

Транзисторы

Транзистором называется полупроводниковый прибор с тремя и более выводами, который предназначен для усиления, генерации и преобразования электрических сигналов.

Буквально (в переводе) транзистор - это трансформируемый (изменяемый) резистор т.е. прибор с изменяемым внутренним сопротивлением.

По принципу действия и, соответственно, конструкции транзисторы разделяются на два основных вида: **биполярные (БТ)** и **полевые (ПТ)**.

Биполярные транзисторы – в них физические процессы определяются движением как основных, так и неосновных носителей, т.е. определяются явлениями инжекции и экстракции носителей в **p-n** переходе.

Полевые или **униполярные** транзисторы – в этих транзисторах физические процессы определяются движением только основных носителей и свойства этих транзисторов не связаны со свойствами **p-n** переходов.

классификация транзисторов (маркировка: **Т**- биполярные; **П**- полевые)

по типу ПП (наименование типа ПП присутствует в марке тр-тора)	по допустимой рассеиваемой мощности	по максимальной рабочей частоте	по технологии изготовления	по конструкции
Г или 1 – Ge К или 2 – Si А или 3 – GaAs	малая – до 100 mW средняя - 0,3 ÷ 1W большая – P > 1W	НЧ – до 3 мГц СЧ – до 30 мГц ВЧ – до 300 мГц СВЧ– свыше 300мГц	сплавная диффузионная эпитаксиальная	корпусные без корпусные СВЧ коаксиальные

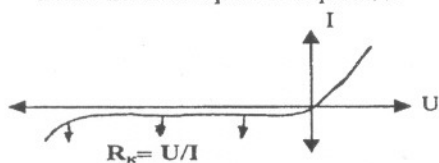
Пример обозначения: **ГТ201** – германиевый (Г), биполярный (Т), средней частоты и малой мощности(2), **01**- номер разработки. Если транзистор проходит военную приёмку, то обозначение будет: **1Т201**. **КП303** или **2П303** – кремниевый полевой транзистор.

Биполярные транзисторы.

Биполярный транзистор (БТ) – это электропреобразовательный прибор с двумя взаимодействующими **p-n** переходами и тремя и более выводами.

Общий принцип действия: управление сопротивлением обратносмещённого (коллекторного) **p-n** перехода с помощью другого (эмиттерного) **p-n** перехода, смещённого в прямом направлении.

ВАХ коллекторного перехода



Чтобы уменьшить сопротивление коллекторного перехода R_k , в него из эмиттерного перехода вливают свободные носители.

Структуры биполярных транзисторов: **n-p-n** и **p-n-p** – они отличаются друг от друга полярностью прикладываемых извне напряжений и направлениями токов текущих в их переходах.

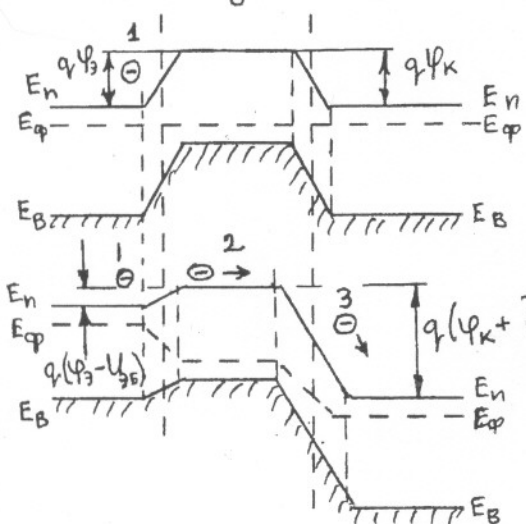
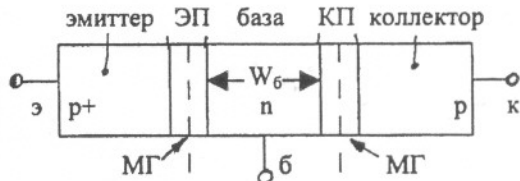
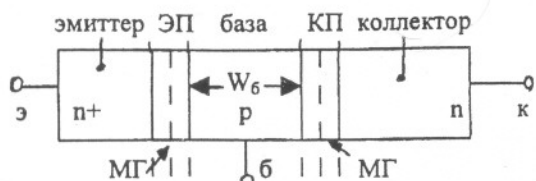
Энергетические диаграммы биполярных транзисторов

(смотри рисунок на следующей странице).

Обозначение транзисторов на схемах: **n-p-n** **p-n-p**

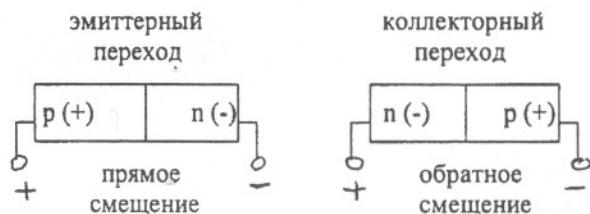
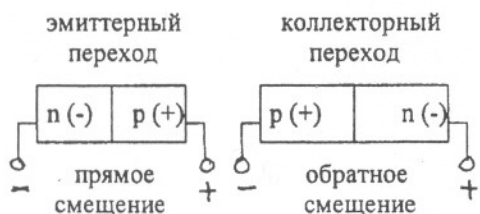
1. В равновесном состоянии электронам из эмиттера перейти в базу мешает барьер $q\phi_3$ – т.е. контактная разность потенциалов эмиттерного перехода (ЭП).

2. При включении биполярного транзистора в активный (усилительный) режим на эмиттерный переход подают прямое смещение, а на коллекторный переход (КП) - обратное ($-U_{эб}$ и $+U_{кб}$), барьер в эмиттерном переходе уменьшается до $q(\phi_3 - U_{эб})$, а в коллекторном переходе барьер увеличивается до $q(\phi_k + U_{кб})$.



транзистор в равновесии

транзистор в активном режиме



3. При снижении энергетического барьера в эмиттерном переходе появляется инжекция основных носителей из эмиттера в базу (электрон-1), причём для усиления инжекции эмиттер делают с большей степенью легирования полупроводника чем степень легирования базы т.е. $N_{дэ} \gg N_{аб}$ - в результате получают несимметричный эмиттерный переход.

4. Электроны -(2, в базе) двигаются к коллекторному переходу в процессе диффузии, рекомбинация носителей в базе при этом мала, т.к. физическая толщина базы – W_6 меньше диффузионной длины пробега электрона $L_{дифф}$.

W_6 - физическая толщина базы – расстояние между обеднёнными областями двух переходов,

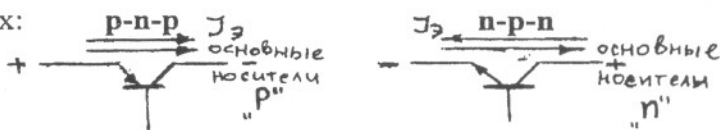
W_{60} – технологическая толщина базы – расстояние между металлургическими границами переходов.

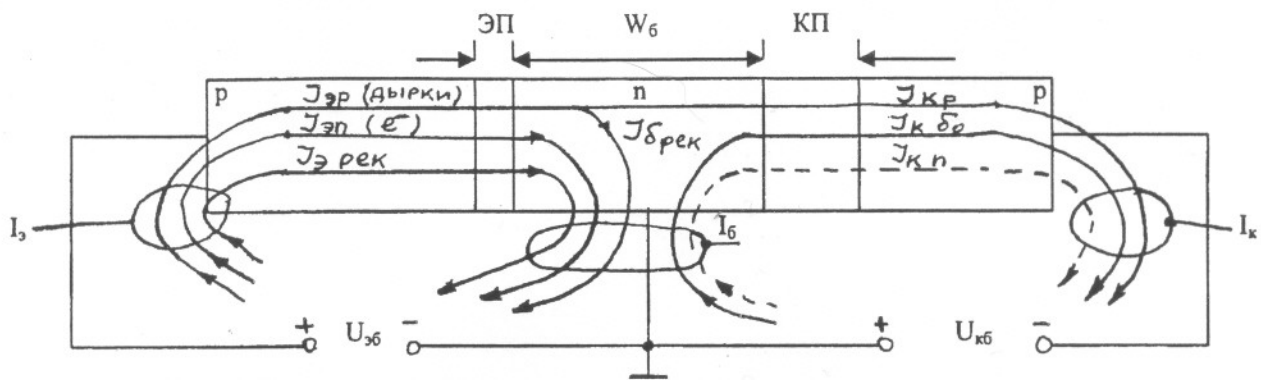
5. Электроны – (3) сильным электрическим полем коллекторного перехода переносятся в область коллектора. Наличие в коллекторном переходе электронов (3) уменьшает его сопротивление.

Приведенная выше простейшая модель работы биполярного транзистора учитывает только движение электронов – т.е. основных носителей в транзисторе с **n-p-n** структурой. В реальности процессы в биполярном транзисторе сложнее.

Рассмотрим, какие токи текут через биполярный транзистор, находящийся в активном режиме и каково соотношение между этими токами. Используем одномерную модель биполярного транзистора.

Направление токов в транзисторах:





Ток эмиттера: $I_3 = I_{3p} + I_{3n} + I_{3рек}$

I_{3p} - эмиттерный ток основных носителей (дырки) – полезный или информационный ток,
 I_{3n} - эмиттерный ток неосновных носителей (e^-) - паразитный ток,
 $I_{3рек}$ - ток рекомбинации носителей в эмиттерном переходе – паразитный ток.

Ток коллектора: $I_k = I_{kp} + I_{кб0} (+ I_{kn})$,

I_{kp} - коллекторный ток основных носителей пришедших из эмиттера – полезный ток,
 $I_{кб0}$ - обратный ток коллекторного перехода, включающий в себя токи тепловой- и термогенерации – это паразитный ток,
 $(+ I_{kn})$ - электронный ток пробоя коллекторного перехода – обозначен пунктиром (паразитный),

Ток базы: $I_б = I_{3n} + I_{3рек} + I_{брек} - I_{кб0} (-I_{kn})$, $I_{брек}$ - основной ток - ток рекомбинации эмиттерных дырок с электронами базы - этот ток - паразитный.

В хорошем биполярном транзисторе должны быть минимизированы паразитные токи:

$$\{ I_{3p} \approx I_{kp} \} \gg \{ I_{3n}; I_{3рек}; I_{брек}; I_{кб0} \}$$

В расчётах обычно принимают: $I_3 \approx I_{3p}$ – полезный эмиттерный ток; $I_k \approx I_{kp}$ – полезный коллекторный ток; $I_3 \approx I_k$; $I_k \gg I_б$.

Коэффициенты передачи тока БП.

Основные коэффициенты: α – статический коэффициент передачи эмиттерного тока,

β – статический коэффициент передачи тока базы.

Коэффициент передачи тока эмиттера в схеме включения транзистора с общей базой (ОБ):

$\alpha = I_k / I_3 = \gamma \cdot \chi \cdot \eta$. α - показывает долю эмиттерного тока в выходной цепи. Причём

$\alpha < 1$ без пробоя коллекторного перехода и $\alpha > 1$ при пробое коллекторного перехода.

γ (гамма) = $I_{3p} / I_3 = [I_{3p} / (I_{3p} + I_{3n} + I_{3рек})] < 1$. γ - всегда меньше единицы – показывает эффективность эмиттера.

χ (каппа) = $I_{kp} / I_{3p} = [I_{kp} / (I_{kp} + I_{брек})] < 1$.

