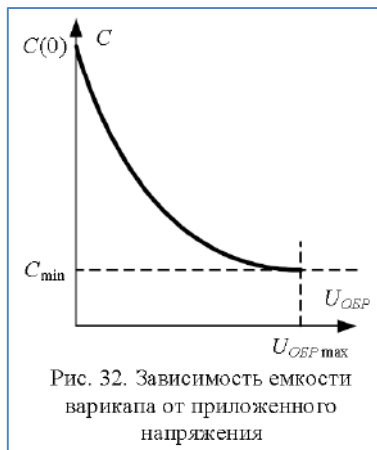


Рис. 32. Зависимость емкости варикапа от приложенного напряжения

$$C(U_{\text{обр}}) = C(0) * \left( \frac{\varphi_K}{\varphi_K + U_{\text{обр}}} \right)^{\frac{1}{m}}$$

Где  $U_{\text{обр}}$  – приложенное обратное напряжение;  $C(U_{\text{обр}})$  – текущая емкость перехода при напряжении  $U_{\text{обр}}$ ;

$C(0)$  – емкость при нулевом напряжении на диоде;

$\varphi_K$  – контактная разность потенциалов

$TKE$  – температурный коэффициент емкости – отношение относительного изменения емкости к вызвавшему его абсолютному изменению температуры окружающей среды:  $TKE = \frac{\Delta C}{\Delta T^\circ}$

**Основными параметрами варикапа являются:**

- начальная емкость варикапа  $C(0)$ ;
- минимальная емкость при максимальном напряжении  $C_{\text{min}}$ ;
- коэффициент перестройки  $K_c = \frac{C(0)}{C_{\text{мин}}}$
- добротность  $Q$ ;
- максимально допустимое обратное напряжение  $U_{\text{обp max}}$ ;
- максимально допустимая мощность  $P_{\text{max}}$ ;

- температурный коэффициент емкости ТКЕ.

## 17. Фотодиод в режиме регистратора сигнала. Схема его задействия, особенности работы?

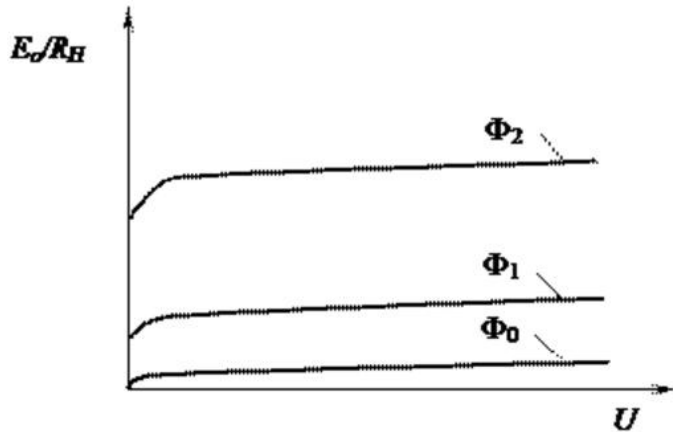
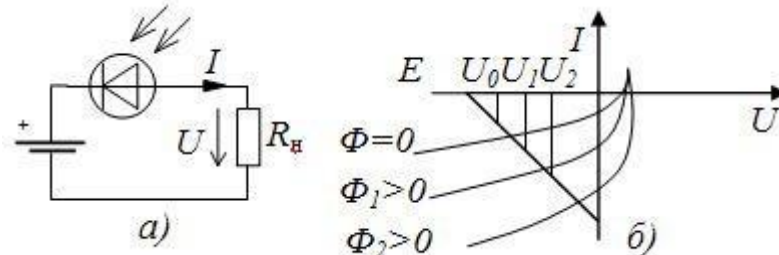


Рис. 4.1.4. Вольт-амперные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя

При работе фотодиода в режиме фотопреобразователя, источник питания  $E$  включается в цепь в запирающем направлении (рис. 1, а). Используются обратные ветви ВАХ фотодиода при различных освещенностях (рис. 1, б).



Фотодиод – полупроводниковый прибор, в котором создан электронно-дырочный p-n-переход.

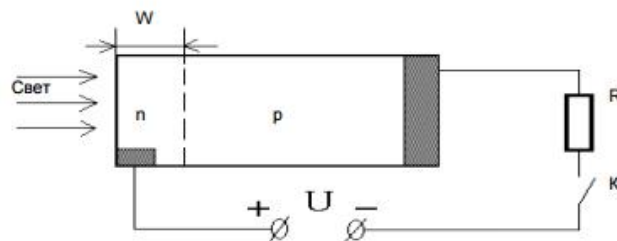


Рис. 1. Схематическое изображение фотодиода и схема его включения.

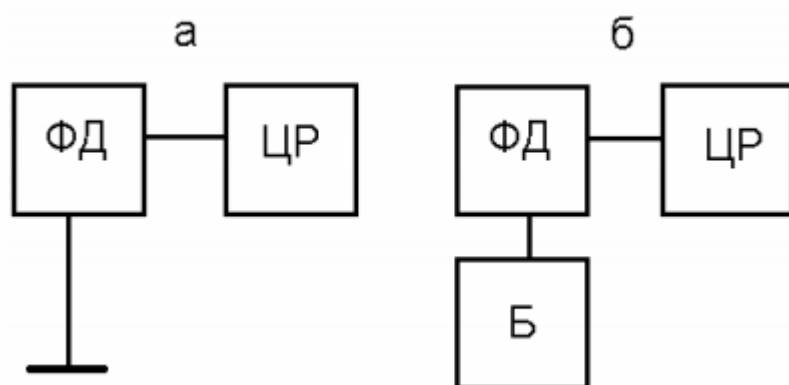
Два режима работы фотодиода. На практике различают два режима работы фотодиода: фотовольтаический (вентильный) и фотогальванический (фотодиодный).

