

## **Физические основы работы п/п приборов**

### **1. От чего зависит проводимость полупроводников и каким образом ее можно управлять?**

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.

От типа и количества примесей, от температуры, освещения, излучения. Проводимость полупроводников сильно зависит от температуры. Вблизи температуры абсолютного нуля полупроводники имеют свойства диэлектриков.

Сопротивление полупроводников с ростом температуры уменьшается, проводимость УВЕЛИЧИВАЕТСЯ. Причина: С ростом температуры в полупроводнике увеличивается число свободных электронов и "дырок". Больше свободных зарядов-меньше сопротивление

С повышением температуры или увеличением напряженности электрического поля увеличивается количество электронов, отрывающихся от атомов кристаллической решетки. Значит, число переносчиков тока в единице объема в этом случае растет, а удельное сопротивление полупроводника уменьшается.

### **2. Статистика Ферми-Дирака. Каким образом ее можно применить для описания свойств полупроводников ?**

определяет статистическое распределение фермионов по энергетическим уровням системы, находящейся в термодинамическом равновесии;

**Статистика Ферми — Дирака** в статистической физике — квантовая статистика, применяемая к системам тождественных фермионов; определяет распределение вероятностей нахождения фермионов на энергетических уровнях системы, находящейся в термодинамическом равновесии; предложена в 1926 году итальянским физиком Энрико Ферми и одновременно английским физиком Полем Дираком, который выяснил её квантово-механический смысл; позволяет найти вероятность, с которой фермион занимает данный энергетический уровень.

В (идеальном) ферми-газе в пределе низких температур  $\mu = E_F$ . В этом случае (полагая уровни энергии невырожденными  $g_i = 1$ ), функция распределения частиц называется **функцией Ферми**:

$$F(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon_i - E_F}{kT}\right) + 1}.$$

$n_i$  — среднее число частиц в состоянии  $i$ ,

$\varepsilon_i$  — энергия состояния  $i$ ,

$\mu$  — химический потенциал (который равен энергии Ферми  $E_F$  при абсолютном нуле температуры),

$k$  — постоянная Больцмана,

$T$  — абсолютная температура.

Интеграла  $F(E)$  — это концентрация подвижных зарядов.

### 3. Уравнение переноса. Какую информацию содержит это уравнение?

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.

Если в полупроводнике существует и электрическое поле, и градиент концентрации носителей, проходящий ток будет иметь дрейфовую и диффузационную составляющие. В таком случае плотности токов рассчитываются по следующим уравнениям:

$\Psi_k$  - контактная разность потенциалов.  
коррд - диффузия носв. в касет.

$$(2) \quad \dot{\rho}_p = q \left( -D_p \frac{d\rho_n}{dx} + (\mu_p p_n E) \right) \quad - \text{ур-е перемоса}$$

$\dot{\rho}$  - плотность дырочного тока

в моделе элем. объеме конц. носв. инос.

з-за и -и изм-се за сч-т др-х пр-в:  
ухода или прихода частиц в элем.  
объем или рекомбинац. пр-сс в элем  
объем.

#### 4. Уравнение непрерывности. Какие процессы в полупроводниках описывает это уравнение?

С учётом механизма перераспределения носителей заряда можно записать уравнения непрерывности. В общем случае для дырок и электронов эти уравнения записываются в виде

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= -\frac{p-p_0}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} - p \mu_p \frac{\partial E}{\partial x}; \\ \frac{dn}{dt} &= -\frac{n-n_0}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} + n \mu_n \frac{\partial E}{\partial x}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где  $\tau_p$ ,  $\tau_n$  — времена жизни носителей заряда.

Из этих уравнений следует вывод: изменение концентраций носителей заряда в полупроводнике с течением времени происходит из-за их рекомбинации (первые члены правых частей), перемещений вследствие диффузии (вторые члены) и дрейфа (третий и четвертый члены).

Поведение неравновесных носителей заряда в полупроводниках описывается уравнением непрерывности.

Уравнения непрерывности представляют собой дифференциальные уравнения в частных производных, которые связывают изменения концентраций свободных носителей заряда в полупроводнике с их генерацией, рекомбинацией, дрейфовым и диффузионным движением.

**5. Каково различие между симметричным, ассиметричным и резко ассиметричным р-п переходами? В каких электронных приборах такие переходы встречаются**

Для простоты примем концентрации основных носителей заряда в обеих областях одинаковыми:

$$p_p = n_n,$$

где  $p_p$  – концентрация дырок в р-области;  $n_n$  – концентрация электронов в н-области. Такой р-н-переход называют **симметричным**.

На практике наибольшее распространение получили р-н-структуры с **неодинаковой** концентрацией внесенных акцепторной  $N_a$  и донорной  $N_d$  примесей, т.е. с неодинаковой концентрацией основных носителей заряда в слоях  $p_p \gg N_a$  и  $n_n \gg N_d$ .

(Если величина концентрации примеси в одной из областей р-н-перехода значительно превышает концентрацию в соседней, то такой переход называется **несимметричным** (в отличие от симметричного, у которого  $N_d = N_a$ ).

Переход, в котором область изменения концентрации примесей значительно меньше ширины ОПЗ, называется **резким**  
ОПЗ – область пространственного заряда

# Применение

---

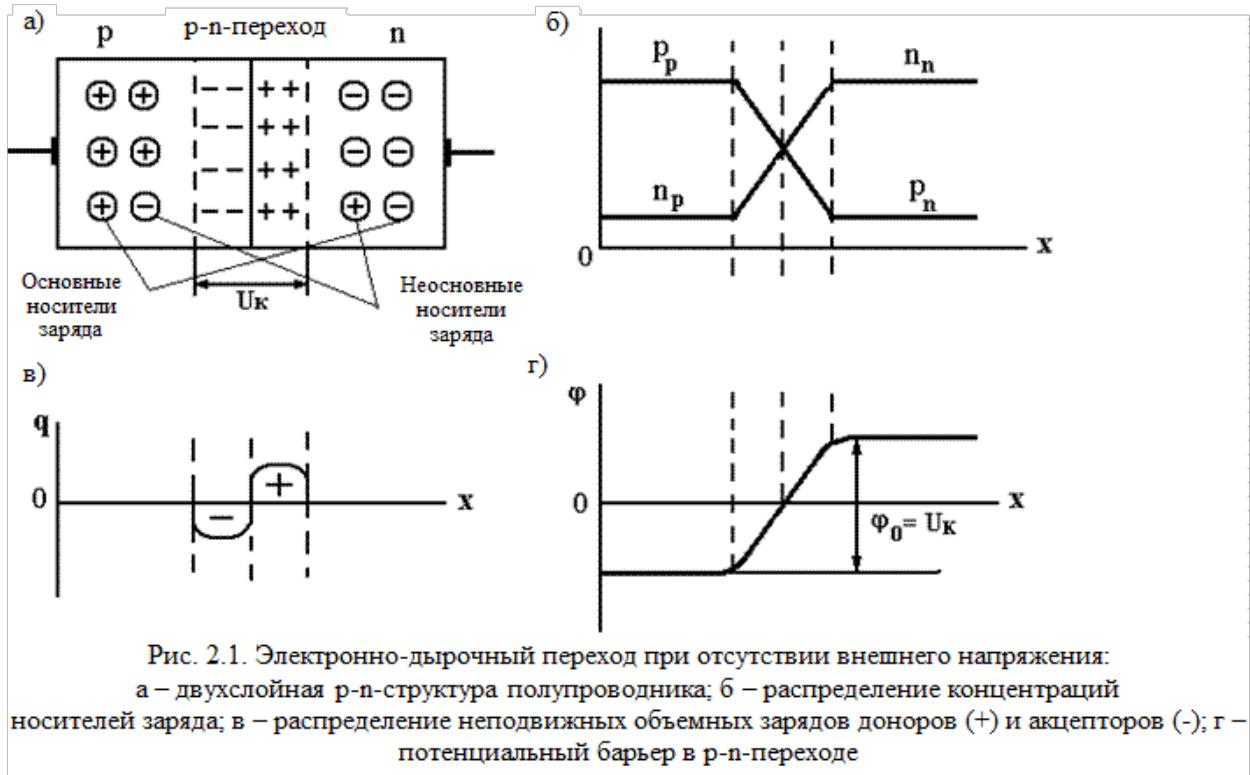
[ [править](#) | [править код](#) ]

- [Диод](#)
- [Транзистор](#)
- [Тиристор](#)
- [Варикап](#)
- [Стабилитрон \(диод Зенера\)](#)
- [Светодиод](#)
- [Фотодиод](#)
- [Стабистор](#)
- [pin диод](#)

**6. Какова неравновесная концентрация не основных носителей заряда на границе p- и n- областей в полупроводнике с симметричным p-n переходом? Как она изменится если переход станет резко ассиметричным?**

p-n переход называют симметричным, если концентрации основных носителей заряда в обеих областях одинаковы

$p_p = n_n$ , где  $p_p$  – концентрация дырок в p-области;  $n_n$  – концентрация электронов в n-области.



В каждой области кроме основных носителей заряда имеются неосновные носители, концентрация которых значительно меньше, чем основных:

$$p_n \ll n_n \text{ и } n_p \ll p_p,$$

Где  $p_n$  – концентрация дырок в n-области;  $n_p$  – концентрация электронов в p-области.

На границе двух областей возникает разность концентраций одноименных носителей заряда. Одни и те же носители заряда в одной области являются основными, а в другой – неосновными, так что дырок в p-области гораздо больше, чем в n-области, и наоборот, электронов в n-области значительно больше, чем в p-области.

## 7. Показать какова величина контактной разности потенциалов и ее зависимость от свойств р- и n- областей.

**Контактная разность потенциалов** — это разность потенциалов, возникающая при соприкосновении двух различных твердых проводников, имеющих одинаковую температуру. Различают внутреннюю и внешнюю разности потенциалов в зависимости от того, рассматриваются ли потенциалы эквипотенциального объема контактирующих проводников или же потенциалы вблизи их поверхности

потенциал работы выхода электрона из полупроводника p-типа:

$$\phi_p = \phi_T \cdot \ln(p_p)$$

потенциал работы выхода электрона из полупроводника n-типа:

$$\phi_n = \phi_T \cdot \ln(p_n)$$

Отсюда контактная разность потенциалов запишется:

$$\phi_K = \phi_p - \phi_n = \phi_T \cdot \ln(p_p) - \phi_T \cdot \ln(p_n) = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right)$$

$$\phi_K = \phi_T \cdot \ln(n_n \cdot p_p / n_i^2) = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_D \cdot p_p}{n_i^2}\right) = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2}\right)$$

Окончательная формула для контактной разности потенциалов р-п перехода определяет ее зависимость от трех факторов:

1. материал полупроводника

Зависимость  $\phi_K$  от материала полупроводника определяется различным значением их ширины запрещенной зоны.

2. Степень легирования исходных полупроводников также влияет на значение контактной разности потенциалов. Чем больше степень легирования полупроводника, то есть чем больше вносится в полупроводник атомов примеси ( $N_{\text{пр}}$  – концентрация примеси), тем большее значение имеет контактная разность потенциалов.

3. Контактная разность потенциалов зависит от температуры окружающей среды. С увеличением температуры контактная разность потенциалов уменьшается. Это связано с тем, что в выражении для  $\phi_K$  с увеличением температуры окружающей среды возрастает значение температурного потенциала  $\phi_T$ .

## **8. Чем определяется инерционность р-п перехода? Зависит ли она от режима работы р-п перехода?**

Под инерционностью понимается запаздывание реакции *p-n*-перехода на электрическое воздействие. Под воздействием может пониматься как изменение во времени приложенного напряжения (тогда реакция – это ток через *p-n*-переход), так и изменение во времени заданного через *p-n*-переход тока (тогда реакция – напряжение на переходе).

