

Биполярным транзистором (БТ) или просто транзистором называют полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими ЭДП и тремя или более выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда.

Электронно-дырочные переходы образуются между тремя областями полупроводника с различными типами электропроводности. В соответствии с порядком чередования p - и n -областей БТ подразделяются на транзисторы типа $p - n - p$ и транзисторы типа $n - p - n$ (рис. 2.5).

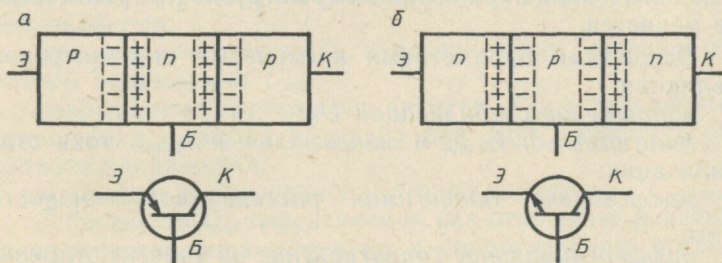


Рис. 2.5. Структура и условные обозначения биполярных транзисторов: а — типа $p - n - p$; б — типа $n - p - n$

Средняя область транзистора называется базой, одна крайняя область — эмиттером (Э), а другая — коллектором (К). Обычно концентрация примесей в эмиттере больше, чем в коллекторе. У БТ типа $n - p - n$ база имеет электропроводность p -типа, а эмиттер и коллектор — n -типа.

ЭДП, образованный между эмиттером и базой, называют *эмиттерным*, а между базой и коллектором — *коллекторным*.

Режимы работы транзистора. В зависимости от способа подключения эмиттерного и коллекторного ЭДП к источникам питания биполярный транзистор может работать в одном из четырех режимов: отсечки, насыщения, активном и инверсном.

Эмиттерный и коллекторный ЭДП в *режиме отсечки* (рис. 2.6, а) смещаются в обратном, а в *режиме насыщения* (рис. 2.6, б) — в прямом направлениях. Коллекторный ток в этих режимах практически не зависит от напряжения и тока эмиттера.

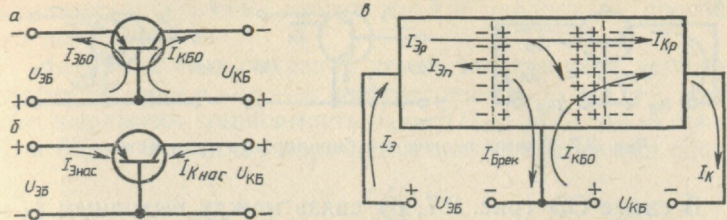


Рис. 2.6. Схемы подключения биполярного транзистора к источникам питания

Режимы отсечки и насыщения используются при работе БТ в импульсных и ключевых устройствах.

При работе транзистора в *активном режиме* его эмиттерный переход смещается в прямом, а коллекторный - в обратном направлении (рис. 2.6, в).

Под действием прямого напряжения $U_{ЭБ}$ в эмиттерной цепи протекает ток $I_{Э}$, создающий токи коллектора $I_{К}$ и базы $I_{Б}$, так что

$$I_{Э} = I_{К} + I_{Б}.$$

Коллекторный ток содержит две составляющие: управляемую $I_{Кр} = h_{21Б} I_{Эр}$, пропорциональную току эмиттера, и неуправляемую $I_{КБ0}$, создаваемую дрейфом неосновных носителей через обратно смещенный коллекторный переход. Коэффициент пропорциональности $h_{21Б} = I_{Кр} / I_{Э}$ называют статическим коэффициентом передачи тока эмиттера. Для большинства современных БТ $h_{21Б} = 0,95...0,99$ и более.

Ток базы $I_{Б}$ включает в себя рекомбинационную составляющую $I_{Б,рек}$, обусловленную электронами, поступающими в базу для компенсации положительного заряда рекомбинирующих в базе дырок, и неуправляемую составляющую коллекторного тока $I_{КБ0}$, так что $I_{Б} = I_{Б,рек} - I_{КБ0}$.