Вентильный режим характеризуется отсутствием источника внешнего напряжения в цепи. При этом внешнее сопротивление в общем случае может быть включено во внешнюю цепь. При разомкнутой внешней цепи ( $R = \infty$ ) ток в ней отсутствует и напряжение на выводах фотодиода максимально. Эту величину называют вентильной фотоэдс. Её можно определить

непосредственно, подключая к выводам фотодиода вольтметр, но внутреннее сопротивление вольтметра должно быть много больше сопротивления р-п- перехода. При коротком замыкании напряжение на выводах фотодиода равно нулю и ток фотодиода определяется только фототоком. Эту величину называют током короткого замыкания фотодиода.

В фотодиодном режиме обычно используются достаточно большие обратные напряжения на р-п-переходе. При таких обратных напряжениях через диод в темноте протекает ток насыщения, а при освещении полный ток возрастает.

Измерение сигналов (фотоЭДС или фототока) осуществляется с помощью цифрового регистратора ЦР.



Блок-схема узла приёмника излучения в фотовольтаическом (а) и фотогальваническом (б) режимах работы: ФД – фотодиод, ЦР – регистратор сигнала (цифровой вольтметр), блок питания.

## 18. Фотодиод-преобразователь светового потока в источник напряжения и тока.

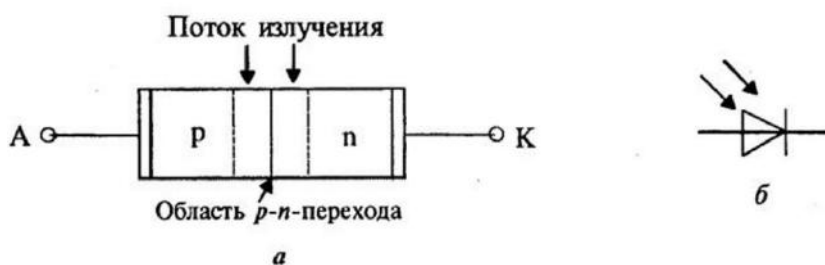


рис. 6.7. Структура (а) и обозначение (б) фотодиода

**Фотодиод** – полупроводниковый оптопреобразовательный прибор, в работе которого используется явления внутреннего фотоэффекта. Явление фотоэффекта возникает непосредственно в зоне р-п перехода, поэтому для его возникновения фотодиод должен иметь оптический канал для проникновения излучения в зону перехода.

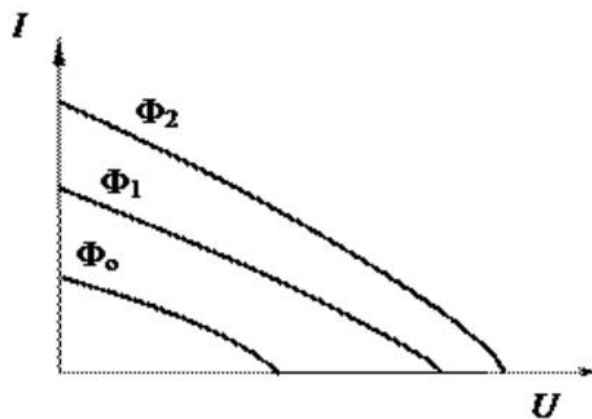
Фотодиод преобразует световую энергию в энергию электрического тока. Под действием светового излучения в области р-п-перехода происходит ионизация атомов примеси, в результате чего генерируются носители заряда

обоих типов – электрон и дырка, которые под действием электрического поля способны формировать во внешней цепи электрический фототок  $I_{\Phi}$ .

**В зависимости от способа включения различают два режима работы фотодиода:**

- Фотогенераторный (без внешнего источника питания).
- Фотопреобразовательный (с внешним источником питания).

Фотодиоды, работающие в режиме фотогенератора, часто применяют в качестве источников питания, преобразующих энергию солнечного излучения в электрическую. Они называются солнечными элементами и входят в состав солнечных батарей, используемых на космических кораблях.



**Рис. 4.13. Вольт-амперные характеристики фотодиода фотогенераторном режиме**

**19. Биполярный транзистор. Физическая структура. Принцип действия.**

Биполярные транзисторы представляют собой трехэлектродные полупроводниковые приборы с двумя взаимодействующими р–n-переходами. Два р–n-перехода реализуются в трехслойной полупроводниковой структуре с чередующимся типом электропроводности. Таким образом, в зависимости от последовательности чередования слоев существуют транзисторы типов р-п-р и п-р-п