*Основным последствием инерционности *p-n*-перехода является потеря свойства преимущественно односторонней проводимости при быстрых изменениях во времени (высокой частоте) входного воздействия.*

Физической причиной инерционности являются конечное время движения основных носителей через переход и конечное время перезаряда паразитных емкостей перехода. Паразитными эти емкости называются потому, что они возникают помимо воли разработчиков-технологов, в силу особенности физических процессов в *p-n*-переходе. Чаще всего временем переноса носителей из-за малых геометрических размеров можно пренебречь и рассматривать только влияние паразитных емкостей.

## **9. Чем определяется тепловой ток р-п перехода ? Какую информацию несет в себе его значение?**

Тепловой ток обусловлен термогенерацией электронно-дырочных пар в областях *p*- и *n*-типа, удаленных от *i*-области не далее чем на диффузионную длину. Он довольно сильно возрастает при увеличении температуры. Обычно тепловой ток возрастает в 2 раза при увеличении температуры на каждые 10°C . Естественной представляется зависимость теплового тока от ширины запрещенной зоны полупроводника, из которого выполнен *p-n* переход. Чем больше ширина, тем меньше тепловой ток. Ток  $I_o$  не зависит от величины обратного напряжения, а зависит от материала полупроводника, температуры окружающей среды, степени легирования полупроводников.

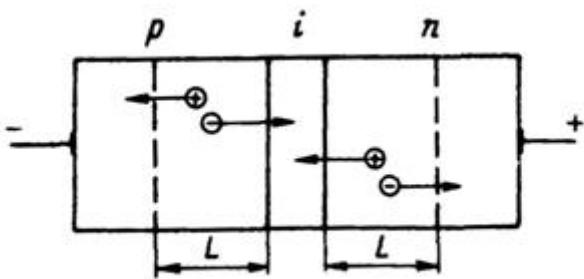


Рис. 1.12

$$I_o = B \cdot S \cdot \exp(-\Delta W_3 / k \cdot T)$$

- тепловой ток

## 10. Чем отличаются между собой эмиттерный и коллекторный *p-n* переходы биполярного транзистора ( способ изготовления, физическая структура, электрические параметры)

нету

## Диоды и вторичные источники питания

### 10. Какова совокупность параметров вторичного источника питания?

Дать им определение:

???????

Основные параметры (по Гусеву):

1. **Максимально допустимое обратное напряжение диода  $U_{обртак}$** - значение напряжения, приложенного в обратном направлении, которое диод может выдержать в течение длительного времени без нарушения его работоспособности.

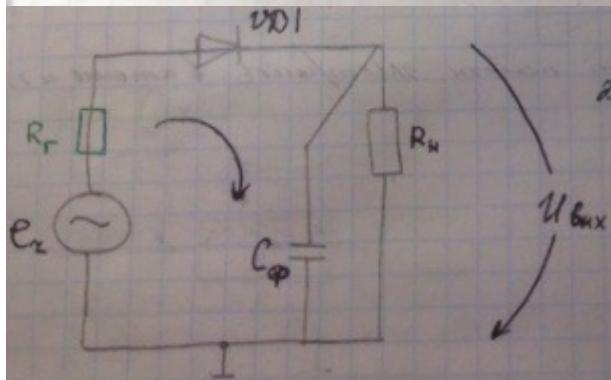
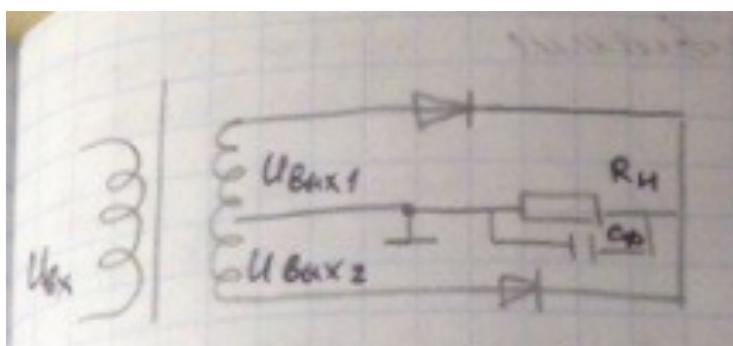
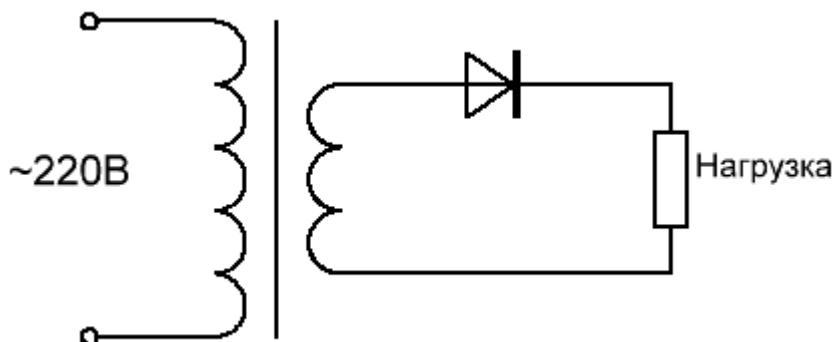
2. **Средний выпрямленный ток диода  $I_{выср}$** - среднее за период значение выпрямленного постоянного тока, протекающего через диод.

3. **Импульсный прямой ток диода  $I_{при}$** - пиковое значение импульса тока при заданной максимальной длительности, скважности и формы импульса.

4. *Средний обратный ток диода* *Ioбрср*- среднее за период значение обратного тока.
5. *Среднее прямое напряжение диода* - среднее прямое напряжение диода за период при заданном значении прямого тока *Uнпрср*.
6. *Средняя рассеиваемая мощность диода* - средняя за период мощность, рассеиваемая диодом при протекании тока в прямом и обратном направлениях.
7. *Дифференциальное сопротивление диода гдиф*- отношение приращения напряжения на диоде к вызвавшему его малому приращению тока.  
?????????

### 11. Привести различные варианты однополупериодных выпрямителей и охарактеризовать их свойства:

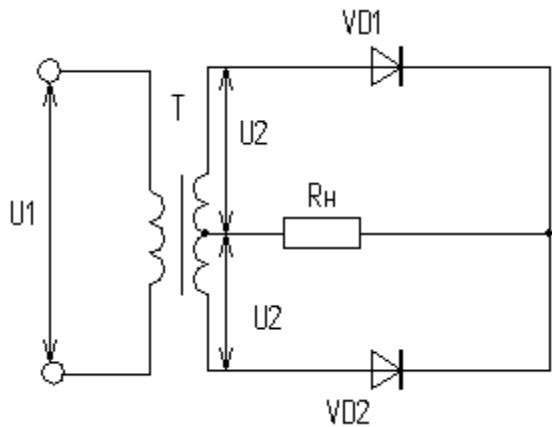
Диоды в схемах выпрямителей включаются по одно- и двухполупериодной схемам. Если взять один диод, то ток в нагрузке будет протекать за одну половину периода, поэтому такой выпрямитель называется однополупериодным. Его недостаток – малый КПД.



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.

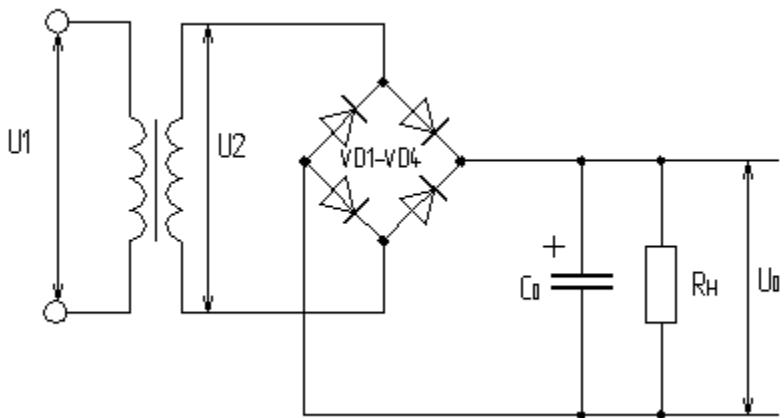
**12. Привести примеры различных двухполупериодных выпрямителей и сравнить их свойства:**



*Рисунок 1 - Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя с выводом от средней точки.*

Достоинствами данной схемы является то, что она имеет лучший коэффициент использования вентилей по току, меньшую расчётную мощность трансформатора, меньший коэффициент пульсации выпрямленного напряжения.

К недостаткам схемы следует отнести: плохое использование вентилей по напряжению, высокое обратное напряжение, прикладываемое к выпрямительным диодам, усложнённая конструкция трансформатора.

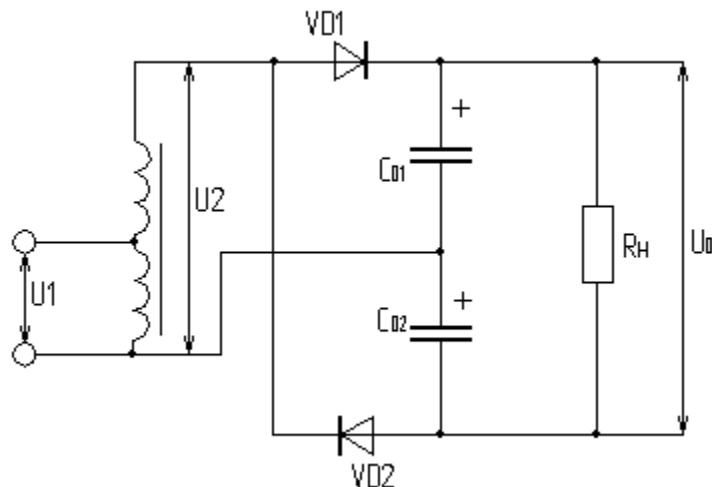


*Рисунок 2 - Схема однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя.*

Главным достоинством мостовой схемы являются: лучший коэффициент использования вентиляй по напряжению, меньшая расчётная мощность трансформатора, благодаря этому мостовая схема широко применяется в установках малой и средней мощности, а также простота конструкции трансформатора.

Недостатками мостовой схемы являются: требуется строгая симметрия напряжений на обмотках, две обмотки вместо одной, большое обратное напряжение на диодах, удвоенное количество диодов по сравнению с выпрямителем со средней точкой. Однако суммарное сопротивление постоянному току двух диодов и обмотки мостового выпрямителя чаще оказывается меньше сопротивления одного диода и обмотки выпрямителя со средней точкой.

### **13. Привести схему выпрямителя с удвоением напряжения и охарактеризовать его свойства.**



*Схема двухполупериодного выпрямителя с удвоением напряжения.*

Данную схему используют, когда трудно намотать многовитковую вторичную обмотку, или когда обмотка имеющегося трансформатора дает недостаточное напряжение. Схема удвоения (как и однополупериодного выпрямителя) имеет круто падающую нагрузочную характеристику. Кроме

того, при пробое одного из диодов переменное напряжение оказывается приложенным к электролитическому конденсатору, что обычно приводит к его взрыву. Достоинством схемы является то, что конденсаторы несколько сглаживают пульсации выпрямленного тока. Недостатком является то, что данную схему нельзя применять для получения выпрямленного напряжения свыше 200-300 В, так как возможен пробой изоляции в кенотроне между катодами и нитью накала.

