

Лекция 20. 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.

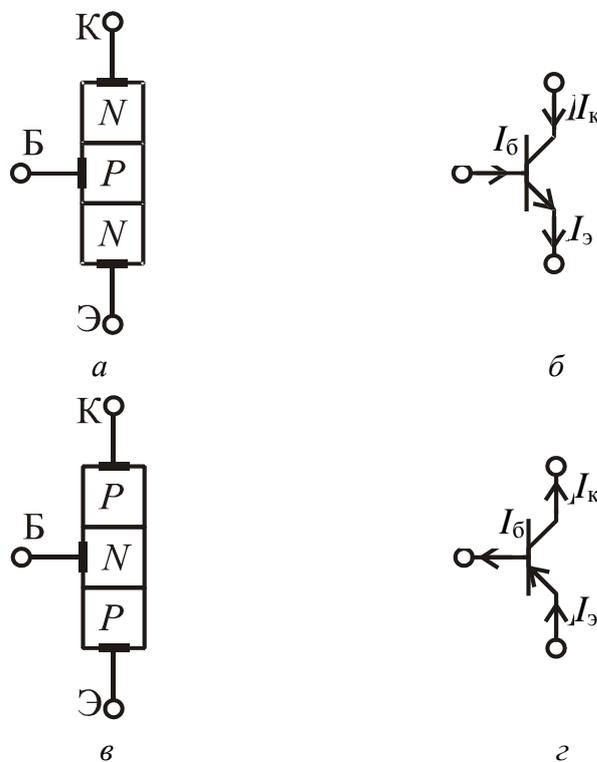


Рис. 20.1

На рис. 20.1, а изображена идеализированная структура биполярного $n-p-n$ -транзистора. На рис. 20.1, б приведено его условное графическое обо-

значение. На рис. 20.1, 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. 20.1, являются идеальными. Структура реального транзистора несимметрична (рис. 20.2). Площадь коллекторного перехода значительно больше, чем эмиттерного.

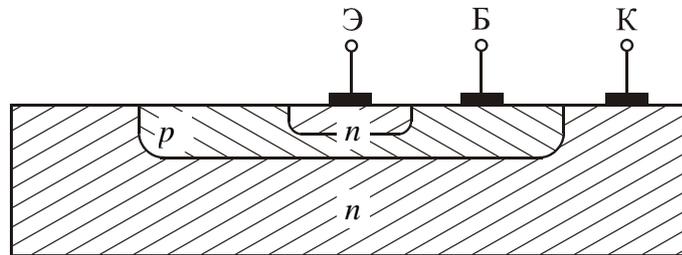


Рис. 20.2

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 рекомбинирует 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:

$$I_{\kappa} = \alpha I_{\text{э}}; \quad (20.1a)$$

$$I_{\text{э}} = I_{\kappa} + I_{\text{б}}. \quad (20.1б)$$

Множитель α называют *коэффициентом передачи тока эмиттера*. У интегральных транзисторов $\alpha = 0.99\text{--}0.995$. Из равенств (20.1) следует, что

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

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

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

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

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 (см. параграф 20.9). 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 $n\text{--}p\text{--}n$ -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 $U_{\text{бэ}}$ меньше пороговой величины (0.6 В для кремниевых транзисторов), заметной инжекции носителей в базу не наблюдается. При этом $I_{\text{э}} = I_{\text{б}} = 0$.

Следовательно, ток коллектора также равен нулю. Таким образом, для режима отсечки справедливы условия: $U_{бэ} < 0.6 \text{ В}$ 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 $U_{кб} < -0.4 \text{ В}$. 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. 20.2), 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. 20.3). 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 $I_к$.