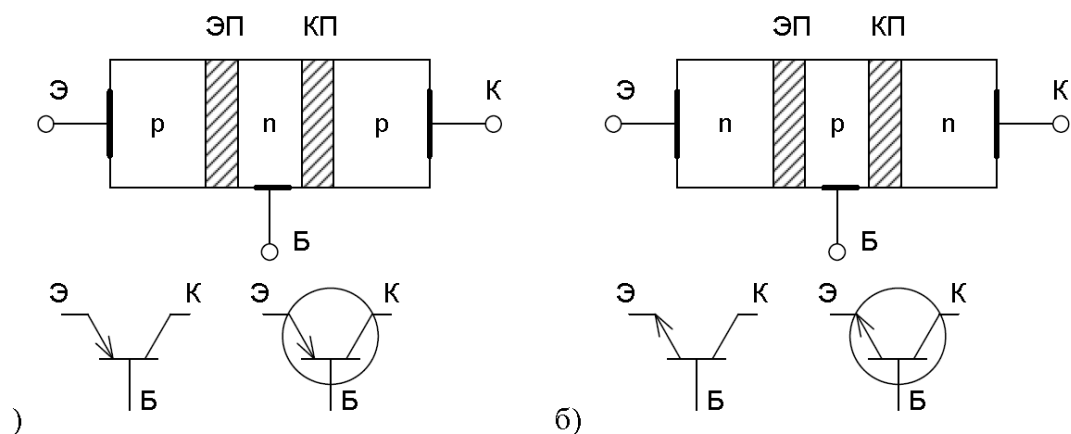


Рис. 48. Биполярные транзисторы: а –  $p-n-p$ , б –  $n-p-n$

Средняя область трехслойной структуры является основанием – базой и имеет тип электропроводности, противоположный крайним областям. Одна из крайних областей, инжектирующая носители в базу, называется эмиттером, другая, собирающая их из базы, – коллектором. В  $n-p-n$  транзисторе в базу инжектируются электроны, а в транзисторе  $p-n-p$  – дырки.

Переходы, отделяющие области базы от эмиттера и коллектора, получили соответственно названия эмиттерного (ЭП) и коллекторного (КП). Стрелка на выводе эмиттера в условном графическом обозначении транзистора показывает проводящее направление эмиттерного  $p-n$ -перехода и однозначно определяет тип биполярного транзистора.

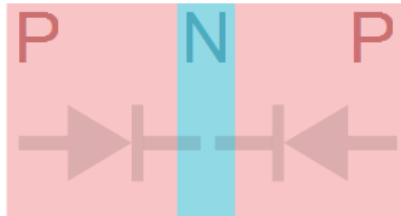
Функция эмиттерного перехода – инжектирование (эмиттирование) носителей заряда в базу, функция коллекторного перехода – сбор носителей заряда, прошедших через базовый слой, поэтому площадь коллекторного перехода обычно намного больше площади эмиттерного перехода, а электроды эмиттер и коллектор не взаимозаменяемы по эксплуатационным функциям биполярного транзистора.

Взаимодействие переходов в процессе работы биполярных транзисторов может возникать в случае, если геометрическая толщина базовой области сравнима с диффузионной длиной подвижного носителя (если база тонкая).

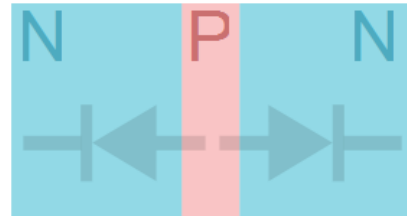
Исходным материалом для создания примесных полупроводников может служить германий или кремний, что также предопределяет классификационный признак биполярного транзистора (кремниевый транзистор, германиевый транзистор) и влияет на эксплуатационные параметры.

## Устройство биполярного транзистора.

Биполярный транзистор состоит из трех слоев полупроводника и двух PN-переходов. Различают PNP и NPN транзисторы по типу чередования дырочной и электронной проводимостей. Это похоже на два диода, соединенных лицом к лицу или наоборот.

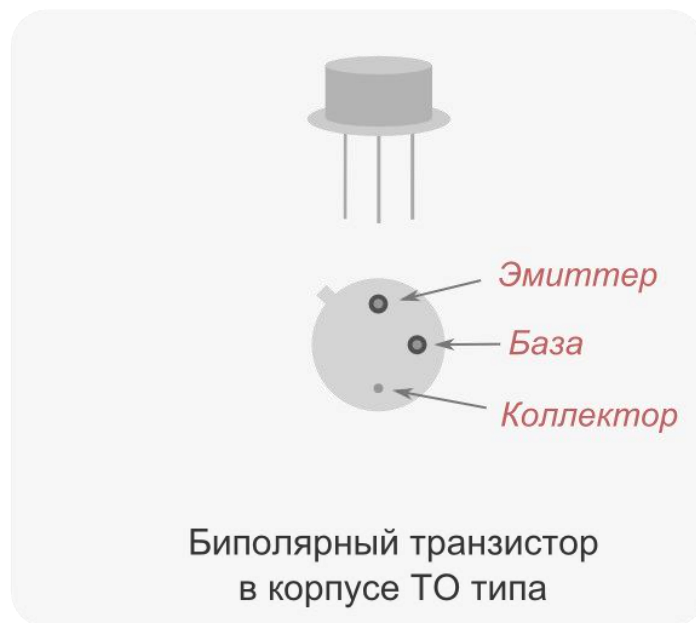
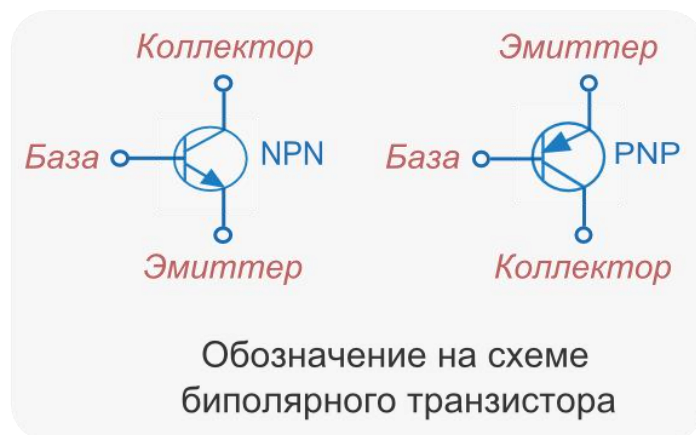
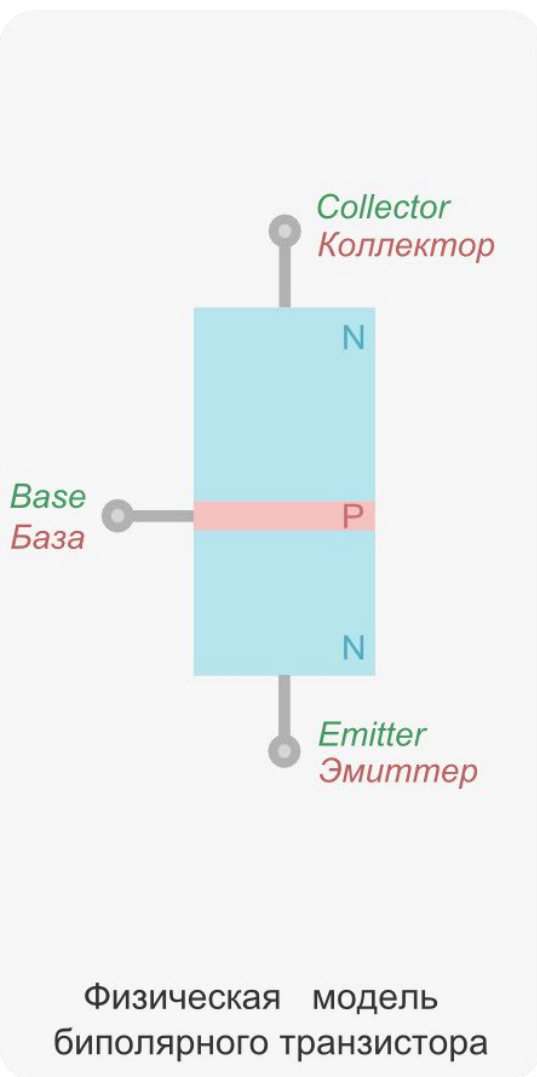


