

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Презентацию подготовила:
студентка группы 21306
Кравченко Г.Ю.

Содержание

- Введение
- Физические процессы в биполярных транзисторах
- Формулы Молла-Эберса
- ВАХ биполярного транзистора в схеме с общей базой
- Дифференциальные параметры биполярного транзистора
- Фундаментальное уравнение в теории транзисторов
- Эффект Эрли
- Коэффициент обратной связи
- Биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером
- Эквивалентные схемы транзисторов
- Составные транзисторы
- Дрейфовые транзисторы
- Параметры транзистора как четырехполюсника
- Н-параметры

Введение



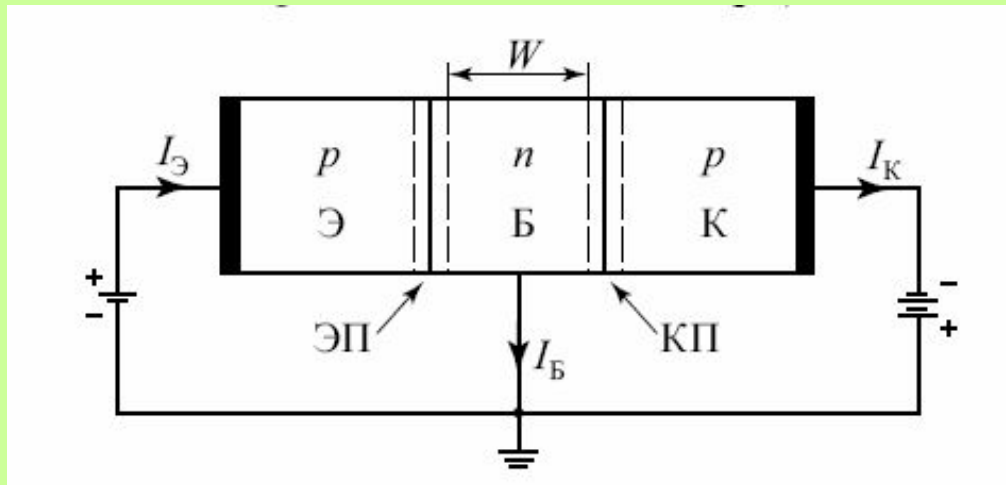
Дж. Бардин
(1908-1991)

В 1948 г. американские ученые Дж. Бардин и У. Браттейн создали полупроводниковый триод, или транзистор.

Транзистор – полупроводниковый прибор с двумя электронно-дырочными переходами. В транзисторе используются оба типа носителей - основные и неосновные, поэтому его называют биполярным. Биполярный транзистор (БТ) состоит из трех областей монокристаллического полупроводника с разным типом проводимости: эмиттера, базы и коллектора.

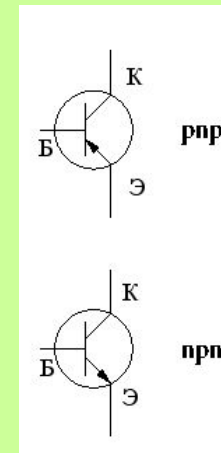


У. Браттейн
(1902-1987)



В зависимости от типа проводимости крайних слоев различают транзисторы р-п-р и п-р-п. По технологии изготовления транзисторы делятся на сплавные, планарные, а также диффузионно-сплавные, мезапланарные и эпитаксиально-планарные.

Каждый из переходов транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:



1. Режим **отсечки** - оба р-п-перехода закрыты, при этом через транзистор обычно идет сравнительно небольшой ток.
2. Режим **насыщения** - оба р-п-перехода открыты.
3. **Активный** режим - один из р-п-переходов открыт, а другой закрыт.

Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном переходе - обратное, то включение транзистора считают нормальным, при противоположной полярности - инверсным.