**14. Какова система параметров диода и как она связана с эквивалентной схемой диода? Любой ли диод можно представить с помощью такой схемы?**

**Основные параметры:**

А) параметры номинального режима

1.  $U_{\text{пр}}$  при заданном  $I_{\text{пр}}$ . У идеального выпрямителя  $U_{\text{пр}}=0$ , у реальных диодов  $U_{\text{пр}}$  равны десятым долям вольта
2.  $I_{\text{обр}}$  при заданном  $U_{\text{обр}}$ . У идеального  $I_{\text{обр}} \approx 0$ , у реальных – от долей микроампера до миллиампер. Задание этих параметров есть задание сопротивлений  $R_{\text{пр}}=U_{\text{пр}}/I_{\text{пр}}$ ;  $R_{\text{обр}}=U_{\text{обр}}/I_{\text{обр}}$
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 50 кГц
4. Параметры, характеризующие температурные зависимости: ТКН ( $\alpha_n=2 \text{ мВ}^{\circ}\text{C}$ ) для  $U_{\text{пр}}$ ,  $\alpha_i, ^\circ\text{C}$  для  $I_{\text{обр}}$ . Для зависимости тока от температуры используются две аппроксимации:  $I_{\text{обр}}(t)=I_{\text{обр}}(20^\circ\text{C})\exp(\Delta t\alpha_i)$ ,  $\alpha_i=11\dots 14^\circ\text{C}$  или  $I_{\text{обр}}(t)=I_{\text{обр}}(20^\circ\text{C}) \cdot 2 \cdot \Delta t^{10}$

Б) предельные эксплуатационные параметры

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

**15. Почему у диодов в качестве предельных эксплуатационных параметров называется  $I_{\text{прср макс}}$  и  $U_{\text{обр макс}}$ ?**

*Предельные эксплуатационные параметры* – значения, которые нельзя превышать, иначе прибор выйдет из строя. Для большинства диодов указываются:

- максимально допустимое постоянное обратное напряжение;
- максимально допустимый постоянный прямой ток;

### **16. Влияет ли на величину выходного напряжения емкость сглаживающего конденсатора, устанавливаемого на выходе выпрямителя? А каково это напряжение?**

Конденсатор С – резервуар энергии. Когда диод открыт и ток протекает через нагрузку, то конденсатор (подсоединен параллельно) заряжается до величины напряжения в цепи. А когда диод закрыт (отрицательная волна синусоиды), благодаря наличию емкости, уровень напряжения не может резко снизиться. Конденсатор постепенно разряжается через нагрузку, таким образом, сглаживая огромные скачки уровня напряжения. Разряжается он до следующей положительной волны, а точнее, когда напряжение на катоде диода превысит напряжение на конденсаторе. И он вновь начнет заряжаться. Такая цикличность действий будет происходить постоянно.

$$C_{\Phi} = 3200 \cdot I_n / U_n \cdot K_n,$$

???

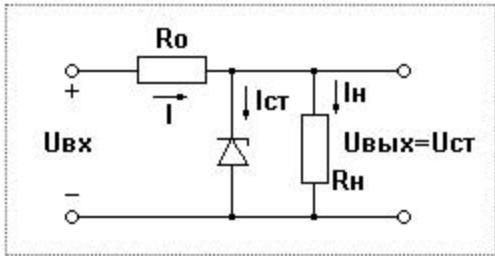
### **17. Стабилитрон. ВАХ. Система параметров, области применения.**

Стабилитрон - полупроводниковый диод, работающий при обратном смещении в режиме пробоя. До наступления пробоя через стабилитрон протекают незначительные токи утечки, а его сопротивление весьма высоко. При наступлении пробоя ток через стабилитрон резко возрастает, а его дифференциальное сопротивление падает до величины, составляющей для различных приборов от долей Ома до сотен Ом. Поэтому в режиме пробоя напряжение на стабилитроне поддерживается с заданной точностью в широком диапазоне обратных токов. Основное назначение стабилитронов — стабилизация напряжения.

Основная область применения стабилитрона — стабилизация постоянного напряжения источников питания. В простейшей схеме линейного параметрического стабилизатора стабилитрон выступает одновременно и источником опорного напряжения, и силовым регулирующим элементом. В более сложных схемах стабилитрону отводится только функция источника опорного напряжения, а регулирующим элементом служит внешний силовой транзистор.

Параметрический стабилизатор представляет собой делитель напряжения, на вход которого подается входное нестабильное напряжение, а выходное стабилизированное напряжение снимается с нижнего плеча делителя.

Схема параметрического стабилизатора напряжений состоит из балластного резистора  $R_o$  (для ограничения тока через стабилитрон), и стабилитрона, подключенного параллельно нагрузке, выполняющий основную функцию стабилизации:



Основным свойством стабилитрона, на базе которого функционирует параметрический стабилизатор напряжения, является то, что  $U$  на нем в рабочем диапазоне (от  $I_{стmin}$  до  $I_{стmax}$ ) остается практически прежним.

Основные параметры стабилитронов.

1. Напряжение стабилизации
2. Максимальный ток стабилизации
3. Минимальный ток стабилизации
4. Дифференциальное сопротивление
5. Температурный коэффициент напряжения стабилизации

## 18. Дать определение коэффициенту стабилизации параметрического стабилизатора напряжения. Какие существуют пути улучшения этого показателя?

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

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

Использование стабилизатора позволяет значительно уменьшить

коэффициент пульсации ( $k_n = \frac{U_{m1}}{U_0}$  - отношение амплитуды первой гармоники к постоянной составляющей),  $R_{вых}$ , а также зависимость  $U_0$  от колебаний напряжения сети и тока нагрузки. Качество стабилизации оценивается коэффициентом стабилизации при постоянном токе нагрузки  $k_{cm} = \frac{\Delta U_{вх.}}{U_{вх.ном.}} / \frac{\Delta U_{вых.}}{U_{вых.ном.}}$  (здесь  $\Delta U_{вых.}$  - приращение  $U_0$  при изменении  $U_{вх.}$  на величину  $\Delta U_{вх.}$ ,  $U_{вх.ном.}$  и  $U_{вых.ном.}$  - номинальные значения напряжений). В параметрическом стабилизаторе (состоит из балластного сопротивления  $R_b$  и

стабилитрона) увеличение балластного сопротивления приводит к увеличению коэффициента стабилизации:

$$k_{cm} = \left( R_b / r_{дин} + 1 \right) \frac{U_{вых.ном.}}{U_{вх.ном.}} \quad (\text{где } r_{дин} - \text{динамическое сопротивление стабилитрона}).$$

С целью увеличения коэффициента стабилизации возможно каскадное включение нескольких параметрических стабилизаторов напряжения.

## **19. Чем определяются высокое быстродействие и хорошие температурные свойства туннельного диода?**

Хорошие температурные свойства объясняются тем, что изменения температуры слабо влияют на статическую характеристику и ее параметры. Это происходит потому, что оба слоя являются вырожденными полупроводниками - полуметаллами.

Высокое быстродействие объясняется тем, что р-п-переход в диоде очень узкий, и барьерная емкость имеет значительную величину. В эквивалентной схеме она подключается параллельно участку обратного сопротивления. Поэтому время переходных процессов очень мало. При этом усиливаемые и генерируемые частоты - сотни и тысячи мегагерц.

## **20. Вариkap. Свойства, режимы работы, области применения.**

Вариkap – это полупроводниковый диод, в работе которого используется

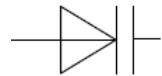


Рис. 31.

Вариkap

зависимость емкости р-п перехода от обратного напряжения. Вариkapы применяются в качестве элементов с электрически управляемой емкостью в схемах перестройки частоты колебательного контура, деления и умножения частоты, частотной модуляции и т.д.

Вариkap можно рассматривать как конденсатор, емкость которого можно регулировать при помощи электрического сигнала. Максимальное значение емкости вариkap имеет при нулевом обратном напряжении. При увеличении обратного напряжения емкость вариkapа уменьшается. На рис показана зависимость емкости вариkapа от приложенного напряжения.

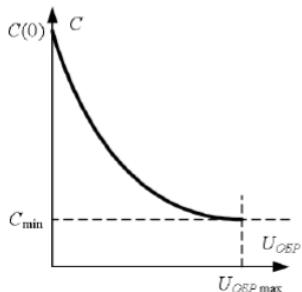


Рис. 32. Зависимость емкости вариkapа от приложенного напряжения

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

$$C(U_{обр}) = C(0) * (\varphi K / (\varphi K + U_{обр}))^{**} (1/m)$$

Где  $U_{обр}$  - приложенное обратное напряжение;  $C(U_{обр})$  - текущая емкость перехода при напряжении  $U_{обр}$ ;  $C(0)$  - емкость при нулевом напряжении на диоде;  $\varphi K$  – контактная разность потенциалов

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

**Основными параметрами варикапа являются:**

- начальная емкость варикапа  $C(0)$ ;
- минимальная емкость при максимальном напряжении  $C_{min}$ ;
- коэффициент перестройки  $K_c = C(0)/C_{min}$
- добротность  $Q$ ;
- максимально допустимое обратное напряжение  $U_{обр max}$ ;
- максимально допустимая мощность  $P_{max}$ ;
- температурный коэффициент емкости  $TKE$ .

## 21. Фотодиод, характеристики, параметры. Режимы работы, области применения.

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

ФД 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  $I_F$ .



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

## 22. В зависимости от способа включения различают два режима работы фотодиода:

- Фотогенераторный (вентильный) (без внешнего источника питания).
  - Фотопреобразовательный (фотодиодный) (с внешним источником питания).
- ФД, 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.

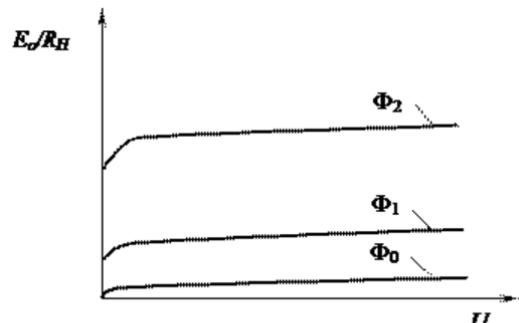
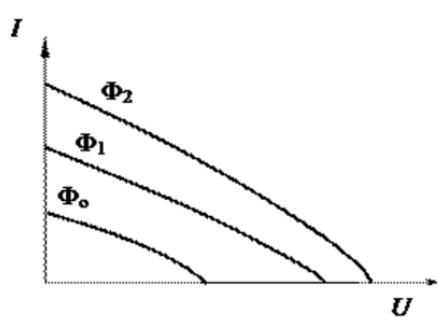
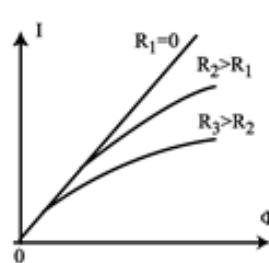
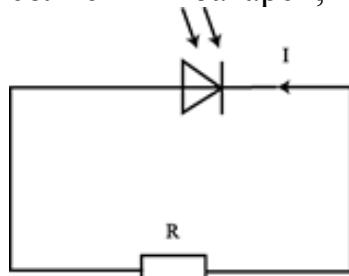
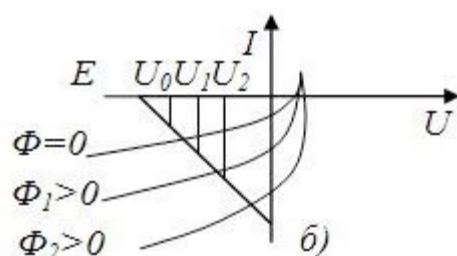
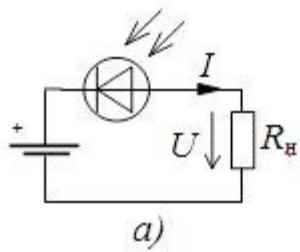


Рис. 4.1.3. Вольт-амперные характеристики фотодиода в режиме фотогенератора

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

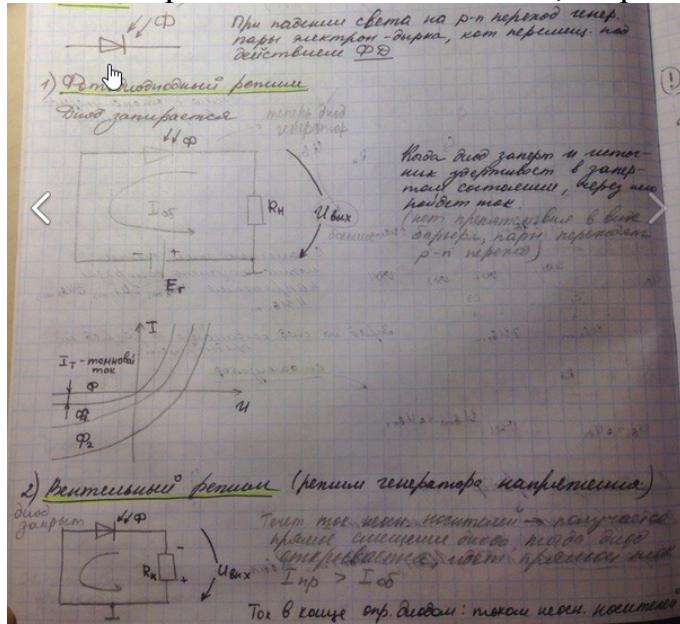
При работе фотодиода в режиме фотопреобразователя, источник питания  $E$  включается в цепь в запирающем направлении (рис. 1, а). Используются обратные ветви ВАХ фотодиода при различных освещенностях



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. Этую 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.