PNP транзистор



NPN транзистор

У биполярного транзистора три контакта (электрода). Контакт, выходящий из центрального слоя, называется *база* (*base*). Крайние электроды носят названия *коллектор* и *эмиттер* (*collector* и *emitter*). Прослойка базы очень тонкая относительно коллектора и эмиттера. В дополнение к этому, области полупроводников по краям транзистора несимметричны. Слой полупроводника со стороны коллектора немного толще, чем со стороны эмиттера. Это необходимо для правильной работы транзистора.

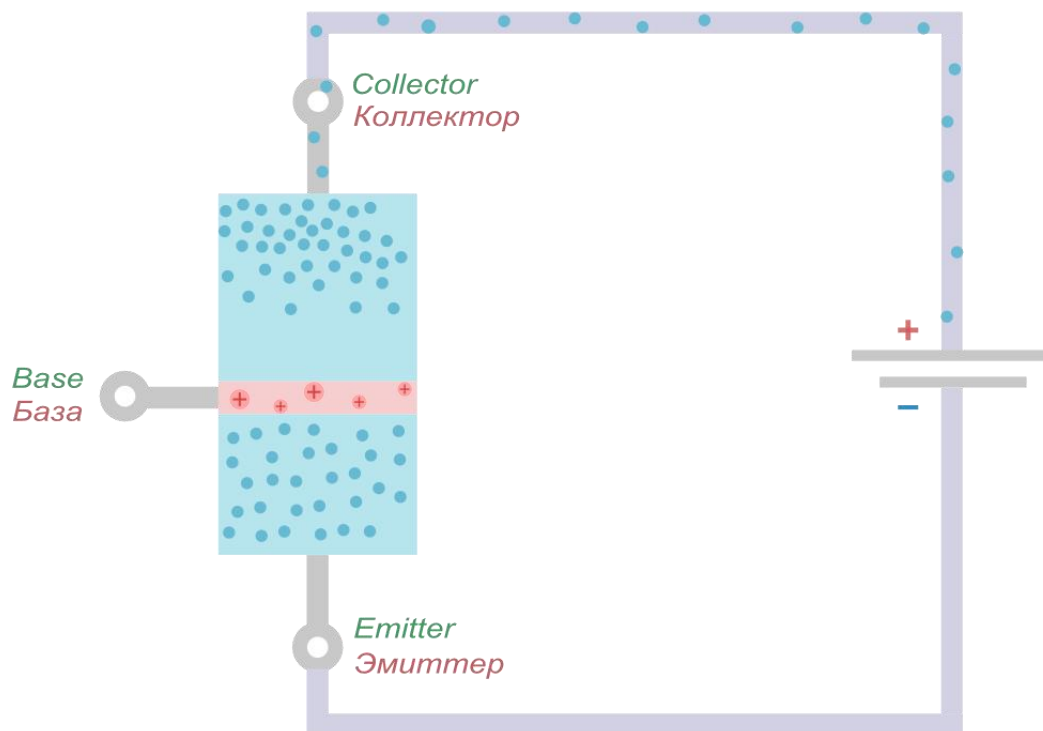


## Работа биполярного транзистора.

Рассмотрим физические процессы, происходящие во время работы биполярного транзистора. Для примера возьмем модель NPN. Принцип работы транзистора PNP аналогичен, только полярность напряжения между коллектором и эмиттером будет противоположной.

Как уже говорилось в [статье о типах проводимости в полупроводниках](#), в веществе P-типа находятся положительно заряженные ионы - дырки. Вещество N-типа насыщено отрицательно заряженными электронами. В транзисторе концентрация электронов в области N значительно превышает концентрацию дырок в области P.

