

Лекция 3

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

План

1. Устройство и принцип действия биполярного транзистора.
2. Вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов.
3. Определение рабочей точки транзистора.
4. Выводы.

1. Устройство и принцип действия биполярного транзистора

Биполярный транзистор – трёхполюсный полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ -переходами. Он состоит из чередующихся областей полупроводника, имеющих электропроводность различных типов.

В зависимости от последовательности чередования n - и p -областей различают транзисторы $n-p-n$ - и $p-n-p$ -типов. На практике используются транзисторы обоих типов; принцип действия их одинаков. Основными носителями заряда в транзисторе $n-p-n$ -типа являются электроны, а в $p-n-p$ -транзисторе – дырки. Так как в кремнии электроны обладают большей подвижностью, чем дырки, то чаще используют транзисторы $n-p-n$ -типа.

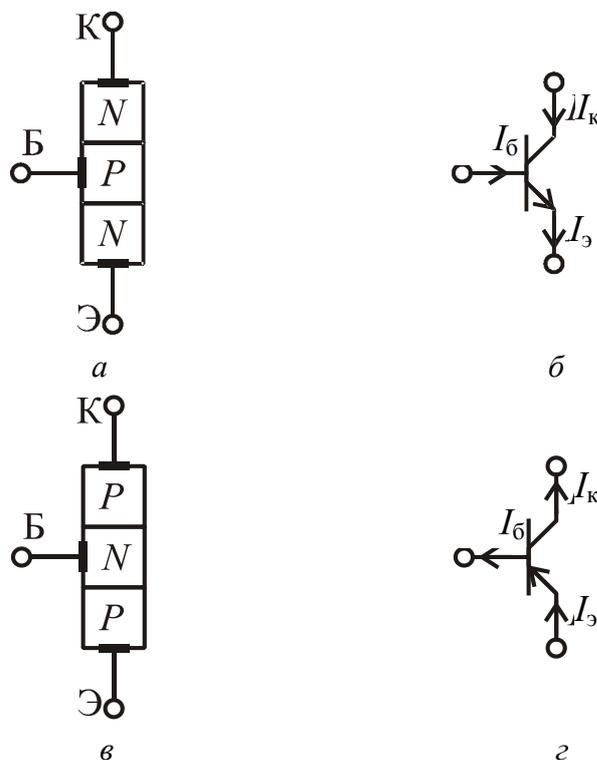


Рис. 3.1

На рис. 3.1, *а* изображена идеализированная структура биполярного n - p -транзистора. На рис. 3.1, *б* приведено его условное графическое обозначение. На рис. 3.1, *в, г* показаны структура и условное графическое обозначение p - n - p -транзистора. Заметим, что n - p - n - и p - n - p -транзисторы имеют обратные полярности напряжений. Соответственно противоположные направления имеют и токи.

Центральная область транзистора, называемая *базой*, заключена между *коллектором* и *эмиттером*. Толщина базы мала и не превышает нескольких микрон. Переход между базой и эмиттером называется *эмиттерным*, а между базой и коллектором – *коллекторным*.

Симметричные структуры биполярных транзисторов, показанные на рис. 3.1, являются идеальными. Структура реального транзистора несимметрична (рис. 3.2). Площадь коллекторного перехода значительно больше, чем эмиттерного.

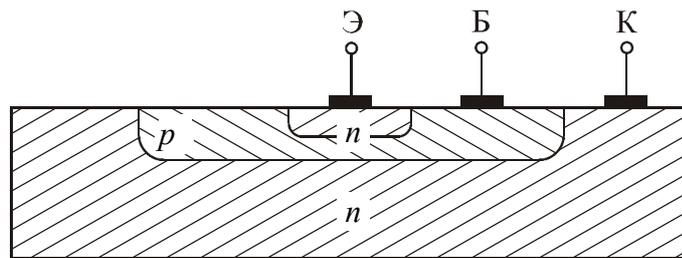


Рис. 3.2

Каждый из p - n -переходов транзистора может быть смещён либо в прямом, либо в обратном направлениях. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора:

- 1) **активный (усиления)**. Эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный – в обратном;
- 2) **отсечки**. Оба перехода смещены в обратном направлении;
- 3) **насыщения**. Оба перехода смещены в прямом направлении;
- 4) **инверсный**. Эмиттерный переход смещён в обратном направлении, а коллекторный – в прямом.