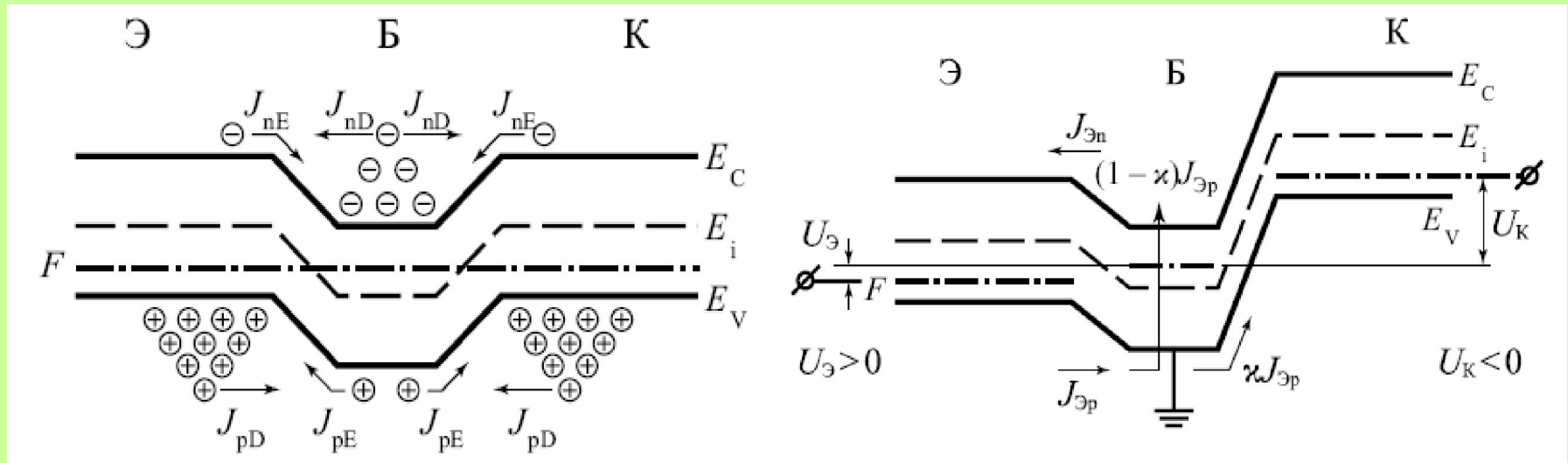
По характеру движения носителей тока в базе различают диффузионные и дрейфовые биполярные транзисторы. Если при отсутствии токов в базе существует электрическое поле, которое способствует движению неосновных носителей заряда от эмиттера к коллектору, то транзистор называют дрейфовым, если же поле в базе отсутствует - диффузионным.

Физические процессы в БТ

В БТ реализуются четыре физических процесса:

- инжекция носителей из эмиттера в базу;
- диффузия от эмиттера к коллектору;
- рекомбинация в базе;
- экстракция из базы в коллектор.

Зонная диаграмма биполярного транзистора:



в равновесном состоянии

в активном режиме

Формулы Молла-Эберса

Формулы Молла - Эберса – это универсальные соотношения, которые позволяют рассчитать ВАХ в БТ при любом варианте подключения.

$$J_{\text{э}} = I'_{\text{э}0} (\exp(\beta U_{\text{э}}) - 1) - \alpha_I I'_{\text{к}0} (\exp(\beta U_{\text{к}}) - 1)$$

$$J_{\text{к}} = \alpha_N I'_{\text{э}0} (\exp(\beta U_{\text{э}}) - 1) - I'_{\text{к}0} (\exp(\beta U_{\text{к}}) - 1)$$

$$J_{\text{б}} = (1 - \alpha_N) I'_{\text{э}0} (\exp(\beta U_{\text{э}}) - 1) + (1 - \alpha_I) I'_{\text{к}0} (\exp(\beta U_{\text{к}}) - 1)$$

Где $J_{\text{б}}$ -ток базы, равный разности токов эмиттера $J_{\text{э}}$ и коллектора $J_{\text{к}}$.

и $I'_{\text{к}0}$ и $I'_{\text{э}0}$ -тепловые токи коллектора и эмиттера

Данные формулы полезны для анализа статических характеристик биполярного транзистора при любых сочетаниях знаков токов и напряжений.

При измерении теплового тока коллектора $I_{\text{к}0}$ дырки как неосновные носители уходят из базы в коллектор $J_{\text{к}} = J_{\text{б}}$ ($J_{\text{э}} = 0$). При этом поток дырок из базы в эмиттер не уравновешен, и их переходит из эмиттера в базу больше, чем в равновесных условиях. Это вызовет накопление избыточного положительного заряда в базе и увеличение потенциального барьера на переходе Э-Б, что, в конце концов, скомпенсирует дырочные токи.

Таким образом, необходимо отметить, что при измерении теплового тока коллектора эмиттер будет заряжаться отрицательно по отношению к базе.

