

ЭЛЕКТРОНИКА

Лектор:

к.ф.-м.н. Алимгазинова Назгуль Шакаримовна

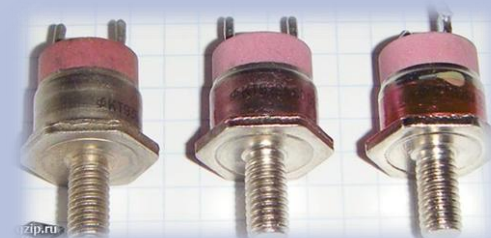
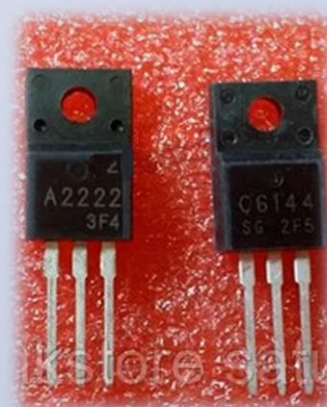
ТРАНЗИСТОРЫ

Транзистор (англ. transistor), полупроводниковый триод — радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала, обычно с тремя выводами, позволяющий входным сигналом управлять током в электрической цепи.



В 1947 году Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн в лабораториях Bell Labs впервые создали действующий биполярный транзистор

*Первый в мире
полупроводниковый транзистор
на прижимном контакте*



Современные транзисторы

КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

ТРАНЗИСТОРЫ по структуре:

Биполярные

p-n-p

n-p-n



Полевые

С p-n затвором

С каналом n типа

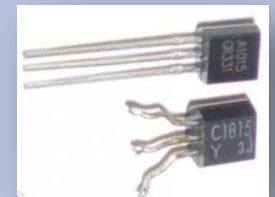
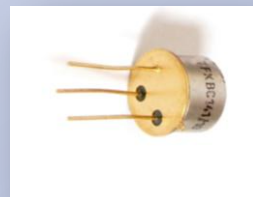
С каналом p типа

С плавающим затвором

С изолированным
затвором

С индуцированным
каналом

Со встроенным
каналом



- Усилительный режим
- Режим ключа
- Режим хранения заряда

Различия в работе транзисторов



$$\text{Большой ток} = \text{Маленький ток} * \text{Коэффициент усиления}$$

Принцип действия
биполярного транзистора



Принцип действия
полевого транзистора

КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

По материалу

германиевые (в настоящее время не производятся)

кремниевые (наиболее широко представленный класс)

из арсенида галлия (в основном СВЧ транзисторы) и др.

По мощности

транзисторы малой мощности (условно $P_{max} < 0,3 \text{ Вт}$)

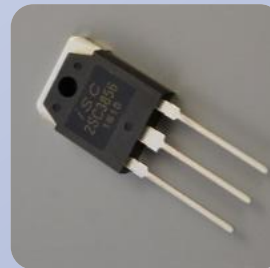
транзисторы средней мощности ($0,3 < P_{max} < 1,5 \text{ Вт}$)

мощные транзисторы ($P_{max} > 1,5 \text{ Вт}$)

По максимальному выходному напряжению

транзисторы общего применения ($< 100 \text{ В}$)

высоковольтные транзисторы ($> 100 \text{ В}$)



КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

По частоте

низкочастотные транзисторы (< 3 МГц)

среднечастотные транзисторы ($3 < f_{cp} < 30$ МГц)

высокочастотные транзисторы ($30 < f_{cp} < 300$ МГц)

сверхвысокочастотные транзисторы ($f_{cp} > 300$ МГц)

По исполнению корпуса

Дискретные транзисторы

Корпусные

Бескорпусные

Для свободного монтажа

Для установки на радиатор

Для автоматизированных систем пайки

Транзисторы в составе интегральных схем

По шумовым характеристикам

транзисторы с ненормированным коэффициентом шума

транзисторы с нормированным коэффициентом шума

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Биполярный транзистор (БТ) - полупроводниковый элемент с двумя электронно-дырочными переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических сигналов.



Используются оба типа носителей заряда (*электроны и дырки*):

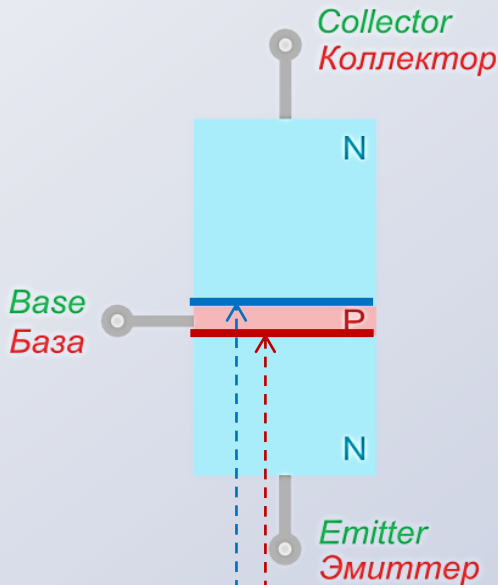
- **Основные.**
- **Неосновные.**

Поэтому его называют *биполярным*.

Физическая модель БТ

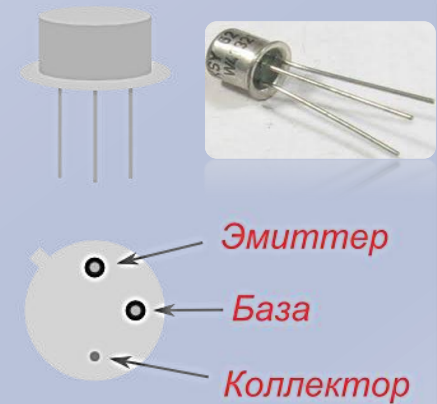
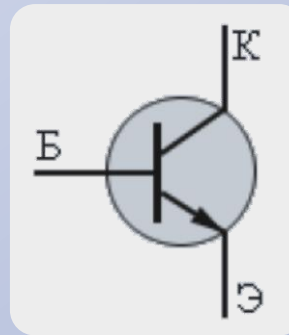
Биполярный транзистор состоит из трех областей монокристаллического полупроводника с разным типом проводимости:

1. **База (Б)** - область транзистора, расположенная между переходами.
2. **Эмиттер (Э)** - область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей в базу.
3. **Коллектор (К)** - область, основным назначением которой является экстракция носителей из базы.