χ - всегда меньше единицы – это коэффициент переноса базы и зависит от физической толщины базы $W_б$,

η (эта) = $I_k / I_{kp} = \{ [I_{kp} + I_{кб0} (+ I_{kn})] / I_{kp} \} > 1$ η - эффективность коллектора, всегда меньше единицы, причём без пробоя коллекторного перехода $\eta \approx 1$, а при лавинном пробое перехода $\eta \gg 1$,

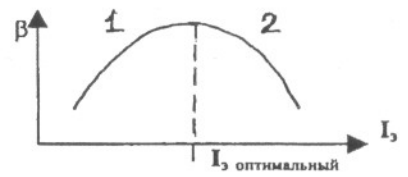
β (бета) = $I_k / I_б = [\alpha / (1 - \alpha)] \gg 1$

β - коэффициент усиления (передачи) тока базы.

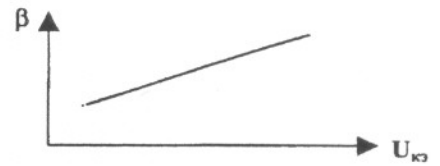
График зависимости β от тока эмиттера I_3 :

1-я область - велика степень рекомбинация носителей в эмиттерном переходе

2-я область - в базе много дырок, при этом уменьшается эффективность инжекции и γ уменьшается (т.е. уменьшается эффективность эмиттера)



В схеме с общим эмиттером β зависит от тока эмиттера I_3 и напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$. Зависимость эта обусловлена двумя эффектами: 1. При увеличении $U_{кэ}$ физическая толщина базы W_6 уменьшается и уменьшается ток $I_{6 рек.}$ Эффект влияния $U_{кэ}$ на толщину базы W_6 – называется эффектом Эрди. 2. Проявляется эффект ударной ионизации в коллекторном переходе.



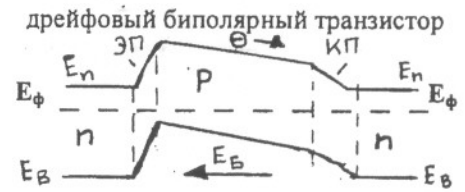
Методы достижения значения α приближающегося к единице ($\alpha \rightarrow 1$):

1- путём уменьшения толщины базы W_6 – при этом уменьшается $I_{6 рек.}$ Обычно делают толщину базы значительно меньше длины диффузионного пробега электрона

$$W_6 = (0,1 \div 1 \text{ мкм}) \ll L_{дифф}$$

2 - путём неоднородного легирования базы с целью создания внутреннего поля базы - E_6 . При этом снижается ток рекомбинации в базе $I_{6 рек.}$

Поле E_6 ускоряет электроны. (справа приведена энергетическая диаграмма n-p-n БТ с неоднородно легированной базой):



3 - путём увеличения концентрации примесей $N_{пр}$ в базе и коллекторе – при этом уменьшается $I_{к60}$, однако и растёт ёмкость коллекторного перехода $C_{кп}$ уменьшая тем самым быстродействие биполярного транзистора!

Режимы работы биполярного транзистора.

Режимы работы БТ определяются полярностью напряжений поданных на эмиттерный (ЭП) и коллекторный (КП) переходы.

Активный режим (АР):

- ЭП под прямым смещением, КП под обратным,
- в ЭП инжекция, а в КП – экстракция носителей,
- $R_{входное}$ – мало, $R_{выходное}$ – велико,
- АР используется в усилительных схемах;

Режим насыщения (РН):

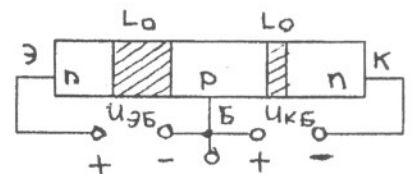
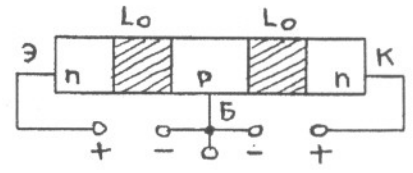
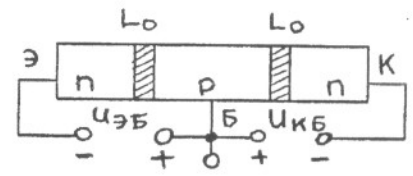
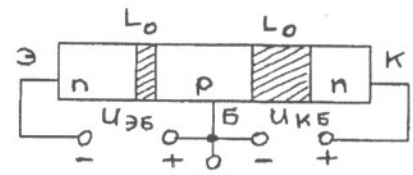
- ЭП под прямым смещением, КП также под прямым,
- идёт инжекция носителей в базу из Э и из К,
- $R_{вх}$ – мало, $R_{вых}$ – мало,
- РН используется в импульсных схемах и соответствует замкнутому ключу - \longrightarrow Кл

Режим отсечки (РО):

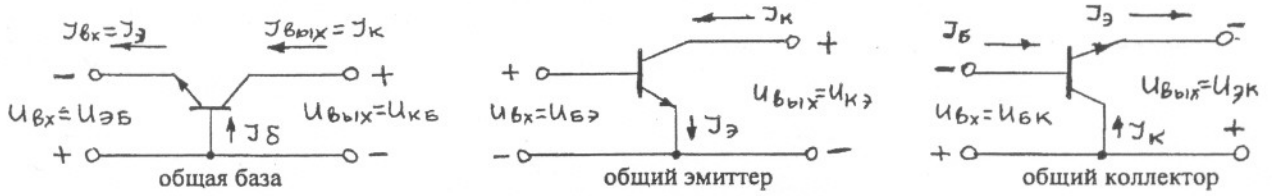
- ЭП и КП под обратным смещением,
- в ЭП и КП идёт только экстракция носителей,
- $R_{вх}$ и $R_{вых}$ – велики,
- РО используется в импульсных схемах и соответствует разомкнутому ключу - \longleftarrow Кл

Инверсный режим (ИР):

- ЭП под обратным, а КП под прямым смещениями,
- в ЭП идёт экстракция, а в КП инжекция носителей,
- $R_{вх}$ – большое, $R_{вых}$ – мало,
- ИР используется в цифровых интегральных схемах,
- у БТ эмиттер и коллектор отличаются как конструктивно, так и степенью легирования (Э - n^+ , К - n) – поэтому АР и ИР не взаимозаменяемы - α и β в ИР много меньше чем в АР.



Схемы включения биполярного транзистора (БТ) n-p-n структуры.



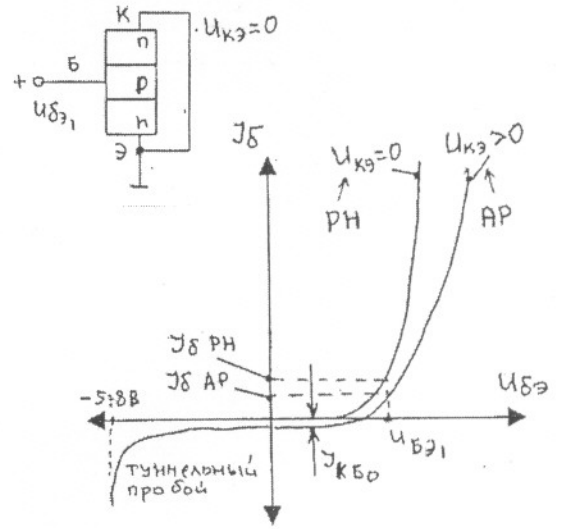
В усилительных каскадах (режим малого сигнала) и в ключевых каскадах (режим большого сигнала) используются схемы включения БТ с общим эмиттером и общей базой. Схема с общим коллектором используется в каскаде называемым эмиттерным повторителем, применяемого с целью согласования входных и выходных сопротивлений каскадов. Область применения схемы с ОК – сравнительно узкая. Основными являются схемы с ОЭ и ОБ, чаще с всего применяются схемы с общим эмиттером.

ВАХ БТ в схеме включения с ОЭ.

Входные ВАХ: $I_b = f(U_{бэ}) | U_{кэ} = \text{const}$

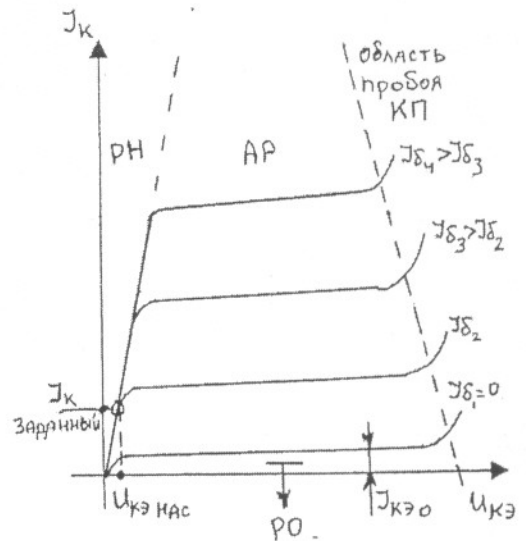
Это выражение читается так: ток базы (I_b) есть функция напряжения между базой и эмиттером при условии, что напряжение между коллектором и эмиттером есть константа.

- при $U_{кэ} = 0$ – транзистор находится в режиме насыщения (РН), При этом режиме происходит инжекция носителей из эмиттерного и коллекторного переходов в базу, ток базы большой – так как идёт ток инжекции двух видов;
- при $U_{бэ} = 0$ ток базы $I_b = -I_{кб0}$ при этом инжекции в ЭП нет,
- при $U_{кэ} > 0$ биполярный транзистор находится в активном режиме (АР), ширина базы сужается (сказывается эффект Эрли), ток базы при этом уменьшается т.к. уменьшается ток $I_{брк}$.



Выходные ВАХ: $I_k = f(U_{кэ}) | I_b = \text{const}$

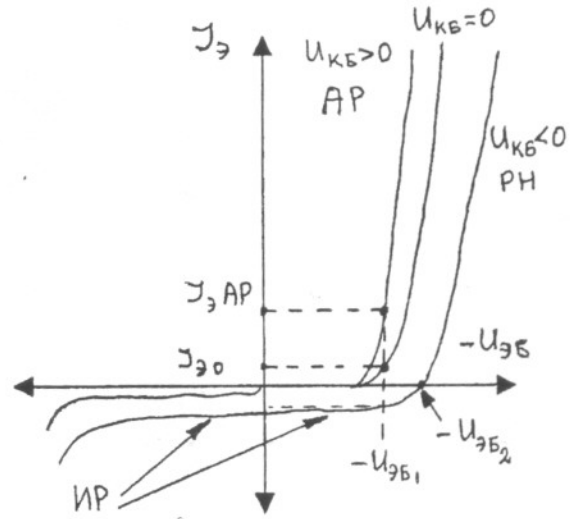
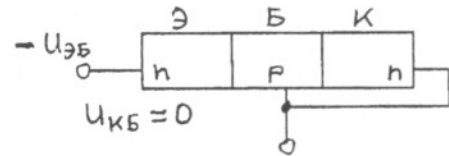
- при токе базы равно нулю $I_b = 0$, обратный ток коллектор-эмиттер $I_{кэ0}$ примерно равен произведению β на величину обратного тока коллектор-база $I_{кб0}$ т. е. $I_{кэ0} \approx \beta \cdot I_{кб0}$, постольку поскольку, из-за положительной обратной связи в БТ, напряжение $U_{кэ}$ частично приоткрывает эмиттерный переход;
- по этой же причине уменьшается сопротивление коллектор-эмиттер и появляется наклон характеристик;
- напряжение $U_{кэ \text{ нас}}$, при заданном I_k , называется напряжением насыщения биполярного транзистора - это табличный параметр;
- при напряжении $U_{кэ}$ больше, чем $U_{бэ}$ – транзистор переходит в АР (активный режим).



ВАХ БТ в схеме включения с ОБ.