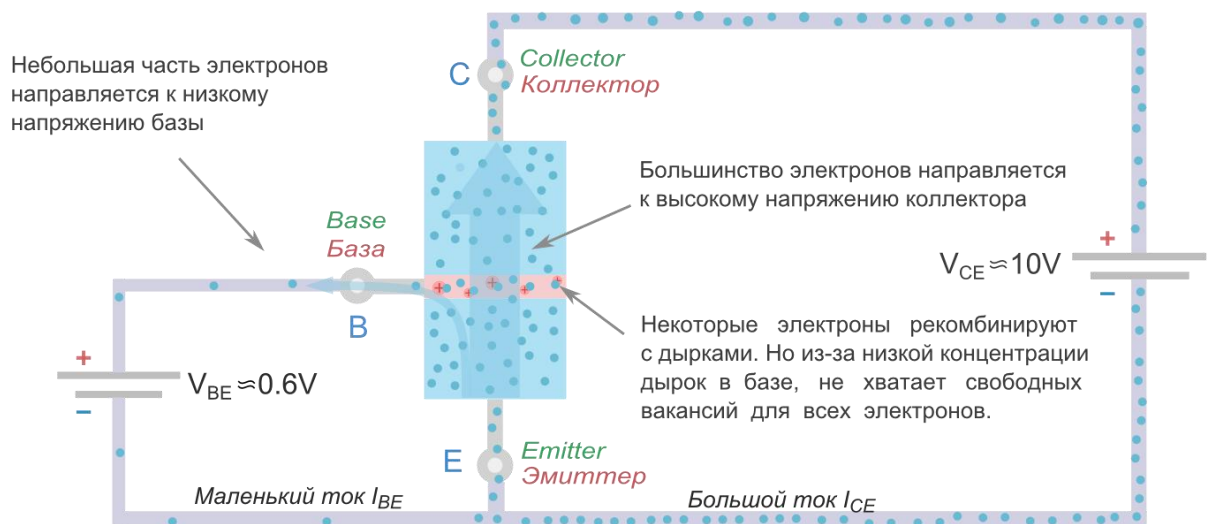
Подключим источник напряжения между коллектором и эмиттером  $V_{кэ}$  ( $V_{сэ}$ ). Под его действием, электроны из верхней N части начнут притягиваться к плюсу и собираться возле коллектора. Однако ток не сможет идти, потому что электрическое поле источника напряжения не достигает эмиттера. Этому мешает толстая прослойка полупроводника коллектора плюс прослойка полупроводника базы.



Подключение напряжения между коллектором и эмиттером

Теперь подключим напряжение между базой и эмиттером  $V_{BE}$ , но значительно ниже чем  $V_{CE}$  (для кремниевых транзисторов минимальное необходимое  $V_{BE} - 0.6V$ ). Поскольку прослойка P очень тонкая, плюс источника напряжения подключенного к базе, сможет "дотянуться" своим электрическим полем до N области эмиттера. Под его действием электроны направятся к базе. Часть из них начнет заполнять находящиеся там дырки (рекомбинировать). Другая часть не найдет себе свободную дырку, потому что концентрация дырок в базе гораздо ниже концентрации электронов в эмиттере.

В результате центральный слой базы обогащается свободными электронами. Большинство из них направится в сторону коллектора, поскольку там напряжение намного выше. Так же этому способствует очень маленькая толщина центрального слоя. Какая-то часть электронов, хоть гораздо меньшая, все равно потечет в сторону плюса базы.



Подключение двух источников питания:

1. Низкой мощности между базой и эмиттером  $V_{BE}$
2. Высокой мощности между коллектором и эмиттером  $V_{CE}$

В итоге мы получаем два тока: маленький - от базы к эмиттеру  $I_{BE}$ , и большой - от коллектора к эмиттеру  $I_{CE}$ .

Если увеличить напряжение на базе, то в прослойке Р соберется еще больше электронов. В результате немного усилится ток базы, и значительно усилится ток коллектора. Таким образом, *при небольшом изменении тока базы  $I_B$ , сильно меняется ток коллектора  $I_C$* . Так и происходит **усиление сигнала в биполярном транзисторе**. Соотношение тока коллектора  $I_C$  к току базы  $I_B$  называется коэффициентом усиления по току. Обозначается  $\beta$ ,  $h_{fe}$  или  $h_{21e}$ , в зависимости от специфики расчетов, проводимых с транзистором.

$$\beta = I_C / I_B$$

#### Устройство биполярных транзисторов.

Основой биполярного транзистора является кристалл полупроводника p-типа или n-типа проводимости, который также, как и вывод от него называется базой. Диффузией примеси или сплавлением с двух сторон от базы образуются области с противоположным типом проводимости, нежели база.

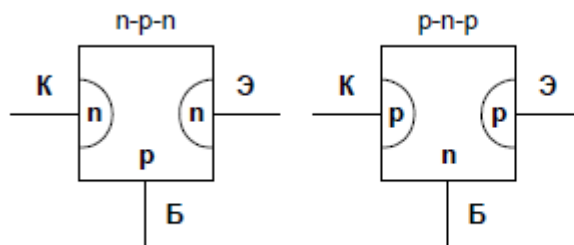


Рис. 60

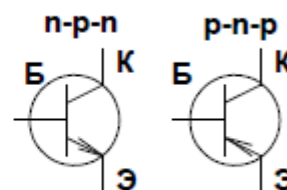
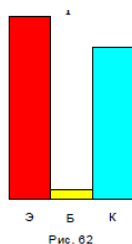


Рис. 61

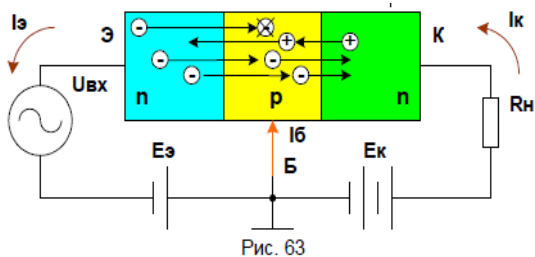
Область, имеющая большую площадь p-n перехода, и вывод от неё называют *коллектором*. Область, имеющая меньшую площадь p-n перехода, и вывод от неё называют *эмиттером*. p-n переход между коллектором и базой называют *коллекторным переходом*, а между эмиттером и базой – *эмиттерным переходом*.