ВАХ биполярного транзистора с общей базой в активном режиме

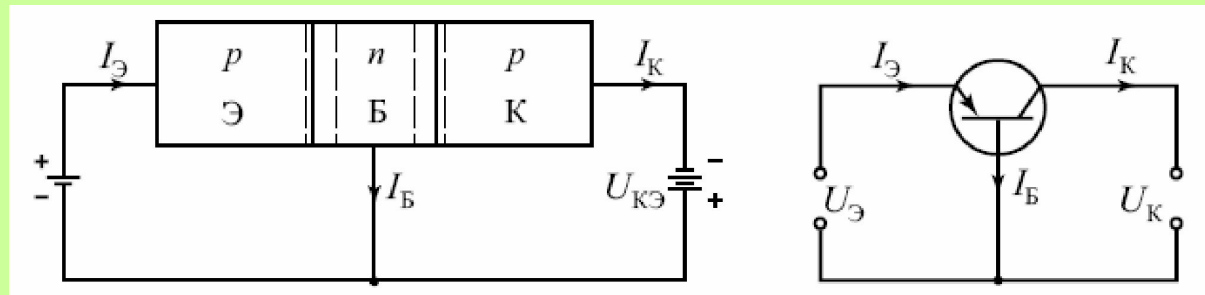
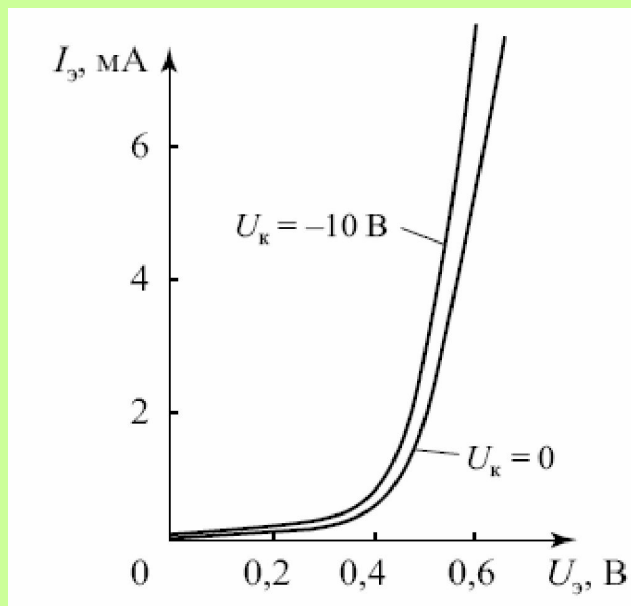
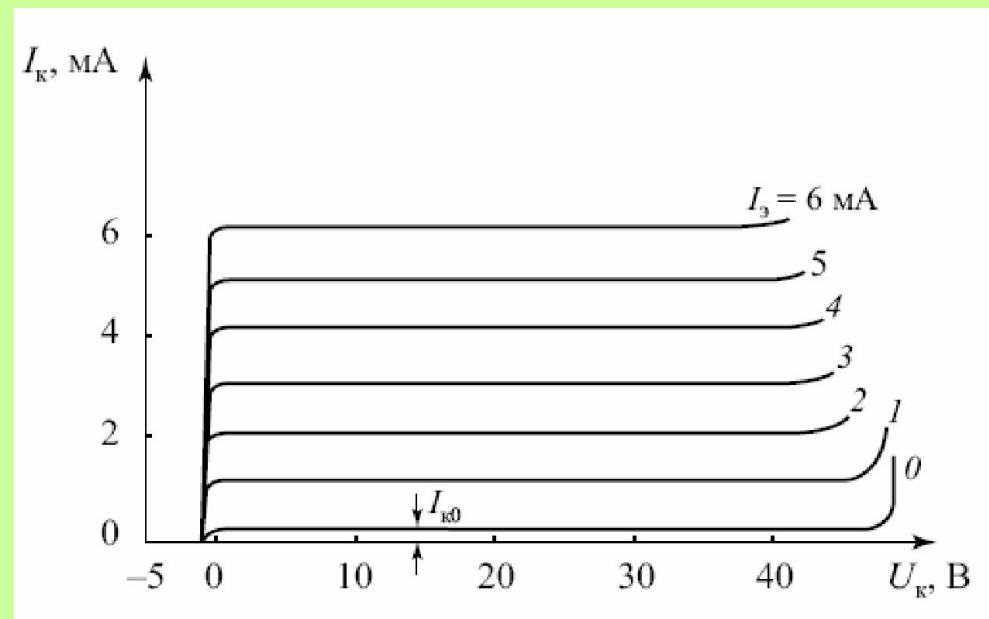


