

6.1. 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.

На рис. 6.1, а изображена идеализированная структура биполярного $n-p-n$ -транзистора. На рис. 6.1, б приведено его условное графическое обозначение. На рис. 6.1, 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.

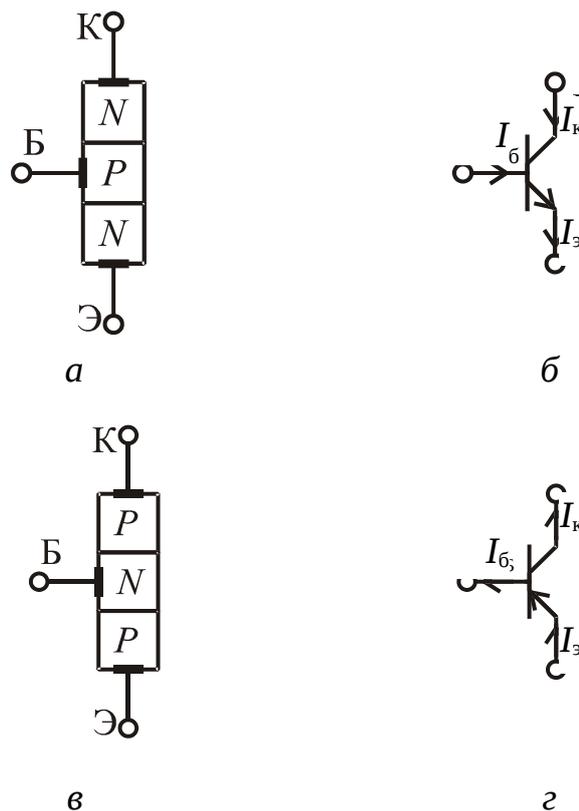


Рис. 6.1

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. 6.1, являются идеальными. Структура реального транзистора несимметрична (рис. 6.2). Площадь коллекторного перехода значительно больше, чем

эмиттерного.

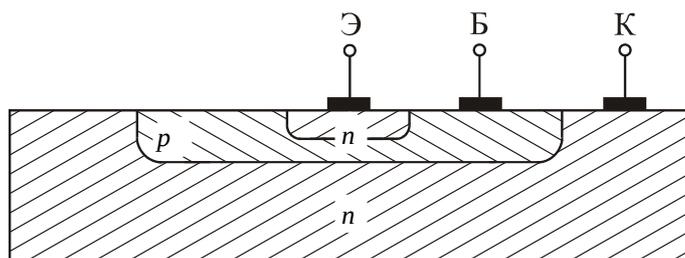


Рис. 6.2

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:

$$I_k = \alpha I_э; \quad (6.1a)$$

$$I_э = I_k + I_б. \quad (6.1б)$$

Множитель α называют *коэффициентом передачи тока эмиттера*. У интегральных транзисторов $\alpha = 0.99$ – 0.995 . Из равенств (6.1) следует, что

$$I_k = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_б = \beta I_б.$$

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:

$$I_{э} = I_{э0} e^{U_{бэ}/V_t}.$$

Обратный ток эмиттерного перехода $I_{э0}$ обратно пропорционален ширине базы и прямо пропорционален площади эмиттерного перехода. Последнее свойство часто используется разработчиками интегральных схем при конструировании источников постоянного тока (см. параграф 6.9). В зависимости от размеров транзистора величина $I_{э0}$ составляет от 10^{-12} до 10^{-18} А. Ток $I_{э0}$ 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 смещен 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: $U_{кэ} \leq U_{кэ\text{нас}}$. Значение $U_{кэ\text{нас}}$ 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. 6.2), с тем, чтобы наибольшее усиление достигалось в активном режиме. В инверсном режиме усиление транзистора невелико. Такой режим используют в некоторых цифровых схемах.

В табл. 6.1 приведены типичные параметры биполярных транзисторов n –

$p-n$ и $p-n-p$ -типов, используемых в микросхемах малой и средней степени интеграции, где $A_э$ – площадь эмиттерного перехода, $I_о$ – обратный ток эмиттерного перехода, β – коэффициент усиления тока базы, $U_{кз гр}$ – напряжение пробоя коллекторного перехода.

Таблица 6.1

Параметр	Тип транзистора	
	$n-p-n$	$p-n-p$
$A_э, \text{мкм}^2$	500	900
$I_о, \text{А}$	$5 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-15}$
β	200	50
$U_{кз гр}, \text{В}$	50	60

Из табл. 6.1 следует, что характеристики $p-n-p$ -транзисторов значительно уступают характеристикам $n-p-n$ -транзисторов. В частности, коэффициент усиления тока базы $p-n-p$ -транзисторов не превышает 50. Значительное отличие характеристик транзисторов с различными типами проводимостей является существенным недостатком биполярных технологий.