

Лекция № 3.

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

План

1. Введение.
2. Структуры биполярного транзистора, принцип действия.
3. Способы включения биполярного транзистора.
4. Схемы включения биполярного транзистора.
5. Температурные и частотные свойства биполярного транзистора.
6. Заключение.

1. Введение

В биполярных транзисторах в образовании тока участвуют носители зарядов двух знаков — и дырки, и электроны.

Распространённый тип биполярных транзисторов — это трёхслойная структура с двумя $p-n$ -переходами, разделёнными слоем базы. Внешние выводы от транзистора выполняются на основе невыпрямляющих контактов («Металл-полупроводник»).

2. Структуры биполярного транзистора, принцип действия.

В зависимости от типа электропроводности крайних областей различают: *транзисторы $n-p-n$ -структуры* и *транзисторы $p-n-p$ -структуры*.

2.1. Транзисторы $n-p-n$ -структуры (рис.3.1а, б).

Области эмиттера и коллектора легируются донорной примесью, а разделяющая их база — акцепторной примесью. Самая высокая степень легирования у эмиттера, немного слабее легирован примесью коллектор. Базу же обедняют носителями, а в поперечном сечении её делают гораздо тоньше, чем области эмиттера и коллектора (до 1 мкм при традиционной технологии и 0,1 мкм по низковольтной интегральной технологии).

После таких мер ослабляется *рекомбинация* носителей в базе (взаимное уничтожение носителей зарядов двух знаков и образование нейтральных зарядов), уменьшается длина свободного пробега носителей, встречная инжекция носителей из базы в эмиттер становится практически незаметной. Но база за счёт таких мер становится высокоомной областью.

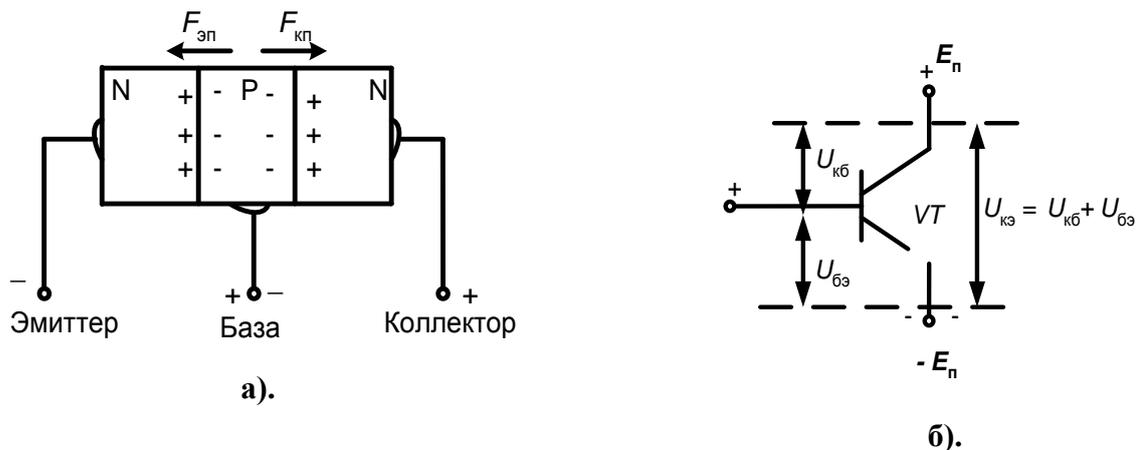


Рис.3.1.

Чтобы вызвать *инжекцию* носителей из эмиттера в базу, на участок эмиттер-база подключаем источник (рис.3.1а) таким образом, чтобы поле эмиттерного перехода было ослаблено полем внешнего источника (подход тот же, что при отпирации полупроводникового диода, то есть потребуются доли вольта, чтобы вызвать инжекцию). Носители, перешедшие из эмиттера в базу, становятся там неосновными. Поле коллекторного перехода (при указанной полярности напряжения на коллекторе) будет ускоряющим для этих носителей при условии, если электрическое поле внешнего источника (E_k) будет совпадать с полем коллекторного перехода, то есть будет его усиливать, а не ослаблять. В этом случае носители, попадая под действие ускоряющего поля коллекторного перехода, втягиваются в область коллектора (явление *экстракции*).

Чтобы оценить, какая часть эмиттерного потока носителей переведена из базы в коллектор, введём понятие *статического коэффициента передачи*

тока эмиттера $\alpha = \frac{I_K}{I_E} < 1$. Если полярность источников на эмиттере и коллекторе соответствует рассмотренной (рис.2.1а), то такой режим транзистора принято называть *активным*. В активном режиме коэффициент « α » называют *нормальным коэффициентом передачи тока эмиттера* и обозначают « α_n ».