Рассмотрим подробнее каждый из режимов работы транзистора на примере прибора n - p - n -типа.

Активный режим. Так как эмиттерный переход смещён в прямом направлении, происходит инжекция носителей из эмиттера в базу. Поскольку область эмиттера легирована сильнее, чем область базы, поток электронов преобладает над потоком дырок. Из-за малой толщины базы почти все электроны, пройдя базу, достигают коллектора. Только малая доля электронов рекомбини-

рует в базе с дырками. Коллекторный переход смещён в обратном направлении, поэтому электроны, достигшие коллекторного перехода, втягиваются полем перехода в коллектор. Происходит *экстракция* электронов в коллектор.

Токи транзистора, работающего в активном режиме, связаны соотношениями:

$$I_{\kappa} = \alpha I_{\text{э}}; \quad (12.1a)$$

$$I_{\text{э}} = I_{\kappa} + I_{\sigma}. \quad (12.1б)$$

Множитель α называют *коэффициентом передачи тока эмиттера*. У интегральных транзисторов $\alpha = 0.99\text{--}0.995$. Из равенств (12.1) следует, что

$$I_{\kappa} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_{\sigma} = \beta I_{\sigma}.$$

Множитель β называют *коэффициентом усиления тока базы*. Так как величина α близка к 1, то β может принимать большие значения. Для интегральных *n-p-n*-транзисторов оно составляет от 50 до 200.

Связь между напряжением эмиттерного перехода и током эмиттера имеет экспоненциальную форму:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{э}0} e^{U_{\text{э}}/V_T}.$$

Обратный ток эмиттерного перехода $I_{\text{э}0}$ обратно пропорционален ширине базы и прямо пропорционален площади эмиттерного перехода. Последнее свойство часто используется разработчиками интегральных схем при конструировании источников постоянного тока. В зависимости от размеров транзистора величина $I_{\text{э}0}$ составляет от 10^{-12} до 10^{-18} А. Ток $I_{\text{э}0}$ зависит от температуры, удваиваясь при увеличении температуры примерно на 7°C .

Таким образом, работа биполярного транзистора в активном режиме основана на сочетании процессов инжекции носителей через один переход и собирания их на другом переходе. Концентрация примесей в эмиттере значительно больше, чем в базе и коллекторе. Поэтому электронная составляющая тока *n-p-n*-транзистора является преобладающей. В активном режиме ток коллектора управляется током эмиттера (или напряжением эмиттерного перехода) и почти не зависит от напряжения на коллекторном переходе, поскольку последний смещен в обратном направлении. Активный режим является основным, если транзистор используется для усиления сигналов.

Режим отсечки. Инжекция основных носителей в область базы наблюдается в том случае, если эмиттерный переход смещён в прямом направлении. Если напряжение $U_{бэ}$ меньше пороговой величины (0,6 В для кремниевых транзисторов), заметной инжекции носителей в базу не наблюдается. При этом $I_э = I_б = 0$. Следовательно, ток коллектора также равен нулю. Таким образом, для режима отсечки справедливы условия: $U_{бэ} < 0,6$ В или $I_б = 0$.

Режим насыщения. Если оба перехода смещены в прямом направлении, носители инжектируются в базу как из эмиттера, так и из коллектора. В этом режиме ток коллектора не зависит от тока базы. Коллекторный переход отпирается, если напряжение коллектор-база $U_{кб} < -0,4$ В. При этом напряжение коллектор-эмиттер не превышает напряжение насыщения: $U_{кэ} \leq U_{кэнас}$. Значение $U_{кэнас}$ находится в пределах 0,2–0,3 В.

Режимы отсечки и насыщения биполярных транзисторов являются основными, когда они работают в ключевых и логических схемах.

Инверсный режим. Биполярный транзистор является симметричным прибором в том смысле, что область полупроводника с одним типом проводимости располагается между двумя областями с другим типом проводимости. Поэтому транзистор можно включить так, что коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный – в обратном. При этом эмиттер играет роль коллектора, а коллектор – эмиттера. Такой режим работы биполярного транзистора называют *инверсным*. Однако коллектор и эмиттер изготавливают неодинаковыми (см. рис. 12.2), с тем, чтобы наибольшее усиление достигалось в активном режиме. В инверсном режиме усиление транзистора невелико. Такой режим используют в некоторых цифровых схемах.

2. Вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов

Рассмотрим транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером (рис. 12.3). Название «схема с общим эмиттером» объясняется тем, что эмиттер является общим для входной и выходной цепей. Входными величинами являются напряжение база-эмиттер $U_{бэ}$ и ток базы $I_б$, а выходными – напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ и ток коллектора $I_к$.

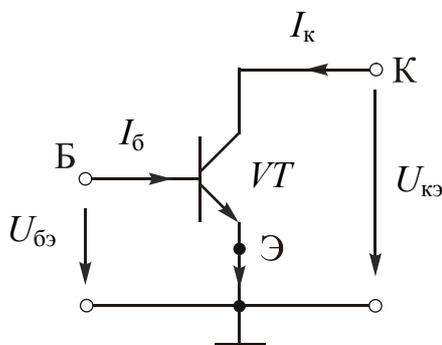


Рис. 12.3

Рассмотрим вольт-амперные характеристики биполярного транзистора и укажем на них области отсечки, насыщения и усиления.

Входная характеристика биполярного транзистора – это зависимость тока базы $I_б$ от

напряжения база-эмиттер $U_{бэ}$ при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$:

$$I_{б} = f(U_{бэ})U_{кэ} = \text{const}.$$

Входная характеристика кремниевого биполярного транзистора показана на рис. 12.4, а. Если эмиттерный переход смещён в прямом направлении, то входная характеристика похожа на прямую ветвь ВАХ диода.

Выходной характеристикой называют зависимость тока коллектора $I_{к}$ от напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ при фиксированном токе базы:

$$I_{к} = f(U_{кэ})I_{б} = \text{const}.$$

Выходная характеристика показана на рис. 12.4, б. Область отсечки лежит ниже кривой $I_{б} = 0$. В области насыщения величина напряжения $U_{кэ}$ столь мала, что становится недостаточной для создания обратного смещения на коллекторном переходе. В режиме насыщения ток коллектора не зависит от тока базы и все ветви выходной характеристики сливаются в одну.

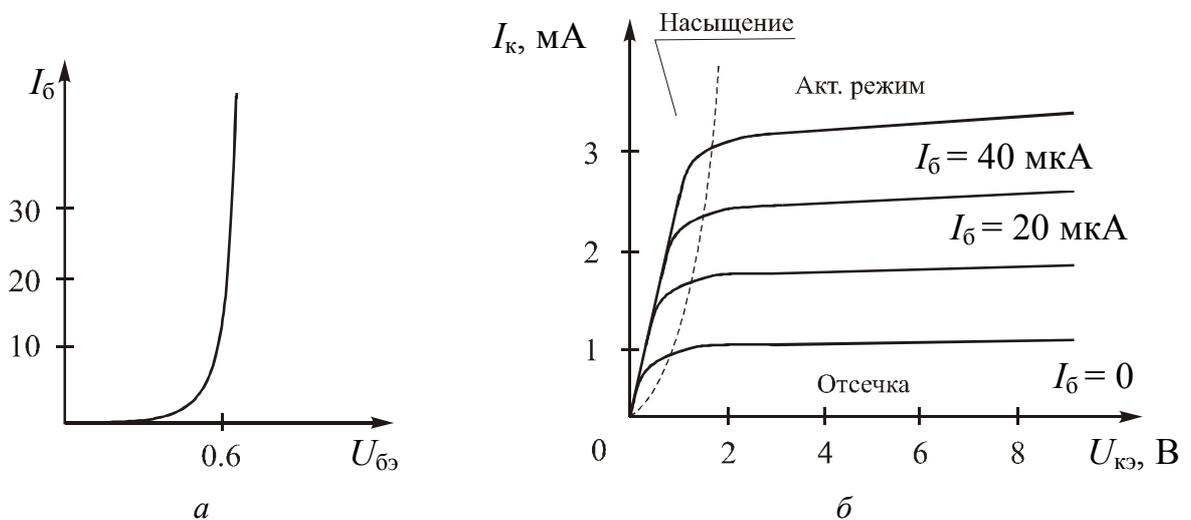


Рис. 12.4

В активной области ток коллектора очень слабо зависит от напряжения коллектор-эмиттер и пропорционален току базы, а ветви выходной характеристики расположены почти горизонтально. Это объясняется тем, что коллекторный переход смещён в обратном направлении. Таким образом, в активном режиме биполярный транзистор ведёт себя как источник тока, управляемый током базы.