Переход, который образуется на границе

- **эмиттер-база - эмиттерный (ЭП),**
- **база-коллектор - коллекторный (КП).**

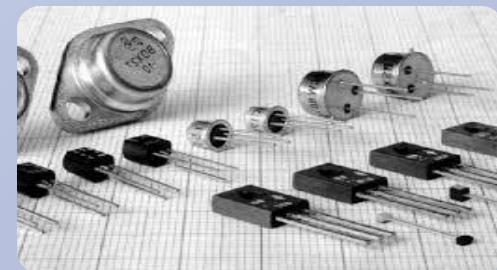
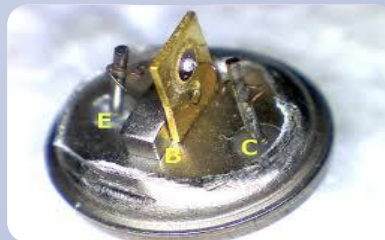
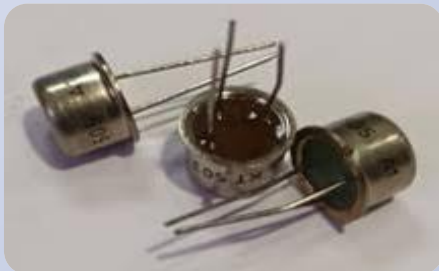
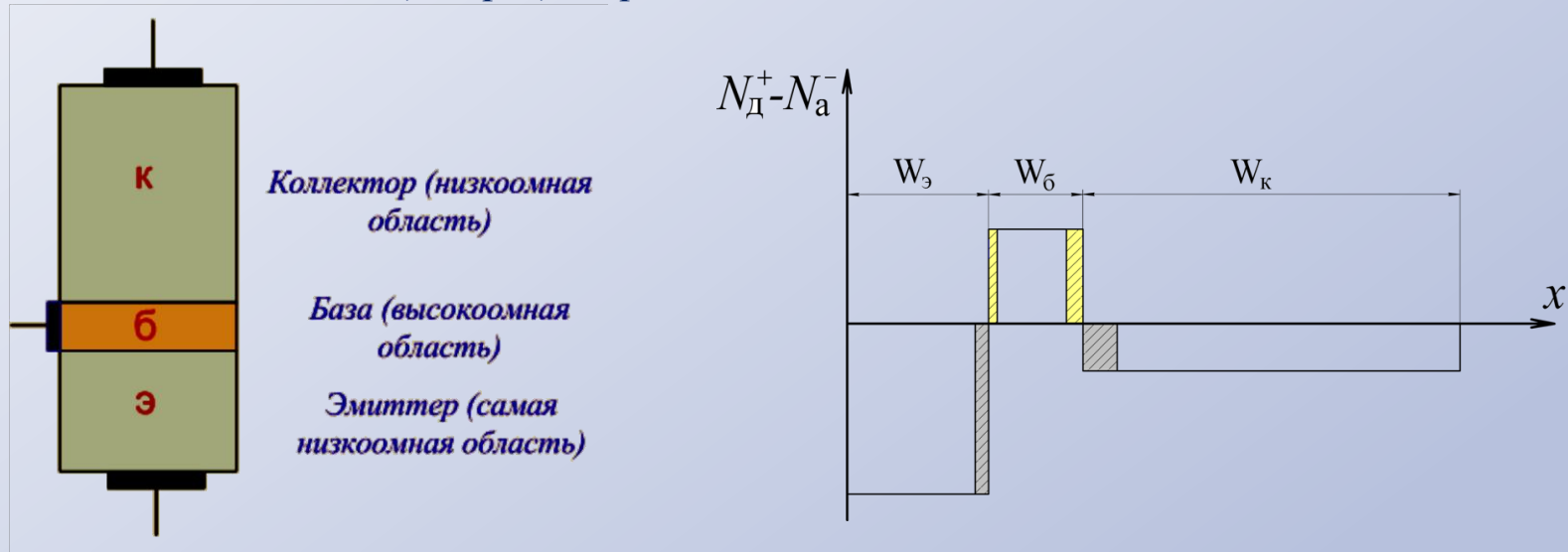


Особенности конструкции БТ

1. Толщина базы должна быть малой по сравнению с длиной свободного пробега носителей зарядов

$$W_{\text{б}} \ll 0,2l_{\text{диф}} \approx 20\text{-}30 \text{ мкм}$$

2. Концентрация примесей и основных носителей в эмиттере больше, чем в коллекторе, а наименьшей является концентрация примеси в базе.

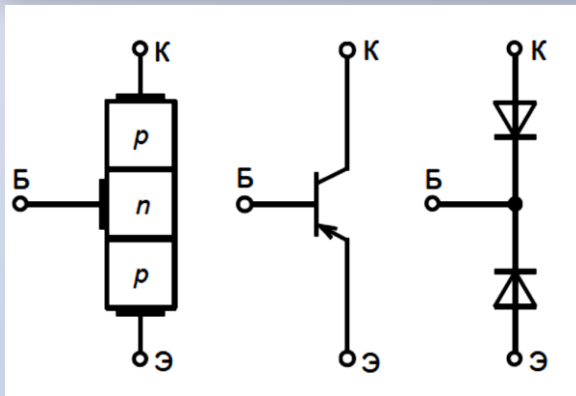
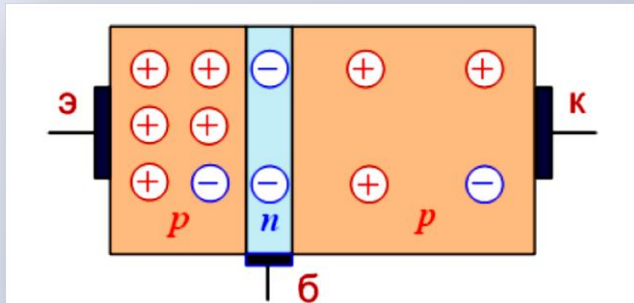


Классификация БТ

БТ по типу проводимости

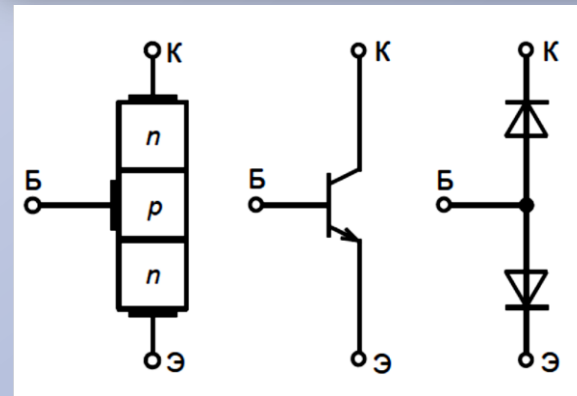
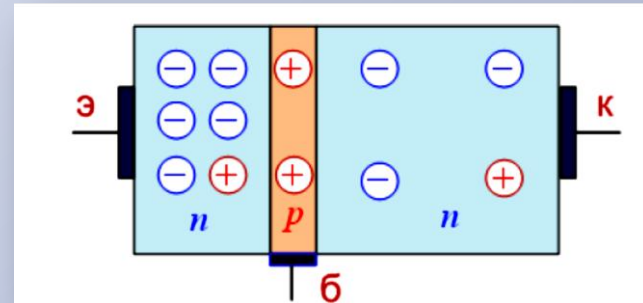
p-n-p

(с прямой проводимостью)



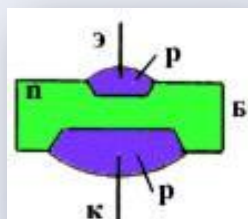
n-p-n

(с обратной проводимостью)

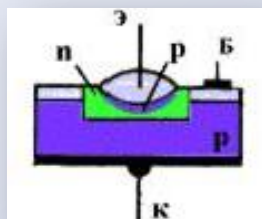


БТ по технологии изготовления

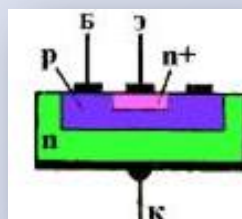
сплавные



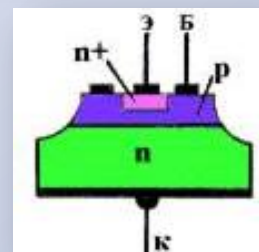
сплавно-диффузионные



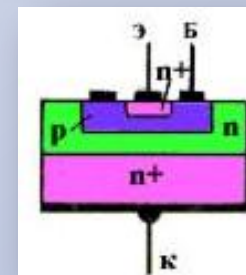
диффузионно-планарные



мезапланарные



эпитаксиально-планарные



- + работают на низких и средних частотах,
- + применяют для больших мощностей, до десятков ватт,
- невысокая предельная частота 20 МГц,
- значительный разброс параметров,
- некоторая нестабильность свойств транзистора во времени.