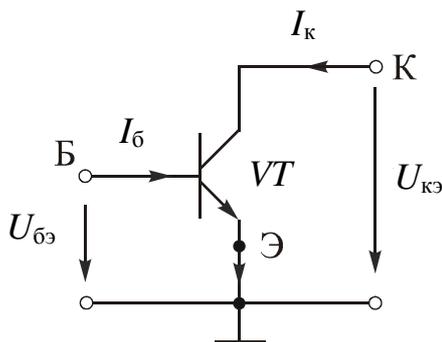


Рис. 20.3

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. 20.4, а. Если эмиттерный переход смещён в прямом направлении, то входная характеристика похожа на прямую ветвь ВАХ диода.

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

$$I_K = f(U_{кэ})I_B = \text{const}.$$

Выходная характеристика показана на рис. 20.4, б. Область отсечки лежит ниже кривой $I_B = 0$. 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.

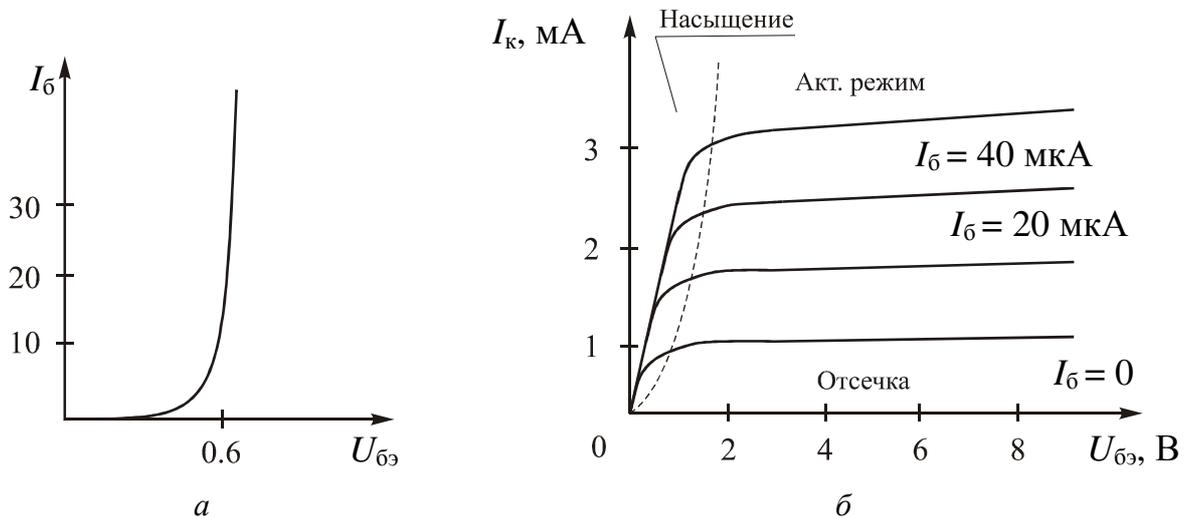


Рис. 20.4

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. 20.4, а, ток эмиттера и напряжение база-эмиттер связаны экспоненциальной зависимостью, описывающей вольт-амперную характеристику диода, смещенного в прямом направлении:

$$I_э = I_{э0} e^{U_{бэ}/V_t}. \quad (20.2)$$

Здесь $I_{\text{э}0}$ – обратный ток эмиттерного перехода. Подставляя выражение (20.2) в формулу (20.1а), получаем связь между током коллектора и напряжением база-эмиттер:

$$I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}0} e^{U_{\text{бэ}}/V_T}. \quad (20.3)$$

Равенство (20.3) 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 $P = U_{\text{кэ}} I_{\text{к}}$.