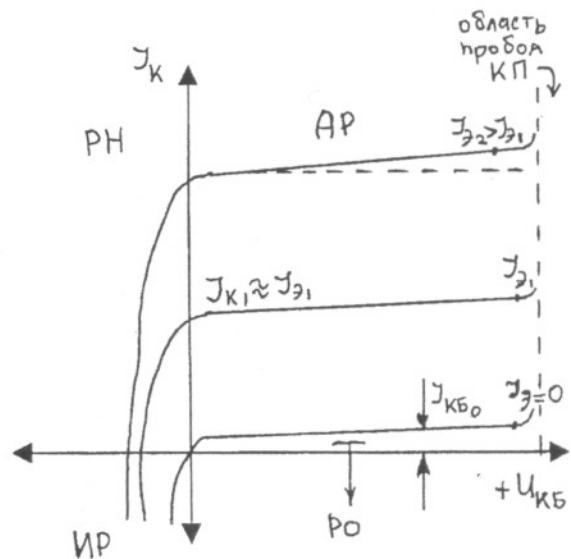
Входные ВАХ: $I_3 = f(U_{36})|_{U_{кб} = \text{const}}$

- при $U_{кб} = 0$ входная ВАХ БТ будет практически соответствовать ВАХ эмиттерного перехода (т.е. при некотором U_{361} ток транзистора будет равен току I_{30});
- при $U_{кб} > 0$ БТ переходит в АР (активный режим); при U_{361} ток эмиттера увеличивается до величины $I_{3АР}$, т.к. количество носителей инжектированных через эмиттерный переход не изменилось, но скорость их ухода из базы – увеличилась за счёт уменьшения ширины базы $W_б$ (сказывается эффект Эрли);
- при $U_{кб} < 0$ БТ переходит в РН (режим насыщения), при некотором ($-U_{362}$) ток эмиттера становится равным нулю $I_3 = 0$, т.к. ток инжекции из эмиттера компенсируется током инжекции из коллектора;
- при $|U_{36}| < |U_{362}|$ БТ переходит в ИР.



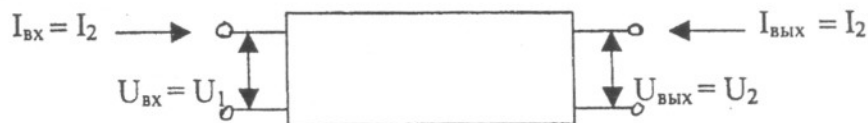
Выходные ВАХ: $I_к = f(U_{кб})|_{I_3 = \text{const}}$

- при $I_3 = 0$ нет инжекции через ЭП и через КП течёт ток $I_{кб0}$;
- при $U_{кб} = 0$ ток коллектора $I_к = \alpha I_3 \approx I_0$;
- при увеличении напряжения $U_{кб}$ характеристики идут с небольшим подъёмом из-за эффекта Эрли (уменьшается ширина базы $W_б$, уменьшается ток рекомбинации носителей в базе $I_{б рек}$, увеличивается ток коллектора $I_{кп}$);
- при отрицательном напряжении ($-U_{кб}$) БТ переходит в РН (режим насыщения), при этом ток $I_к$ уменьшается и меняет знак при переходе в ИР (инверсный режим).



БТ как линейный четырёхполюсник. Малосигнальные параметры БТ.

Для любой схемы (с ОЭ, ОБ, ОК) биполярный транзистор можно представить как четырёхполюсник, связь между токами и напряжениями в котором, в общем случае представляется двумя функциями (уравнениями). Независимыми переменными можно выбрать любые две из четырёх величин $I_1; I_2; U_1; U_2$.



Для большинства схем, называемых линейными, токи и напряжения складываются из сравнительно больших постоянных составляющих ($I_2; U_2$) и малых переменных составляющих, которые можно рассматривать как малые приращения ΔI ; ΔU .

Какие это схемы – это усилители.

В пределах малых изменений напряжений и токов статические характеристики транзистора являются линейными. Поэтому фундаментальные зависимости тоже будут линейными.

Если принять в качестве независимых переменных $\Delta I_{вх}$ и $\Delta U_{вых}$ то:

$$\Delta U_{вх} = h_{11} \Delta I_{вх} + h_{12} \Delta U_{вых}$$

$$\Delta I_{вых} = h_{21} \Delta I_{вх} + h_{22} \Delta U_{вых}$$

где коэффициенты – h_{11} ; h_{12} ; h_{21} ; h_{22} называются малосигнальными h -параметрами биполярных транзисторов. В общем виде:

$$\Delta U_{вх} = f(\Delta I_{вх}; \Delta U_{вых})$$

$$\Delta I_{вых} = f(\Delta I_{вх}; \Delta U_{вых})$$

Физический смысл h – параметров.

- $h_{11} = \Delta U_{вх} / \Delta I_{вх} |_{\Delta U_{вых}=0}$ - дифференциальное входное сопротивление биполярного транзистора при $U_{вых} = \text{const}$ ($\Delta U_{вых} = 0$);
- $h_{12} = \Delta U_{вх} / \Delta U_{вых} |_{\Delta I_{вх}=0}$ - коэффициент обратной связи по напряжению (КОС) в БТ при условии, что $I_{вх} = \text{const}$ или $\Delta I_{вх} = 0$;
- $h_{21} = \Delta I_{вых} / \Delta I_{вх} |_{\Delta U_{вых}=0}$ - коэффициент передачи по току БТ при условии, что $U_{вых} = \text{const}$ или $\Delta U_{вых} = 0$;
- $h_{22} = \Delta I_{вых} / \Delta U_{вых} |_{\Delta I_{вх}=0}$ - дифференциальная выходная проводимость БТ при условии, что $I_{вх} = \text{const}$ или $\Delta I_{вх} = 0$.

Физический смысл: $h_{11} = r_{вх}$; $h_{21} = \alpha$ в схеме с общей базой и $h_{21} = \beta$ в схеме с общим эмиттером; $h_{22} = 1/r$; h_{12} - эта величина обусловлена эффектом Эрли (при изменении выходного напряжения появляется положительная обратная связь между выходом транзистора и его входом за счёт ΔW_6 т.е. изменения ширины базы – эффект модуляции базы).

Методика расчёта h -параметров по ВАХ биполярного транзистора приведена в руководстве по выполнению лабораторной работы “Исследование ВАХ биполярного транзистора”.

Простейшие электрические схемы на БТ.

Схема с ОЭ. Транзистор $n-p-n$.

$$r_{вхэ} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_б = \Delta U_{бэ} \beta / \Delta I_к \approx \beta \Delta U_{бэ} / \Delta I_к \approx \beta r_э,$$

где $\beta = \Delta I_к / \Delta I_б$, отсюда $\Delta I_б = \Delta I_к / \beta$,

$r_э$ (сопротивление эмиттера) = $1 \div 100$ Ом;

$K_{iэ} = \Delta I_к / \Delta I_б = \beta$ - схема усиливает входной ток – это коэффициент передачи по току для схемы с ОЭ;

$K_{uэ} = \Delta U_{кэ} / \Delta U_{бэ} = R_н \Delta I_к / r_э \beta \Delta I_б \approx R_н / r_э$ - схема с ОЭ - усиливает входное напряжение $\beta \Delta I_б \approx \Delta I_к$;

$K_{pэ} = \Delta P_{вых} / \Delta P_{вх} = R_н \Delta I_к^2 / r_{вхэ} \Delta I_б^2 = \beta^2 R_н / r_{вхэ} \approx \beta R_н / r_э$ - схема с ОЭ усиливает мощность;

$r_{выхэ} = R_н r_{iэ} / (R_н + r_{iэ})$, где $r_{iэ} = \Delta U_{кэ} / \Delta I_к$ – наклон ВАХ; схема с ОЭ **меняет** фазу входного сигнала на 180° ;

недостаток схемы с ОЭ - низкая температурная стабильность:

возникает наклон ВАХ в зависимости от температуры

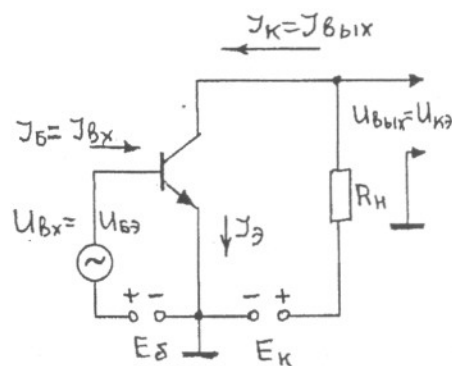


Схема с ОБ.

$r_{вх\ б} = \Delta U_{эб} / \Delta I_3 = r_3$ - по входной ВАХ, $1 \div 10 \text{ Ом}$ - входное сопротивление мало - это недостаток схемы с ОБ;

$K_{i\ б} = \Delta I_k / \Delta I_3 = \alpha \approx 1$, нет усиления тока;

$K_{u\ б} = \Delta U_{кб} / \Delta U_{эб} = R_H \Delta I_k / r_3 \Delta I_3 \approx R_H / r_3$ - схема с ОБ усиливает напряжение;

$K_{p\ э} = \Delta P_{ввых} / \Delta P_{вх} = R_H \Delta I_k^2 / r_3 \Delta I_3^2 = \alpha^2 R_H / r_3 \approx R_H / r_3$ - схема с ОБ усиливает мощность;

$r_{ввых\ б} = R_H r_{кп} / (R_H + r_{кп})$ - большое (т.к. сопротивление $r_{кп} = 0,1 \div 100 \text{ МОм}$) - это достоинство схемы с ОБ позволяет использовать большое R_H ;

схема с ОБ **не меняет** фазу входного сигнала; достоинство ОБ - высокая термостабильность;

наклон ВАХ небольшой: \longrightarrow

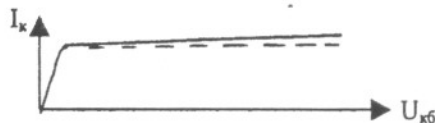
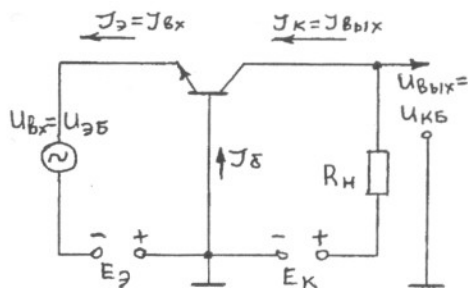


Схема с ОК.