Как видно из рис. 12.4, *a*, ток эмиттера и напряжение база-эмиттер связаны экспоненциальной зависимостью, описывающей вольт-амперную характеристику диода, смещенного в прямом направлении:

$$I_{э} = I_{э0} e^{U_{бэ}/Vt} . \quad (12.2)$$

Здесь $I_{э0}$ – обратный ток эмиттерного перехода. Подставляя выражение (12.2) в формулу (12.1а), получаем связь между током коллектора и напряжением база-эмиттер:

$$I_{к} = \alpha I_{э0} e^{U_{бэ}/Vt} . \quad (12.3)$$

Равенство (12.3) справедливо для активного режима.

Определим теперь, какие предельные значения могут принимать токи и напряжения биполярного транзистора. При рассеянии электрической энергии температура транзистора повышается, что приводит к необходимости ограничивать допустимые уровни токов и напряжений. Величина максимальной мощности ограничивается максимально допустимой температурой прибора (для кремниевых транзисторов 150–200 °С). Она зависит от размеров транзистора, его конструкции и температуры окружающей среды.

В транзисторе, работающем в режиме усиления, подавляющая часть рассеиваемой мощности выделяется в области коллекторного перехода. Ее можно определить по формуле $P = U_{кэ} I_{к}$.

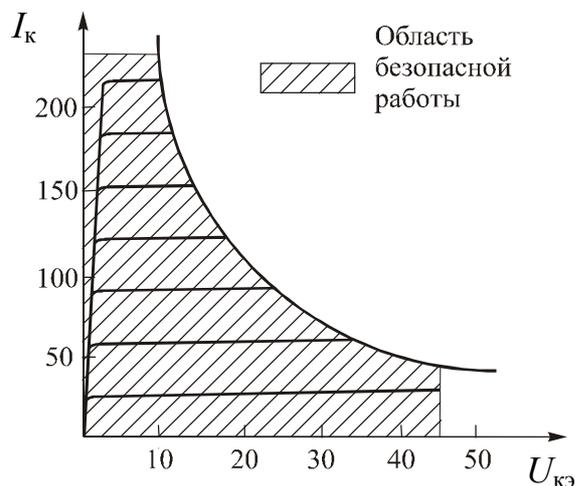


Рис. 12.5

Если рассеиваемую мощность положить равной максимально допустимой, то максимально допустимые значения напряжения тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер можно определить из соотношения:

$$U_{кэ} I_{к} \leq P_{\max}. \quad (12.4)$$

Неравенству (12.4) соответствует гипербола, ограничивающая область допустимых значений $U_{кэ}$ и $I_{к}$ (рис. 12.5). Если рабочая точка находится за пределами этой области, возможен тепловой пробой транзистора. При выборе транзистора для конкретной схемы нужно определить, какие величины токов и напряжений следует ожидать в этой схеме, а затем убедиться в том, что найденные значения лежат в области безопасной работы.

Из условия (12.4) можно определить только произведение $U_{кэ}$ и $I_{к}$, а не их предельные значения. Тем не менее существуют ограничения на максимальные значения этих величин. В паспортных данных транзистора указывается максимальный ток $I_{к\max}$, превышать который не разрешается. Максимально допустимое значение $U_{кэ}$ определяется напряжением, при котором происходит лавинный пробой коллекторного перехода.

3. Определение рабочей точки транзистора

Рассмотрим схему с общим эмиттером (рис. 12.6). Входным током является ток базы $I_{б}$, а выходным – ток коллектора $I_{к}$.