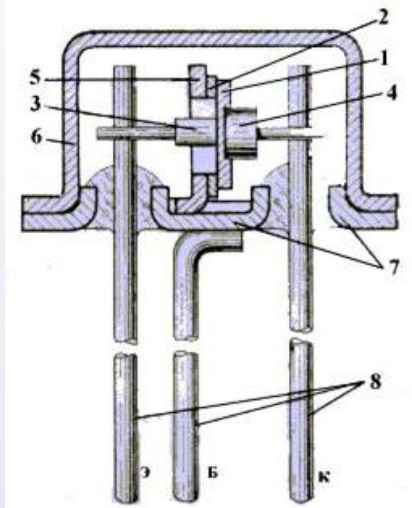
- + Толщина базы транзисторов до 0,5-1 мкм.
- + Рабочие частоты: 500-1000 МГц.
- низкие обратные напряжения на эмиттере из-за сильного легирования эмиттерной области
- трудности в разработке транзисторов на высокие напряжения и большие мощности.

- + создают для больших мощностей,
- + можно сформировать эмиттер и коллектор необходимых размеров, достаточных для прохождения относительно больших токов.

В настоящее время при серийном производстве дискретных биполярных транзисторов используют мезапланарную и эпитаксиально-планарную технологии. Последняя находит также широкое применение в микроэлектронике при изготовлении транзисторных структур.

- + малый разброс параметров,
- + малые емкости переходов,
- + небольшое сопротивление базы,
- + работают на частотах до нескольких сот мегагерц.

- + малое объемное сопротивление эпитаксиального коллектора,
- + небольшая барьерная емкость коллекторного перехода,
- + небольшое время накопления носителей в коллекторной области,
- + достаточно высокое напряжение пробоя коллекторного перехода.



Сплавные транзисторы (преимущественно германиевые) изготавливают по сплавной технологии получения р-п-переходов. Одна из наиболее распространенных конструкций сплавного транзистора: 1 - кристалл Ge; 2 - кристаллодержатель; 3 - электрод эмиттера; 4 - электрод коллектора; 5 - базовое кольцо; 6 - корпус; 7 - основание; 8 - выводы.

Сплавно-диффузионные транзисторы изготавливают сочетанием сплавной технологии с диффузионной. В этом случае наплавляемая навеска содержит как донорные (сурьма), так и акцепторные (индий) примеси. Навески размещают на исходной полупроводниковой пластине и прогревают. При сплавлении образуется эмиттерный переход.

Однако при высокой температуре одновременно с процессом плавления происходит диффузия примесей из расплава в глубь кристалла. Примеси доноров и акцепторов распределяются по толщине кристалла при этом неравномерно, так как разные примеси диффундируют на разную глубину (например, диффузия сурьмы идет скорее, чем индия). В кристаллов результате образуется диффузионный базовый слой n-типа с неравномерным распределением примесей (получается «встроенное» в базу электрическое поле). Коллектором служит исходная пластинка германия р-типа. Перенос неосновных носителей через базовую область осуществляется в основном дрейфом во «встроенном» электрическом поле транзисторы, поэтому называют дрейфовыми.

При изготовлении дрейфовых транзисторов широко используется метод **двойной диффузии**. В этом случае базовая и эмиттерная области получают при диффузии примесей n- и р-типа в исходную пластинку полупроводника. Такие транзисторы изготавливают в виде планарных структур и меза-структур. Метод диффузии очень хорошо подходит для производства мощных транзисторов, так как он позволяет вводить примеси на больших площадях — таким образом можно сформировать эмиттер и коллектор необходимых размеров, достаточных для прохождения относительно больших токов.

Диффузионно-планарный транзистор, например, кремниевый, может быть изготовлен методом диффузии примесных атомов через окна в пленке двуокиси кремния SiO_2 . При изготовлении планарного транзистора за основу берется пластинка кремния p -типа, которая в результирующей структуре играет роль коллектора. Пластика помещается вначале в атмосферу паров воды или кислорода, где покрывается плотной пленкой SiO_2 . Фотолитографией и последующим травлением в пленке образуются окна через которые осуществляется диффузия акцептора-бора. В пластинке при этом образуется слой базы p -типа. Одновременно происходит окисление поверхности. В образовавшейся пленке окиси затем вскрываются окна, через которые проводится диффузия донора - фосфора на меньшую глубину. Образуется эмиттерный слой n^+ -типа. Далее слой SiO_2 вновь протравливается, в отверстия напыляются контакты ($A1$) и методом термокомпрессии подсоединяются выводы.

Мезапланарные транзисторы изготавливают методом двойной диффузии с последующим вытравливанием определенных участков эмиттера и базы для создания активной части транзисторов в виде меза-структур. При этом уменьшаются площади переходов, снижается барьерная емкость коллектора. Мезапланарные транзисторы получают при изготовлении большой партии приборов в едином технологическом цикле из одной пластины полупроводника.

Эпитаксиально-планарные транзисторы имеют коллектор, состоящий из двух слоев: высокоомного, примыкающего к базе, и низкоомного, примыкающего к контакту. Высокоомный слой в транзисторах n - p - n получают методом эпитаксиального наращивания пленки монокристаллического полупроводника (в данном случае - с электронной проводимостью) на низкоомную подложку, образующую коллекторную область n^+ . В транзисторах p - n - p эпитаксиальный высокоомный слой имеет проводимость p -типа. Таким образом, между базой и низкоомным коллектором получается слой с высоким сопротивлением. Базовую и эмиттерную области изготавливают методом двойной диффузии через окна в пленке SiO_2 . В результате получают дрейфовый транзистор типа n^+ - p - n - n^+ или p^+ - n - p - p^+ .

ПАРАМЕТРЫ БТ

Собственные (или первичные)

характеризуют свойства самого транзистора

Сопротивление эмиттера $r_{\text{э}}$

Сопротивление коллектора $r_{\text{к}}$

Сопротивление базы $r_{\text{б}}$

Статический коэффициент передачи тока эмиттера α

Вторичные

различны, для различных схем включения

h -параметры

y -параметры

Статический режим работы БТ - это режим работы при отсутствии нагрузки в выходной цепи.

В схемах с транзисторами, как правило, образуется две цепи:

- 1. входная цепь – служит для управления транзисторами*
- 2. выходная цепь – служит для подключения нагрузки.*

Статические характеристики

➤ ВХОДНЫЕ

$$I_{ВХ} = f(U_{ВХ}) \text{ при } U_{ВЫХ} = const.$$

➤ ВЫХОДНЫЕ

$$I_{ВЫХ} = f(U_{ВЫХ}) \text{ при } I_{ВХ} = const.$$

➤ передаточные

$$I_{ВЫХ} = f(U_{ВХ}) \text{ при } U_{ВЫХ} = const.$$

Статические характеристики связывают постоянные токи электродов с постоянными напряжениями на них - это графически выраженные зависимости напряжения и тока входной цепи и выходной цепи (ВАХ).

Коэффициент усиления - величина постоянная для одного транзистора, и зависит от физического строения прибора. Высокий коэффициент усиления исчисляется в сотнях единиц, низкий - в десятках. Эта характеристика биполярного транзистора является самой важной.

Коэффициент усиления

➤ по току $k_I = \Delta I_{ВЫХ} / \Delta I_{ВХ}$,

➤ по напряжению $k_U = \Delta U_{ВЫХ} / \Delta U_{ВХ}$,

➤ по мощности $k_P = k_I / k_U = \Delta P_{ВЫХ} / \Delta P_{ВХ}$.