## Биполярные транзисторы

### 23. Биполярный транзистор. Устройство, принцип действия, особенности работы, разновидности, условное графическое изображение.

**Биполярный транзистор** Биполярный же транзистор представляет собой, говоря грубо, два диода с одним общим полупроводником р- или п-типа, т.е. онный содержит 2 р-п перехода, общая часть которых называется **базой**, а две другие - **коллектором и эмиттером**.

## Принцип действия биполярного транзистора

Любой р-п переход транзистора работает аналогично [диоду](#). При приложении к его полюсам разности потенциалов происходит его "смещение". Если приложенная разность потенциалов условно положительна, при этом р-п переход открывается, говорят, что переход смещён в прямом направлении. При приложении условно отрицательной разности потенциалов происходит обратное смещение перехода, при котором он запирается. Особенностью работы транзистора является то, что **при положительном смещении хотя бы одного перехода, общая область, называемая базой, насыщается электронами, или электронными вакансиями** (в зависимости от типа проводимости материала базы), что **обуславливает значительное снижение потенциального барьера второго перехода и как следствие, его проводимость при обратном смещении.**

## Разновидности биполярных транзисторов

Биполярные транзисторы разделяют по различным признакам на виды:

- **По материалу изготовления:** кремний или арсенид галлия.
- **По величине частоты:** до 3 МГц – низкая, до 30 МГц – средняя, до 300 МГц – высокая, более 300 МГц – сверхвысокая.
- **По наибольшей рассеиваемой мощности:** 0-0,3 Вт, 0,3-3 Вт, выше 3 Вт.
- **По типу прибора:** 3 слоя полупроводника с последовательной очередностью типа проводимости.

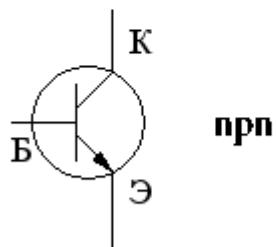
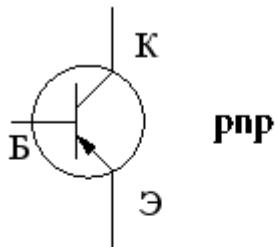
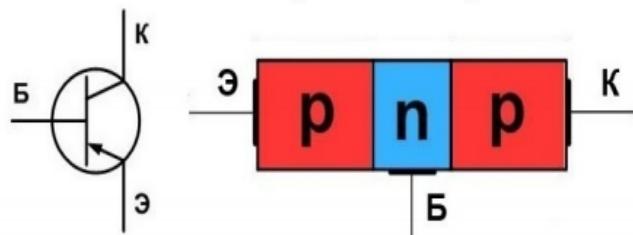


Рис. 2. Условное обозначение биполярного транзистора

Таблица 2. Особенности схем включения транзисторов

Тип соединения	Входное сопротивление	Выходное сопротивление	Усиление по напряжению	Усиление по току	Усиление по мощности
ОБ	Низкое	Высокое	Высокое	< 1	Среднее
ОЭ	Среднее	Среднее	Среднее	Среднее	Высокое
ОК	Высокое	Низкое	< 1	Среднее	Среднее

### PNP транзистор



### NPN транзистор

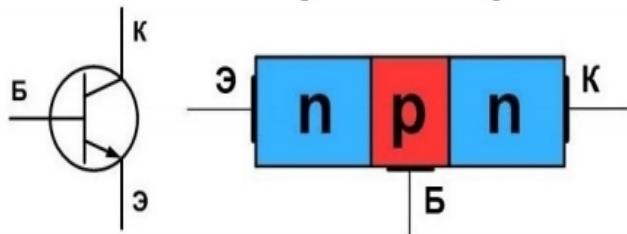
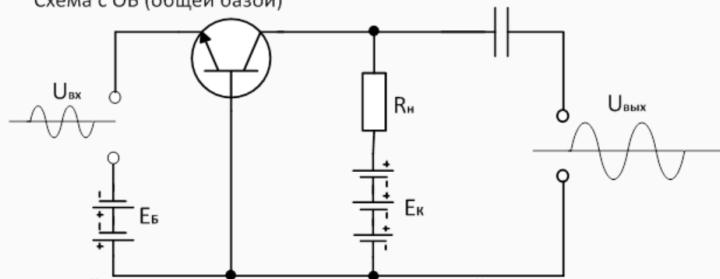


Рис. 5. Устройство биполярного транзистора

## 24. Способы включения биполярного транзистора в схемах

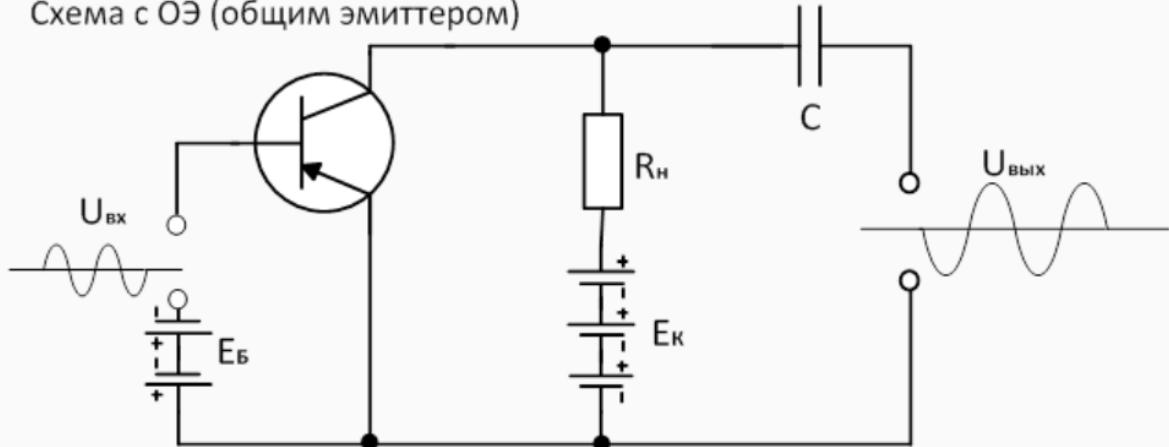
Транзистор имеет три электрода: эмиттер, базу и коллектор. На вход транзистора подводится входной сигнал, а с выхода снимается выходной. Для подачи входного сигнала нужны два электрода, а для снятия — ещё два. Так как электродов у транзистора три, то один из них делают общим для входного и выходного сигналов. Существует несколько способов включения транзистора: схема с общей базой, схема с общим эмиттером, схема с общим коллектором. В каждой из этих схем один из выводов транзистора служит общей точкой, а два других являются входом и выходом.

#### Схема с ОБ (общей базой)



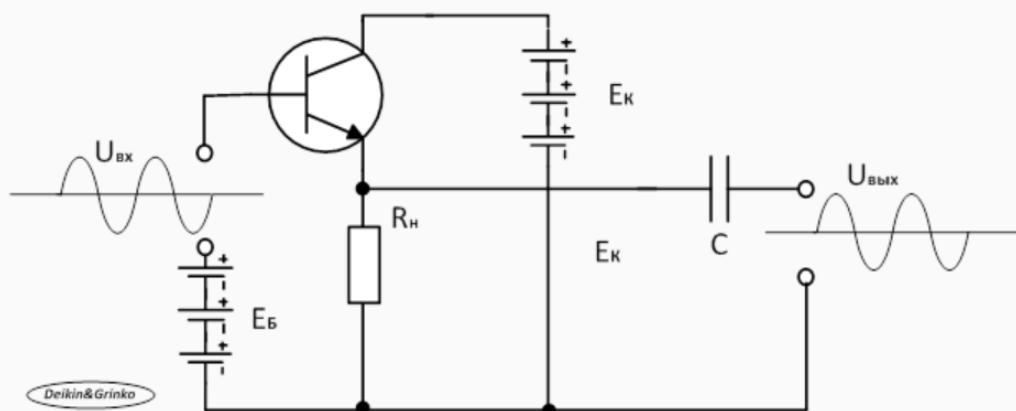
Входной сигнал подается в цепь Э-Б, а выходной получается в цепи К-Б.  
База является общей для входа и выхода.

Схема с ОЭ (общим эмиттером)



Входной сигнал подается в цепь Э-Б, выходной снимается с нагрузки в цепи Э-К. Это наиболее широко применяемая схема.

Схема с ОК (общим коллектором)



Входной сигнал подается в цепь Б-К, а выходной снимается в цепи Э-К. Здесь коллектор является общим для входа и выхода. Служит для согласования входных и выходных сопротивлений каскадов.

Таблица 2. Особенности схем включения транзисторов

Тип соединения	Входное сопротивление	Выходное сопротивление	Усиление по напряжению	Усиление по току	Усиление по мощности
ОБ	Низкое	Высокое	Высокое	< 1	Среднее
ОЭ	Среднее	Среднее	Среднее	Среднее	Высокое
ОК	Высокое	Низкое	< 1	Среднее	Среднее

## 25. Режим работы биполярного транзистора и его свойства в разных режимах

**Усилительный или активный режим** – на эмиттерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный – обратное. Именно этот режим работы транзистора соответствует максимальному значению коэффициента передачи тока эмиттера. Ток коллектора пропорционален току базы, обеспечиваются минимальные искажения усиливаемого сигнала.

**Инверсный режим** – к коллекторному переходу подведено прямое напряжение, а к эмиттерному – обратное. Инверсный режим приводит к значительному уменьшению коэффициента передачи тока базы транзистора по сравнению с работой транзистора в активном режиме и поэтому на практике используется только в ключевых схемах.

**Режим насыщения** – оба перехода (эмиттерный и коллекторный) находятся под прямым напряжением. Выходной ток в этом случае не зависит от входного и определяется только параметрами нагрузки. Из-за малого напряжения между выводами коллектора и эмиттера режим насыщения используется для замыкания цепей передачи сигнала.

**Режим отсечки** – к обоим переходам подведены обратные напряжения. Так как выходной ток транзистора в режиме отсечки практически равен нулю, этот режим используется для размыкания цепей передачи сигналов.

Основным режимом работы биполярных транзисторов в аналоговых устройствах является активный режим. В цифровых схемах транзистор работает в ключевом режиме, т.е. он находится только в режиме отсечки или насыщения, минуя активный режим.

## 26. Привести универсальную эквивалентную схему биполярного транзистора и перечислить его параметры, используемые в этой схеме.

???????

## 27. Какова физическая структура и принцип действия биполярного транзистора

**Биполярный транзистор** представляет собой полупроводниковый элемент, имеющий трехслойную структуру, которая образует два **электронно-дырочных перехода**. Поэтому транзистор можно представить в виде двух встречно включенных **диода**. В зависимости от того, что будет являться основными носителями заряда, различают **p-n-p** и **n-p-n** транзисторы.