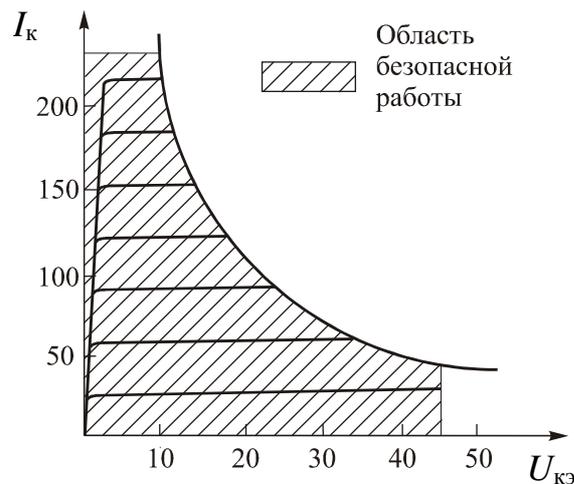


Рис. 20.5

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

$$U_{\text{кэ}} I_{\text{к}} \leq P_{\text{max}}. \quad (20.4)$$

Неравенству (20.4) соответствует гипербола, ограничивающая область допустимых значений $U_{\text{кэ}}$ и $I_{\text{к}}$ (рис. 20.5). Если рабочая точка находится за пределами этой области, возможен тепловой пробой транзистора. При выборе транзистора для конкретной схемы нужно определить, какие величины то-

ков и напряжений следует ожидать в этой схеме, а затем убедиться в том, что найденные значения лежат в области безопасной работы.

Из условия (20.4) 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 $I_{кmax}$, превышать который не разрешается. Максимально допустимое значение $U_{кэ}$ определяется напряжением, при котором происходит лавинный пробой коллекторного перехода. Типичные значения этого напряжения приведены в табл. 20.1 и 20.2.

3. Определение рабочей точки транзистора

Рассмотрим схему с общим эмиттером (рис. 20.6). Входным током является ток базы $I_{б}$, а выходным – ток коллектора $I_{к}$.

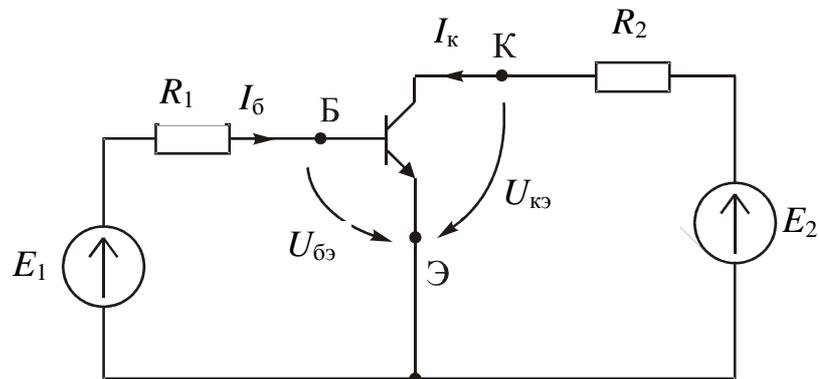


Рис. 20.6

Для определения напряжений и токов транзистора воспользуемся графическим методом. Рабочая точка на входе транзистора (рис. 20.7, 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. 20.7, 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 $I_{э} = f(U_{эв})$, соответствующей определенной величине тока базы (рис. 20.7, б).