Значение этого коэффициента колеблется от **0,98 до 0,99**. Нетрудно представить, какая доля из общего тока (I_E) приходится на ток базы: $I_B = I_E - I_K$, то есть ток базы — величина незначительная по сравнению с токами эмиттера и коллектора. После проведённого анализа процессов, протекающих в транзисторе *n-p-n*-типа, можем сделать вывод о том, что переходы в транзисторе ведут себя так же как переход в полупроводниковом диоде в разных его состояниях («открыт-закрыт»): эмиттерный переход находится в прямосмещённом состоянии, а коллекторный — в обратносмещённом. Поэтому, можем представить *пассивную схему* замещения транзистора (не отражающую усилительных свойств транзистора) в виде эквивалентных диодов (рис.3.2а). А чтобы отразить, какие сопротивления соответствуют каждой области и каждому переходу, воспользуемся схемой замещения в виде эквивалентных резисторов (рис.2.2б).

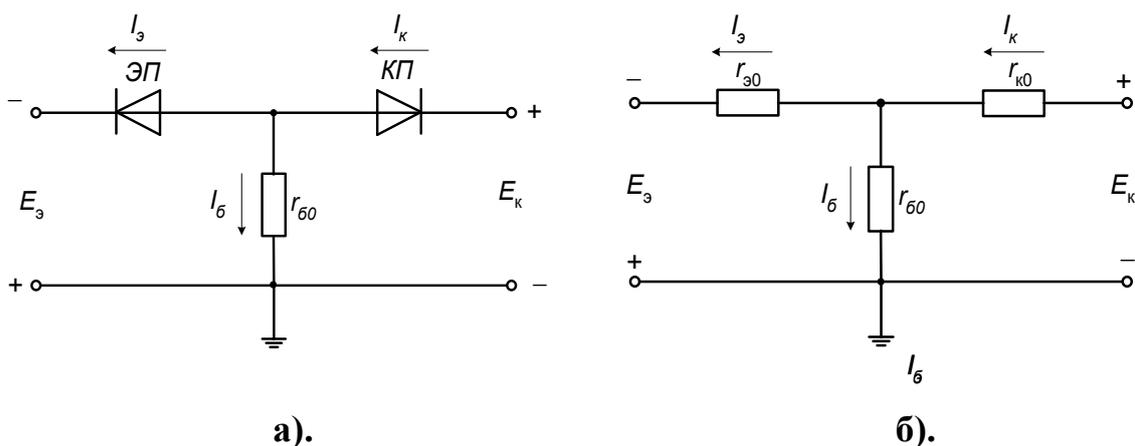


Рис.3.2.

ЭП – эмиттерный переход;

КП – коллекторный переход;

$r_{э0}$ – сопротивление области эмиттера и прямосмещённого эмиттерного перехода. Это сопротивление составляет *единицы – десятки Ом*.

$r_{к0}$ – сопротивление области коллектора и обратно смещённого коллекторного перехода. Это сопротивление составляет *десятки – сотни кОм*.

$r_{б0}$ – сопротивление области базы. Ток через базу течёт в плоскости, перпендикулярной областям эмиттера и коллектора, поэтому, мы можем базу рассматривать как длинный тонкий проводник, и чем тоньше база, тем больше её сопротивление. Это сопротивление составляет *сотни Ом*.

Примечание. Индекс «0» используется при работе с постоянными составляющими тока.

Из схемы на рис.3.2а видно, что переходы в транзисторе равноправны: каждый из переходов может находиться как в прямосмещённом, так и в обратносмещённом состояниях. А из схемы на рис.3.2 б видно, что каждая область и переходы имеют вполне конкретное сопротивление.

Чтобы отразить в схеме замещения активные свойства транзистора, выходную коллекторную цепь транзистора представим в виде эквивалентного генератора тока $I_{э} \alpha = I_{к}$. (рис.3.3).

Фактически на рис.2.3 приведена малосигнальная физическая модель биполярного *n-p-n*-транзистора в активном режиме.

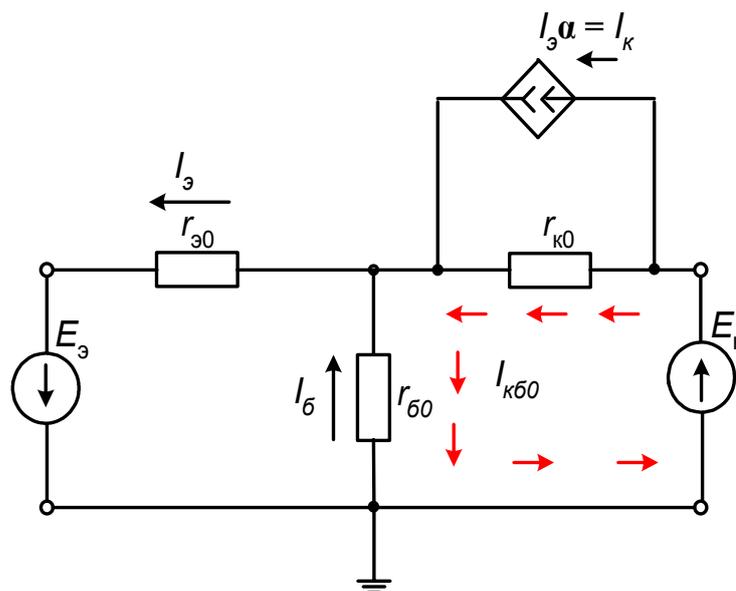


Рис.3.3.