$r_{вх\ к} = \Delta U_{бк} / \Delta I_б = (\Delta U_{бэ} + \Delta U_H) / \Delta I_б \approx (\beta r_3 + \beta R_H) \approx \beta (r_3 + R_H) \approx \beta R_H$; $r_{вх\ к}$ - велико;

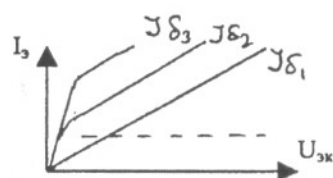
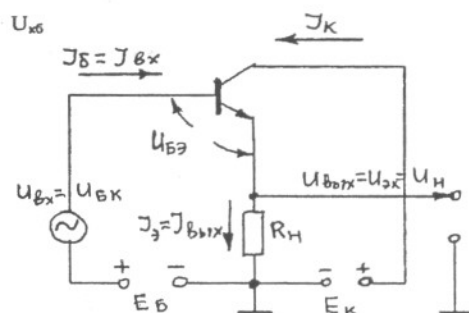
$K_{i\ к} = \Delta I_3 / \Delta I_б \approx \beta$ - схема с ОК усиливает ток;

$K_{u\ к} = \Delta U_H / \Delta U_{вх} \approx R_H \Delta I_3 / \beta r_3 \Delta I_б (r_3 + R_H) \approx R_H / (r_3 + R_H) \approx 1$, схема с ОК называется - эмиттерный повторитель - потому что не меняет фазу и амплитуду входного сигнала;

$K_{p\ к} = \Delta P_{ввых} / \Delta P_{вх} = R_H \Delta I_3^2 / \beta (r_3 + R_H) \Delta I_б^2 = \beta^2 R_H / \beta (r_3 + R_H) \approx \beta$ - усиливает мощность;

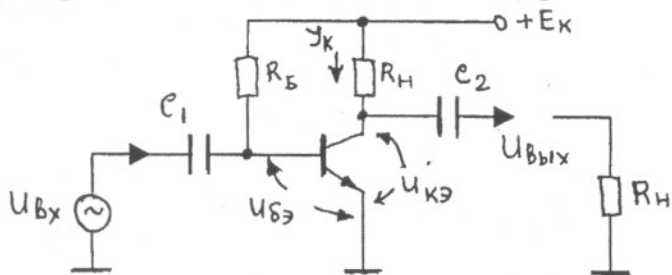
$r_{ввых\ к} = R_H r_{i\ к} / (R_H + r_{i\ к})$, где $r_{i\ к} = \Delta U_{эк} / \Delta I_3 < r_{i\ э} < r_{кп}$ поэтому $r_{ввых\ к}$ - маленькое (сотни Ом)

$r_{i\ к}$ = внутреннее сопротивление - мало т.к. большой наклон выходных ВАХ \longrightarrow

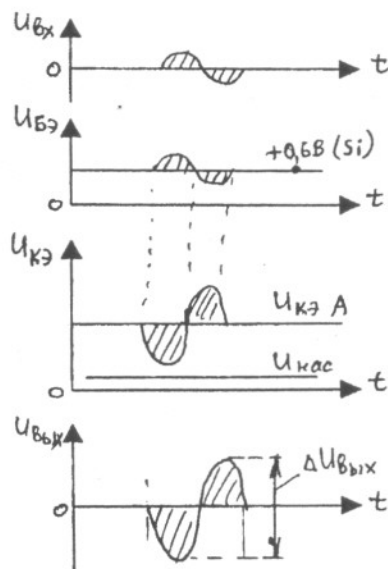


Биполярный транзистор в режиме малого сигнала (усилитель).

Простейший каскад с общим эмиттером.

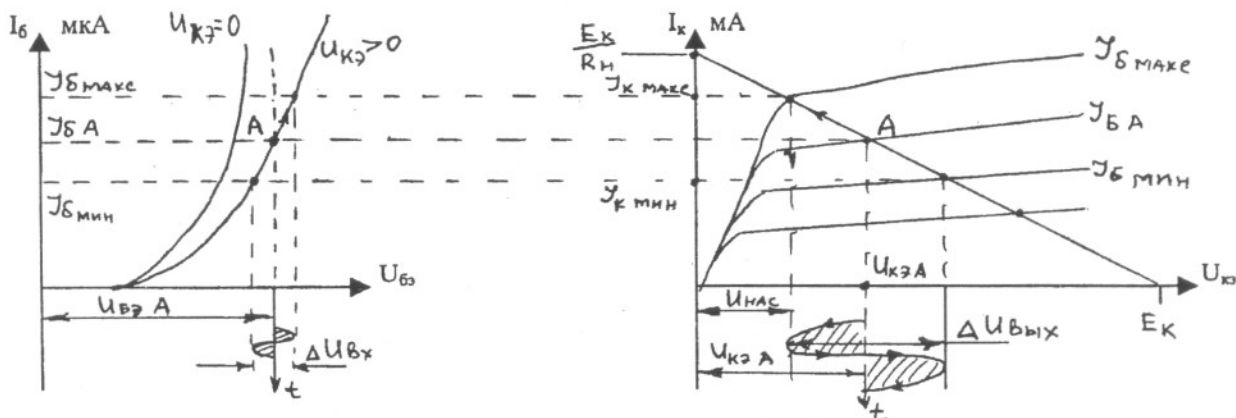


1. БТ не усиливает, а перераспределяет энергию источника питания в нагрузку т.е. в $R_{входное}$ следующего каскада;
2. C_1 ; C_2 - разделительные конденсаторы;
3. $R_б = (E_к - U_{бэА}) / I_{бА}$ с помощью этого сопротивления устанавливается режим входного тока (тока базы) для рабочей точки "А" на ВАХ транзистора;

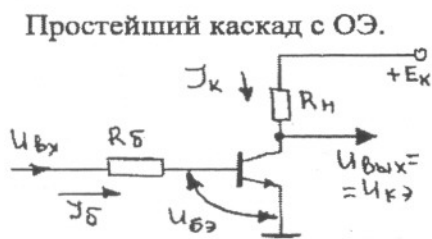


4. $U_{кэА} = U_{нас} + (E_{к} - U_{нас})/2$ (см. график) – напряжение в рабочей точке “А”.
5. Токи: $I_{к макс} = \beta I_{б макс}$; $I_{к мин} = \beta I_{б мин}$.
6. Каскад с ОЭ меняет фазу входного сигнала на 180° .
7. Коэффициент передачи сигнала по напряжению схемы с общим эмиттером:

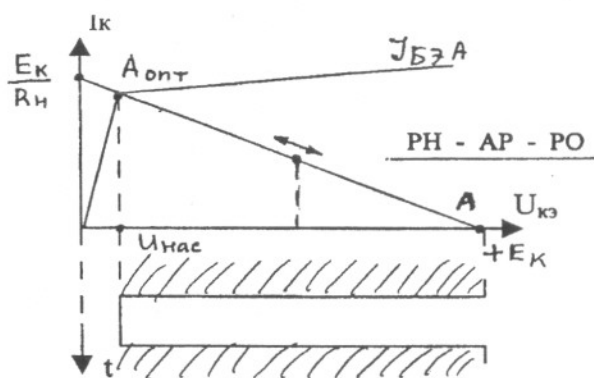
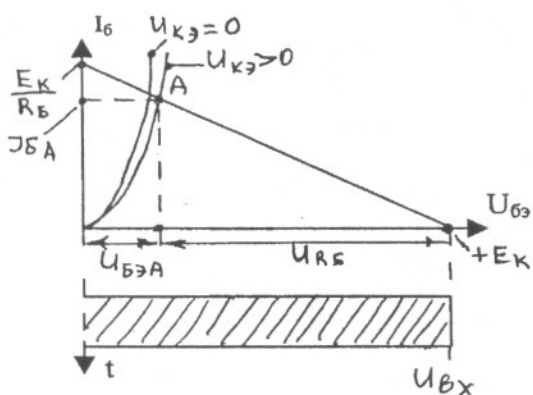
$$K_{uэ} = S(R_{н} \parallel r_{iэ}) = \beta R_{н}/r_{iэ} (1 + R_{н}/r_{iэ}) = R_{н}/r_{э} \quad S_{БТ} = \Delta I_{к} / \Delta U_{бэ} - \text{крутизна ВАХ}$$



Биполярный транзистор в режиме большого сигнала (электронный ключ).



Графический анализ:



- $U_{вх} = +E_{к}$ - амплитуда сигнала поступающего с предыдущего каскада;
- $R_{б}$ - ограничительный резистор, $R_{б} = (U_{вх} - U_{бэА}) / I_{бэА}$ - оптимальный для режима насыщения (РН);
- $R_{н}$ - сопротивление нагрузки биполярного транзистора;
- $U_{нас} < U_0 < E_{к}/2$ - уровень логического нуля;
- $E_{к}/2 < U_1 < E_{к}$ - уровень логической единицы.

Влияние ёмкостей переходов биполярного транзистора на реальную форму импульса.

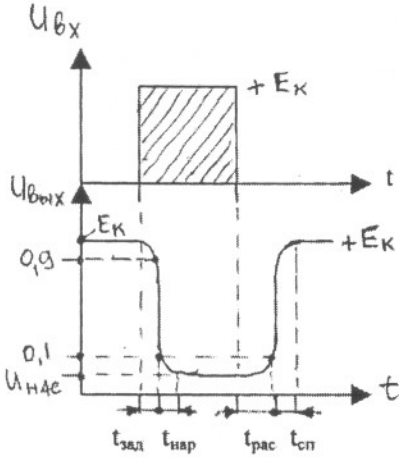
$t_{зад}$ - время задержки фронта импульса из-за перезаряда барьерных ёмкостей $C_{кп}$ и $C_{эп}$, БТ переходит из

режима РО в режим АР (происходит задержка инжекции носителей из эмиттера в базу;

$t_{нар}$ - время нарастания импульса $I_{к0,1} \rightarrow I_{к0,9}$; это время на перезарядку $C_{кп}$ и $C_{эп}$ и прибавляется время на пролёт носителей из базы в коллектор, режим переходит из АР в РН.

$t_{рас}$ - время рассасывания импульса - происходит обратное движение неосновных носителей в базе плюс время на рекомбинацию носителей, каскад переходит из режима РН в режим АР.

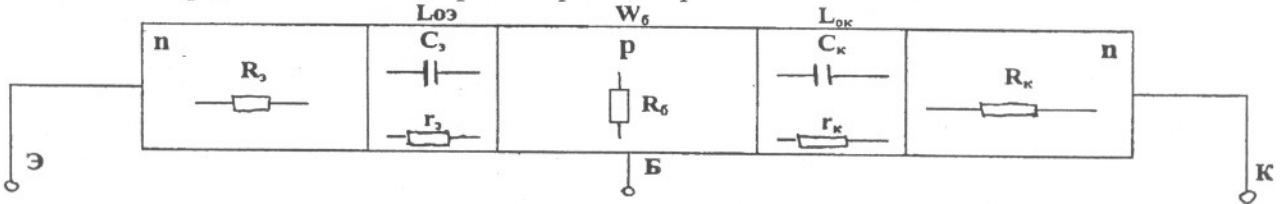
$t_{сп}$ - время спада амплитуды импульса от уровня $I_{к0,9}$ до уровня $I_{к0,1}$, происходит перезаряд ёмкостей $C_{кп}$ и $C_{эп}$ и режим работы каскада переходит из АР в РО.



Время включения БТ: $t_{вкл} = t_{зд} + t_{нар}$
 Время выключения БТ: $t_{вык} = t_{рас} + t_{сп}$

Работа биполярного транзистора на высокой частоте.

Элементы инерционности биполярного транзистора:



$R_э; R_б; R_к$ - объёмные сопротивления областей эмиттера, базы и коллектора.

$r_э; r_к$ - дифференциальные сопротивления эмиттерного и коллекторного переходов.

$C_э; C_к$ - ёмкости эмиттерного и коллекторного переходов.

$L_{ээ}; L_{ок}$ - ширина обеднённых слоёв(областей) эмиттерного и коллекторного переходов.

$W_б$ - физическая толщина базы.

Определение: частоту можно считать высокой, если период колебания соизмерим со временем протекания физических процессов в электронном приборе.

Быстродействие биполярного транзистора определяется временем переноса носителя из эмиттера в коллектор: $\tau_{\Sigma} = \tau_{эк} = \tau_э + \tau_б + \tau_{кп} + \tau_к$, где

$\tau_э \approx C_э r_э$ (при $R_э$ стремящимся к нулю) - это постоянная времени эмиттерного перехода;

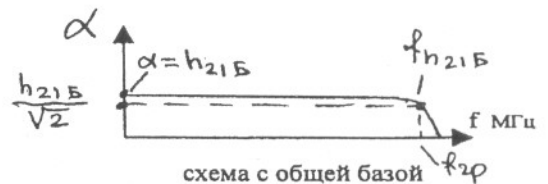
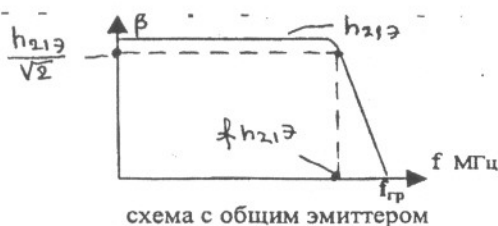
$\tau_б = W_б^2 / D \eta$ - среднее время пролёта электрона через базу ($\eta = 2$ для дрейфового и $\eta =$ десяткам - для бездрейфового транзисторов; D - коэффициент диффузии);

$\tau_{кп} = L_к / V_{др нос}$ - время пролёта носителя через коллекторный переход ($V_{др}$ - скорость дрейфа);

$\tau_к = C_к R_к$ - (при $r_к \rightarrow \infty$) - постоянная времени коллекторного перехода.