### Принцип действия биполярного транзистора

Любой p-n переход транзистора работает аналогично **диоду**. При приложении к его полюсам разности потенциалов происходит его "смещение". Если приложенная разность потенциалов условно положительна, при этом p-n переход открывается, говорят, что переход смещён в прямом направлении. При приложении условно отрицательной разности потенциалов происходит обратное смещение перехода, при котором он запирается. Особенностью работы транзистора является то, что при **положительном смещении хотя бы одного перехода, общая область, называемая базой, насыщается электронами, или электронными вакансиями** (в зависимости от типа проводимости материала базы), что **обуславливает значительное снижение потенциального барьера второго перехода и как следствие, его проводимость при обратном смещении**.

## 28. Чем отличаются эквивалентные схемы для большого и малого сигнала у биполярных транзисторов

На рис. 3 приведены типичные вольтамперные характеристики транзисторов. На рис.3,а изображены характеристики биполярного транзистора при различных значениях тока управления базы. На этих характеристиках можно выделить три области: область насыщения при малых напряжениях между коллектором и эмиттером, активную область и область отсечки (или пробоя) при больших напряжениях между коллектором и эмиттерами.

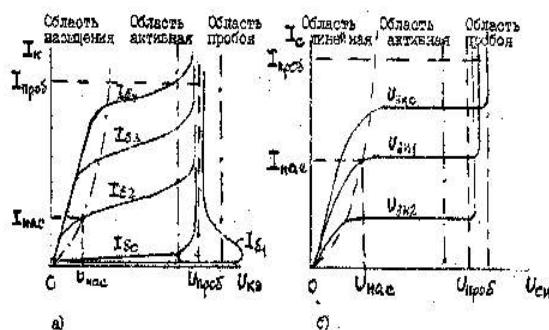


Рис.3

В области насыщения транзистор можно рассматривать как управляемый резистивный элемент с малым значением сопротивления. Эта область характеризуется напряжением  $U_{\text{нас}}$  и током  $I_{\text{нас}}$  насыщения при заданном значении тока  $I_B$  базы. В активной области транзистор можно рассматривать как линейный четырехполюсник, причем наиболее часто для описания биполярного транзистора используют систему Н-параметров четырехполюсника.

В области отсечки или пробоя характерными значениями являются напряжение  $U_{\text{проб}}$  пробоя и ток  $I_{\text{проб}}$ . Напряжение пробоя зависит от тока базы и увеличивается при отрицательном значении тока базы. Длительное пребывание транзистора в области пробоя может привести к повреждению прибора из-за его перегрева.

## 29. Какой параметр биполярного транзистора отражает его усиительные и свойства? Каким образом его можно изменить?

Усилилительные свойства транзистора можно характеризовать тремя параметрами:

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_B}$$

- коэффициентом усиления по току;

$$K_V = \frac{U_{\text{вых}}}{U_B}$$

- коэффициентом усиления по напряжению;

$$K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_B} = K_I \cdot K_V$$

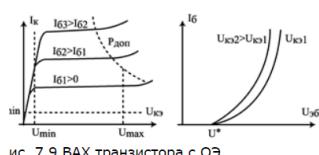
- коэффициентом усиления по мощности,

где  $I_B, I_{\text{вых}}, U_B, U_{\text{вых}}$  - амплитуды или действующие значения входного и выходного переменного токов и напряжений.

Для расчета усиительных свойств во входную цепь транзистора во всех трех схемах включения включается генератор ЭДС для задания переменного входного сигнала, а во выходную цепь - нагрузочный резистор  $R_K$ , на котором выделяется переменный выходной сигнал (см. рис. 3.4-3.6).

## 30. Привести систему ВАХ биполярного транзистора

Биполярный транзистор характеризуется двумя ВАХ, вид которых зависит от схемы включения и типа транзистора – п-р-п или р-п-п-структурой. ВАХ биполярного транзистора п-р-п-структурой в схеме с ОЭ показаны на рис. 7.9. Первое слева семейство характеристик называется **выходными ВАХ**, а второе семейство – **входными характеристиками**. Из выходных ВАХ видно, что ток коллектора  $I_C$  увеличивается при увеличении тока базы  $I_B$ . При увеличении напряжения  $U_{CE}$  ток коллектора сначала растет, а затем становится постоянным. На выходных ВАХ можно выделить пять областей. Область, для которой ток  $I_C < I_{\text{нас}}$  соответствует режиму отсечки. Область, в которой напряжение  $U_{CE} < U_{\text{ди}}$  определяет режим насыщения. Область  $U_{CE} > U_{\text{нас}}$  принадлежит режиму электрического пробоя р-п-перехода. При больших токах и напряжениях мощность электрического сигнала может превысить допустимую. В этом случае при  $P > P_{\text{доп}}$  наступает тепловой пробой, р-п-переходы транзистора разрушаются. Оставшаяся область, ограниченная указанными выше режимами, соответствует активному режиму и обычно является рабочей областью транзистора в усиительном режиме. Также, в ключевых схемах транзистор может работать в режиме насыщения и отсечки.



ис. 7.9 ВАХ транзистора с ОЭ

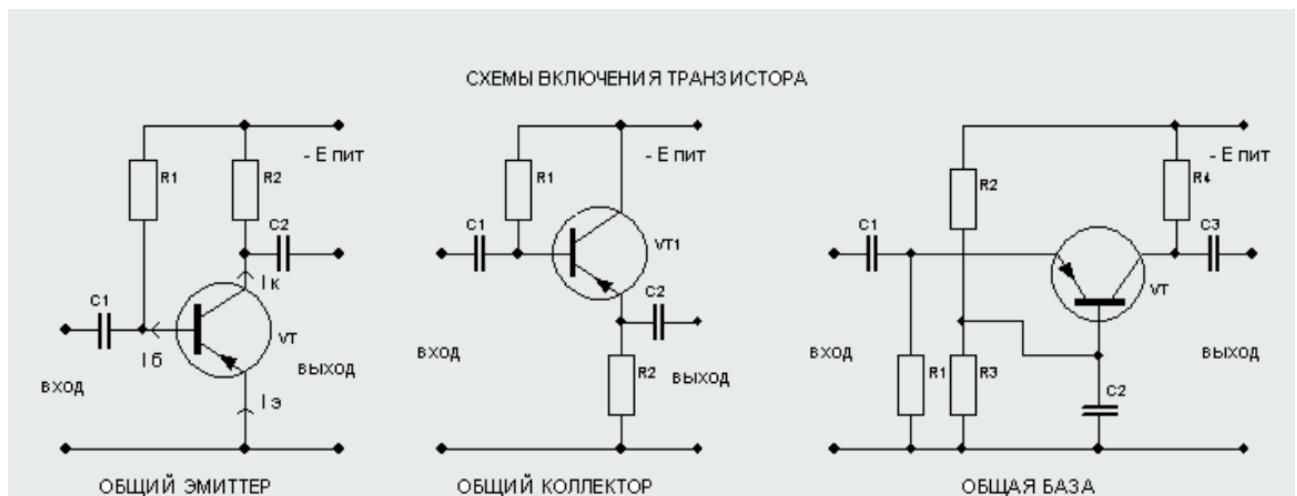
## Усилители на биполярных транзисторах

( Вопросы 31-38 в самом конце файла)

**39. Какой из каскадов ОЭ, ОБ или ОК имеет наименьшее выходное сопротивление и как его вычислить?**

Наименьшее выходное сопротивление имеет каскад с общим коллектором, и вычисляется формулой:

$$R_{\text{выходOK}} = \frac{r_3 \cdot R_1}{r_3 + R_1} \quad , \text{ где } r_3 = \frac{26 \text{ мВ}}{i_3} \quad \text{а } R_1 - \text{входное Сопротивление.}$$



**40. Какой из каскадов ОЭ, ОБ или ОК имеет наибольшее входное сопротивление? Как оно исчисляется?**

Соответственно, наибольшее входное сопротивление имеет транзистор с

Параметры	Сравнительные показатели свойств транзисторов в схемах		
	с общей базой	с общим эмиттером	с общим коллектором
Коэффициенты передачи по току	0,6 — 0,95	Десятки — сотни	Больше, чем в схеме с ОЭ
усиления по напряжению	Тысячи	Меньше, чем в схеме с ОБ	0,7 — 0,99
усиления по мощности	Менее чем на схеме с ОЭ	Большое (тысячи)	Меньше, чем в схеме с ОЭ
Сопротивление:			
входное	Малое (единицы — десятки омов)	Большое (десятки — тысячи омов)	Большое (сотни килоомов)
выходное	Большое (тысячи омов — единицы мегаомов)	Сотни омов, — десятки килоомов	Единицы омов — десятки килоомов
Сдвиг фаз	0°	180°	0°

общим коллектором ( как и в прошлом пункте).

Входное сопротивление у схемы очень большое.  $R_{\text{вх}}$  определяется, как в схеме с ОЭ, параллельным соединением  $R_{\text{Б1}}, R_{\text{Б2}}$  и эквивалентного сопротивления транзистора  $r_{\text{БЭ}} = I_{\text{Б}}/U_{\text{БЭ}}$ . В схеме с ОК такой же, как и в схеме с ОЭ, порядок величин  $I_{\text{Б}}$ , но к тому же мало меняется  $U_{\text{БЭ}}$  (так как при подаче входного переменного сигнала  $f_{\text{Б}}$  и  $f_{\text{Э}}$  изменяются синхронно). Обычно  $R_{\text{вх}}$  схемы с общим коллектором составляет килоомы-десятки килоом.

$$1/R_{\text{вх}} = 1/R_{\text{Б1}} + 1/R_{\text{Б2}} + 1/r_{\text{БЭ}}$$

#### **41. Чем определяются высокочастотные и низкочастотные свойства транзисторного каскада на биполярном транзисторе?**

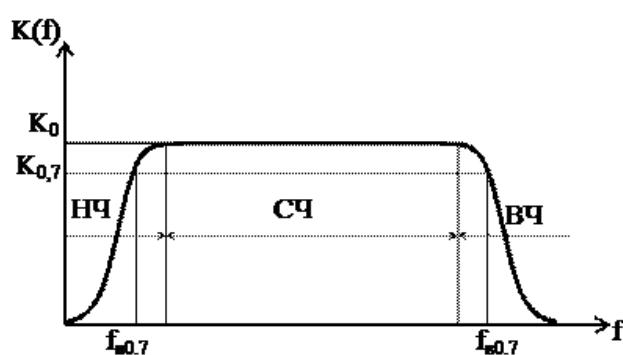


Рис 2.1

Усилильные свойства каскада зависят от частоты. Этую зависимость обычно рассматривают в трех областях; в области низких частот (НЧ), в области средних частот (СЧ) и в области высоких частот (ВЧ). Типичная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усиливального устройства показана на рис.2.1.

Область средних частот является основной рабочей областью. В ней пренебрегают частотной зависимостью коэффициента усиления, считают его равным  $K_0$ . Протяженность и положение областей НЧ, СЧ, ВЧ характеризуют с помощью граничных частот  $f_H$  и  $f_B$ , которые часто определяют по уровню 0,707 от номинального значения  $K_0$  и обозначают  $f_{H0,7}$ ;  $f_{B0,7}$  соответственно.

**Область низких частот.** В области НЧ уменьшение коэффициента усиления определяется тем, что в усиливальном каскаде разделительные и шунтирующие (блокирующие) конденсаторы обладают заметным сопротивлением, в результате чего передаточные свойства каскада имеют заниженное по сравнению с  $K_0$  значение.

**Область высоких частот.** В ВЧ - области снижение усиления обусловлено, с одной стороны, ухудшением усиливательных свойств самого транзистора (уменьшением модуля коэффициента передачи тока  $h_{21}$ ), а с другой – заметным шунтирующим влиянием емкости на выходе каскада.

**42. Если ошиблись в назначении сопротивления резистора  $R_E$  усилительного каскада, то к чему это может привести?**

Резистор в цепи эмиттера  $R_E$  необходим для задания коэффициента усиления, увеличения входного сопротивления и для температурной стабилизации работы усилителя. Отметим, что если не использовать  $R_E$ , коэффициент усиления будет максимальным для данного транзистора, но будет наблюдаться высокая температурная нестабильность.