Сопротивление

➤ ВХОДНОЕ $R_{ВХ} = U_{ВХ} / I_{ВХ}$,

➤ ВЫХОДНОЕ $R_{ВЫХ} = U_{ВЫХ} / I_{ВЫХ}$.

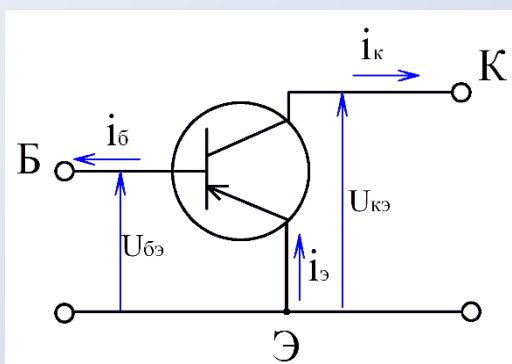
Входное сопротивление - сопротивление в транзисторе, которое «встречает» ток базы. Обозначается R_{in} ($R_{вх}$). Чем оно больше - тем лучше для усилительных характеристик прибора, поскольку со стороны базы обычно находится источник слабого сигнала, у которого нужно потреблять как можно меньше тока.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

Выходная проводимость (обратная величина выходному сопротивлению) - 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. Идеальный вариант - это когда выходная проводимость равняется бесконечность (или выходное сопротивление $R_{out} = 0$ ($R_{вых} = 0$)).

Схемы включения БТ

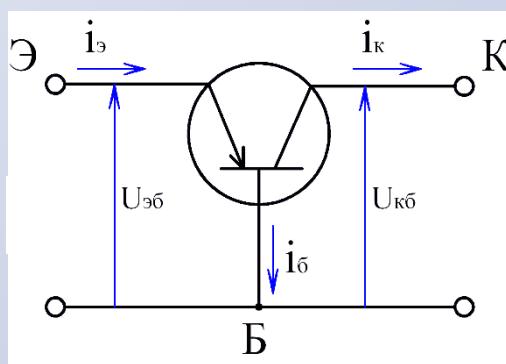
СХЕМЫ

с общим эмиттером (ОЭ)



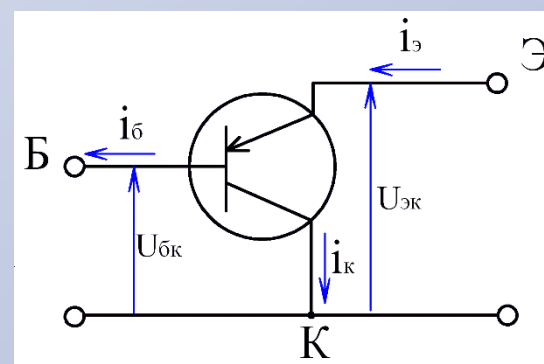
Эта схема включения биполярных транзисторов обеспечивает **наибольшее увеличение вольтамперных характеристик (ВАХ)**, поэтому является самой востребованной. Минус такого варианта – **ухудшение усилительных свойств прибора при повышении частоты и температуры**. Это означает, что для высокочастотных транзисторов рекомендуется подобрать другую схему.

с общей базой (ОБ)



Применяется для работы на **высоких частотах**. Уровень шумов снижен, усиление не очень велико. Каскады приборов, собранные по такой схеме, **востребованы в антенных усилителях**. Недостаток варианта – **необходимость в двух источниках питания**.

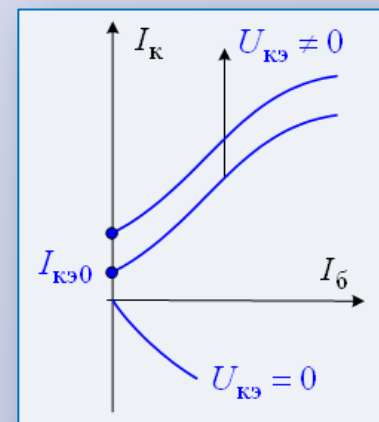
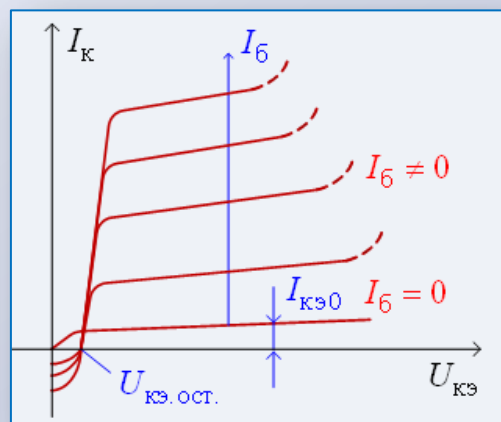
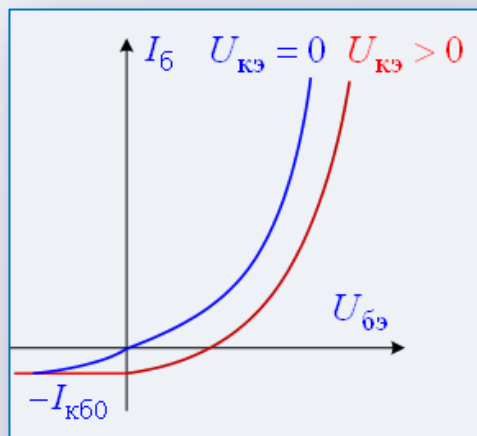
с общим коллектором (ОК)



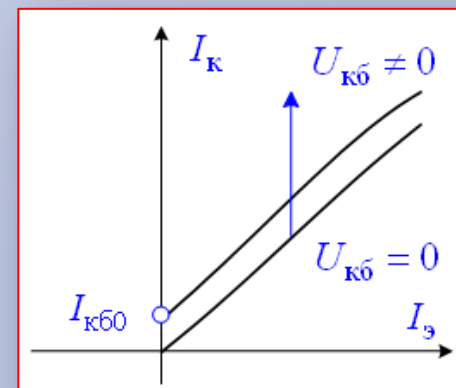
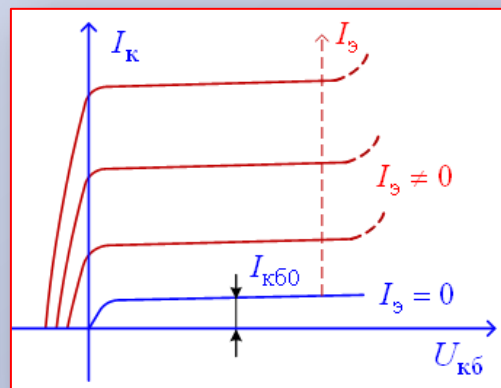
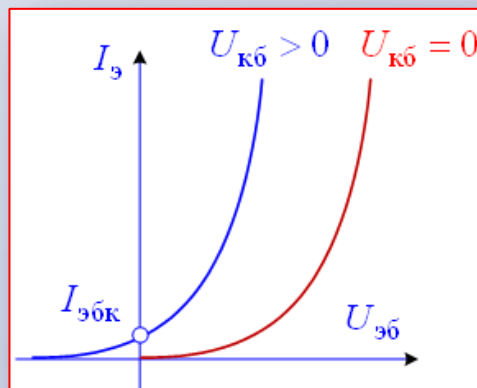
Для такого варианта характерна **передача входного сигнала обратно на вход**, что существенно уменьшает его уровень. **Коэффициент усиления по току – высокий, по напряжению – небольшой**, что является минусом этого способа. Схема приемлема для каскадов приборов в случаях, если источник входного сигнала обладает высоким входным сопротивлением.