2.1.1. Мощности, рассеиваемые на переходах.

Из предыдущих рассуждений о транзисторе n - p - n -типа следует, что по переходам текут примерно одинаковые токи, но они текут по разным сопротивлениям и под действием разных напряжений, то есть:

$$P_{эн} = I_{эн}^2 \times r_{э0} \text{ — мощность, рассеиваемая на эмиттерном переходе.}$$

$$P_{кн} = I_{к}^2 \times r_{к0} \text{ — мощность, рассеиваемая на коллекторном переходе.}$$

Следовательно, на коллекторном переходе рассеивается большая мощность, чем на эмиттерном: КП находится в обратносмещённом состоянии и его сопротивление составляет десятки сотни кОм. По этой причине коллекторный переход приходится делать более массивным, а транзистор получается несимметричным.

Главным направлением в развитии современной микроэлектроники является уменьшение геометрических размеров полупроводниковых приборов и снижение рабочих напряжений (для уменьшения рассеиваемых на приборе мощностей). Рассеиваемая на приборе мощность вообще представляет важный параметр разработки, так как определяет её реализуемость, надёжность и стоимость. В современных разработках интегральных схем преобладает низковольтная технология: рабочие напряжения не превышают 3 В, кроме того, размеры транзистора получаются значительно меньшими, чем размеры при традиционной технологии. Площадь эмиттерного перехода у транзисторов n - p - n -структуры в интегральных схемах средней степени интеграции гораздо меньше площади коллекторного перехода.

2.1.2. Токи неосновных носителей в биполярном транзисторе

Помимо основного коллекторного тока I_k через коллекторный переход течёт ток неосновных носителей $I_{к60}$. Природа тока $I_{к60}$ та же, что и у диода, поставленного под обратное напряжение. Даже при отсутствии инжекции со стороны эмиттера, но при подключенном E_k , ток $I_{к60}$ в транзисторе течёт на участке «коллектор-база». В схеме (рис.3.3) видно, что основной коллекторный ток и ток неосновных носителей (**красные стрелки**) текут согласно и, та-

ким образом, при увеличении температуры ток $I_{кб0}$ делает «добавочку» в общий коллекторный ток, и это необходимо учитывать при расчёте температурных режимов электронных схем. Выражение для результирующего тока через коллекторный принимает вид

$$I_{\kappa} = \alpha I_{\vartheta} + I_{\kappa б 0}$$

2.2. Транзисторы *p-n-p*-структуры устроены аналогично только что рассмотренной структуре *n-p-n*-типа, но проводимость в *p-n-p*-структуре будет дырочной (основные носители — дырки). Следовательно, полярность подключаемых источников будет иной (рис.3.4а, б). На рис.3.4а показана структура транзистора *p-n-p*-типа, а на рис.3.4б — условное графическое изображение транзистора в схемах.

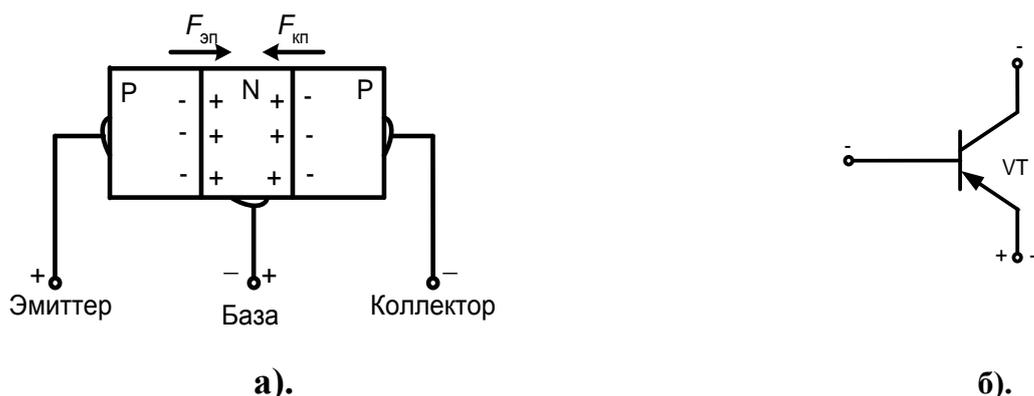


Рис.3.4.

Более технологичными признаны транзисторы структуры *n-p-n*-типа: основную роль в процессах транзистора *n-p-n*-типа играют электроны, а в *p-n-p*-структуре — дырки, но электроны обладают большей подвижностью, чем дырки (в 2...3 раза), поэтому быстрое действие электронных схем на *n-p-n*-структуре выше. После перечисления достоинств транзисторов *n-p-n*-структуры становится понятным, почему в интегральной технологии преимущество отдано структуре *n-p-n*-типа.