Важнейший табличный параметр - граничная частота биполярного транзистора - $f_{гр} = 1/\tau_{\Sigma}$.

Графически $f_{гр}$ определяется при условии $h_{21э} = 1 \approx h_{21б}$



Для увеличения граничной частоты $f_{гр}$ необходимо:

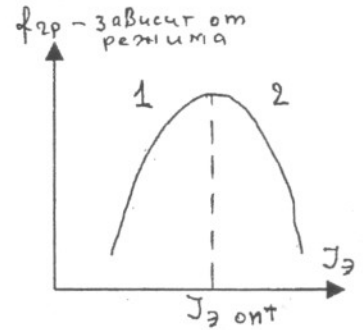
- уменьшать площади эмиттерного и коллекторного переходов – при этом уменьшается ёмкость этих переходов;
- уменьшать толщину базы;
- использовать дрейфовый биполярный транзистор;
- использовать структуру **n-p-n**; - использовать **GaAs**.

Эти требования – противоречивы: например - если уменьшать площадь перехода, то снижается величина рабочих токов, а если уменьшать толщину базы – то уменьшается допустимое рабочее напряжение коллектора и так далее. Поэтому высокочастотные свойства биполярного транзистора – это результат конструктивных компромиссов.

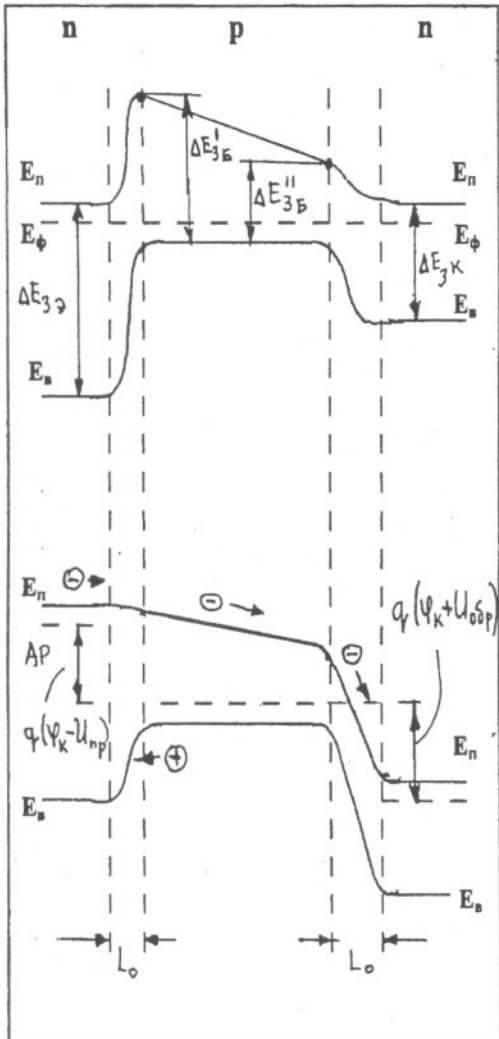
Граничная частота $f_{гр}$ зависит и от рабочего режима:

1-ая область - область малого уровня инжекции – увеличивается дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода $r_э$, т.е. увеличивается постоянная времени этого перехода $\tau_э$ и в результате снижается граничная частота $f_{гр}$.

2-ая область - область большого уровня инжекции – появляется эффект Кирка: при большом токе эмиттера - в базе резко увеличивается количество электронов, что по принципу электронейтральности повышает и количество дырок, область коллекторного перехода смещается в сторону коллектора, база расширяется, при этом увеличивается $\tau_б$ и уменьшается $f_{гр}$.



Гетероструктурные биполярные транзисторы.



Основные недостатки дрейфовых транзисторов:

1. Для уменьшения постоянной времени $\tau_б$ базы необходимо сильно легировать область базы на границе с эмиттером, однако это ухудшает эффективность эмиттера γ .
2. На границе с коллектором база легирована слабо, поэтому появляются эффект Эрли (эффект модуляции базы) и возникает ПОС (положительная обратная связь).

Эти недостатки можно устранить используя в качестве эмиттерного перехода – гетеропереход, а в качестве базы- вариозонный (т.е. с переменной шириной запрещённой зоны) полупроводник.

Преимущества гетероэмиттерного вариозонного БТ:

1. Поскольку $\Delta E_{зэ} > \Delta E_{зб}$, то при $U_{пр} = \phi_k$ идёт инжекция только электронов, поэтому эффективность эмиттера $\gamma = I_{эн} / (I_{эн} + I_{эп} + I_{эрек}) \approx 1$, т.к. $I_{эп} = 0$, а $I_{эн} \gg I_{эрек}$ при рабочих токах эмиттера.

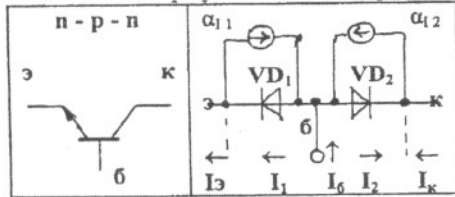
2. База высоколегирована, т.е. $N_{аб} \gg N_{дэ}$ и $N_{аб} \gg N_{дк}$, причём она легирована равномерно, но $\Delta E_{зб} > \Delta E_{зб}$ т.к. по длине базы меняется концентрация (примерно на 30%) добавочного элемента (например Al в сплаве GaAlAs), определяющего ширину $\Delta E_{зб}$.

В результате электроны в базе ускоряются, а дырки не ускоряются ($\chi \rightarrow 1$, см. стр 3 - коэффициенты передачи тока БТ) – область обеднения при обратном смещении $U_{обр кп}$ на коллекторном переходе смещается в коллектор и при этом отсутствует положительная (по знаку) обратная связь (ПОС).

Экспериментальные гетероструктурные биполярные транзисторы имеют характеристики: материал структуры – GaAlAs – GaAs или GaP - AlGaP; ширина базы $W_b = 0,1 \div 0,3 \mu\text{м}$; коэффициент передачи по току $h_{21} = \beta \approx 1000$; рабочая температура $T^{\circ}\text{C} = -195 \div + 550$; граничная рабочая частота $f_{h_{21}} \approx 20 \text{ ГГц}$.

Простейшая модель биполярного транзистора – модель Эберса-Молла.

Эта модель позволяет получить аналитические выражения для любых вольтамперных характеристик биполярного транзистора включенного по схемам с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором. Недостаток этой модели в том, что она не учитывает сопротивления эмиттера, базы, коллектора (R_e, R_b, R_k), не учитывает токи рекомбинации носителей $I_{рек}$ и обратный ток коллектора $I_{к0}$, а так же не учитывает эффекты Эрли (изменение ширины базовой области при изменении напряжений $U_{эб}$ и $U_{кб}$ на переходах, см. стр.7) и Кирка (при больших токах коллектора увеличивается время задержки $\tau_{э,к}$ и поэтому ограничивается значение рабочего тока I_3).



VD_1 – модель ЭП

VD_2 – модель КП

α_{11} – моделирует передаточный ток эмиттер – коллектор

α_{12} – моделирует передаточный ток коллектор - эмиттер

Особенности интегральных биполярных транзисторов.

Определение: Интегральная схема (ИС) – это электронный прибор, состоящий из взаимосвязанных интегральных и дискретных электронных компонентов и выполняющий определённую функцию преобразования сигнала.

Основными достоинствами ИС являются малые размеры; высокая надёжность; низкая стоимость; возможность массового автоматизированного производства.

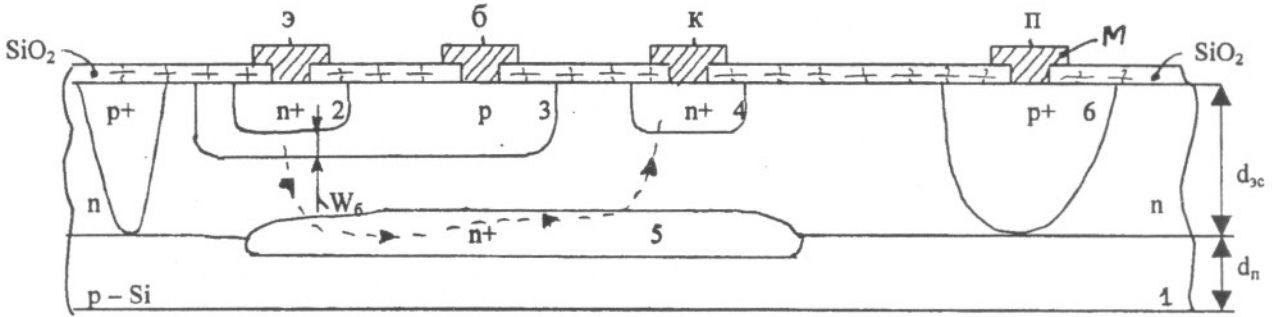
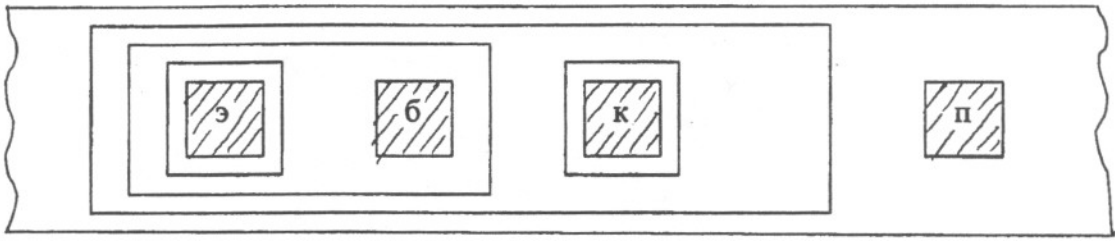
Существуют три основных вида ИС: 1. Плёночные ИС (состоят из пассивных R, L, C элементов); 2. Гибридные ИС (представляют из себя комбинацию плёночных ИС и дискретных бескорпусных активных элементов - транзисторов и диодов); 3. Полупроводниковые ИС (активные и пассивные элементы выполнены на одной полупроводниковой монокристаллической основе – подложке) – это основной вид интегральных схем.

По степени интеграции т.е. по плотности элементов на одном мм^2 ИС делятся на простые ($k < 1$; $N < 10$); средние ($1 < k < 2$); большие - БИС ($2 < k < 3$) и сверхбольшие – СБИС ($3 < k$; $N > 10000$). $k = \lg N$, где N – число элементов на кристалле.

Методы изоляции элементов полупроводниковых интегральных схем

	метод	достоинства метода	недостатки метода
1	изоляция обратносмещённым p-n переходом	- органично сочетается с общим технологическим процессом изготовления ИС, - простой, дешёвый, хорошо подходит для массового производства	- наличие обратных токов p-n переходов и зависимость от температуры - наличие барьерных ёмкостей - ёмкостная связь между элементами - плохая радиационная стойкость
2	изоляция диэлектриком	- нет токов утечки - малые паразитные ёмкости - высокая радиационная стойкость	- дорог - сложный, особенно в глубине подложки
3	комбинированный – p-n переход (донная часть) и диэлектрик SiO_2 – боковая изоляция “карманов”	- меньшие ёмкости и токи утечки по сравнению с изоляцией только p-n переходом	- параметры изоляции хуже, чем у второго метода

Структура и топология биполярного транзистора в интегральном исполнении (ИБТ).



Это - биполярный, эпитаксиально-планарный **n-p-n** транзистор с изоляцией между структурами путём использования обратносмещённого (т.е. закрытого) **p-n** перехода.