При использовании БТ в качестве усилительного элемента один из выводов должен быть общим для входной и выходной цепей. В схеме, приведенной на рис. 2.6, в, общим электродом является база. Такую схему включения БТ называют схемой с общей базой (ОБ) и обычно изображают так, как показано на рис. 2.7, а. Кроме схемы ОБ, на практике также применяются схемы с общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК).

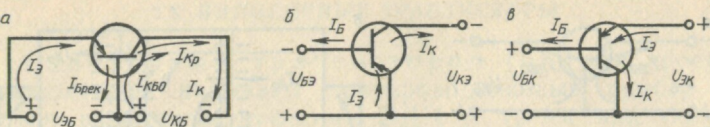


Рис. 2.7. Схемы включения биполярного транзистора

В схеме ОЭ (рис. 2.7, б) связь между выходным I_K и входным I_B токами определяется уравнением

$$I_K = h_{21E} I_B + I_{KЭО}.$$

Коэффициент h_{21E} называется статическим коэффициентом передачи тока базы. Он связан с коэффициентом h_{21B} соотношением

$$h_{21E} = h_{21B} / (1 - h_{21B}).$$

При $h_{21B} = 0,95 \dots 0,99$ значения h_{21E} находятся в пределах $19 \dots 99$.

Составляющая $I_{KЭО}$ представляет собой обратный (неуправляемый) ток коллектора в схеме ОЭ. Этот ток связан с обратным током $I_{KБО}$ в схеме ОБ соотношением

$$I_{KЭО} = (1 + h_{21E}) I_{KБО}.$$

Из соотношения (2.4) следует, что обратный ток коллектора в схеме ОЭ значительно больше, чем в схеме ОБ. Это означает, что изменение температуры в схеме ОЭ в большей степени влияет на изменение токов (а значит, и на изменение статических характеристик и параметров), чем в схеме ОБ. Это один из недостатков включения БТ по схеме ОЭ.

При включении БТ по схеме ОК (рис. 2.7, в) связь между выходным $I_Э$ и входным $I_Б$ токами определяется соотношением

$$I_Э = (1 + h_{21E}) I_Б + I_{KЭО}.$$

Из сравнения выражений (2.2) и (2.5) следует, что зависимости между входными и выходными токами БТ в схемах ОЭ и ОК примерно одинаковы. Это позволяет для расчета схем ОЭ и ОК использовать одинаковые характеристики и параметры.

Инверсный режим отличается от активного противоположной полярностью напряжений, прикладываемых к эмиттерному и коллекторному ЭДП.

Статические характеристики. Статические характеристики выражают сложные связи между токами и напря-

жениями электродов транзистора и зависят от способа его включения.

На рис. 2.8, а показано семейство входных характеристик БТ типа $n - p - n$, включенного по схеме ОЭ, которые выражают зависимость $I_B = f(U_{КЭ})$ при $I_C = \text{const}$. При $I_C = 0$ входная характеристика представляет собой

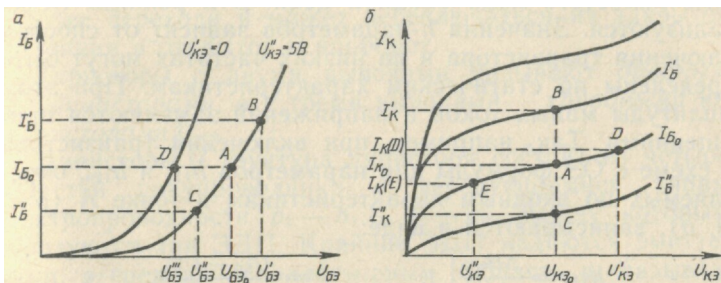


Рис. 2.8. Статические характеристики биполярного транзистора в схеме с ОЭ

прямую ветвь ВАХ эмиттерного ЭДП. При положительном напряжении коллектора входная характеристика смещается вправо.

Выходные характеристики (рис. 2.8, б) отражают зависимость $I_C = f(U_{КЭ})$ при $I_B = \text{const}$. Крутой участок характеристик соответствует режиму насыщения, а пологий — активному режиму. Зависимость между коллекторным и базовым токами на пологом участке определяется выражением (2.2).

Малосигнальные параметры статического режима.