В заключение по этой теме немного остановимся на дрейфовых и бездрейфовых транзисторах.

2.2.1. В бездрейфовых (диффузионных) транзисторах концентрация примесных атомов распределена примерно равномерно по всей базе, поэтому база не оказывает дополнительного ускоряющего действия на движение основного потока носителей, впрыснутых из эмиттера: движение этих носителей происходит по законам диффузии. Не нужно путать понятие «диффузионный транзистор» с понятием технологического процесса получения *p-n*-перехода: понятие «диффузионный транзистор» отражает основные процессы, происходящие в базе.

2.2.2. В дрейфовых транзисторах концентрация примесных атомов распределена неравномерно по всей базе, поэтому в базе возникает дополнительное электрическое поле, которое оказывает существенное влияние на поток носителей, ускоряя его, и неосновные носители движутся в результате дрейфа и диффузии, но доминирует дрейф, поэтому дрейфовые транзисторы имеют более высокое быстродействие, чем бездрейфовые.

3. Способы включения биполярного транзистора.

В зависимости от состояния эмиттерного и коллекторного переходов в транзисторе различают четыре способа (режима) его включения.

1-й способ включения

Нормальное включение (активный режим).

При таком включении эмиттерный переход находится в прямосмещённом, а коллекторный в обратносмещённом состояниях (рис.3.5.). Эмиттер работает в режиме инжекции, а коллекторный переход — в режиме экстракции. Такой режим используется в линейных усилителях. Статический коэффициент передачи тока $\alpha_n = 0,98...0,99$.

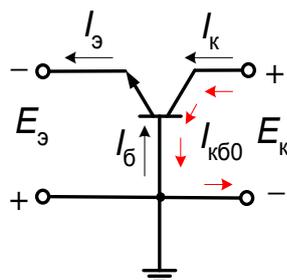


Рис.3.5.

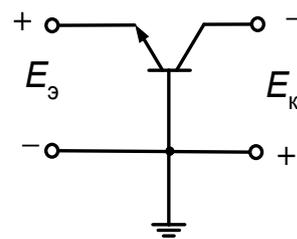


Рис.3.6.

2-й способ включения.

Инверсное включение.

При таком включении эмиттерный переход находится в обратносмещённом, а коллекторный в прямосмещённом состоянии (рис.3.6). Коллектор поставлен в режим инжекции, а эмиттер — в режим экстракции. *Инверсный статический коэффициент передачи тока $\alpha_i = 0,5...0,7$ (желательно подумать, почему $\alpha_i < \alpha_n$).*

Инверсный режим используется в некоторых цифровых схемах.

3-й способ включения.

Режим двойной инжекции.

При таком включении эмиттерный и коллекторный переходы находятся в прямосмещённом состоянии (рис.3.7).

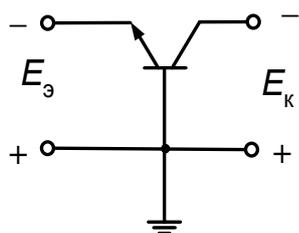


Рис.3.7. Режим двойной инжекции

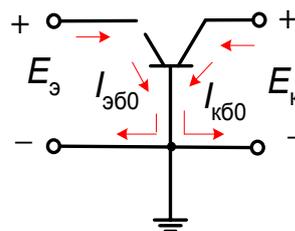


Рис.3.8. Режим отсечки

Инжекция носителей в базу идёт из эмиттера и коллектора. В базе скапливается объёмный заряд, на рассасывание которого потребуется определённое время. Таким образом, транзистор становится инерционным прибором, скорость его переключения снижается, и чем глубже насыщение транзистора, тем хуже его переключающие свойства.

Этот факт важно учитывать при проектировании транзисторных ключей, важным параметром которых является быстродействие.

4-й способ включения.

Режим отсечки.

При таком включении эмиттерный и коллекторный переходы находятся в обратносмещённом состоянии (рис.3.8). Транзистор при таких условиях будет закрыт (выключен), и через переходы будут течь лишь токи неосновных носителей ($I_{эб0}$ и $I_{кб0}$ — через эмиттерный и коллекторный переходы соответственно).

Режимы отсечки и насыщения являются основными для ключевых и логических схем.

4. Схемы включения биполярного транзистора.

Примечание. Переменные составляющие тока в схемах включения транзистора (рис.3.9; 3.13; 3.16) обозначены через мгновенные значения ($i_э$; $i_к$, $i_б$), а постоянные составляющие с индексом для тока покоя — $I_{эп}$; $I_{кп}$; $I_{бп}$.

В зависимости от того, какой из электродов транзистора будет общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения:

- с общей базой (**ОБ**);
- с общим эмиттером (**ОЭ**);
- с общим коллектором (**ОК**).