1. Исходная подложка толщиной $d_n \approx 200 \div 300$ мкм (**p-Si**).

Эпитаксиальный, выращенный на подложке слой **n**-типа толщиной $d_{эс} \approx$ единицы мкм.

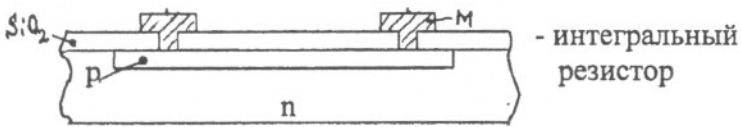
2. Область эмиттера **n⁺**-типа (знак + - высокая концентрация примеси) – для увеличения инжекции.

3. Область базы **p**-типа, легирована неравномерно – транзистор дрейфовый.

4. Область **n⁺**-типа с целью создания омического перехода (для увеличения площади контакта).

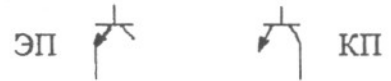
5. Область **n⁺**-типа (скрытый слой) – для уменьшения сопротивления R_k коллектора и увеличения быстродействия транзистора.

6. Область **p⁺**-типа – выполняет функцию боковой изоляции образуя “карман”, внутри которого и находится структура транзистора.



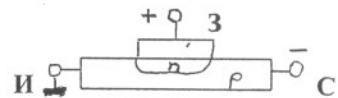
- интегральный резистор

интегральные диоды:



используется один из переходов ИБТ.

Полевые транзисторы.



Полевой транзистор - это полупроводниковый прибор, где **дрейфовый** ток основных носителей происходит в канале, проводимость которого управляется напряжением поперечного электрического поля. (Работа биполярного транзистора связана не дрейфом, а с диффузией неосновных носителей через базовую область). В связи с тем, что физические процессы в полевых транзисторах определяются только основными носителями (дырками или электронами), они ещё называются **униполярными** транзисторами.

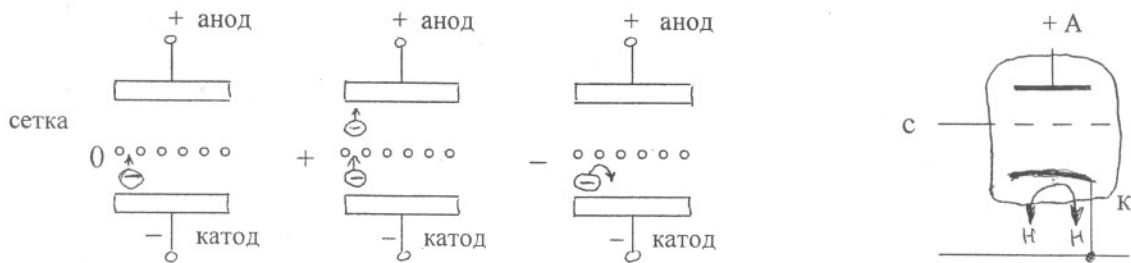
Полевой транзистор (ПТ) можно рассматривать как резистор или как полупроводниковый канал, заключённый между двумя выводами (электродами) называемыми **истоком** и **стоком**. Сопротивление канала определяется степенью концентрации свободных носителей в его объёме. Воздействуя на эту концентрацию поперечным электрическим полем через третий вывод (электрод) – **затвор**, можно изменять величину сопротивления или проводимости канала, т.е. управлять током носителей через полевой транзистор.

Полевые транзисторы бывают трёх типов, отличающимися между собой конструкцией управляющего электрода – **затвора**.

Полевые транзисторы (ПТ)						
С затвором в виде управляющего р-п перехода с п- и р-каналами	С затвором Шотки		С затвором изолированным от канала диэлектриком – МДП или МОП ПТ			
	обычно с п-каналом		с р-каналом		с п-каналом	
транзистор обычно нормально открыт – т.е. при отсутствии напряжения на затворе проводит ток	нормально закрытый	нормально открытый	нормально закрытый (канал индуцированный)	нормально открытый (канал встроенный)	нормально закрытый (канал индуцированный)	нормально открытый (канал встроенный)
обычно используются в качестве НЧ дискретных приборов	обычно с п-каналом, материал GaAs, используются в СВЧ ПТ или в сверхскоростных ИС		есть дискретные ПТ, но наиболее широко МОП ПТ применяются в ИС и СБИС, обладая очень малым потреблением энергии.			

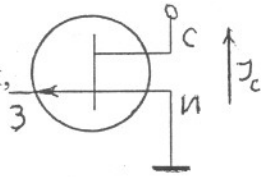
Отличительная особенность всех полевых транзисторов – очень малый ток **затвора**, т.к. **затвор** либо изолирован от **канала**, либо образует с **каналом** электрический переход, включённый в обратном направлении (обратное смещение). Входное сопротивление полевых транзисторов достигает $10^8 \div 10^{10}$ Ом. Основная схема включения - с **общим истоком (ОИ)**, т.е. для каскада на полевом транзисторе входным электродом всегда является **затвор**. И при очень большом входном сопротивлении (т.е. между затвором и истоком) – ток через **затвор** очень мал. В этом заключается важнейшее отличие полевого транзистора от биполярного – говорят, что полевой транзистор это прибор, управляемый напряжением, а биполярный транзистор – прибор который управляется током.

Полевой транзистор в известном смысле можно считать аналогом электронной лампы: **исток** это **катод**, **затвор** это управляющая **сетка**, **сток** это **анод**. В электронной лампе поток электронов так же управляется напряжением, т.е. электрическим полем и так же она может считаться нормально открытой т.к. при напряжении на управляющей сетке равном нулю $U_c = 0$ через лампу течёт ток (анодный).

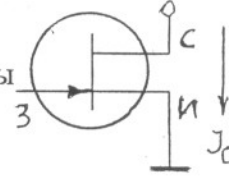


Полевой транзистор с управляющим p-n переходом.

транзистор с **p**-каналом, основные носители – дырки, применяются на низких частотах (НЧ).

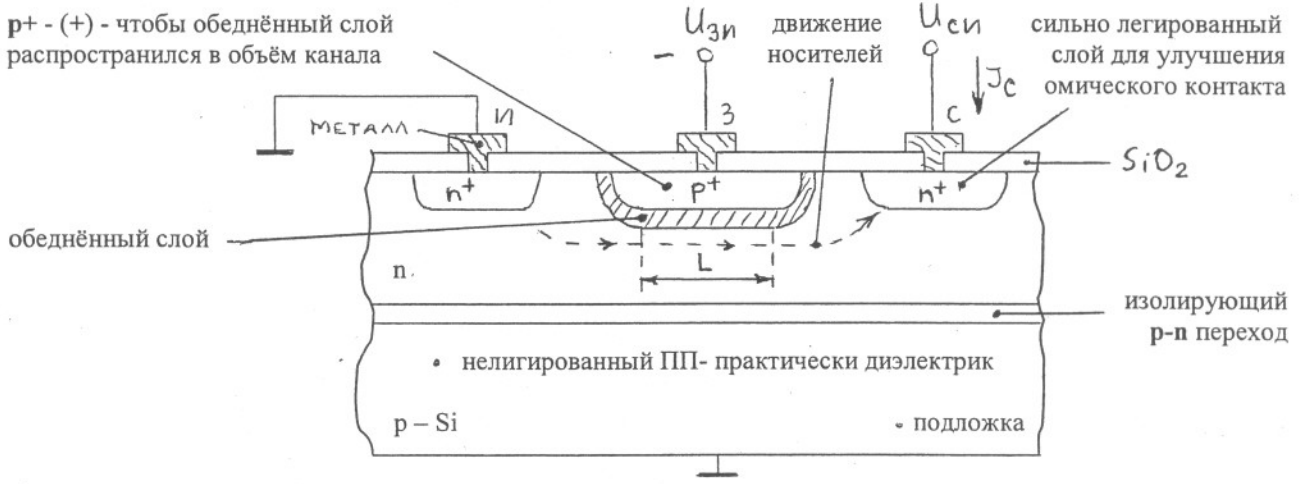


транзистор с **n**-каналом, основные носители – электроны, применяются на высоких частотах (ВЧ).



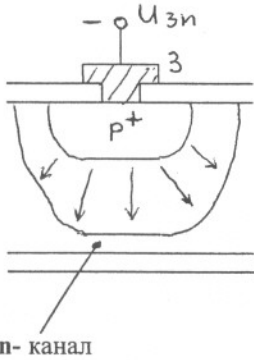
Полевые транзисторы с управляющим **p-n** переходом изготавливаются только нормально открытые (НО), но можно сделать и нормально закрытые (НЗ) – они будут работать на малых токах. Устройство ПТ с **n**-каналом:

p+ - (+) - чтобы обеднённый слой распространился в объём канала



n-канал - **L** - слабелегированный ($N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$) тонкий слой (0,1 ÷ 0,2 мкм – толщина; 0,5 ÷ 2,0 мкм длина).
 движение носителей →

Принцип действия: - пусть напряжение между истоком и стоком будет постоянным $U_{ис} = \text{const}$; если при этом напряжение между затвором и истоком равно нулю $U_{зи} = 0$; толщина канала постоянная; то сопротивление канала определяется концентрацией свободных электронов в канале и через полевой транзистор течёт ток стока



$$I_c \approx U_{си} / R_{\text{канала}}$$

- если теперь на затвор подать отрицательное напряжение ($-U_{зи}$), то переход сместится в обратном направлении, обеднённый слой расширится, а канал сузится, увеличится сопротивление канала и уменьшится ток стока I_c ;

- при некотором ($-U_{зи}$) обеднённый слой расширится на всю ширину канала, канал перекрывается полностью и ток стока прекращается $I_c = 0$, напряжение на затворе ведущее к прекращению тока стока называется **напряжением отсечки** – $U_{зи \text{отс}}$;

- если изменить полярность напряжения на затворе с отрицательного на положительное т.е. на ($+U_{зи}$), которое соответствует прямому смещению **p-n** перехода между затвором и каналом, то через вывод затвора потечёт часть тока стока – этот режим транзистора является не рабочим.

Вольтамперные характеристики полевого транзистора управляющим **p-n** переходом:

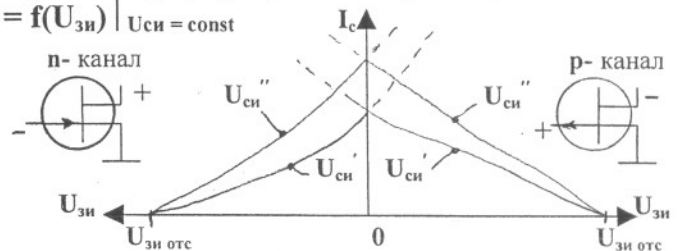
1. Передаточные (стокзатворные) ВАХ $I_c = f(U_{зи}) | U_{си} = \text{const}$

$$U_{си}'' > U_{си}'$$

пунктир – не рабочий режим;

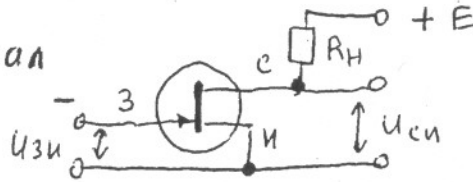
ширина $L_{\text{обедн}}$ зависит от $U_{зи}$ и $U_{си}$!;

$U_{зи \text{отс}}$ (при $U_{си} = \text{const}$) – закрывает ПТ, т.е. ток через транзистор прекращается.