Направление стрелки в транзисторе показывает направление протекающего тока. Основной особенностью устройства биполярных транзисторов является неравномерность концентрации основных носителей зарядов в эмиттере, базе и коллекторе. В эмиттере концентрация носителей заряда максимальная. В коллекторе – несколько меньше, чем в эмиттере. В базе – во много раз меньше, чем в эмиттере и коллекторе (рисунок 62).

### Принцип действия биполярных транзисторов.

При работе транзистора в усилительном режиме эмиттерный переход открыт, а коллекторный – закрыт. Это достигается соответствующим включением источников питания.



Так как эмиттерный переход открыт, то через него будет протекать ток эмиттера, вызванный переходом электронов из эмиттера в базу и переходом дырок из базы в эмиттер. Следовательно, ток эмиттера будет иметь две составляющие – электронную и дырочную. Эффективность эмиттера оценивается коэффициентом инжекции:  $\gamma = \frac{I_{э.н}}{I_{э.п.}}$  (0,999),  $I_{э.п.}$  – ток дырочный.

+  $I_{э.п.}$

Инжекцией зарядов называется переход носителей зарядов из области, где они были основными в область, где они становятся неосновными. В базе электроны рекомбинируют, а их концентрация в базе пополняется от «+» источника  $E_{э}$ , за счёт чего в цепи базы будет протекать очень малый ток. Оставшиеся электроны, не успевшие рекомбинировать в базе, под ускоряющим действием поля закрытого коллекторного перехода как неосновные носители будут переходить в коллектор, образуя ток коллектора. Переход носителей зарядов из области, где они были не основными, в область, где они становятся основными, называется экстракцией зарядов.

Степень рекомбинации носителей зарядов в базе оценивается коэффициентом перехода носителей зарядов  $\delta$ :  $\delta = \frac{I_{к.н}}{I_{э.н}}$

Основное соотношение токов в транзисторе:  $I_{э} = I_{к} + I_{б}$ ;  $\delta \cdot \gamma = \frac{I_{э.н} \cdot I_{к.н}}{I_{э.п.} \cdot I_{э.н}} = \frac{I_{к.н}}{I_{э.п.}} = \alpha$ , где  $\alpha$  – коэффициент передачи тока транзистора или коэффициент усиления по току:  $I_{к} = \alpha \cdot I_{э}$ . Дырки из коллектора как неосновные носители зарядов будут переходить в базу, образуя обратный ток коллектора  $I_{кбо}$ .  $I_{к} = \alpha \cdot I_{э} + I_{кбо}$

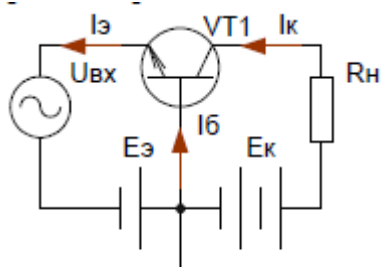


Рис. 64

Из трёх выводов транзистора на один подаётся входной сигнал, со второго – снимается выходной сигнал, а третий вывод является общим для входной и выходной цепи. Таким образом, рассмотренная выше схема получила название схемы с общей базой.

$I_{вх} = I_{э}$ ;  $I_{вых} = I_{к}$ ;  $U_{вх} = U_{бэ}$ ;  $U_{вых} = U_{бк}$

Напряжение в транзисторных схемах обозначается двумя индексами в зависимости от того, между какими выводами транзистора эти напряжения измеряются. Так как все токи и напряжения в транзисторе, помимо постоянной составляющей имеют ещё и переменную составляющую, то её можно представить как приращение постоянной составляющей и при определении любых параметров схемы пользоваться либо переменной составляющей токов и напряжений, либо приращением постоянной составляющей.

$\alpha = \frac{I_{к}}{I_{э}}$ ;  $\alpha = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{э}}$ ; где  $I_{к}$ ,  $I_{э}$  – переменные составляющие коллекторного и эмиттерного тока,  $\Delta I_{к}$ ,  $\Delta I_{э}$  – постоянные составляющие.

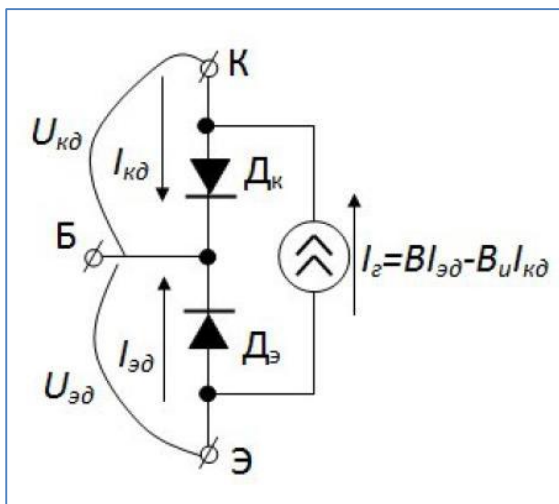
## 20. Эквивалентная схема и система параметров биполярного транзистора.

Методы анализа электрических цепей, с помощью которых выполняется анализ электронных схем, предполагают представление электронной схемы в виде электрической цепи, состоящей из R, L, C компонентов, источников тока и напряжения. Для этого диоды и транзисторы электронной схемы должны быть заменены в ней своими эквивалентными схемами. Чем точнее и полнее отражены в эквивалентной схеме свойства реального компонента, тем точнее анализ и расчёт, но тем заметнее вычислительные трудности.