4.1. Схема включения биполярного транзистора с ОБ

В такой схеме включения (рис.3.9) база будет общей для входной ($U_{эб}$) и выходной ($U_{кб}$) цепей.

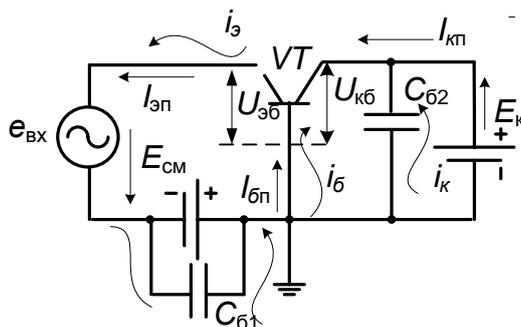


Рис.3.9.

В отличие от предыдущих схем в данной схеме во входной цепи включен источник напряжения переменной ЭДС.

$e_{\text{вх}}$ — генератор переменной ЭДС; в режиме усиления напряжение этого источника необходимо будет усилить. В этой схеме усиления напряжения не может быть: схема дана без нагрузки и потенциал коллектора по переменной составляющей тока относительно базы («условной земли») равен нулю: за счёт конденсатора C_6 сопротивление источника E_k по переменной составляющей тока равняется нулю;

$E_{\text{см}}$ — источник напряжения смещения. Служит для того, чтобы задать рабочую точку (РТ) на вольтамперной характеристике транзистора (ВАХ). $E_{\text{см}}$ составляет доли вольта;

$I_{\text{эп}}, I_{\text{кп}}, I_{\text{бп}}$ — постоянные составляющие тока в схеме (*токи покоя*);

$i_э, i_к, i_б$ — переменные составляющие тока во входной и выходной цепях;

E_k — напряжение питания коллекторной цепи (E_k составляет десятки-сотни вольт);

$U_{кб}$ — напряжение на выходных зажимах транзистора;

$U_{эб}$ — напряжение на входных зажимах транзистора.

C_{61}, C_{62} — конденсаторы, блокирующие источники постоянного напряжения по переменной составляющей тока и, таким образом, предотвращающие потери полезного выходного напряжения (в режиме усиления) на внутренних сопротивлениях этих источников;

В течение времени с t_0 по t_1 (рис.3.10) транзистор находится в *режиме покоя*: генератор переменной ЭДС отключен, и во входной, и в выходной цепях действуют только источники постоянного напряжения.

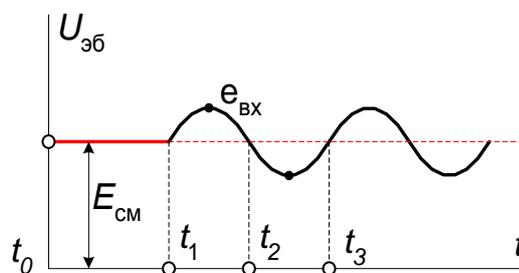


Рис.3.10.

В этом режиме идёт речь о постоянных составляющих тока $I_{эп} = I_{бп} + I_{кп}$, с помощью которых задаётся положение РТ транзистора (подготовка транзистора к режиму усиления переменного сигнала).

В предлагаемой схеме используется *автономный источник напряжения смещения* (независимый) — $E_{см}$.

С момента времени t_1 в схему подключается генератор переменной ЭДС. На вход транзистора поступает напряжение сложной формы $U_{эб}$ (рис.3.10); с этого момента времени напряжение $U_{эб}$ складывается из напряжения переменной ЭДС и напряжения источника смещения $E_{см}$.



Рис.3.11.

В течение времени с t_1 по t_2 от генератора переменной ЭДС поступает положительная полуволна напряжения $e_{вх}$ (рис.3.11а).

Напряжение на входе $U_{эб}$ увеличивается, усиливается инжекция, ток во входной цепи $i_э$ увеличивается, поэтому возрастает и ток в коллекторной цепи ($i_к = \alpha i_э$)

$$i_э + \Delta i_э = i_к + \Delta i_к + i_б + \Delta i_б$$

Следовательно, $\Delta i_э = \Delta i_к + \Delta i_б$. Таким образом, между токами входной и выходной цепей наблюдается практически пропорциональная зависимость, а это значит, что если во входном токе будут иметь место нелинейные искажения, то они обязательно будут переданы на выход и полезный выходной сигнал (в режиме усиления) будет искажён.

В течение времени с t_2 по t_3 от генератора переменной ЭДС поступает отрицательная полуволна напряжения $e_{вх}$ (рис.3.11б). Напряжение на входе

$U_{эб}$ уменьшится, инжекция уменьшается, ток во входной цепи i , уменьшается, следовательно, уменьшается и ток в коллекторной цепи.