ВАХ БТ

с общим эмиттером (ОЭ)



с общей базой (ОБ)



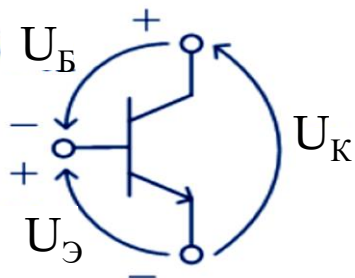
ХАРАКТЕРИСТИКИ	Схема с ОЭ	Схема с ОБ	Схема с ОК
Входные	$I_B, U_{БЭ}$	$I_{Э}, U_{ЭБ}$	$I_B, U_{БК}$
Выходные	$I_K, U_{КЭ}$	$I_K, U_{КБ}$	$I_{Э}, U_{ЭК}$
k_i	Десятки - сотни	меньше единицы	Десятки - сотни
k_u	Десятки - сотни	Десятки - сотни	меньше единицы
k_p	Сотни – десятки тысяч	Десятки - сотни	Десятки - сотни
R_{BX}	Сотни Ом – единицы кОм	Единицы – десятки Ом	Десятки – сотни кОм
$R_{ВЫХ}$	Единицы – десятки кОм	Сотни кОм – единицы МОм	Сотни Ом – единицы кОм
Фазовый сдвиг между $u_{ВЫХ}$ и $u_{ВХ}$	180°	0	0

Режимы работы БТ



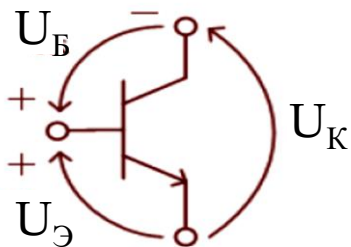
БТ п-р-п типа

1. АКТИВНЫЙ (усилительный)



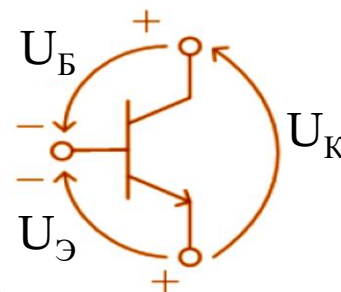
$$U_{\text{Э}} < U_{\text{Б}} < U_{\text{К}}$$

2. режим ОТСЕЧКИ (транзистор заперт)



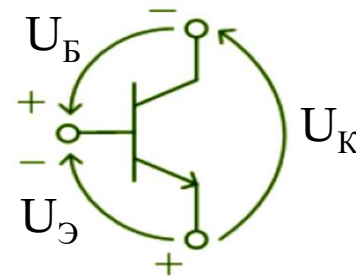
$$U_{\text{Э}} < U_{\text{Б}} > U_{\text{К}}$$

3. режим НАСЫЩЕНИЯ (транзистор открыт)



$$U_{\text{Э}} > U_{\text{Б}} < U_{\text{К}}$$

4. ИНВЕРСНЫЙ режим (К и Э меняют местами)



$$U_{\text{Э}} > U_{\text{Б}} > U_{\text{К}}$$

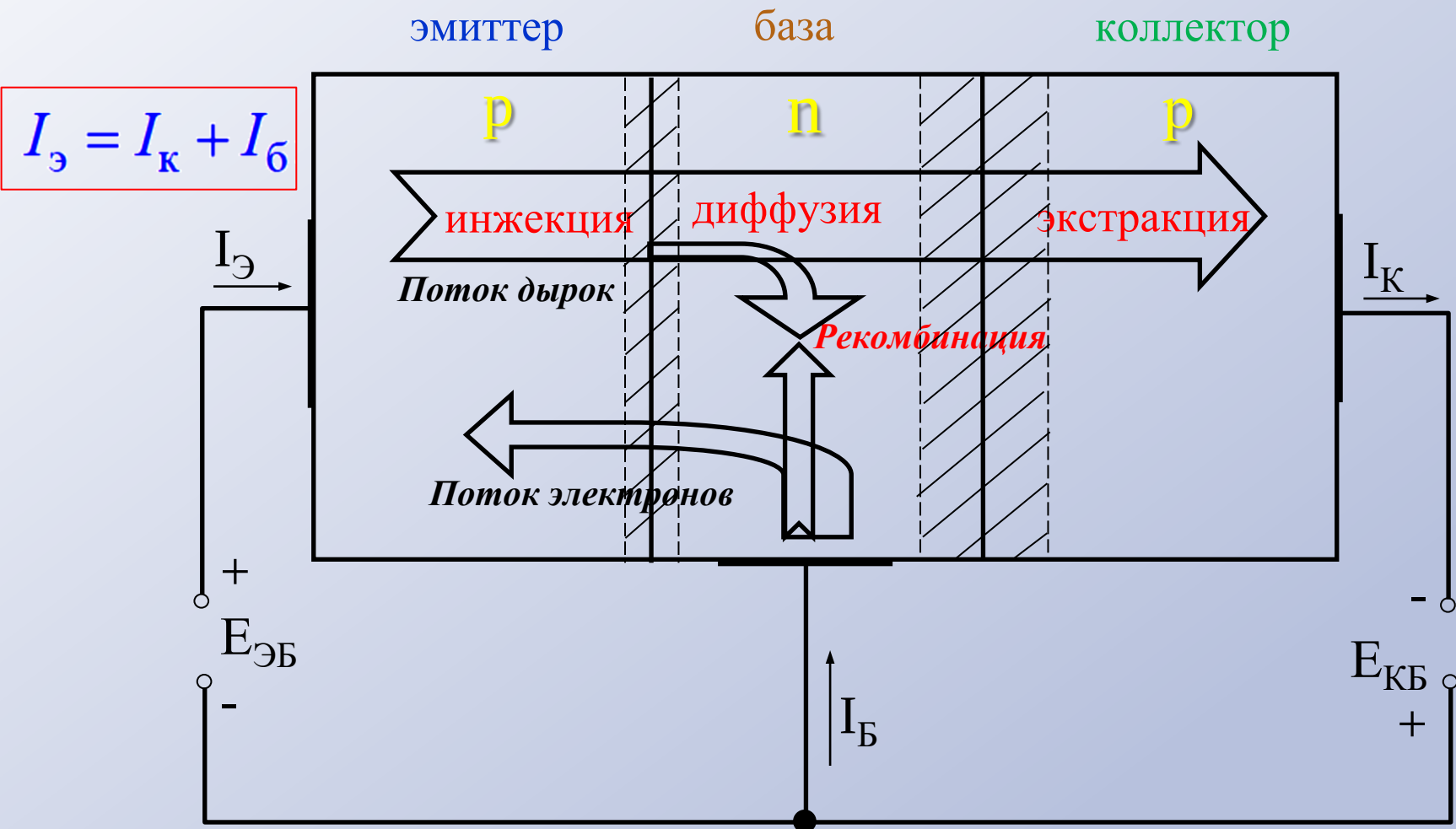


Переходы закрыты, прибор не работает. Через оба перехода протекают **обратные малые коллекторные и эмиттерные токи**. Прибор в этом режиме разрывает цепь.

Прибор полностью открыт. При этом снижается потенциальный барьер, ограничивающий проникновение носителей заряда. **Через эмиттер и коллектор** начинают проходить **токи, которые называют «токами насыщения»**.