При работе транзистора в усилительном режиме его свойства определяются малосигнальными параметрами, для которых транзистор можно считать линейным элементом. На практике наибольшее применение получили малосигнальные гибридные или h -параметры. Токи и напряжения при малых амплитудах переменных составляющих в системе h -параметров связаны следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\text{вх}} &= h_{11} \dot{I}_{\text{вх}} + h_{12} \dot{U}_{\text{вых}}, \\ \dot{I}_{\text{вых}} &= h_{21} \dot{I}_{\text{вх}} + h_{22} \dot{U}_{\text{вых}}, \end{aligned} \right\}$$

где $h_{11} = \left. \frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{\dot{I}_{\text{вх}}} \right|_{\dot{U}_{\text{вых}}=0}$ — входное сопротивление;

$h_{12} = \left. \frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{\dot{U}_{\text{вых}}} \right|_{\dot{I}_{\text{вх}}=0}$ — коэффициент обратной связи по на-

пряжению; $h_{21} = \frac{i_{\text{ВМХ}}}{I_{\text{ВХ}}} \Big|_{\dot{U}_{\text{ВМХ}}=0}$ - коэффициент прямой пе-

редачи по току; $h_{22} = \frac{j_{\text{ВМХ}}}{\dot{U}_{\text{ВМХ}}} \Big|_{i_{\text{ВХ}}=0}$ - выходная проводимость.

Параметры h_{11} и h_{21} измеряются в режиме короткого замыкания выходной цепи, а параметры h_{12} и h_{22} - в режиме холостого хода входной цепи. Эти режимы легко реализуются. Значения h -параметров зависят от способа включения транзистора и на низких частотах могут быть определены по статическим характеристикам. При этом амплитуды малых токов и напряжений заменяются приращениями. Так, например, при включении транзистора по схеме с ОЭ формулы для параметров h_{11} и h_{21} , определяемых по входным характеристикам в точке А (рис. 2.8, а), записываются в виде:

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{\text{БЭ}}}{\Delta I_{\text{Б}}} \Big|_{U_{\text{КЭ}} = \text{const}} = \frac{U'_{\text{БЭ}} - U''_{\text{БЭ}}}{I'_{\text{Б}} - I''_{\text{Б}}};$$
$$h_{21э} = \frac{\Delta U'_{\text{БЭ}}}{\Delta U_{\text{КЭ}}} \Big|_{I_{\text{Б}} = \text{const}} = \frac{U_{\text{БЭ0}} - U'''_{\text{БЭ}}}{5 - 0}.$$

Параметры $h_{21э}$ и $h_{22э}$ определяются по выходным (рис. 2.8, б) характеристикам по формулам:

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}} \Big|_{U_{\text{КЭ}} = \text{const}} = \frac{I'_{\text{К}} - I''_{\text{К}}}{I'_{\text{Б}} - I''_{\text{Б}}};$$
$$h_{22э} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta U_{\text{КЭ}}} \Big|_{I_{\text{Б}} = \text{const}} = \frac{I_{\text{К}}(D) - I_{\text{К}}(E)}{U'_{\text{КЭ}} - U''_{\text{КЭ}}}.$$

Аналогично определяются h -параметры при включении транзистора по схеме с ОБ.

Малосигнальные параметры $h_{21э}$ и $h_{22э}$ соответственно называются *коэффициентами передачи тока эмиттера* и *тока базы*. Они характеризуют усилительные свойства транзистора по току для переменных сигналов, а их значения зависят от режима работы транзистора и от частоты усиливаемых сигналов. Так, с увеличением частоты уменьшается модуль коэффициента передачи тока базы

$h_{21э}$. Частота, на которой $h_{21э}$ уменьшается в $\sqrt{2} \approx 0,707$ раза по сравнению с его значением на низкой частоте, называется *предельной частотой передачи тока базы* и обозначается $f_{h_{21э}}$. Частота, на которой $h_{21э}$ уменьшается до 1, называется *граничной частотой БТ* и обозначается $f_{\text{БТ}}$. По значению граничной частоты транзисторы

подробно подразделяются на низкочастотные, среднечастотные,

высокочастотные и сверхвысокочастотные.