Проследив поведение транзистора в течение действия целого периода напряжения переменной ЭДС, приходим к выводу, что под действием входного напряжения $e_{вх}$ происходит модуляция поперечного сечения базы, в результате изменяется уровень инжекции носителей со стороны эмиттера и, следовательно, меняются токи на входе и выходе. Ток коллектора следует за всеми изменениями тока эмиттера, *следовательно, схема включения транзистора с ОБ — это схема с эмиттерным управлением.*

Выводы по схеме с ОБ.

- Схема не усиливает по току ($\alpha < 1$).
- Схема имеет малое входное и большое выходное сопротивления, следовательно, схема с ОБ имеет плохие согласующие свойства.
- Схема с ОБ имеет хорошие усилительные свойства по напряжению (в режиме усиления).
- Транзистор в схеме с ОБ имеет хорошие температурные и частотные свойства (*эта тема будет дана чуть позже*).

4.2. Схема включения биполярного транзистора с ОЭ

В схеме с ОЭ (рис.3.12) входным током будет ток базы (вспоминаем — *наименьший ток в транзисторе*), а выходным — ток коллектора (*близкий по величине току эмиттера*). Следовательно, по отношению этих токов можно судить о неплохих усилительных свойствах схемы по току.

Входным напряжением будет напряжение на участке «база-эмиттер» ($U_{эб}$), а выходным — напряжение на участке «коллектор-эмиттер» ($U_{кэ}$).

Передачу тока базы в цепь коллектора оцениваем *дифференциальным статическим коэффициентом передачи тока базы — $\beta_{оэ}$.*

$$\beta_{оэ} = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B} = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_E - \Delta i_K} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} > 1. \quad (3.1)$$

Таким образом, транзистор в схеме с ОЭ обладает хорошими усилительными свойствами по току и чем больше α , тем больше β .

Для анализа тока неосновных носителей ($I_{кэ0}$) в транзисторе с ОЭ воспользуемся пассивной схемой замещения транзистора эквивалентными диодами при отключённой базе (рис.3.13).

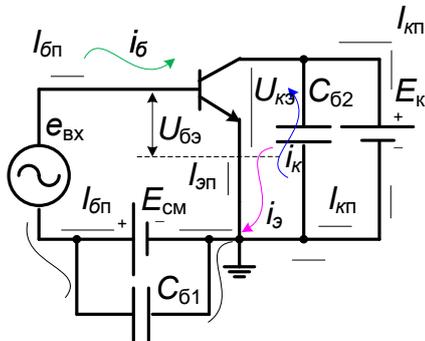


Рис.3.12.

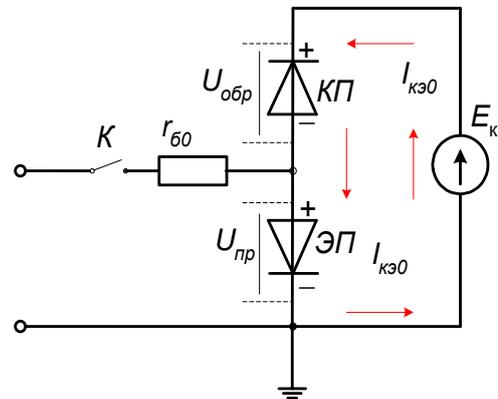


Рис. 3.13.

Примечание.

Пассивной схемой названа схема на рис.3.13 потому, что в ней не отражены активные (усилительные) свойства транзистора.

Под действием источника напряжения $E_{к}$ в цепи «коллектор-эмиттер» протекает ток неосновных носителей $I_{кэ0}$. Этот ток на своём пути создаёт падение напряжения на переходах транзистора. Но на ЭП падение напряжения оказывается «прямым», что вызовет, хоть и слабую, но инжекцию носителей из эмиттера. Следовательно, ток через переходы увеличится на величину диффузионного тока ($I_{кэ0} + I_{диф}$). Падение напряжения на переходах увеличивается, в том числе и на ЭП. Процесс может принять лавинообразный характер и привести к гибели транзистора. Поэтому, в схеме с ОЭ необходимо строго соблюдать последовательность подключения источников напряжения, а именно:

- *в первую очередь* подаётся напряжение в цепь базы;
- *во вторую очередь* — на коллектор;
- *отключать источники напряжения* полагается в обратном порядке.

Как видим, ток неосновных носителей в схеме с ОЭ оказывает влияние на процесс инжекции, поэтому этот ток в этой схеме значительно больше, чем в схеме с ОБ

$$I_{кэ0} = (\beta + 1)I_{кб0}. \quad (3.2)$$

По этой причине температурные свойства транзистора в схеме с ОЭ значительно хуже, чем в схеме с ОБ.