Промежуточный режим. **Переход Б-К открыт, а Э-Б закрыт. Ток базы в этом случае значительно меньше токов Э и К. Усиливающие характеристики БТ отсутствуют.** Этот режим востребован мало.

Активный режим работы БТ



Ток эмиттера $I_{\text{Э}}$ равен сумме дырочной $I_{\text{Эр}}$ и электронной $I_{\text{Эн}}$ составляющих: $I_{\text{Э}} = I_{\text{Эр}} + I_{\text{Эн}}$;

Ток коллектора $I_{\text{К}}$ состоит из дырочной составляющей $I_{\text{Кр}}$ и теплового тока $I_{\text{К0}}$: $I_{\text{К}} = I_{\text{Кр}} + I_{\text{К0}}$;

Ток базы $I_{\text{Б}}$ равен алгебраической сумме электронной составляющей тока эмиттера $I_{\text{Эн}}$, рекомбинационной дырочной составляющей $I_{\text{Бр}}$ и теплового тока $I_{\text{К0}}$: $I_{\text{Б}} = I_{\text{Эн}} + I_{\text{Бр}} - I_{\text{К0}}$.

Взаимосвязь токов в БТ

$$I'_K = \alpha I_\Theta$$

α - коэффициент передачи тока эмиттера ($\alpha=0,95\dots0,99$)

Выходной ток транзистора: $I_K = I'_K + I_{КБ0}$

$I_{КБ0}$ - обратный ток

$$I_K = \alpha I_\Theta + I_{КБ0}$$

Поскольку $I_\Theta \gg I_{КБ0}$, то

$$I_K \approx \alpha I_\Theta$$

Ток базы: $I_B = I'_B - I_{КБ0}$ или $I_B = I_\Theta - I_K$

$$I_B = \frac{1}{\alpha} I_K - I_K \quad \text{или} \quad I_B = \frac{1-\alpha}{\alpha} I_K$$

$$\frac{I_K}{I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta$$

β - динамический коэффициент передачи тока базы

$$I_K = \beta I_B$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$$

Коэффициент инжекции γ : показывает, какую часть от полного эмиттерного тока составляет его дырочная составляющая:

$$\gamma = \frac{I_{\text{эп}}}{I_{\text{э}}}$$

Коэффициент переноса дырок в базе - отношение дырочной составляющей коллекторного тока к дырочной составляющей эмиттерного тока

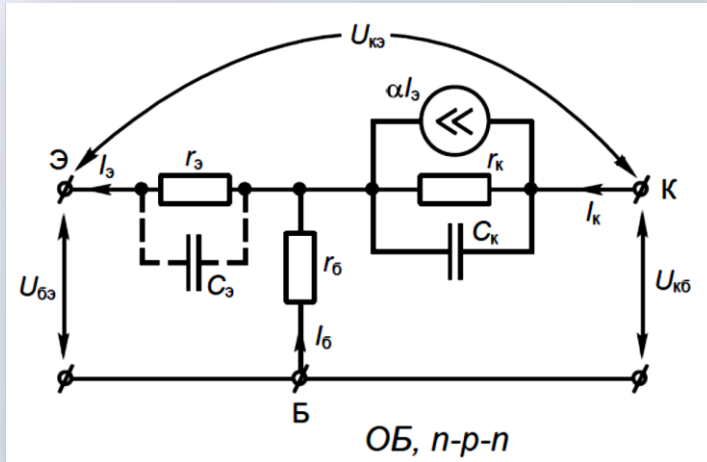
$$\delta = \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{эп}}}$$

Коэффициент передачи эмиттерного тока:

$$\alpha = \gamma \cdot \delta$$

Схемы замещения БТ

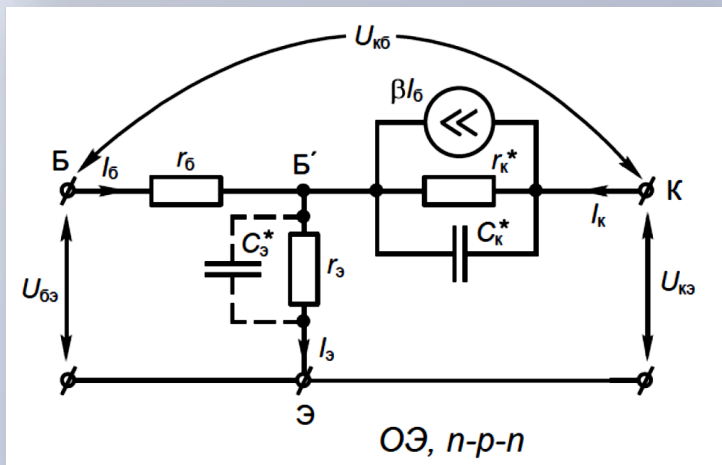
T – образные малосигнальные схемы замещения построены с помощью физических (внутренних) параметров транзистора, которые характеризуют физические свойства трехслойной полупроводниковой структуры транзистора. Состав этих схем одинаков.



$r_э$ – дифференциальное сопротивление прямо смещенного эмиттерного перехода, которая зависит от величины постоянной составляющей эмиттерного тока $I_{0э}$ (тока покоя эмиттера):

$$r_э = \frac{\varphi_T}{I_{0э}}; \quad \varphi_T = \frac{k \cdot T}{e},$$

φ_T – температурный потенциал.



$r_б$ – объемное сопротивление базового слоя (базы) (справочный параметр, составляет 100-400 Ом).

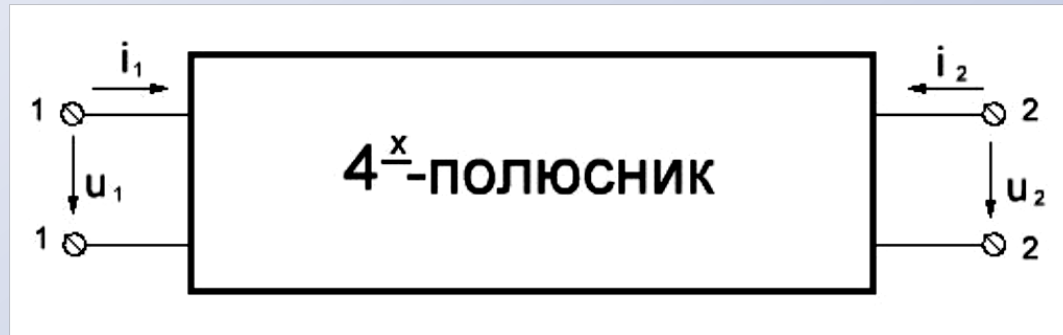


Так как значения переменных составляющих токов и напряжений транзистора, как правило, значительно меньше постоянных составляющих, то данные схемы замещения называют **малосигнальными**, а их параметры – малосигнальными. **Все сопротивления, входящие в схемы являются дифференциальными**, т.е. определяются для приращений (изменений) тока и напряжения.



Физические параметры, входящие в Т-образную схему замещения транзистора не могут быть измерены напрямую, т.к. слои и переходы транзистора недоступны для подключения измерительных приборов. Поэтому в качестве измеряемых параметров выбраны те, которые отражают свойства транзистора как четырехполюсника.