**43. Если ошиблись в назначении сопротивления резистора  $R_C$  усилительного каскада, то к чему это может привести?**

$R_C$  является нагрузкой усилителя. Т.к. напряжение источника питания  $E_C$  постоянное, изменение коллекторного напряжения равно изменению напряжения на резисторе коллекторной нагрузки, т.е  $U_C = I_C \cdot R_C$ . Из этого выражения видно, что чем больше сопротивление резистора  $R_C$ , тем сильнее изменяется на нем напряжение и тем больше будет усиление. Однако увеличивать сопротивление резистора  $R_C$  можно лишь до некоторого предела, превышение которого может привести даже к снижению усиления и появлению больших искажений усиливаемого сигнала.

**44. Если транзистор имеет большой разброс коэффициента усиления по току  $B$ , то на каких параметрах и как это скажется**

Коэффициент  $B$  транзистора – это коэффициент усиления транзистора по току. Показывает во сколько раз ток коллектора больше тока базы. Для согласованной работы нескольких транзисторов в каскадах, их подбор часто начинают по коэффициенту усиления. Учитывая большой разброс параметров  $B$ , важно точно знать этот параметр у каждого транзистора.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

*Коэффициент усиления зависит не только от тока на входе, но и от температуры.*

**45. Как стабилизируется положение рабочей точки в транзисторном каскаде на биполярном транзисторе**

Как известно, все параметры биполярного транзистора имеют сильную температурную зависимость. Если не предусмотреть специальные схемы стабилизации, то рабочая точка в зависимости от температуры будет передвигаться, что может привести к выходу ее за пределы рабочей области характеристики.

Широкое применение находят **коллекторная и эмиттерная** схемы стабилизации режимов работы транзисторов. Надо отметить, что все схемы стабилизации реализованы с использованием **отрицательной обратной связи** по постоянному току.

**Коллекторная:** При повышении температуры увеличивается ток коллектора, следовательно, возрастает падение напряжения на сопротивлении нагрузки, вследствие чего уменьшается потенциал коллектора. Это приводит к уменьшению напряжения смещения, следовательно, к уменьшению тока коллектора.

**Эмиттерная:** Стабилизация осуществляется введением в схему последовательной отрицательной обратной связи (OOC) по постоянному току. Для этого в схему усиительного каскада в цепь эмиттера добавлен резистор  $R_E$ . Обратная связь представляет собой процесс подачи выходного напряжения усиительного каскада на его вход.

## 46. Влияет ли коэффициент усиления по току В на коэффициент усиления по напряжению в каскадах на биполярных транзисторах?

Коэффициент усиления транзистора по току – отношение изменения соответствующего показателя в цепи коллектора и в цепи базы.

Для схем с общей базой этот коэффициент обозначается буквой  $\alpha$  ( $h_{fB}$  или  $h_{21B}$ ), с общим эмиттером буквой  $\beta$  ( $h_{fE}$  или  $h_{21E}$ ).

Рассмотрим три каскада:

$$1) \text{ Каскад с ОЭ: } K_u = \frac{B * R_K || R_n}{r_3 * (B+1) + r_b}, \text{ если } r_b \text{ мало, то } K_u = \frac{R_K || R_n}{r_3}$$

Т.о.  $K_u$  не зависит от  $B$ , где  $B = \frac{I_K}{I_B}$

$$\text{Пусть } R_n \rightarrow \infty \text{ (} R_r = 0 \text{): } K_u = \frac{R_K}{r_3}, r_3 = \frac{\varphi T}{I_E \text{раб.точки}}$$

$$\text{Т.к } \alpha = \frac{B}{B+1} \Rightarrow K_u = \frac{\alpha * R_K * I_E \text{раб.точки}}{\varphi T} = \frac{R_K I_K}{\varphi T} = \frac{E_K}{2 * \varphi T}.$$

### 2) Каскад с ОБ:

если  $r_b$  мало, то

$$K_U = \frac{B * R_{kn}}{r_e * (B+1)} \approx \frac{R_{kn}}{r_e}$$

Не зависит от  $B$ .

$$K_{IO} = \frac{R_E * \alpha * R_{kn}}{R_E + \frac{R_{in,tr.}}{(B+1)}}$$

$$\frac{R_E}{(B+1)} = \frac{r_b}{(B+1)} + r_e \approx r_e \rightarrow 0$$

следовательно:

$$K_{IO} = \frac{R_E * \alpha * R_{kn}}{R_E + 1}$$

### 3) Каскад ОК (всё аналогично):

$$K_U = \frac{R_{En} * (B+1)}{r_b + r_e * (B+1) + R_{En} * (B+1)} \approx \frac{R_{En}}{r_e + R_{En}}$$

следовательно не зависит от  $B$ .

$$\begin{aligned} K_{IOK} &= \frac{R_b * (B+1) * R_e}{[R_b + R_{in,tr.} + R_{En} * (B+1)] * (R_e + R_n)} = \\ &= \frac{R_b * (B+1) * R_e}{(B+1)[\frac{R_b+r_b}{B+1} + r_e + R_{En}] * (R_e + R_n)} = \frac{R_b * R_e}{(r_E + R_{En})(R_E + R_n)} \end{aligned}$$

**4. Почему у транзисторных каскадов ОЭ и ОБ одинаковые коэффициенты усиления по напряжению?**

**Каскад ОЭ (каскад с общим эмиттером)** – каскад, у которого входной сигнал подаётся на базу, а снимается с коллектора. При этом выходной сигнал инвертируется относительно входного (для гармонического сигнала фаза выходного сигнала отличается от входного на  $180^\circ$ ). Каскад усиливает и ток, и напряжение.



Рисунок 1.21 - Каскад с общим эмиттером

**Анализ схемы:**  $C_{p1}, C_{p2}$  – разделительно – связующие конденсаторы, необходимые чтобы исключить влияние нагрузки и источника сигнала на режим работы каскада по постоянному току.

**Описание элементов:**  $R1, R2$  – сопротивления по переменному току, подключенные параллельно между базой и эмиттером.

$R_k, R_h$  – сопротивления, подключенные параллельно между коллектором и эмиттером.

$r_b, r_e, r_k(\beta)$  – дифференциальное сопротивление базы, эмиттерного, коллекторного перехода.

$\beta * I_6$  – эквивалентный источник тока,  $C_k(\beta)$  – емкость коллекторного перехода.

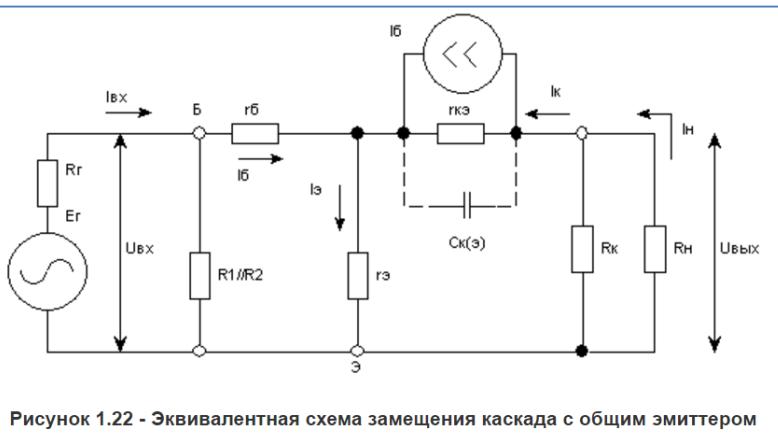


Рисунок 1.22 - Эквивалентная схема замещения каскада с общим эмиттером

**1) Входное сопротивление каскада ОЭ:**  $R_{bx} = (R1||R2||r_{bx})$

**2) Для входной цепи можно записать:**  $U_{бэ} = I_6 r_b + I_e r_e$ .

Если учесть, что  $I_e = (\beta + 1)I_6$ , то  $U_{бэ} = I_6 [r_b + (\beta + 1)r_e]$

**3) Входное сопротивление транзистора:**  $\frac{U_{бэ}}{I_6} = r_{bx} = r_b + r_e(\beta + 1)$

**4) Коэффициент усиления по току  $K_i$ :**  $K_i = \frac{I_H}{I_{bx}}$

Из схемы замещения:  $I_6 r_{bx} = I_{bx} R_{bx}$ ,  $I_{bx} = I_6 \frac{r_{bx}}{R_{bx}}$ . Ток нагрузки находим путем

анализа выходной эквивалентной схемы (т.к.  $r_e$  весьма мало), то  $I_H R_h = \beta I_6 (r_{k_e} || R_k || R_h) \Rightarrow I_H = \beta I_6 \frac{(r_{k_e} || R_k || R_h)}{R_h}$

$$\Rightarrow K_i = \beta \frac{R_{bx}}{r_{bx}} * \frac{R_k || R_h}{R_h}$$

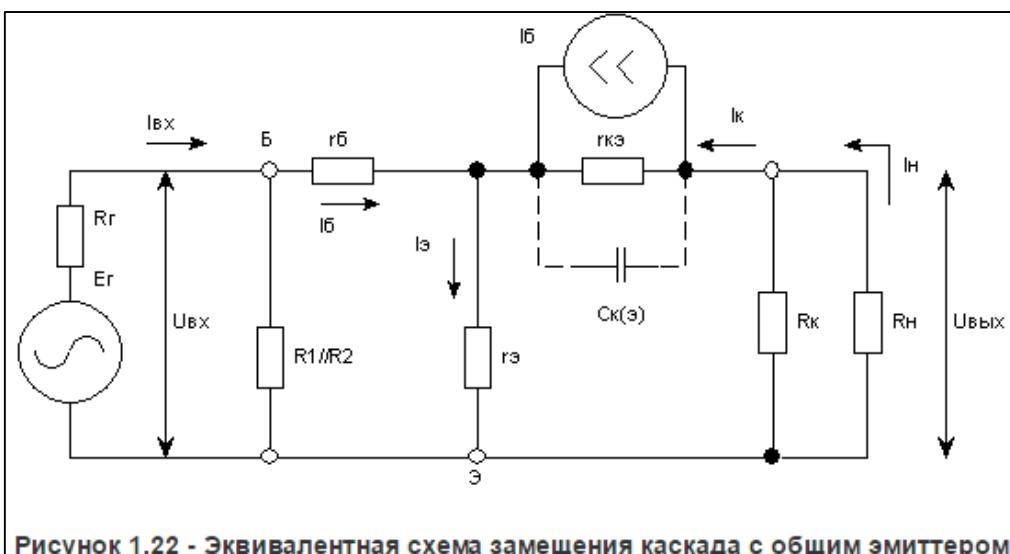
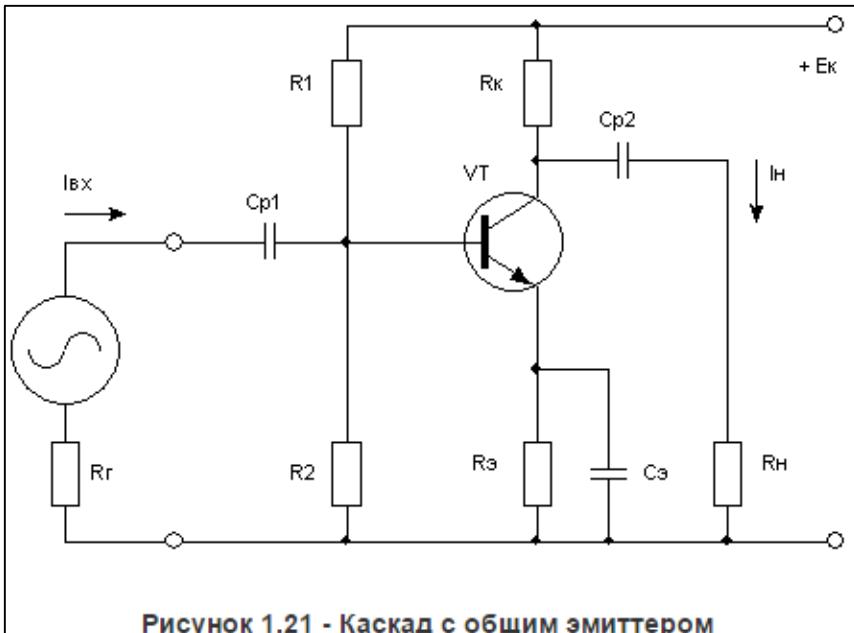
Таким образом, коэффициент усиления по току каскада с общим эмиттером пропорционален коэффициенту  $\beta$  транзистора, зависит от шунтирующего действия входного делителя и величины сопротивлений  $R_k, R_h$ . Для ориентировочной оценки  $K_i$  можно принять  $R_{bx} \approx r_{bx}$ , тогда коэффициент усиления по току:  $K_i = \beta * \frac{R_k || R_h}{R_h}$ , т.е. он довольно велик и стремится в пределе к коэффициенту усиления транзистора  $\beta$  при  $R_k \parallel R_h$ .