схема включения транзистора с общей базой



семейство эмиттерных характеристик



семейство коллекторных характеристик

Анализ вольт-амперных характеристик БТ, приведенных на предыдущем рисунке, показывает, что коллекторные характеристики эквидистантны. При напряжении на коллекторе, равном нулю, ток коллектора уже достаточно большой и в дальнейшем по мере роста коллекторного напряжения не меняется. При небольшом прямом смещении коллекторного перехода коллекторный ток резко убывает и становится равным нулю при значениях смещения на коллекторе, равном напряжению на эмиттере. Для семейства эмиттерных кривых характерна слабая зависимость от коллекторного напряжения. При напряжении на коллекторе, равном нулю, эмиттерная характеристика полностью совпадает с вольт-амперной характеристикой р-п перехода. При увеличении напряжения на коллекторе ток эмиттера слабо меняется вследствие эффекта модуляции ширины базы.

Дифференциальные параметры БТ

Основными величинами, характеризующими параметры биполярного транзистора, являются коэффициент передачи тока эмиттера α , сопротивление эмиттерного ($r_{\text{э}}$) и коллекторного ($r_{\text{к}}$) переходов, а также коэффициент обратной связи эмиттер – коллектор $\mu_{\text{эк}}$.

γ - коэффициент инжекции, или эффективность эмиттера, характеризует долю полезного тока в полном токе эмиттера

\varkappa - коэффициент переноса, показывает какая доля носителей прошла без рекомбинации через эмиттерный переход

$$\alpha = \frac{dJ_{\text{к}}}{dJ_{\text{э}}} = \frac{dJ_{\text{эп}}}{dJ_{\text{э}}} \frac{dJ_{\text{к}}}{dJ_{\text{эп}}} = \gamma \cdot \varkappa$$

$$\mu_{\text{эк}} = \left. \frac{dU_{\text{к}}}{dU_{\text{э}}} \right|_{I_{\text{э}} = \text{const}}$$

$$r_{\text{э}} = \left. \frac{dU_{\text{э}}}{dI_{\text{э}}} \right|_{I_{\text{к}} = \text{const}}$$

$$\gamma = \frac{J_{\text{эп}}}{J_{\text{эп}} + J_{\text{эн}}} = \frac{1}{1 + \frac{J_{\text{эн}}}{J_{\text{эп}}}} = \frac{1}{1 + \frac{n_{\text{р0}}}{p_{\text{н0}}}}$$

$$r_{\text{к}} = \left. \frac{dU_{\text{к}}}{dI_{\text{к}}} \right|_{I_{\text{э}} = \text{const}}$$

$$\varkappa \equiv \frac{J_{\text{к}}}{J_{\text{эп}}}$$

транзисторов

$$\mathcal{K} = \frac{dJ_{\text{к}}}{dJ_{\text{эп}}} = \frac{\text{ток диффузионный в базе при } x = W}{\text{ток диффузионный в базе при } x = 0},$$

$$\mathcal{K} = \frac{\partial J_{\text{к}}}{\partial J_{\text{эп}}} = \left(\frac{\frac{\partial p_{\text{n}}}{\partial x} \Big|_{x=0}}{\frac{\partial p_{\text{n}}}{\partial x} \Big|_{x=W}} \right)^{-1}.$$

Продифференцируем уравнение:

$$p(x) = \frac{L_{\text{p}} J_{\text{эп}}}{qDS} \frac{\text{sh}\left(\frac{W-x}{L_{\text{p}}}\right)}{\text{ch}\left(\frac{W}{L_{\text{p}}}\right)} + p_0 \left[(e^{qV_{\text{к}}}} - 1) \cdot \frac{\text{ch}\left(\frac{x}{L_{\text{p}}}\right)}{\text{ch}\left(\frac{W}{L_{\text{p}}}\right)} + 1 \right].$$