При любой схеме включения транзистор может быть представлен в виде активного (линейного) четырехполюсника – «черного ящика».



$$U_1 = U_{\text{ВХ}}; U_2 = U_{\text{ВЫХ}}; I_1 = I_{\text{ВХ}}; I_2 = I_{\text{ВЫХ}}.$$

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11} \cdot \Delta I_1 + h_{12} \cdot \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21} \cdot \Delta I_1 + h_{22} \cdot \Delta U_2 \end{cases}$$

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{\Delta U_2=0}$$

- входное сопротивление транзистора переменному току при неизменном выходном напряжении (КЗ)

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right|_{\Delta U_2=0}$$

- коэффициент передачи по току при неизменном выходном напряжении (КЗ)

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \right|_{\Delta I_1=0}$$

- коэффициент обратной связи по напряжению при неизменном входном токе, показывает какая часть переменного выходного напряжения передается на вход транзистора из-за наличия обратной связи в нем (ХХ)

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{\Delta I_1=0}$$

- выходная проводимость транзистора при неизменном входном токе транзистора

**Показатели схем
ОЭ, ОБ и ОК
для
маломощных БТ**

Параметр	ОЭ	ОБ	ОК
h_{11}	сотни Ом единицы кОм	единицы десятки Ом	десятки сотни кОм
$ h_{21} $	десятки сотни	0,95 0,998	сх. ОЭ
$1/h_{22}$	единицы десятки кОм	сотни кОм единицы МОм	десятки Ом

Схема ОЭ: $I_1 = I_{\bar{6}}$; $I_2 = I_K$; $U_1 = U_{\bar{6}\bar{3}}$; $U_2 = U_{K\bar{3}}$.

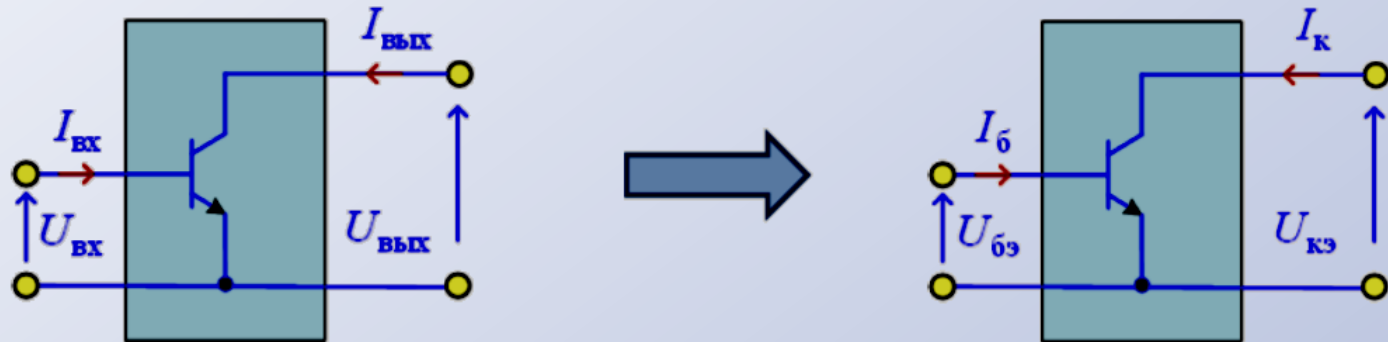
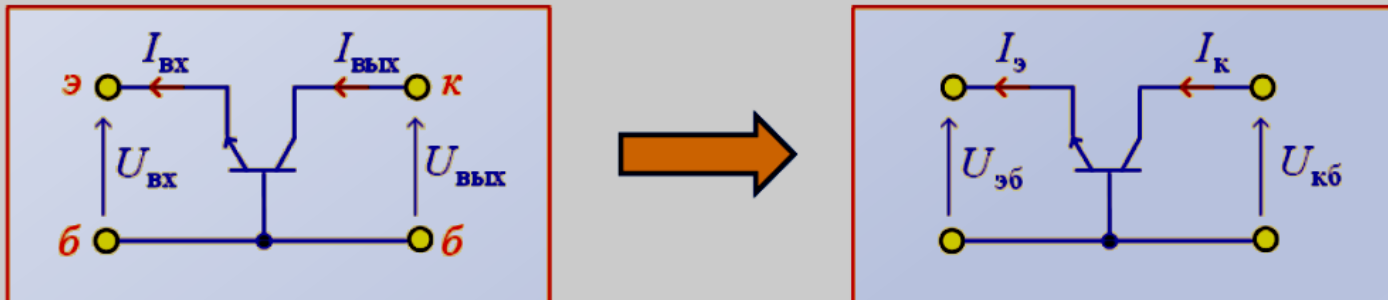
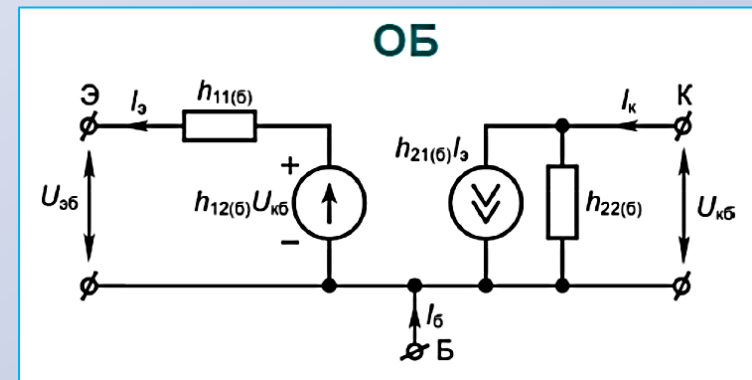
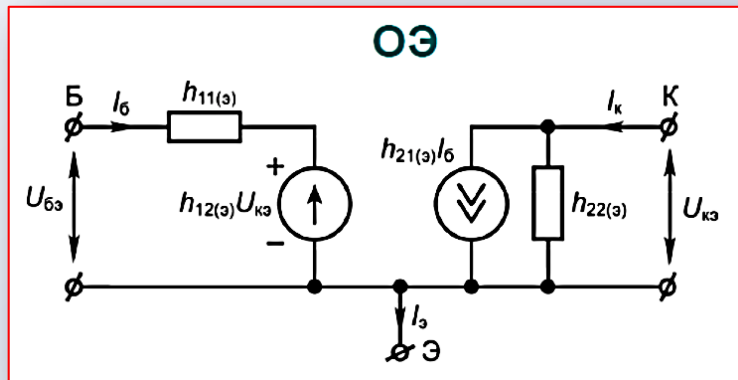


Схема ОБ: $I_1 = I_{\bar{3}}$; $I_2 = I_K$; $U_1 = U_{\bar{3}\bar{6}}$; $U_2 = U_{K\bar{6}}$.



Эквивалентные схемы БТ на средних частотах



$$\begin{aligned}\Delta U_{\delta\delta} &= h_{11\delta} \Delta I_{\delta\delta} + h_{12\delta} \Delta U_{\kappa\delta}, \\ \Delta I_{\kappa} &= h_{21\delta} \Delta I_{\delta\delta} + h_{22\delta} \Delta U_{\kappa\delta}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h_{11\delta} &= \left. \frac{\Delta U_{\delta\delta}}{\Delta I_{\delta\delta}} \right|_{U_{\kappa\delta} = \text{Const}} & h_{12\delta} &= \left. \frac{\Delta U_{\delta\delta}}{\Delta U_{\kappa\delta}} \right|_{I_{\delta\delta} = \text{Const};} \\ h_{21\delta} &= \left. \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\delta\delta}} \right|_{U_{\kappa\delta} = \text{Const}} & h_{22\delta} &= \left. \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta U_{\kappa\delta}} \right|_{I_{\delta\delta} = \text{Const};}\end{aligned}$$

Влияние температуры на БТ

Причины нагрева транзисторов

1. температура окружающей среды
2. внешние источники тепла
(например, находящиеся нагретые детали)
3. токи, протекающие через транзистор

Частотные свойства БТ

Причины снижения усиления с увеличением частоты:

1. Влияние емкостей транзистора

$$X_c \downarrow = \frac{1}{\omega \uparrow C}$$

Наиболее существенное влияние оказывает емкость коллекторного перехода S_k , т.к. имеет наибольшую величину.

$$\beta(\omega) = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_\beta}\right)^2}} = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}},$$

β – комплексная величина

2. Снижение коэффициента передачи тока

Снижение β с ростом частоты обусловлено инерционностью перемещения носителей из ЭП через базу в КП. Время пробега носителей через базу составляет $\approx 10^{-7}$ с. На частотах единицы десятки МГц это время соизмеримо (или больше) с периодом усиливаемого сигнала (т.е. носители не успевают перескочить через базу и задерживаются в ней). В результате коллекторный ток отстает от эмиттерного (появляется фазовый сдвиг) и I_k уменьшается, а ток базы I_b увеличивается.