**4) Коэффициент усиления по напряжению схемы ОЭ:**  $K_u = \frac{U_{вых}}{E_r} = \frac{I_H R_h}{I_{bx}(R_r + R_{bx})} = K_i \frac{R_h}{R_r + R_{bx}}$

Коэффициент усиления каскада по напряжению тем больше, чем выше коэффициент  $\beta$  транзистора и сопротивление выходной цепи по сравнению с сопротивлением входной цепи. В частности, коэффициент усиления по напряжению возрастает с уменьшением внутреннего сопротивления источника сигнала.

5. А у какого каскада ОЭ или ОК больше коэффициент усиления по току (каскады состоят из одинаковых деталей)?

5.1. Каскад с общим эмиттером.



Коэффициент усиления по току:  $K_i = \frac{I_H}{I_{BX}}$ . Из эквивалентной схемы замещения:  $I_B r_{BX} = I_{BX} R_{BX} \Rightarrow I_{BX} = \frac{I_B r_{BX}}{R_{BX}}$ . Ток нагрузки может быть найден путем анализа выходной цепи эквивалентной схемы рис. 1.22. Так как сопротивление  $r_E$  весьма мало по сравнению с сопротивлениями элементов выходной цепи, можно записать:  $I_H R_H = I_B (r_{k(E)} || R_K || R_H)$  и  $I_H = I_B \beta \frac{r_{k(E)} || R_K || R_H}{R_H}$ . Таким образом, коэффициент усиления по току каскада с общим эмиттером пропорционален коэффициенту  $\beta$  транзистора, зависит от шунтирующего действия входного делителя и величины сопротивлений  $R_K, R_H$ . Для ориентировочной оценки  $K_i$  можно принять  $R_{BX} \approx r_{BX}$ , тогда коэффициент усиления по току:  $K_i = \beta \frac{R_K || R_H}{R_H}$  т.е. он довольно велик и стремится в пределе к коэффициенту усиления транзистора  $\beta$  при  $R_K || R_H$ .

## 5.2. Каскад с общим коллектором.

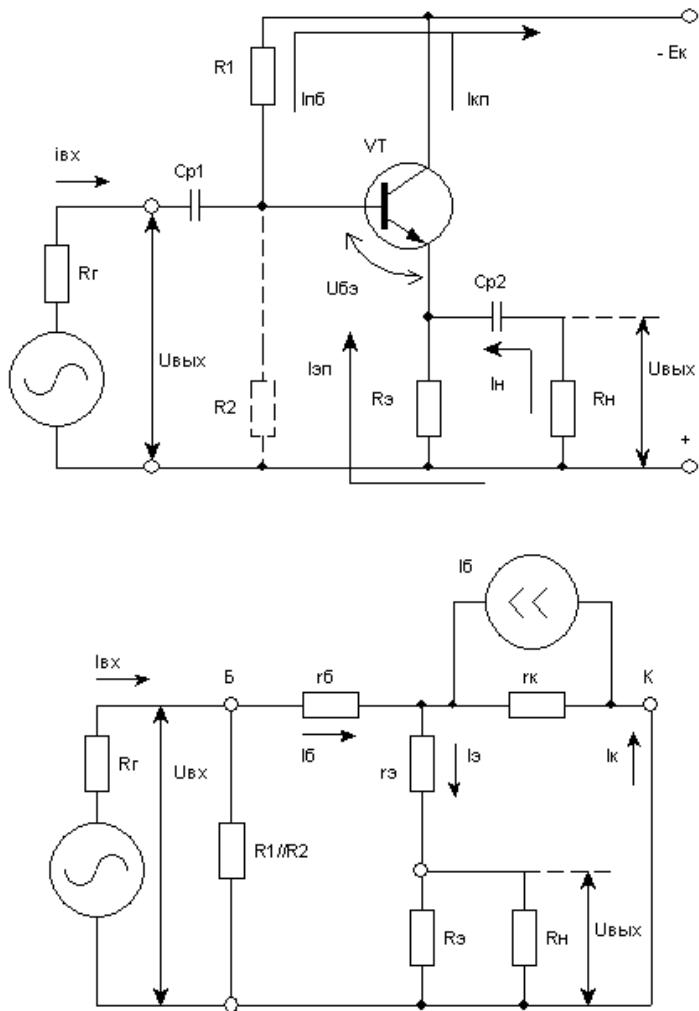


Рисунок 1.23 - Схема усилительного каскада ОК (а) и его схема замещения (б)

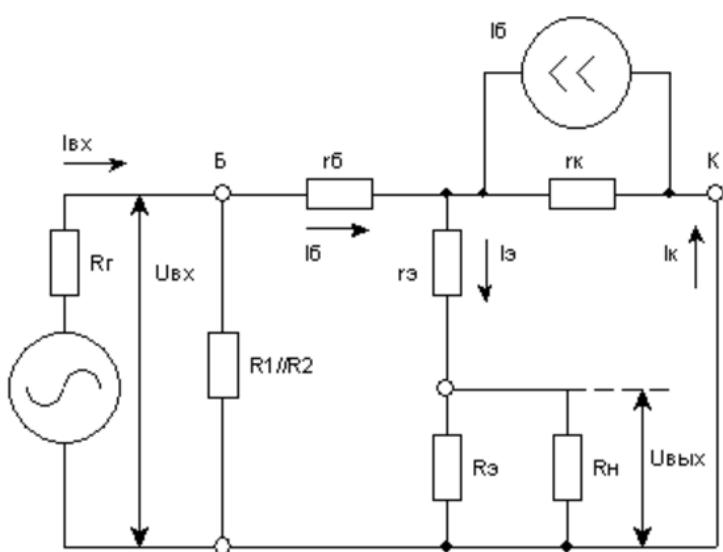
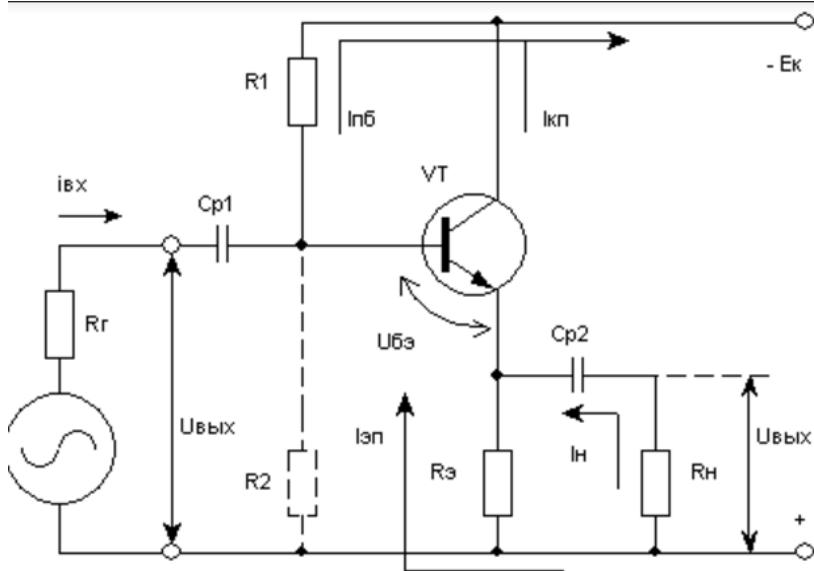
Коэффициент усиления по току можно определить, используя эквивалентную схему замещения, аналогично каскаду ОК  $K_i = \frac{I_H}{I_{BX}}$ . Ток нагрузки является частью эмиттерного тока транзистора, поэтому:  $I_H R_H = I_E (R_e || R_H)$ , откуда:  $I_H = (1 + \beta) I_6 \frac{R_e || R_H}{R_H}$ . Выразив аналогично

схеме ОЭ ток базы через входной ток каскада получаем:  $I_B = I_{BX} (1 + \beta) \frac{R_{BX} R_e || R_H}{r_{BX} R_H}$ . Разделив левую и правую часть уравнения на  $I_{BX}$  имеем:  $K_i = (1 + \beta) \frac{R_{BX} R_e || R_H}{r_{BX} R_H}$ , т.е. коэффициент усиления каскада ОК зависит от соотношений  $R_{BX}$  и  $r_{BX}$ , а также  $R_e$  и  $R_H$ .

Если предположить, что  $R_{BX} \approx r_{BX}$ , имеем:  $K_i = (1 + \beta) \frac{R_e || R_H}{R_H}$ . Таким образом, каскад ОК обеспечивает усиление по току, причем при  $R_e = R_H$  и одинаковых значениях  $R_H$  коэффициенты усиления по току в схемах ОК и ОЭ примерно одинаковы.

## 6. Почему усилительный каскад ОК не может иметь коэффициент усиления по току больше 1?

Каскад с общим коллектором (ОК) – схема подключения, при которой, напряжение питания подаётся на коллектор, входной сигнал подаётся на базу, а выходной сигнал снимается с эмиттера. Нагрузка подключается в цепь эмиттера, входным напряжением является напряжение между базой и корпусом, выходным напряжением – между эмиттером и корпусом.



Коэффициент усиления по току можно определить, используя эквивалентную схему замещения, аналогично каскаду ОК  $K_i = \frac{I_H}{I_{BX}}$ . Ток нагрузки является частью эмиттерного тока транзистора, поэтому:  $I_H R_H = I_E (R_E || R_H)$  откуда:  $I_H = (1 + \beta) I_B \frac{R_E R_H}{R_H}$ . Выразив аналогично схеме ОЭ ток базы через входной ток каскада получаем:  $I_H = I_{BX} (1 + \beta) \frac{R_{BX} R_E || R_H}{r_{BX} R_H}$ . Разделив левую и правую часть уравнения на  $I_{BX}$  имеем:  $K_i = (1 + \beta) \frac{R_{BX} R_E || R_H}{r_{BX} R_H}$ , т.е. коэффициент усиления каскада ОК зависит от соотношений  $R_{BX}$  и  $r_{BX}$ , а также  $R_E$  и  $R_H$ . Если предположить, что  $R_{BX} \approx r_{BX}$ , имеем:

$$K_i \approx (1 + \beta) \frac{R_E || R_H}{R_H}$$

Таким образом, каскад ОК обеспечивает усиление по току, причем при  $R_E = R_H$  и одинаковых значениях  $R_H$  коэффициенты усиления по току в схемах ОК и ОЭ примерно одинаковы.

7. Почему усилительный каскад ОБ имеет коэффициент усиления по току меньше 1?