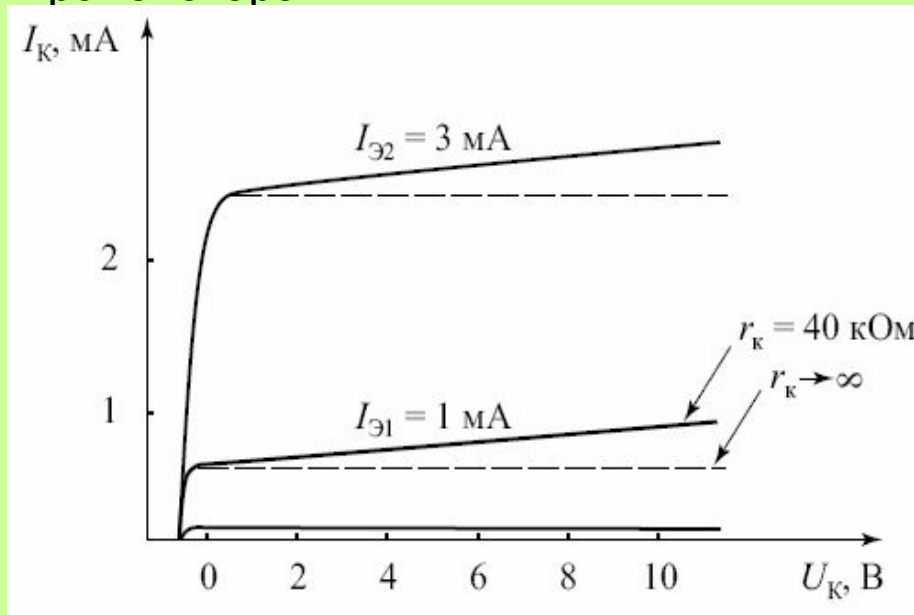
$$\mathcal{K} \equiv \frac{J_{\text{к}}}{J_{\text{эп}}} = \text{ch}^{-1} \frac{W}{L}.$$

$$\mathcal{K} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L} \right)^2.$$

Эффект

Эрли

Изменение коэффициента передачи α биполярного транзистора вследствие модуляции ширины базы при изменении коллекторного напряжения получило название эффекта Эрли. Объёмное сопротивление БТ в схеме с общей базой определяется геометрическими особенностями конструкции биполярного транзистора.



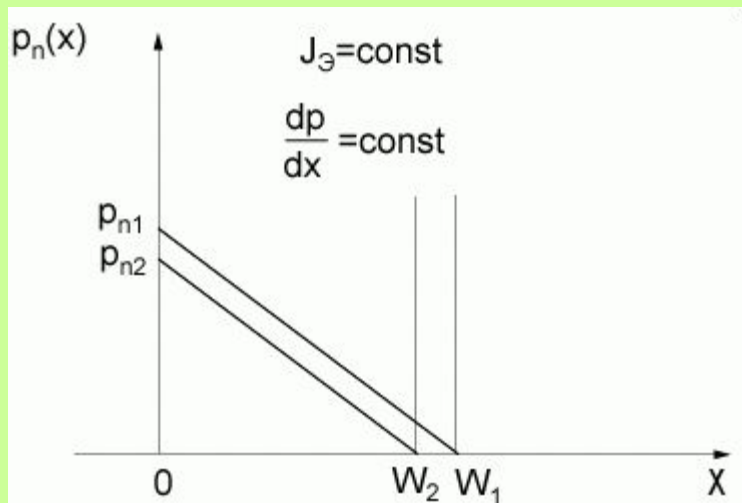
Эффект Эрли

$$r_k = \frac{dU}{dI_{p-n}} \cdot \frac{\partial I_{p-n}}{\partial W} \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial I_k}$$

$$r_k = \frac{\partial U_k}{\partial I_k} = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_s \epsilon_0} \cdot \frac{L^2}{W} \cdot \frac{\sqrt{U_k}}{\mu_s}}$$

Коэффициент обратной связи

$$\mu_{\text{зк}} = \left. \frac{dU_{\text{к}}}{dU_{\text{з}}} \right|_{I_{\text{э}} = \text{const}}$$



При рассмотрении коэффициента обратной связи в ПТ важную роль играет требование постоянства $I_{\text{э}}$.

$$I_{\text{э}} = \text{const}$$

$$dp/dx = \text{const}$$

При увеличении W , уменьшается $U_{\text{э}}$.

$$\mu_{\text{зк}} = - \sqrt{2 \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{q N_{\text{DE}}} \frac{\varphi_1}{W \sqrt{U_{\text{к}}}}$$