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

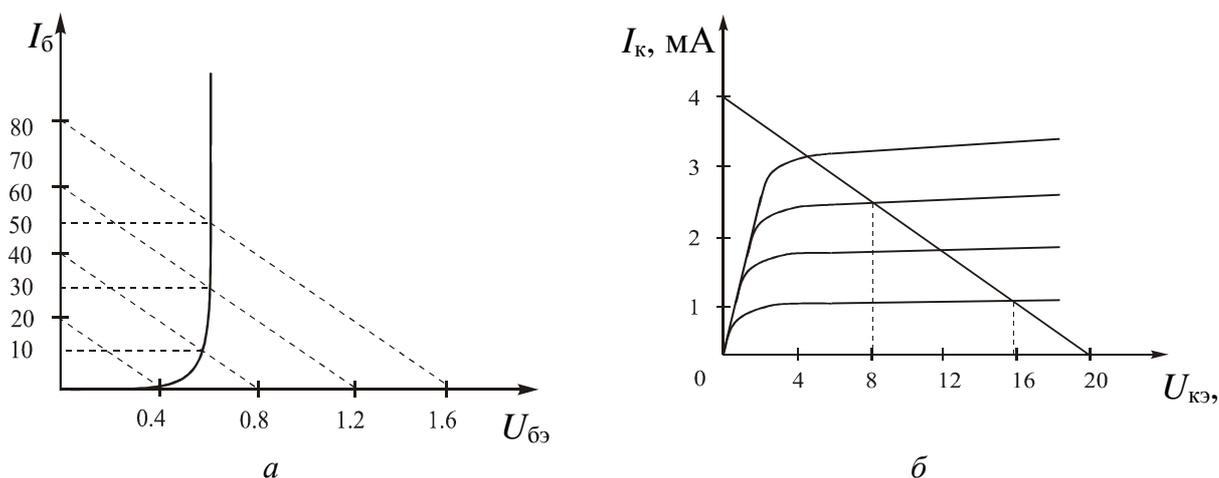


Рис. 20.7

Рабочую точку на выходе цепи найдем на рис. 20.7, б. При увеличении $I_б$ напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ уменьшается до тех пор, пока рабочая точка не попадет в область насыщения, где $U_{кэ}$ не зависит от напряжения на входе.

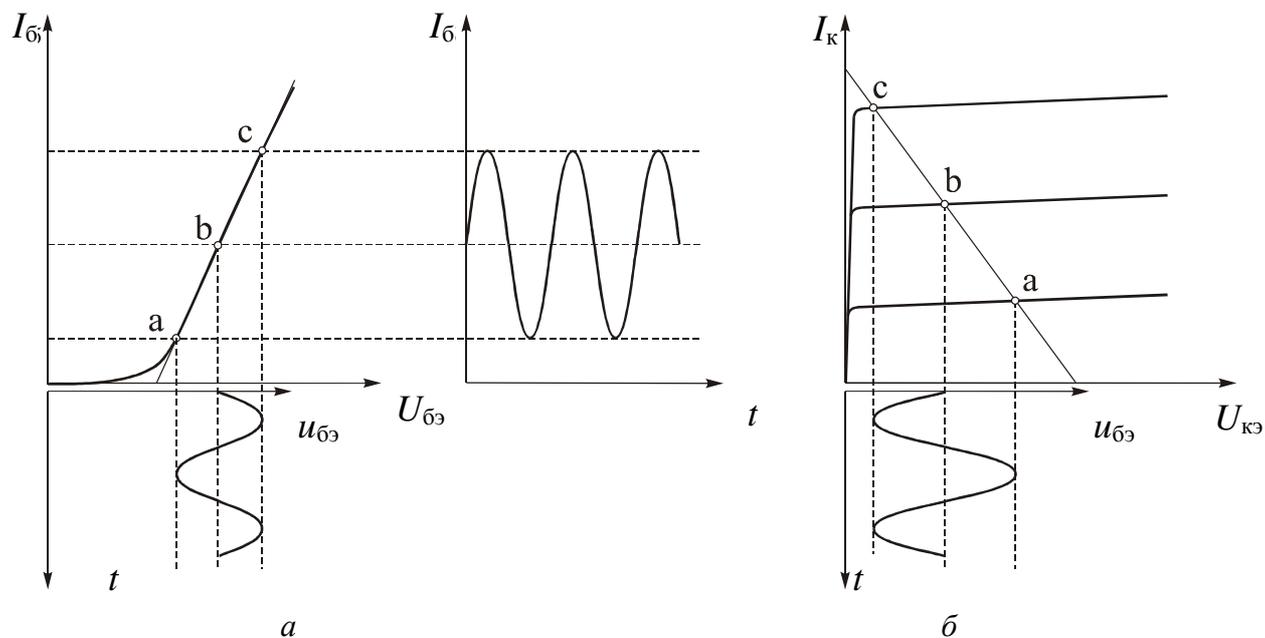


Рис. 20.8

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

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

Графики входного и выходного напряжений показаны на рис. 20.8, *а*, *б*. Точки *а*, *б*, *с* на входной характеристике соответствуют точкам *а*, *б*, *с* выходной характеристики. 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_b от напряжения база-эмиттер $U_{бэ}$ при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер.

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