Существует два вида эквивалентных схем: физическая, отражающая процессы, протекающие в транзисторе, и формальная, в которой транзистор представляется в виде четырехполюсника.

**Физическая эквивалентная схема** составляется для переменных токов и напряжений, но при условии, что эмиттерный переход находится под прямым напряжением, а коллекторный переход - под обратным напряжением, а амплитуды сигналов таковы, что транзистор работает в линейном режиме.

### Нелинейная эквивалентная схема транзистора (для больших сигналов) – модель Эберса - Молла



На рисунке представлена одна из ее модификаций. Данная модель отражает наличие двух р-п переходов в нём с помощью диодов Дэ и Дк, а также взаимодействие переходов (перенос носителей тока через базу) с помощью генератора тока  $I_{\Gamma}$ :  $I_{\Gamma} = B * I_{\text{эд}} - B_u * I_{\text{кд}}$

Такая модель отражает все четыре области работы транзистора и получена путём последовательного рассмотрения активного и инверсного активного режимов работы транзистора и их суперпозиции (что допустимо, так как процессы в базе описываются линейными уравнениями). Для нормальной активной области:  $I'_{\Gamma} = B * I_{\text{эд рекомб}}$ , для инверсного активного режима:  $I''_{\Gamma} = B * I_{\text{кд рекомб}}$

Полные токи соответствующих диодов:  $I_{\text{эд}} = I_{\text{эд рекомб}} - I_{\text{дрейф}} = I_{\text{тэ}} \exp \left[ \frac{U_{\text{эд}}}{m * \varphi_{\text{тэ}}} - 1 \right]; I_{\text{кд}} = I_{\text{тк}} * \exp \left[ \frac{U_{\text{кд}}}{m * \varphi_{\text{тэ}}} - 1 \right]$

Формальная эквивалентная схема получила наибольшее распространение т.к. формальные параметры легко измеряются и приводятся в справочниках.

Рассмотрим формальную эквивалентную схему при включении транзистора с общим эмиттером (рисунок 2.11).

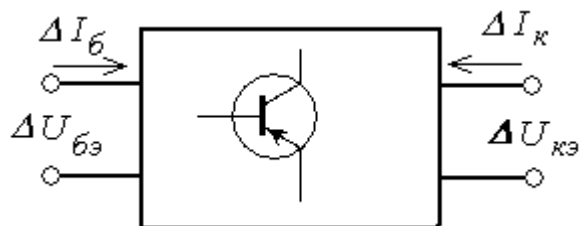


Рисунок 2.11 - Эквивалентная замена транзистора четырехполюсником

Если за зависимые переменные принять  $\Delta U_{бэ}$  и  $\Delta I_к$ , то их можно выразить через независимые переменные в виде уравнений

$$\begin{aligned}\Delta U_{бэ} &= h_{11э} \cdot \Delta I_б + h_{12э} \cdot \Delta U_{кэ}, \\ \Delta I_к &= h_{21э} \cdot \Delta I_б + h_{22э} \cdot \Delta U_{кэ}.\end{aligned}\quad (2.12)$$

Значение  $h$  – параметров можно определить, проведя опыт короткого замыкания на выходе и опыт холостого хода на входе.

Опыт короткого замыкания на выходе  $\Delta U_{кэ} = 0$ , тогда из системы уравнений следует

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} \quad \text{– входное сопротивление транзистора при схеме включения ОЭ;}$$

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} \quad \text{– коэффициент передачи по току при схеме включения ОЭ.}$$

Опыт холостого хода на входе  $\Delta I_б = 0$ , тогда из системы уравнений следует

$$h_{12э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \quad \text{– коэффициент внутренней обратной связи при схеме включения с ОЭ;}$$

$$h_{22э} = \frac{\Delta I_к}{\Delta U_{кэ}} \quad \text{– выходная проводимость при схеме включения с ОЭ.}$$



### **Основные параметры биполярного транзистора:**

**Коэффициент усиления по току** – соотношение тока коллектора  $I_c$  к току базы  $I_b$ . Обозначается  $\beta$ ,  $h_{fe}$  или  $h_{21e}$ .  $\beta$  – величина постоянная для одного транзистора, и зависит от физического строения прибора.  $\beta = \frac{I_c}{I_b}$

**Коэффициент передачи тока по эмиттеру:**  $\alpha = \frac{I_c}{I_e}$

**Формулу взаимосвязи коэффициентов передачи:**  $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$

**Входное сопротивление** – сопротивление в транзисторе, которое «встречает» ток базы. Обозначается  $R_{in}$  ( $R_{вх}$ ). Чем оно больше – тем лучше для усилительных характеристик прибора, поскольку со стороны базы обычно находится источник слабого сигнала, у которого нужно потреблять как можно меньше тока. Идеальный вариант – это когда входное сопротивление равняется бесконечность.

$R_{вх}$  для среднестатистического биполярного транзистора составляет несколько сотен К $\Omega$  (килоом). Здесь биполярный транзистор очень сильно проигрывает полевому транзистору, где входное сопротивление доходит до сотен Г $\Omega$  (гигаом).

**Выходная проводимость** – проводимость транзистора между коллектором и эмиттером. Чем больше выходная проводимость, тем больше тока коллектор-эмиттер сможет проходить через транзистор при меньшей мощности.

Также с увеличением выходной проводимости (или уменьшением выходного сопротивления) увеличивается максимальная нагрузка, которую может выдержать усилитель при незначительных потерях общего коэффициента усиления. Например, если транзистор с низкой выходной проводимостью усиливает сигнал в 100 раз без нагрузки, то при подсоединении нагрузки в 1 К $\Omega$ , он уже будет усиливать всего в 50 раз. У транзистора, с таким же коэффициентом усиления, но с большей выходной проводимостью, падение усиления будет меньше. Идеальный вариант – это когда выходная проводимость равняется бесконечность (или выходное сопротивление  $R_{out} = 0$  ( $R_{вых} = 0$ )).