ОИ
общий источник

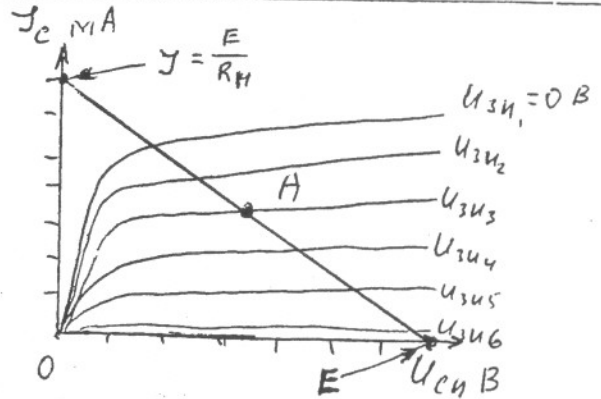
n-канал



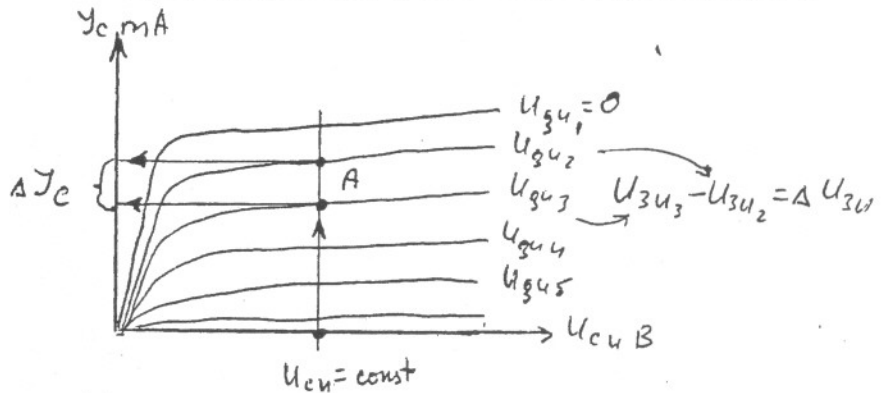
Полевой транзистор с управляющим p-n переходом

Рабочая точка А" выбирается на прямолинейном участке ВАХ. Через нее проводится нагрузочная линия соответствующая сопротивлению Rн

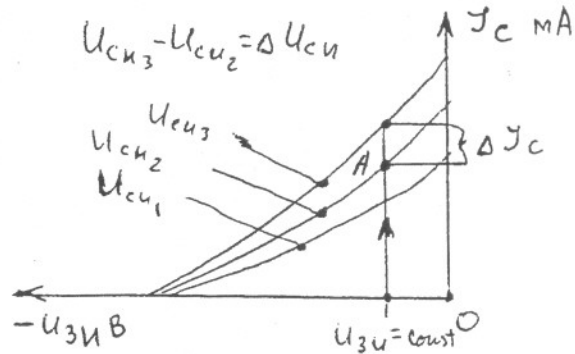
$$R_n = \frac{E}{J}$$



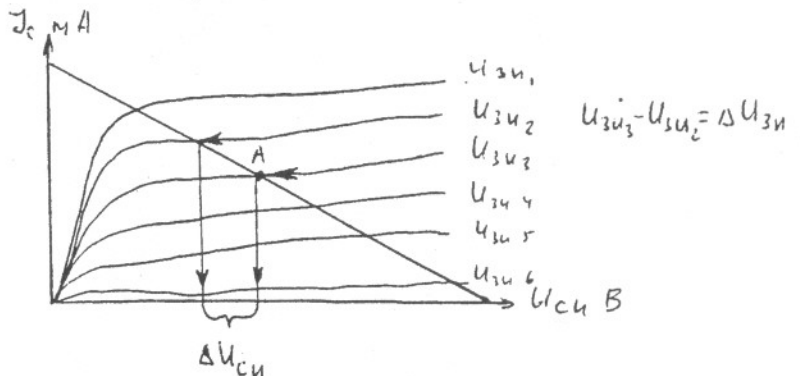
$$S = \left. \frac{\Delta J_c}{\Delta U_{зи}} \right|_{\Delta U_{си} = 0} = \left. \frac{\Delta J_c}{\Delta U_{зи}} \right|_{U_{си} = \text{const}}$$



$$\tau_i = \left. \frac{\Delta U_{си}}{\Delta J_c} \right|_{\Delta U_{зи} = 0} = \left. \frac{\Delta U_{си}}{\Delta J_c} \right|_{U_{зи} = \text{const}}$$

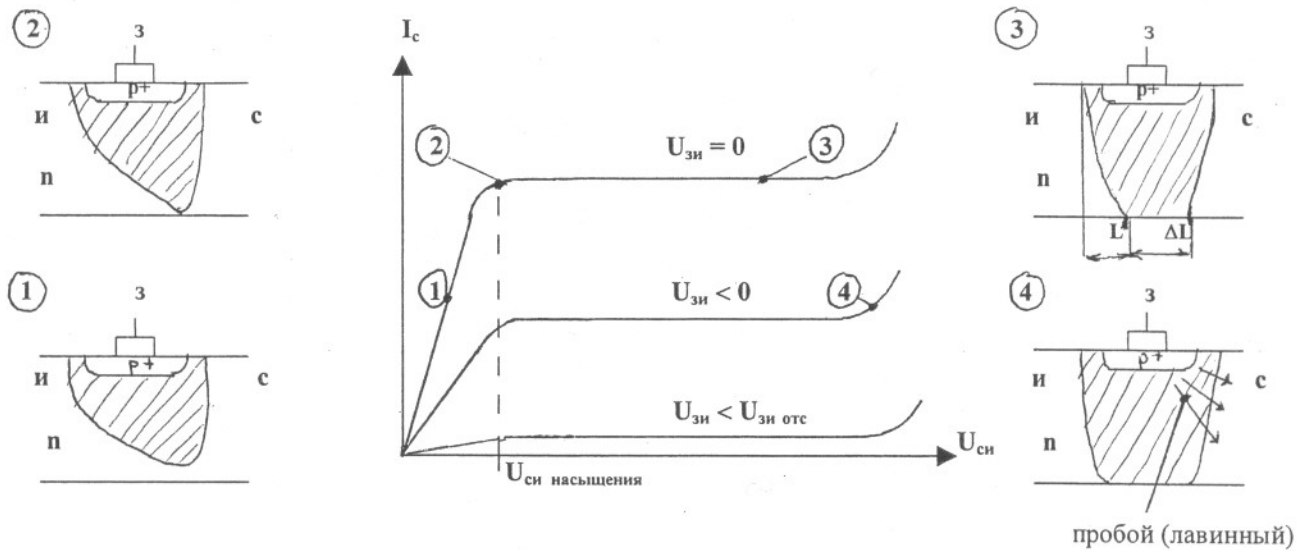


$$K_{VГ} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}}$$



$$K_{V_A} = \int (R_n \parallel \tau_i) = \int \frac{R_n \cdot \tau_i}{R_n + \tau_i} \leftarrow \text{параллельное включение резисторов.}$$

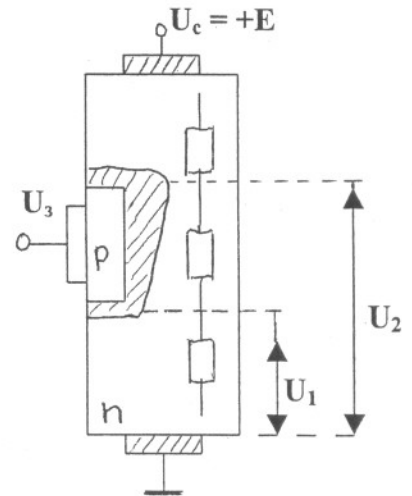
2. Выходные (стоковые) ВАХ $I_c = f(U_{си}) | U_{зи} = \text{const}$



- область обеднения несимметрична, т.к. с одной стороны оказывает влияние напряжение истока равно нулю $U_n = 0$ а с другой напряжение стока, которое больше нуля $U_n > 0$,

1-я диаграмма – канал открыт полностью,

2-я диаграмма – канал начинает перекрываться, канал имеет распределённое сопротивление и напряжение перехода U_{p-n} делится на участки: $U_{затвора} + U_2 > U_{затвора} + U_1$ - т.е. канал уже около стока и шире около области истока



3-я диаграмма – канал перекрыт почти полностью, реально толщина канала 0,1 мкм, длина канала $L = L' + \Delta L$ - сказывается эффект модуляции канала,

4-я диаграмма – из-за высокого напряжения на стоке начинается пробой промежутка между областью затвора и областью стока (пробой - лавинный).

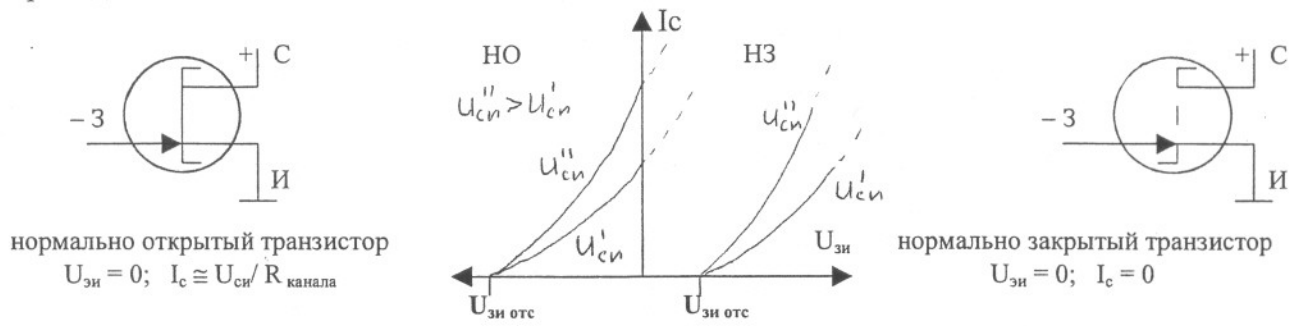
Характеристики у полевых транзисторов с p-каналом аналогичны ПТ с n-каналом, однако полярности напряжений $U_{зи}$ и $U_{си}$ другие.

Полевые транзисторы с затвором Шотки (ПТШ).

В связи с тем, что основное назначение ПТШ работа на СВЧ канал выполняется на полупроводнике n-типа, т.к. носители заряда – электроны – подвижнее носителей дырок. Но возможно изготовление ПТШ и с каналом p-типа.

ПТШ выполняются двух типов: нормально открытыми (НО) и нормально закрытыми

(НЗ), т.е. при отсутствии напряжения на затворе НО – транзистор проводит ток, а НЗ не проводит.



Передаточные ВАХ НО и НЗ транзисторов

Устройство полевых транзисторов с затвором Шотки.



нормально открытый ПТШ

нормально закрытый ПТШ

Принцип действия. Чтобы закрыть нормально открытый полевой транзистор необходимо на затвор подать большее (по модулю) отрицательное напряжение (большее обратное смещение), обеднённый слой при этом расширится, перекроет канал, проводимость канала уменьшится, и ток стока упадёт до нуля.

Чтобы открыть нормально закрытый ПТ необходимо на затвор подать большее положительное напряжение $U_{зи\ пр}$ (большее прямое смещение), обеднённый слой при этом сужается, канал открывается, проводимость канала увеличивается, появляется и увеличивается ток стока. Но это напряжение $U_{зи\ пр}$, не должно превышать величину напряжения открывания **p-n** перехода затвор-канал, в противном случае через этот переход потечёт ток затвора, что недопустимо. Реальное напряжение затвор-исток $U_{зи} = 0,2 \div 0,5$ В

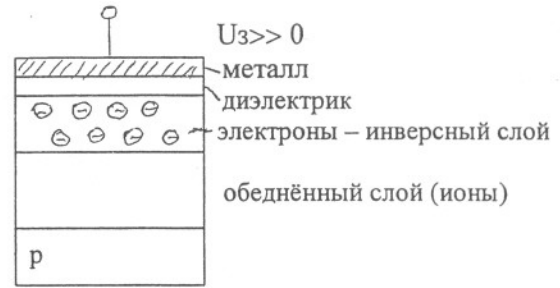
Нормально закрытые полевые транзисторы работают на малых токах и с малыми положительными напряжениями ($+U_{зи}$). Такие транзисторы применяются в быстродействующих интегральных схемах. Удобство их применения в интегральных структурах заключается в том, что полярность напряжений сток-исток и затвор-исток - одинаковые.