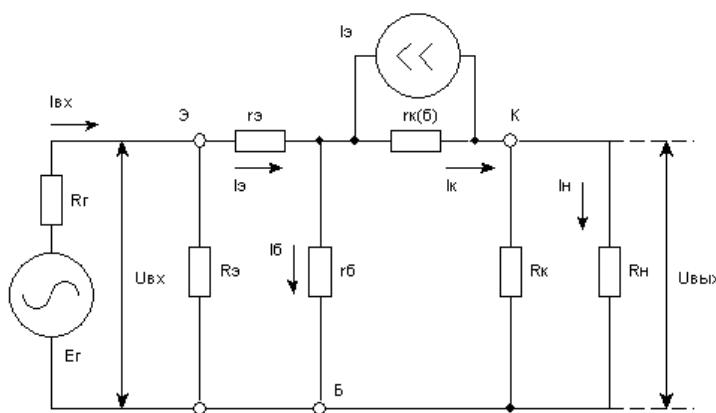
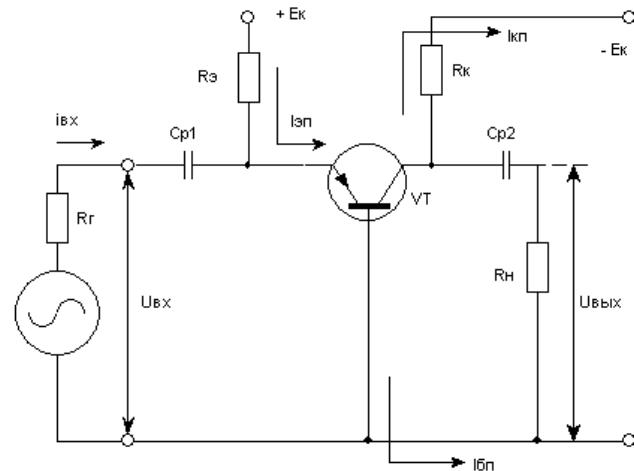
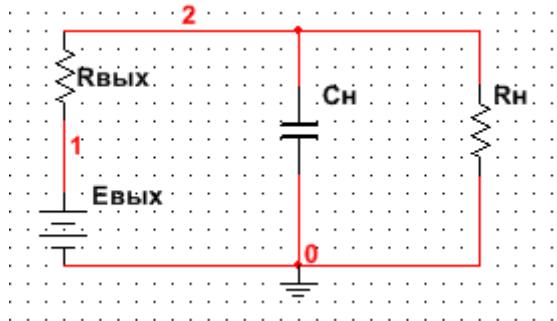


Рисунок 1.24 - Схема усилительного каскада с общей базой(а) и его схема замещения (б)

Коэффициент усиления по переменному току можно найти, исходя из того, что  $I_{\text{вх}} \approx I_{\text{Э}}$  (т.к.  $R_{\text{вх}} \approx r_s$ ) и  $I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{Э}}$ . Так как коллекторный ток делится между  $R_{\text{к}}$  и  $R_{\text{h}} \Rightarrow K_i \approx \frac{R_{\text{к}}||R_{\text{h}}}{R_{\text{h}}}$ , где  $R_{\text{h}}$  значительно больше чем  $R_{\text{к}}$ , а  $\alpha \approx 0,9 \div 0,9999 \Rightarrow K_i < 1$

**9. Могут ли каскады ОБ и ОЭ иметь одинаковые верхние граничные частоты?**

О частотных свойствах транзистора судят по граничной частоте  $f_\alpha$ , при которой коэффициент передачи уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз. Частота  $f_\alpha$  входит в число основных параметров транзистора и определяет его частотные свойства. При этом схема включения транзистора с общей базой имеет максимальную граничную частоту. Что касается схемы с общим эмиттером, то граничная частота:  $f_\beta = \frac{f_\alpha}{1+\beta}$ , т.е. частотные свойства схемы с общим эмиттером значительно хуже.



ВЧ:

$\tau_B = G_{(0\Theta/0B)}(\tau_B + C_{K\Theta}R_{KH}) + C_H R_{KH}$ , где  $C_{K\Theta}R_{KH}$  – инерционность эмиттерного перехода,  $C_H R_{KH}$  - инерционность коллекторного перехода.

$G_{0\Theta} = \frac{R'_\Gamma + r_6 + r_3}{R'_\Gamma + r_6 + r_3(1+B)}$  и  $G_{0B} = \frac{R'_\Gamma + r_6 + r_3}{R'_\Gamma(B+1) + r_6 + r_3(1+B)}$ . Если  $R'_\Gamma \rightarrow \infty$ , то  $G_{0\Theta} = 1$ ,  $G_{0B} = \frac{1}{1+B}$ .

Если  $R'_\Gamma \rightarrow 0$ , то  $G_{0\Theta} = \frac{1}{1+B}$ ,  $G_{0B} = \frac{1}{1+B}$ .  $G$  принимает значения  $0.2 \div 0.5$  и 1. Когда  $G$  равно 1, то это плохо влияет на схему на ВЧ. Поэтому частотные свойства схемы с общим эмиттером значительно хуже.

**8. Какому каскаду и почему следует отдать предпочтение при желании иметь в нагрузке максимальную мощность?**

Так как коэффициент усиления по мощности – это произведение коэффициента усиления по току и коэффициента усиления по напряжению ( $K_p = K_i K_u$ ), а коэффициенты усиления по напряжению и току имеют максимальное значение у каскада с ОЭ, то в случае, если мы хотим иметь максимальную мощность, то мы должны использовать именно его.

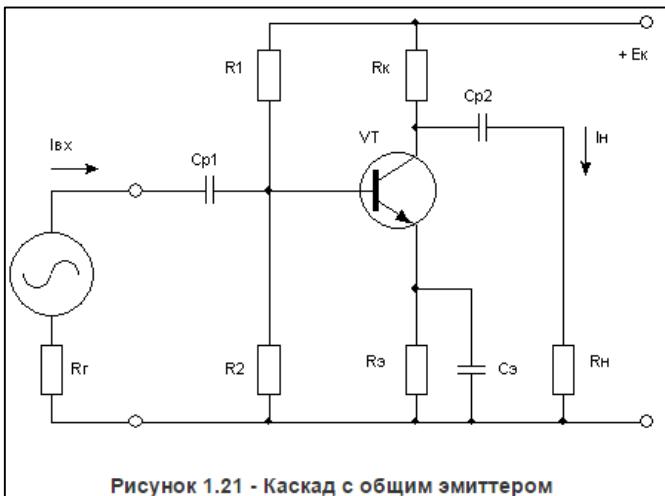


Рисунок 1.21 - Каскад с общим эмиттером

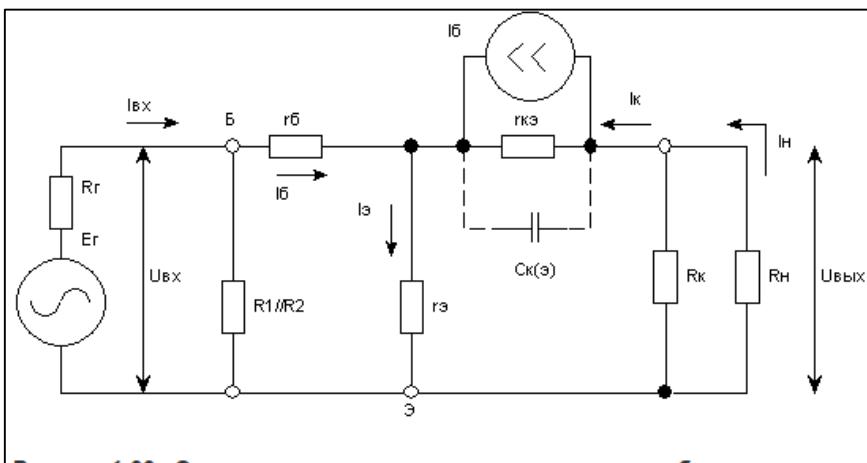


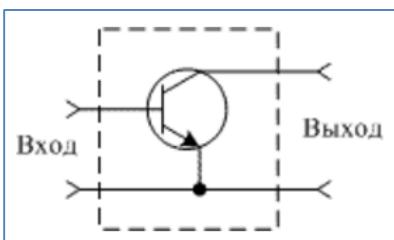
Рисунок 1.22 - Эквивалентная схема замещения каскада с общим эмиттером

$$K_i = \beta \frac{R_K || R_H}{R_H}$$

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{E_r} = \frac{I_H R_H}{I_{\text{вх}}(R_r + R_{\text{вх}})} = K_i \frac{R_H}{R_r + R_{\text{вх}}}$$

**10. Какой из трех каскадов ОЭ, ОБ или ОК, и при каких условиях, будет иметь по отношению к другим самую большую верхнюю граничную частоту?**

**1) ОЭ (функциональная схема):**



Наиболее распространенной схемой включения транзистора является схема с общим эмиттером (ОЭ). Это связано с наибольшим усилением этой схемы по мощности. Схема с общим эмиттером обладает усилением, как по напряжению, так и по току

АЧХ схемы с общим эмиттером, то в данном включении транзистора верхняя частота усиления будет минимальная по сравнению с остальными схемами включения транзистора. Верхняя частота усиления транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, ограничена частотой  $f_\beta$  ( $f_{h21\beta}$ ).

**2) ОБ (функциональная схема):**

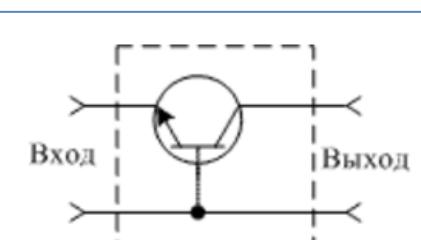


Схема с общей базой обычно применяется на высоких частотах. Коэффициент усиления по мощности данной схемы включения транзистора меньше по сравнению со схемой с общим эмиттером. Это связано с тем, что схема включения транзистора с общей базой не усиливает по току. В данной схеме производится усиление только по напряжению.

АЧХ схемы с общей базой — самая широкополосная из всех схем включения транзистора, поэтому она широко используется в высокочастотных усилителях радиочастоты.

Частотная характеристика схемы с общей базой ограничивается предельной частотой усиления транзистора  $f_a$  ( $f_{h21\alpha}$ ).

**3) ОК (функциональная схема):**

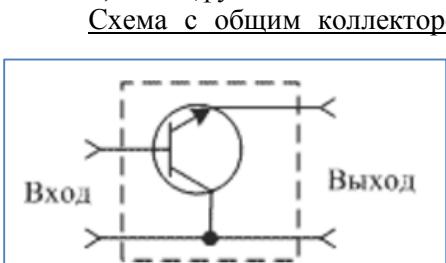


Схема с общим коллектором обычно применяется для получения высокого входного сопротивления. Коэффициент усиления по мощности данной схемы включения транзистора меньше по сравнению со схемой с общим эмиттером и соизмерим с коэффициентом усиления схемы с общей базой. Это связано с тем, что схема включения транзистора с общим коллектором не усиливает по напряжению. В данной схеме производится усиление только по току.

АЧХ схемы включения транзистора с общим коллектором достаточно широкополосна. Однако полоса пропускания усилителя может быть серьёзно ограничена из-за шунтирования высокого входного сопротивления схемы с общим коллектором паразитными емкостями, поэтому в основном схема с общим коллектором применяется в качестве буферного усилителя с высоким входным сопротивлением. Иногда она применяется для ослабления влияния нагрузки на характеристики высокочастотных генераторов и синтезаторов частоты.

**11. Чем принципиально отличаются усилительные каскады на биполярных и униполярных транзисторах?**

- 1) В биполярном транзисторе, в отличие от полевого транзистора, используются заряды одновременно двух типов, носителями которых являются электроны и дырки. Протекание в полевом транзисторе рабочего тока обусловлено носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), поэтому такие приборы часто включают в более широкий класс униполярных электронных приборов (в отличие от биполярных).
- 2) Биполярный транзистор управляет током, а униполярный – напряжением.
- 3) Униполярные транзисторы имеют значительно большие входные сопротивления, что связано с обратным смещением р-п-перехода затвора в рассматриваемом типе полевых транзисторов.