**Частотная характеристика** – зависимость коэффициента усиления транзистора от частоты входящего сигнала. С повышением частоты, способность транзистора усиливать сигнал постепенно падает. Причиной тому являются паразитные емкости, образовавшиеся в PN-переходах. На изменения входного сигнала в базе транзистор реагирует не мгновенно, а с определенным замедлением, обусловленным затратой времени на наполнение зарядом этих емкостей. Поэтому, при очень высоких частотах, транзистор просто не успевает среагировать и полностью усилить сигнал.

## **21. Как представлены инерционные свойства в биполярном транзисторе?**

При быстрых изменениях входного сигнала, например  $I_b$ , появляются инерционные свойства транзистора. Они обусловлены конечным временем «пролета» носителей заряда через область базы, временем, необходимыми на перезарядку емкостей эмиттерного и коллекторного переходов и на установление необходимых концентраций носителей зарядов. В итоге выходной сигнал (ток  $I_c$ ) будет иметь искаженную форму. Если у транзистора, работающего в активной области, скачком изменить ток на  $\Delta I_b$ , то  $I_c$  вначале практически не меняется, а затем начинает нарастать до установившегося значения по сложному закону, увеличиваясь на  $\Delta I_c$ .

В инженерной практике чаще всего считают, что изменения выходного сигнала происходит по экспоненте с задержкой на время  $t_{зд\alpha}$ .

Инерционные свойства электронных приборов обуславливаются конечностью пролетного времени частиц, образующих ток в приборе, и наличием резервуаров энергии в виде емкостей обедненных слоев p–n–переходов.

При прохождении тока через транзистор в его базовой области происходят два физических процесса: диффузия носителей заряда и их рекомбинация. В зависимости от способа управления входным током инерционные свойства транзистора определяются либо процессом диффузии, либо процессом рекомбинации.

## 22. Чем различаются эквивалентные схемы биполярного транзистора для большого и малого сигнала?

В зависимости от диапазона изменения напряжений и токов различают модели для режимов большого и малого сигнала.

Модели для режима большого сигнала учитывают нелинейность характеристик полупроводникового прибора. Модели для режима малого сигнала служат для анализа переменных составляющих токов и напряжений, имеющих малую величину. Они имитируют характеристики прибора в окрестности рабочей точки. Такие модели содержат только линейные элементы.

### Модели биполярных транзисторов для режима большого сигнала

Модели для режима большого сигнала делят на глобальные и локальные. Глобальные модели позволяют проводить анализ при всех возможных изменениях напряжений и токов. Такие модели сложны и содержат большое количество нелинейных элементов. Они используются в программах машинного анализа электронных схем. Локальные модели предназначены для расчета токов и напряжений электронного прибора только в пределах определенных участков его характеристик. Такие модели используют в основном при ручных расчетах для приближенного определения рабочих точек электронных устройств.

Простейшая нелинейная модель биполярного транзистора показана на рис. 21.1, а. Она удовлетворительно моделирует характеристики транзистора в активном режиме и режиме отсечки. Эмиттерный переход представлен диодом, ВАХ которого определяется выражением

$$I_{\varepsilon} = I_{\varepsilon 0} (e^{U_{\varepsilon \text{б}}/V_T} - 1).$$

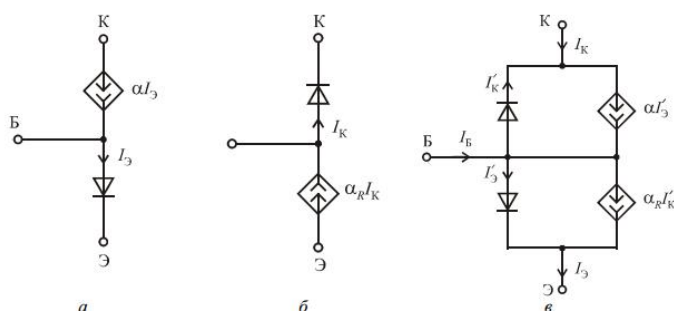


Рис. 21.1

Модель биполярного транзистора на рис. 21.1, а справедлива для активного режима и режима отсечки. Однако режимы насыщения и инверсный с ее помощью моделировать нельзя.

Модель транзистора для инверсного режима получим, поменяв местами диод и источник тока в схеме на рис. 21.1, а. Эквивалентная схема для инверсного режима показана на рис. 21.1, б.

Объединив схемы замещения на рис. 21.1, а, б, получим модель Эберса – Молла, широко используемую для исследования транзисторных схем (рис. 21.1, в). На рис. 21.1, в  $\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера в активном режиме,  $\alpha_R$  – коэффициент передачи коллекторного тока в инверсном режиме.

Модель биполярного транзистора на рис. 21.1, а справедлива для активного режима и режима отсечки. Однако режимы насыщения и инверсный с ее помощью моделировать нельзя. Модель транзистора для инверсного режима получим, поменяв местами диод и источник тока в схеме на рис. 21.1, а. Эквивалентная схема для инверсного режима показана на рис. 21.1, б. Объединив схемы замещения на рис. 21.1, а, б, получим модель Эберса – Молла, широко используемую для исследования транзисторных схем (рис. 21.1, в). На рис. 21.1, в  $\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера в активном режиме, а  $R$  – коэффициент передачи коллекторного тока в инверсном режиме. Она позволяет моделировать все режимы работы биполярного транзистора.