Основные параметры БТ

1. Коэффициенты $h_{21э}$, $h_{21б}$, $h_{21к}$ – это коэффициенты передачи тока (коэффициенты усиления по току) (в схеме ОЭ $h_{21э}$ – это β , в схеме ОБ $h_{21б}$ – α).

2. Граничная частота для коэффициента передачи тока – это частота, на которой $h_{21э}$ уменьшается до 1.

3. Частота усиления $f(h_{21})$ – это частота, на которой $h_{21э}$ уменьшается в 2 раза – этим значением определяется так называемая полоса пропускания частот, т.е. диапазон частот, в которых характеристики усиления удовлетворительны.

4. Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода в схеме ОЭ (значения $h_{11э}$ – Омы, десятки Ом)

$$h_{11э} = r_{э \text{ диф}} = \left. \frac{dU_{эз}}{dI_{эз}} \right|_{U_{кз} = \text{Const}}$$

5. Выходная проводимость $h_{22э}$ связана с дифференциальным сопротивлением коллекторного перехода.

$$\frac{1}{h_{22э}} = r_{к \text{ диф}} = \left. \frac{dU_{кз}}{dI_{к}} \right|_{I_{э} = \text{Const}}$$

6. Коэффициент обратной связи по напряжению:

$$h_{12э} = \left. \frac{dU_{эз}}{dU_{кз}} \right|_{I_{э} = \text{Const}}, \quad h_{12э} \approx 10^{-3} \cdot 10^{-4}$$

7. Объемное сопротивление базы: $r_b = (\text{десятки} - \text{сотни Ом})$.

8. Емкость коллекторного перехода C_k . Это фактически барьерная емкость коллекторного перехода $C_k \approx (5 - 50) \text{ пФ}$.

9. Максимальная частота генерации:

$$f_{\text{макс}} \approx \sqrt{\frac{f(h_{21\delta})}{30r_b C_k}}$$

где $f_{\text{макс}}$ – это наибольшая частота, при которой транзистор может работать (способен работать в схеме автогенератора).

10. Обратный ток коллекторного перехода при заданном обратном напряжении: $I_{кбо} = I_k$ при $I_b=0$, $U_{кб} < 0$. Величина тока $I_{кбо}$ от мкА до нескольких мА в зависимости от мощности и качества изготовления транзистора.

11. Максимально допустимый ток коллектора – $I_{к.макс}$

12. Наибольшая допустимая мощность рассеяния коллектора:

$$P_{к.макс} = I_{к.макс} U_{кэ}.$$

13. Тепловое сопротивление между коллектором и корпусом:

$$R_m = \Delta T / P_{к.макс}$$

где ΔT – перепад (градиент) температур между коллектором и корпусом.

Применение БТ

Усилители сигналов

Для увеличения амплитуды сигналов в усилителях звука, радиосистемах, телевизорах и других аудио- и видеоустройствах

Логические схемы

Для создания логических элементов, триггеров и других основных логических блоков

Источники питания

Для регулирования выходного напряжения, управления током и обеспечения стабильности питания в различных устройствах

Аналоговая и смешанная схемотехника

*Применяются в аналоговой электронике, такой как операционные усилители, и других устройствах, где требуется **точность и стабильность** в обработке аналоговых сигналов*

Усилители мощности

Для усиления мощности сигналов в высокопотребляющих устройствах, таких как аудиоусилители для больших колонок, радиопередатчики и другие системы.

Импульсные источники и ключи

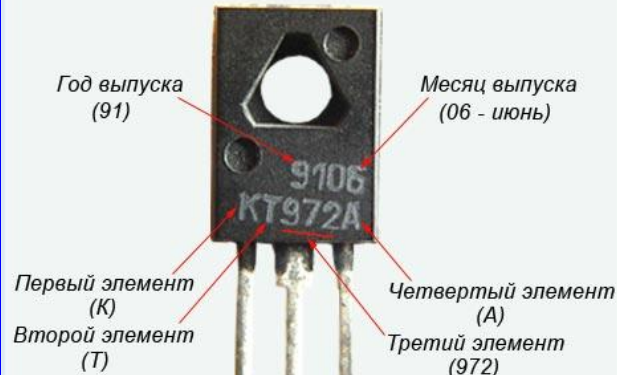
*Используются в импульсных источниках и в качестве ключей для управления током в цепях, где требуется **быстрое переключение***

Автомобильная электроника

В автомобильной электронике, в системах зажигания, управления двигателем, системах безопасности и других подсистемах автомобиля

Маркировка БТ

Кремниевый транзистор КТ972А выпущен в июне 1991 г.



Первый элемент — буква (или цифра) характеризует полупроводниковый материал и температурные условия работы транзистора.

1. Буква Г или цифра 1 присваивается германиевым транзисторам;
2. Буква К или цифра 2 присваивается кремниевым транзисторам;
3. Буква А или цифра 3 присваивается транзисторам, полупроводниковым материалом которых служит арсенид галлия.

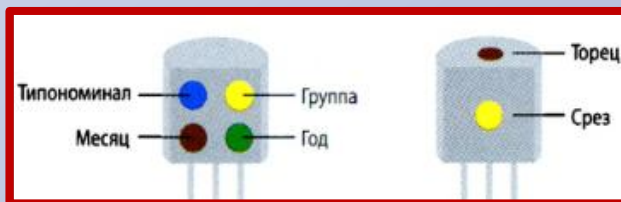
Цифра, стоящая вместо буквы, указывает на то, что данный транзистор может работать при повышенных температурах: германий – выше 60°C, а кремний – выше 85°C.

Второй элемент – буква Т от начального слова «транзистор».

Третий элемент – трехзначное число от 101 до 999 – указывает порядковый заводской номер разработки и назначение транзистора. Эти параметры даны в справочнике по транзисторам.

Четвертый элемент – буква от А до К – указывает разновидность транзисторов данной серии.

Буквенный код	Цветная точка	Диапазон частот, МГц
Низкий диапазон бета		
В	● — коричневый	15—23
С	● — красный	20—32
Д	● — оранжевый	28—42
Е	● — желтый	38—52
Средний диапазон бета		
Ф	● — зеленый	48—63
Г	● — синий	57—78
Н	● — фиолетовый	72—93
Высокий диапазон бета		
И	●● — черный	87—108
Ж	●● — коричневый	100—125
К	●● — красный	115—140
Л	●● — оранжевый	130—155



В цветовой маркировке для кодирования параметров транзисторов используют цветные точки в корпусах КТ-26 (ТО-92) и КТП-4.