Пример маркировки ПТШ выполненного на GaAs, предназначенный для работы на частотах до 60 ГГц: 3П376А.

МДП транзисторы (металл-диэлектрик-полупроводник).



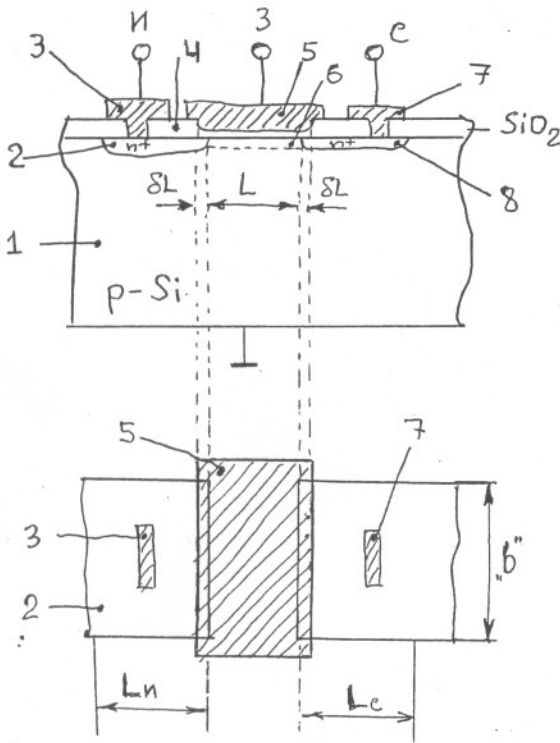
структура МДП транзистора



режим инверсии при $U_z \gg 0$

При наличии напряжения между затвором и подложкой возникает так называемый *эффект поля* приводящий к изменению концентрации свободных носителей заряда в приповерхностном слое полупроводника. Возможны три электрических режима состояния приповерхностного слоя: обеднения, инверсии и обогащения. Рабочим режимом является режим инверсии (подробнее смотрите выше – “режимы МДП перехода”). В режиме инверсии (при $U_z \gg 0$) в приповерхностном слое (под затвором) возникает хорошо проводящий инверсионный слой – с типом проводимости противоположной проводимости подложки – т.е. инверсионный. В МДП транзисторе этот слой играет роль проводящего канала.

Устройство и принцип действия МДП транзистора.



n – канальный транзистор

- 1-подложка с малой концентрацией атомов акцепторов $N_a = 10^{15} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$,
 - 2;8- сильнолегированные области *истока* и *стока* толщиной 0,5 – 1,0 мкм.
 - 3;5;7- металлические электроды *истока*, *затвора*, *стока*,
 - 4- диэлектрик,
 - 6- пространство между границами сильнолегированных областей *истока* и *стока* – область проводящего канала – L толщиной менее 0,1 мкм.
- “ b ”- ширина областей *истока* и *стока*.
 Движение электронов из *истока* через канал в *сток* соответствует положительному напряжению $U_{си}$.
 Структура полевого транзистора симметрична – взаимозаменять функции *истока* и *стока*.
 Напряжение *подложка-исток* – нулевое или отрицательное – что соответствует обратному напряжению *p-n* перехода *подложка-исток*.
 Подложку можно использовать в качестве дополнительного управляющего электрода.

Принцип действия полевого транзистора основан на изменении концентрации электронов в канале (т.е. в инверсионном слое) и соответственно величины проводимости канала при изменении поперечного электрического поля.

δL – ширина перекрытия области затвора и областей истока и стока.

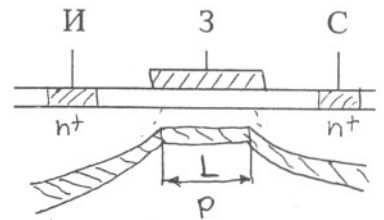
Статическая характеристика.



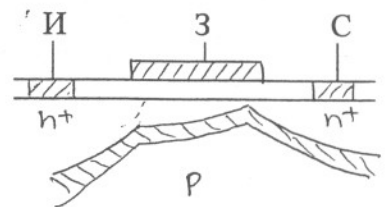
- эта ВАХ является основной выходной (стоковой) характеристикой полевого транзистора в схеме с общим истоком при постоянном напряжении затвор-исток $U_{зи} = \text{const}$.

1. $U_{зи} = U_{\text{пороговое}}$
 $U_{си} = 0$.

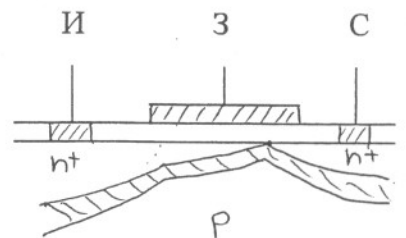
Стоковая характеристика линейна, а канал представляет из себя резистор, сопротивление которого обратно пропорционально напряжению на затворе.



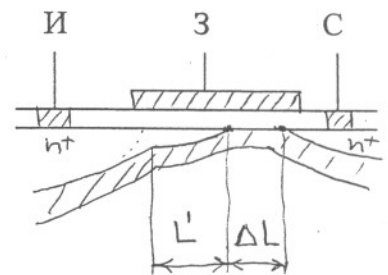
2. $U_{си} = U_{си2}$ - это напряжение на стоке называется напряжением насыщения - при этом плотность заряда электронов у стока мала - происходит перекрытие канала и толщина его падает до нуля.



3. $U_{си} = U_{си3} > U_{си2}$ - канал начинает перекрываться.



4. $U_{си3} \gg U_{си2}$ При дальнейшем увеличении напряжения сток-исток канал перекрывается уже не в точке, а на некоторой длине ΔL около области стока. С ростом напряжения сток-исток величина перекрытия ΔL увеличивается, а физическая длина канала L^1 - уменьшается.



Параметры МДП транзисторов.

Крутизна стокзатворной характеристики $S = dI_c/dU_{зи}$ при $U_{си} = \text{const}$ и $U_{пи} = \text{const}$.

Для увеличения крутизны S необходимо уменьшать толщину подзатворного диэлектрика; уменьшать длину канала; увеличивать подвижность носителей (электронов) в канале; увеличивать ширину канала. Крутизна управления каналом при помощи напряжения на подложке $S_n = dI_c/dU_{пи}$. При этом надо иметь ввиду, что $S_n < S$.

Внутреннее сопротивление $R_i = dU_{си}/dI_c$ при $U_{зи} = \text{const}$ и $U_{пи} = \text{const}$. Внутреннее Сопротивление R_i тем больше чем выше напряжение на стоке. У полевых транзисторов внутреннее сопротивление достигает величин в десятки и сотни Ом.

MGN

Коэффициент усиления по напряжению $\mu = dU_{си}/U_{зи}$ при $I_c = const.. \mu = S \cdot R_i$.

Напряжение пробоя стокового перехода $U_{си}$ проб зависит от напряжения затвор-исток $U_{зи}$ — чем меньше это напряжение, тем выше вероятность пробоя промежутка сток-исток(канала) т.е. наихудшие условия работы транзистора создаются при его закрытом состоянии.

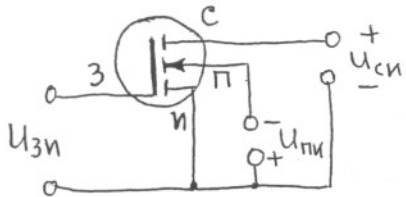
Напряжение пробоя подзатворного диэлектрика. При критической напряженности поля $E_{кр} = 10^7 В/см$ и толщине подзатворного диэлектрика $d = 0,05 мкм$ - $U_{проб} \approx 50В$.

Обратные токи стокового $I_{с0}$ и истокового $I_{и0}$ переходов вызванные термогенерацией.

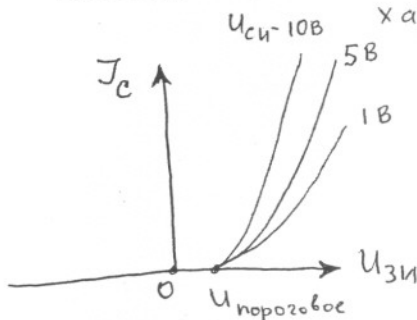
Ёмкость затвор-канал $C_{зк} = \epsilon_0 \epsilon_d bL/d_d$, для уменьшения этой ёмкости надо уменьшать длину канала L ; уменьшать диэлектрическую проницаемость подзатворного диэлектрика ϵ_d ; увеличивать толщину диэлектрика d_d , однако увеличение этой толщины приводит к уменьшению крутизны, а это делать нежелательно, т.е. требования противоречивы.

Различные типы полевых транзисторов и их ВАХ.

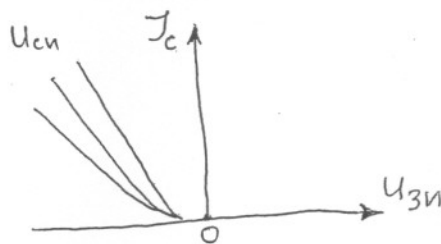
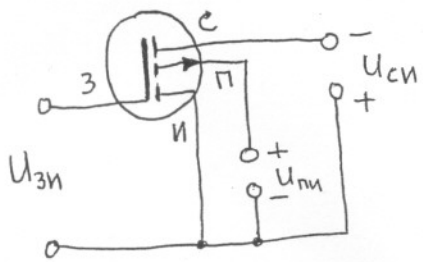
индуцированный канал "n"-типа



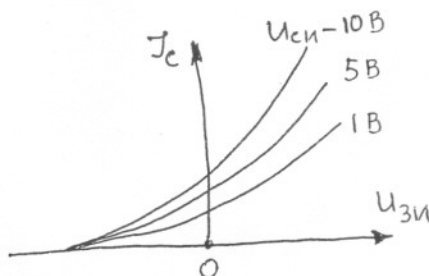
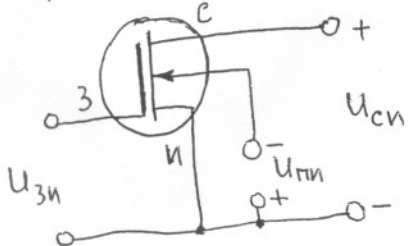
стокозатворные передаточные характеристики



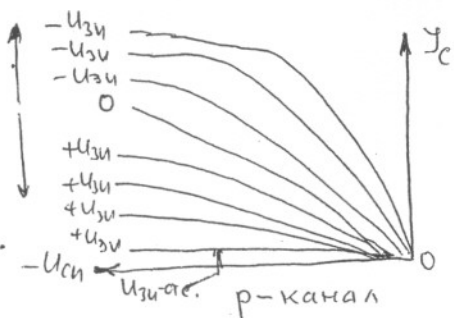
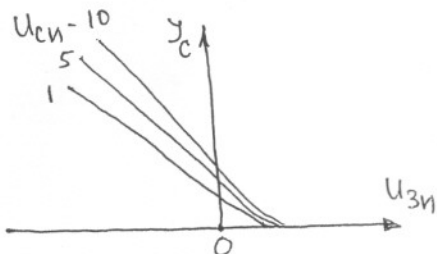
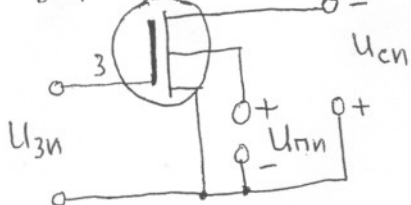
индуцированный канал "p"-типа



встроенный канал "n"-типа



встроенный канал "p"-типа



$U_{зи}$ соответствует транзистору со встроенным каналом