БТ в схеме с общим эмиттером

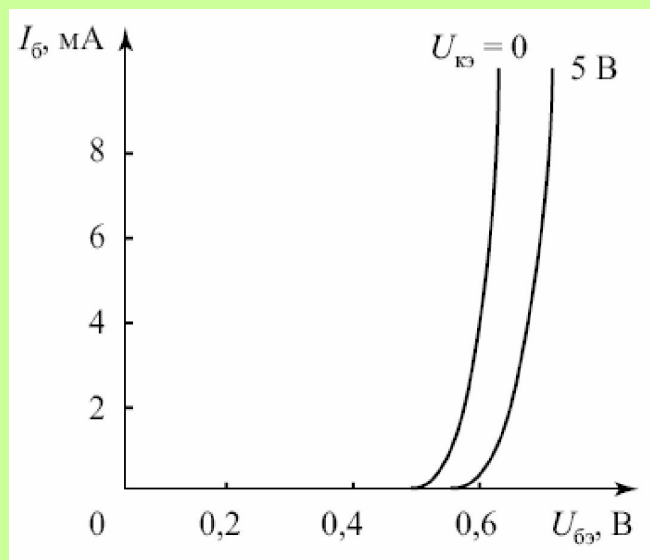
В транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, имеет место усиление не только по напряжению, но и по току. Входными параметрами для схемы с общим эмиттером будут ток базы $I_б$ и напряжение на коллекторе $U_к$, а выходными характеристиками - ток коллектора $I_к$ и напряжение на эмиттере $U_э$.
- коэффициент усиления по току транзистора в схеме с общим эмиттером.

$$I_к = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_б + \frac{I_{к0}}{1-\alpha} + \frac{U_к}{(1-\alpha)r_к}$$

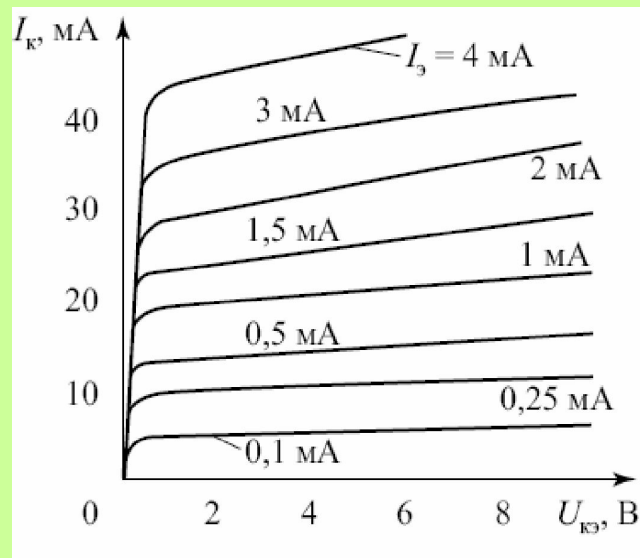
$$I_э = I_б + I_к$$

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

$$U_э = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_б}{I_{э0}}\right)$$



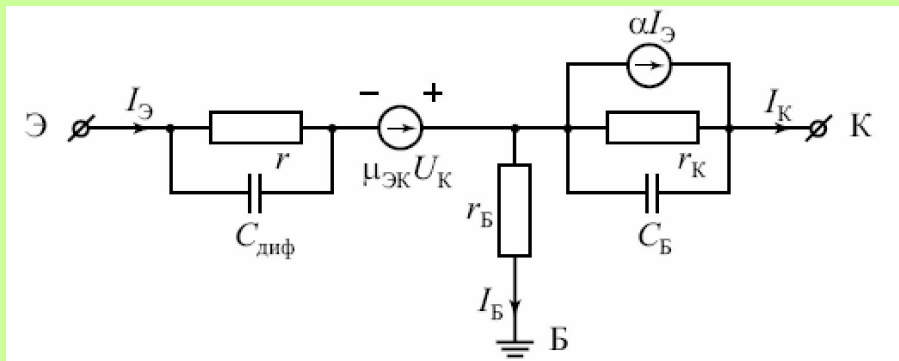
входная ВАХ



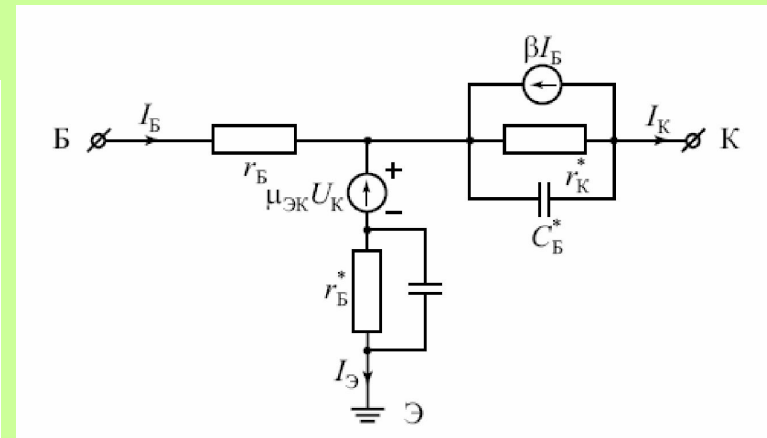
выходная ВАХ

Эквивалентные схемы транзисторов

Иногда для анализа процессов, происходящих в биполярных транзисторах удобнее применять соответствующие эквивалентные схемы, где реальные процессы в нелинейных устройствах описываются с помощью активных (источники тока и напряжения) и пассивных элементов (сопротивления, ёмкости), адекватно описывающих взаимосвязь входных и выходных параметров.