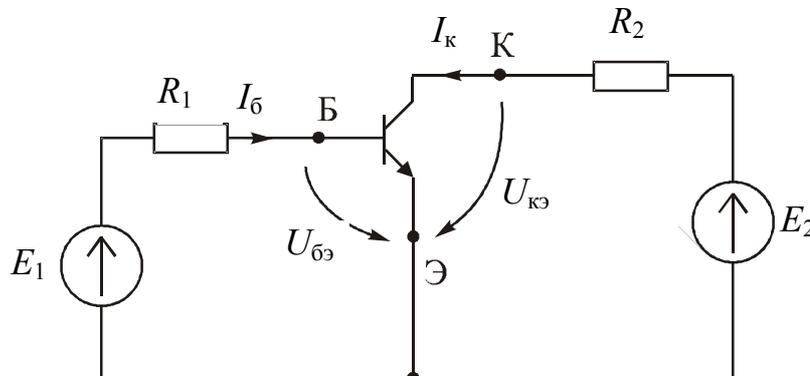


Рис. 12.6

Для определения напряжений и токов транзистора воспользуемся графическим методом. Рабочая точка на входе транзистора (рис. 12.7, а) определяется пересечением нагрузочной прямой линейного двухполюсника, образованного резистором R_1 и источником E_1 , и входной характеристики транзистора $I_{б} = f(U_{бэ})$. На рис. 12.7, а пунктиром показаны нагрузочные прямые для случая, когда $R_1 = 20$ кОм, а напряжение источника E_1 принимает значения 0.4, 0.8, 1.2 и 1.6 В. При увеличении E_1 изменяется и положение рабочей точки. Ток базы увеличивается от 0 до 50 мкА.

Рабочая точка выходной цепи транзистора представляет пересечение нагрузочной прямой двухполюсника E_2, R_2 с ветвью выходной характеристики транзистора $I_{\text{э}} = f(U_{\text{э-й}})$, соответствующей определенной величине тока базы (рис. 12.7, б).

Рассмотрим, как изменяется напряжение $U_{\text{кэ}}$ в зависимости от изменения напряжения источника E_1 . Если $E_1 < 0.6$ В, ток базы $I_{\text{б}} \approx 0$ и транзистор находится в режиме отсечки. Рабочая точка определяется пересечением нагрузочной прямой с ветвью выходной характеристики, соответствующей току базы $I_{\text{б}} = 0$. Точка пересечения имеет координаты $I_{\text{к}} = 0$, $U_{\text{кэ}} \approx E_2$ и соответствует режиму отсечки транзистора.

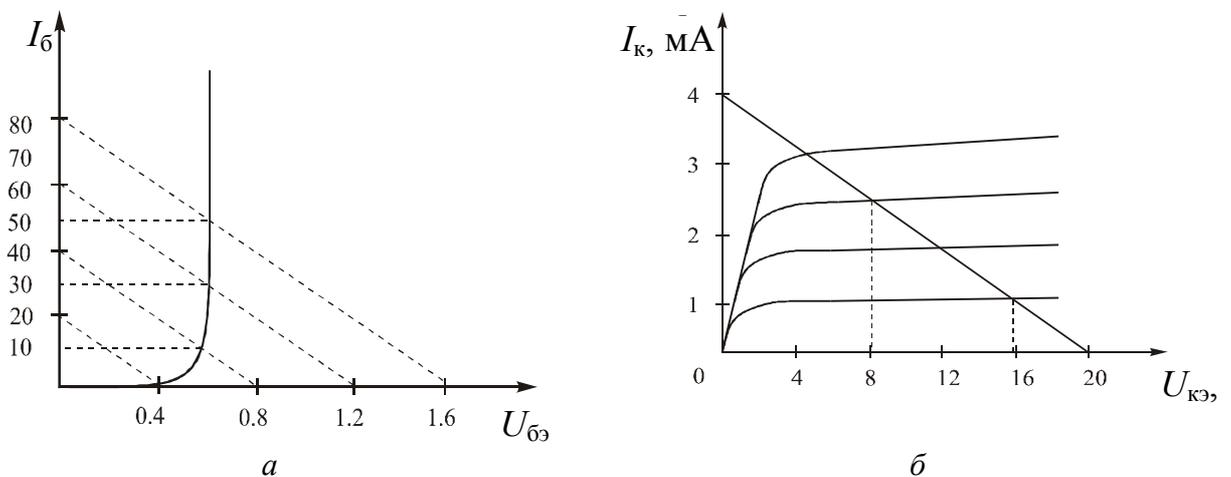


Рис. 12.7

Рабочую точку на выходе цепи найдем на рис. 12.7, б. При увеличении $I_{\text{б}}$ напряжение коллектор-эмиттер $U_{\text{кэ}}$ уменьшается до тех пор, пока рабочая точка не попадет в область насыщения, где $U_{\text{кэ}}$ не зависит от напряжения на входе.