Выводы по схеме с ОЭ:

- Транзистор в схеме с ОЭ хорошо усиливает по току.
- В режиме усиления схема имеет хорошие усилительные свойства по напряжению.
- Имея хорошие усилительные свойства по току и по напряжению, схема с ОЭ признана лучшим усилителем мощности.
- Входное сопротивление у схемы с ОЭ больше, чем у схемы с ОБ, но, тем не менее, входное сопротивление всё же меньше, чем выходное.
- Схема с ОЭ нуждается в элементах частотной и температурной коррекции, так как имеет плохие температурные и частотные свойства; *эта тема будет рассмотрена несколько позже.*

4.3. Схема включения биполярного транзистора с ОК

На рис.3.14 приведена схема включения транзистора с ОК.

Входным током в такой схеме является ток базы, а выходным — ток эмиттера. Таким образом, эта схема, как и схема с ОЭ, является схемой с **базовым управлением**.

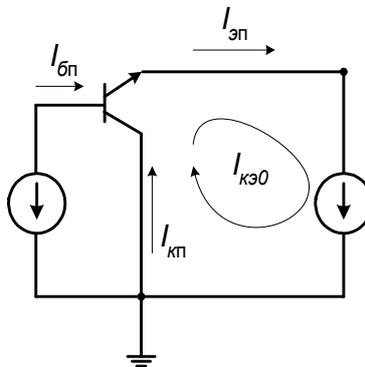


Рис.3.14

Усиление по току определяем по отношению выходного эмиттерного тока (вспоминаем — наибольшего тока в транзисторе) ко входному базовому (наименьшему).

$$\beta_{ок} = \frac{\Delta i_{\text{э}}}{\Delta i_{\text{б}}} = \frac{\Delta i_{\text{э}}}{\Delta i_{\text{э}} - \Delta i_{\text{к}}} = \frac{1}{1 - \alpha} > 1. \quad (3.3)$$

$$\beta_{ок} = (\beta_{оэ} + 1).$$

Например, при $\alpha = 0,99$, $\beta_{оэ} = 99$, $\beta_{ок} = 100$.

Нагрузка в схеме с ОК в режиме усиления включается в цепь эмиттера.

За счёт усиления по току схема с ОК может использоваться в качестве усилителя мощности.

Схема с ОК среди трёх схем включения имеет особенности:

- Включение нагрузки в цепь эмиттера создаёт 100% отрицательную обратную связь (ООС) по переменной составляющей сигнала.

- 100%-я ООС по переменной составляющей сигнала обеспечивает схеме большое входное сопротивление (а выходное сопротивление у схемы мало).

- Имея большое входное сопротивление и малое выходное, схема с ОК успешно применяется для согласования высокоомной нагрузки с низкоомной, например, во входных цепях измерительных вольтметров, осциллографов.

- *Вопрос согласования между усилителями рассмотрены подробно в разделе «Основы аналоговой схемотехники». Лекция № 6.*

- У транзистора в схеме с ОК плохие частотные и температурные свойства.

- Схема с ОК не усиливает по напряжению, но она лучше других усиливает по току, поэтому её можно использовать в качестве усилителя мощности.

5. Температурные и частотные свойства биполярного транзистора

5.1. Температурные свойства транзистора

Различают три основные причины зависимости коллекторного тока от температуры:

- зависимость тока неосновных носителей $I_{кбо}$ от температуры (этот ток удваивается при изменении температуры на каждые $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ у германиевых транзисторов и на каждые $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ у кремниевых);
- напряжение база-эмиттер $U_{бэ}$ с увеличением температуры уменьшается (примерная скорость этого уменьшения $\Delta U_{бэ} / \Delta T \approx -2,5\text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$);
- коэффициент передачи тока базы β (h_{21}) с повышением температуры увеличивается.

Самое ощутимое влияние на работу транзистора при повышении температуры оказывает ток $I_{кбо}$. За счет этого тока может произойти тепловой пробой коллекторного перехода.

Температурные свойства транзистора в схеме с ОБ лучше, чем в схеме с ОЭ. Например, если при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ германиевый транзистор имел коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21} = 50$, ток коллектора $I_k = 100\text{ мА}$, ток неосновных носителей $I_{кбо} = 10\text{ мкА}$, то при изменении температуры с $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ у германиевого транзистора в схеме с ОБ произойдет увеличение тока $I_{кбо}$ в 32 раза, то есть ток $I_{кбо}$ станет равен 320 мкА , а ток коллектора $I_k = 100,32\text{ мА}$. Такое незначительное увеличение тока коллектора при изменении температуры на $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически не нарушит работу транзистора.

В схеме на транзисторе с ОЭ картина иная, так как сквозной ток течёт через коллекторный и эмиттерный переходы $I_{кэо}$ будет в $(\beta+)$ раз больше тока $I_{кбо}$. Следовательно, у того же транзистора, что использовался в схеме с ОБ, при изменении температуры на те же $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ произойдет увеличение тока неосновных носителей $I_{кэо}$ до 16 мА , а коллекторного тока со 100 мА до 116 мА . Такое изменение тока коллектора основательно повлияет на режим транзистора и на его основные характеристики.