Эквивалентная схема транзистора с общей базой



Эквивалентная схема транзистора с общим эмиттером

Составные транзисторы

Создание мощного высоковольтного транзистора, предназначенного для работы в режиме переключения и характеризующегося переходом из закрытого состояния с высоким обратным напряжением в открытое состояние с большим током коллектора, т. е. с высоким коэффициентом β , имеет схемотехническое решение: два биполярных транзистора имеют характеристики, как для одного транзистора с высоким коэффициентом передачи β эмиттерного тока. Такая комбинация получила название составного транзистора, или схемы Дарлингтона.

$$\beta_{\Sigma} = \beta_1 + \beta_1\beta_2 + \beta_2 \approx \beta_1\beta_2$$

Высокие значения коэффициента усиления в составных транзисторах реализуются только в статическом режиме, поэтому составные транзисторы нашли широкое применение во входных каскадах операционных усилителей.

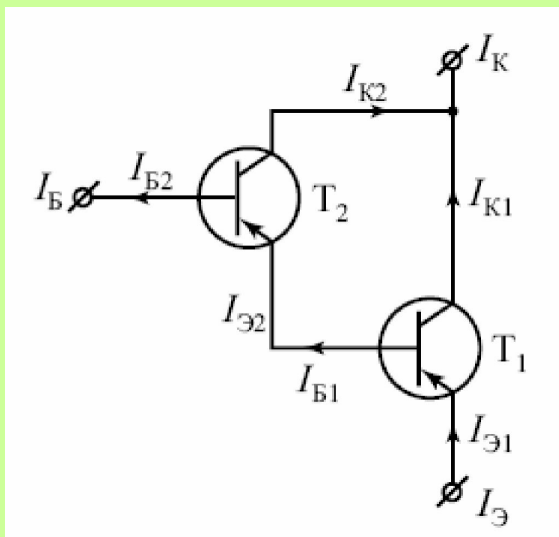


схема составного транзистора

Дрейфовые транзисторы

Для повышения быстродействия транзисторов необходимо увеличить скорость движения инжектированных носителей в базе. Одним из способов этого будет переход от диффузионного к дрейфовому механизму переноса в базе. В дрейфовых транзисторах используется принцип встраивания электрического поля в базу. Этот принцип реализуется путем неоднородного легирования базы.

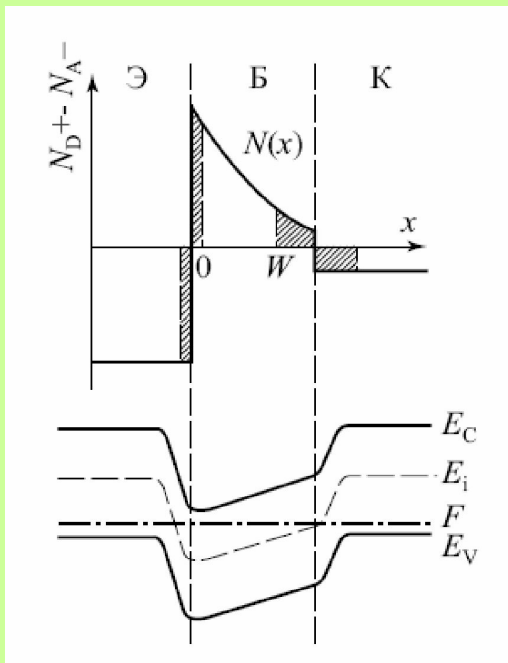
Вводится параметр η – коэффициент неоднородности базы.

$$\eta = \frac{W}{2L_0} = -\frac{1}{2} \ln \frac{N_D(W)}{N_D(0)} = \frac{1}{2} \ln \frac{N_D(0)}{N_D(W)}$$

Время переноса через базу в биполярном транзисторе при дрейфовом и диффузионном переносе:

$$t_{др} = \frac{W}{\mu E} = \frac{W \frac{kT}{q} L_0}{D \frac{kT}{q}} = \frac{WL_0}{D}$$