Предположим теперь, что входное напряжение равно сумме постоянной и переменной составляющих:

$$E_1 = E_0 + E_m \sin \omega t.$$

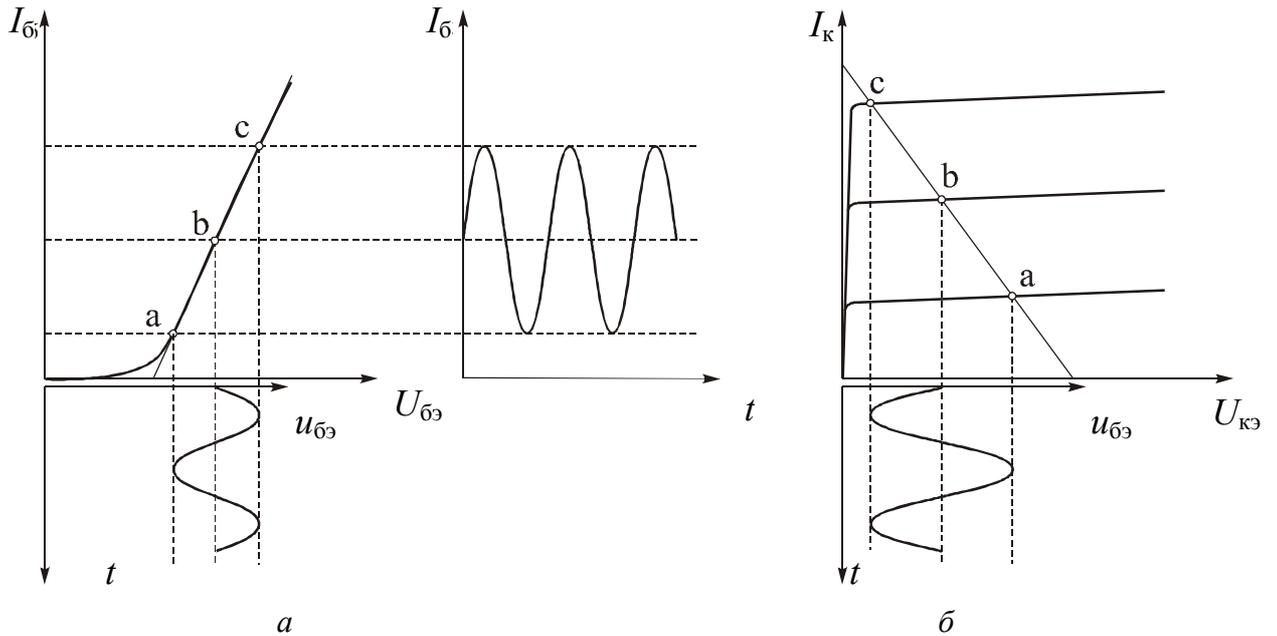


Рис. 12.8

Графики входного и выходного напряжений показаны на рис. 12.8, а, б. Точки а, б, с на входной характеристике соответствуют точкам а, б, с выходной характеристике. Увеличение входного напряжения вызывает уменьшение выходного, т. е. схема является инвертирующим усилителем.

4. Выводы

1. Биполярный транзистор – трехполюсный полупроводниковый прибор с двумя p - n -переходами. Он состоит из чередующихся областей полупроводника, имеющих электропроводность различных типов.

2. В зависимости от последовательности чередования n - и p -областей различают транзисторы n - p - n - и p - n - p -типов. Основными носителями заряда в транзисторе n - p - n -типа являются электроны, а в p - n - p -транзисторе – дырки.

3. Каждый из p - n -переходов транзистора может быть смещён либо в прямом, либо в обратном направлениях. В зависимости от этого различают четыре режима работы транзистора: активный, отсечки, насыщения и инверсный.

4. Входной характеристикой биполярного транзистора называют зависимость тока базы $I_{\text{б}}$ от напряжения база-эмиттер $U_{\text{бэ}}$ при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер.

5. Выходной характеристикой называют зависимость тока коллектора $I_{\text{к}}$ от напряжения коллектор-эмиттер $U_{\text{кэ}}$ при фиксированном токе базы.