Вывод по температурным свойствам транзистора в разных схемах включения.

В схеме с ОБ ток неосновных носителей $I_{кбо}$ не участвует в процессе инжекции со стороны эмиттера, а в схеме с ОЭ ток неосновных носителей непосредственно влияет на процесс инжекции.

5.2. Частотные свойства транзистора

С повышением частоты усилительные свойства транзистора ухудшаются по двум причинам:

1 причина. Влияние диффузионной и барьерной емкостей эмиттерного и коллекторного переходов;

Влияние барьерных емкостей

Обозначим сопротивление эмиттерного перехода через $r_э$, а барьерную ёмкость ЭП — через $C_э$.

Роль эмиттерной барьерной ёмкости

Постоянная времени эмиттерного перехода (она же и постоянная времени коэффициента инжекции) $\tau_{ЭП} = r_э C_э$. Чаще всего $\tau_{ЭП} \ll t_{пр}$, (где $t_{пр}$ — время пролёта носителей) поэтому постоянную времени эмиттерного перехода можно не учитывать. И только в микрорежиме, когда $\tau_{ЭП}$ становится соизмеримым со временем пролёта носителей ($t_{пр}$), необходимо учитывать постоянную времени эмиттерного перехода: $\tau_a = \tau_{ЭП} + t_{пр}$. ($\alpha_a = 0,8 t_{пр}$),

Роль коллекторной барьерной ёмкости

При анализе влияния барьерной ёмкости (C_k) на работу транзистора замкнём участок «коллектор-эмиттер» (чтобы можно было пренебречь сопротивлением коллекторного перехода). При таких условиях ёмкость C_k окажется подключенной параллельно к базе. Следовательно, справедливо будет постоянную времени такой цепочки обозначить через $\tau_б$

$$\tau_б = r_б C_k.$$

Ток в коллекторной цепи ($\alpha I_э$) распределяется между внешней цепью (куда входит и $r_б$) и ёмкостью C_k . Следовательно, с повышением частоты ток, протекающий в коллекторной цепи, будет меньше, чем $\alpha I_э$.

2 причина. Появление фазового сдвига между переменными составляющими входного и выходного токов. Период подводимых колебаний становится соизмеримым со временем пролета носителей, в базе происходит накопление объемного заряда, за счет которого затруднена инжекция носителей в базу из эмиттера, так как на рассасывание заряда требуется определенное время. Коэффициент передачи тока эмиттера уменьшается и становится комплексной величиной.

Для характеристики частотных свойств транзистора вводятся параметры:

предельная частота транзистора $f_{гр}$ – это такая частота, на которой статический коэффициент передачи тока эмиттера α уменьшается в $\sqrt{2}$ раза по сравнению с « α », измеренном на частоте 1000 Гц;

границная частота транзистора $f_{гр}$ – это такая частота, на которой модуль коэффициента передачи тока базы становится равным единице. На любой частоте в диапазоне $0,1f_{2p} < f < f_{2p}$ модуль коэффициента передачи тока базы изменяется в два раза при изменении частоты в два раза;

максимальная частота генерации – наибольшая частота, при которой транзистор способен работать в схеме автогенератора при оптимальной обратной связи. Приближенно эта частота соответствует выражению

$$f_{мак} \approx 200 \sqrt{f_{гр} / \tau_k},$$

где $f_{гр}$ – граничная частота в МГц; $\tau_k = r'_б C_k$ – постоянная времени цепи обратной связи, определяющая устойчивость усилительного каскада к самовозбуждению; $r'_б$ – распределенное омическое сопротивление базовой области; C_k – емкость коллекторного перехода.

Частотные свойства транзистора зависят от его схемы включения.

Например:

На частоте $f = 1000$ Гц статический коэффициент передачи тока эмиттера $\alpha = 0,99$. В схеме с ОЭ на этой же частоте коэффициент передачи тока базы $\beta_{оэ} = 99$, а в схеме с ОК $\beta_{ок} = 100$.

На предельной частоте $\alpha_{np} = \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \approx 0,7$;

В схемах с ОЭ и ОК на этой же частоте коэффициент передачи тока базы (соответственно)

$$\beta_{оэ.пp} = \frac{\alpha_{np}}{1 - \alpha_{np}} = \frac{0,7}{1 - 0,7} = 2,3; \quad \beta_{ок.пp} = \frac{1}{1 - \alpha_{np}} = 3,3.$$

Следовательно, частотные свойства транзистора в схеме с ОБ значительно лучше, чем в схемах с ОЭ и ОК.

6. Заключение

Количество транзисторов на одном чипе за каждые 18 месяцев примерно удваивается; в 1970 г число транзисторов на одном чипе составляло примерно 4000, через 20 лет – около миллиона, а к 2007 г на один процессор приходится около миллиарда транзисторов. К 2020 году топологическая ширина элементов ИС в чипах составит около 23 нм (вместо 90...130 нм на сегодня).