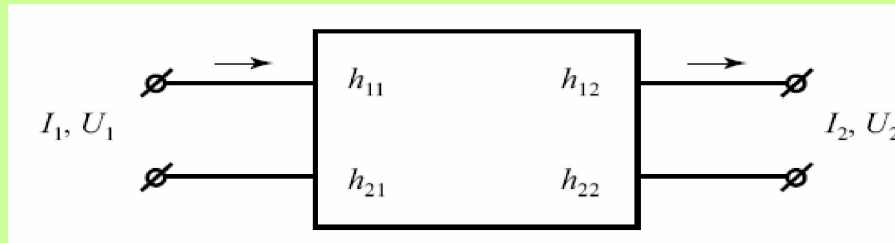
$$t_{диф} = \frac{W^2}{2D}$$



распределение концентрации легирующей примеси дрейфового транзистора и зонная диаграмма

Параметры транзистора как четырёхполюсника

Биполярный транзистор в схемотехнических приложениях представляют как четырёхполюсник и рассчитывают его параметры для такой схемы. Для транзистора как четырёхполюсника характерны два значения тока I_1 и I_2 и два значения напряжения U_1 и U_2 .



четырёхполюсник

z – параметры: измеряются в режиме холостого хода на входе и выходе.

$$z_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad \text{и} \quad z_{22} = \left. \frac{U_2}{I_2} \right|_{I_1=0}$$

- входное и выходное сопротивления

$$z_{12} = \left. \frac{U_1}{I_2} \right|_{I_1=0} \quad \text{и} \quad z_{21} = \left. \frac{U_2}{I_1} \right|_{I_2=0}$$

- сопротивления обратной и прямой передач

y-параметры: измеряются в режиме короткого замыкания на входе и выходе

$$y_{12} = \left. \frac{I_1}{U_2} \right|_{U_1=0} \quad \text{и} \quad y_{21} = \left. \frac{I_2}{U_1} \right|_{U_2=0}$$

- входная и выходная проводимости

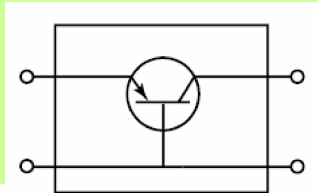
$$y_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2=0} \quad \text{и} \quad y_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{U_1=0}$$

- проводимости обратной и прямой передач

h – параметры

Система h-параметров используется как комбинированная система из двух предыдущих, причем из соображений удобства измерения параметров биполярного транзистора выбирается режим короткого замыкания на выходе и режим холостого хода на входе.

В схеме с общей базой:



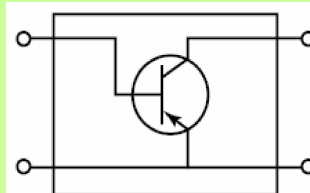
$$h_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2=0} = \left. \frac{U_э}{I_э} \right|_{U_к=0} \approx r_э + (1-\alpha)r_б$$

$$h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2=0} = \left. \frac{I_к}{I_э} \right|_{U_к=0} = \alpha;$$

$$h_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{I_1=0} = \left. \frac{U_э}{U_к} \right|_{I_э=0} = \frac{r_б}{r_к} + \mu_{эк};$$

$$h_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1=0} = \left. \frac{I_к}{U_к} \right|_{I_э=0} = \frac{1}{r_к + r_б} \approx \frac{1}{r_к}$$

С общим эмиттером:



$$h_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2=0} = \left. \frac{U_э}{I_э} \right|_{U_к=0} \approx r_б + (1+\beta)r_э;$$

$$h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2=0} = \left. \frac{I_к}{I_э} \right|_{U_к=0} = \beta;$$

$$h_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{I_1=0} = \left. \frac{U_э}{U_к} \right|_{I_э=0} = \frac{r_э}{r_к} + \mu_{эк} = \frac{r_э}{2r_к^*}$$

$$h_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1=0} = \left. \frac{I_к}{U_к} \right|_{I_э=0} = \frac{1}{r_к^* + r_б} \approx \frac{1}{r_к^*}$$

Где

h_{11} - входное сопротивление при коротком замыкании на выходе

h_{12} - выходная проводимость при холостом ходе во входной цепи

h_{21} - коэффициент обратной связи при холостом ходе во входной цепи

h_{22} - коэффициент передачи тока при коротком замыкании на выходе

Дифференциальные параметры биполярных транзисторов зависят от режимов их работы.