

Лекция 6.

Структура и устройство биполярных транзисторов.

Принцип действия биполярного транзистора и его основные параметры

Транзистор, или полупроводниковый триод, являясь управляемым элементом, нашел широкое применение в схемах усиления, а также в импульсных схемах. Отсутствие накала, малые габариты и стоимость, высокая надежность — таковы преимущества, благодаря которым транзистор вытеснил из большинства областей техники электронные лампы.

Биполярный транзистор представляет собой трехслойную полупроводниковую структуру с чередующимся типом электропроводности слоев и содержит два p - n -перехода. В зависимости от чередования слоев существуют транзисторы типов p - n - p и n - p - n (рис. 4.1, а, б). Их условное обозначение на электронных схемах показано на рис. 4.1, в, г. В качестве исходного материала для получения трехслойной структуры используют германий и кремний (германиевые и кремниевые транзисторы).

Трехслойная транзисторная структура создается по сплавной или диффузионной технологии, по которой выполняется и двухслойная p - n -структура полупроводниковых диодов. Трехслойная транзисторная структура типа p - n - p , выполненная по сплавной технологии, показана на рис. 4.1, д. Пластина полупроводника « n -типа» является основанием, базой (отсюда и название слоя) конструкции. Два наружных p -слоя создаются в результате диффузии в них акцепторной примеси при сплавлении с соответствующим материалом. Один из слоев называется эмиттерным, а другой — коллекторным. Так же называются и p - n -переходы, создаваемые этими слоями со слоем базы, а также внешние выводы от этих слоев.

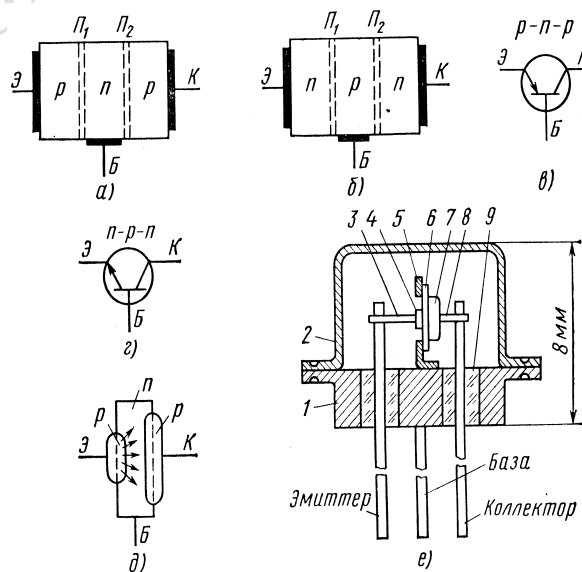


Рис. 4.1. Полупроводниковая структура транзисторов типов $p-n-p$ (а) и $n-p-n$ (б);

их условные обозначения в электронных схемах (в, г); сплавная транзисторная структура типа $p-n-p$ (д); пример конструктивного исполнения маломощного транзистора (е):

- 1 — донце корпуса; 2 — колба; 3 — внутренний вывод эмиттера; 4 — таблетка индия;
5 — кристаллодержатель; 6 — пластина германия n -типа; 7 — таблетка индия;
8 — внутренний вывод коллектора; 9 — стеклянный изолятор

Функция эмиттерного перехода — инжектирование (эмиттирование) носителей заряда в базу, функция коллекторного перехода — сбор носителей заряда, прошедших через базовый слой. Чтобы носители заряда, инжектируемые эмиттером и проходящие через базу, полнее собирались коллектором, площадь коллекторного перехода делают больше площади эмиттерного перехода. Пример конструктивного исполнения маломощного транзистора показан на рис. 4.1, е. В транзисторах типа $n-p-n$ функции всех трех слоев и их названия аналогичны, изменяется лишь тип носителей заряда, проходящих через базу: в приборах типа $p-n-p$ — это дырки, в приборах типа $n-p-n$ — электроны.

Принцип действия биполярного транзистора рассмотрим на примере структуры типа $p-n-p$ (рис. 4.2, а). Сначала покажем распределение концентрации носителей заряда в слоях транзисторной структуры и разности потенциалов, создаваемой объемными зарядами $p-n$ -переходов, в отсутствие внешних напряжений (рис. 4.2, б, в).

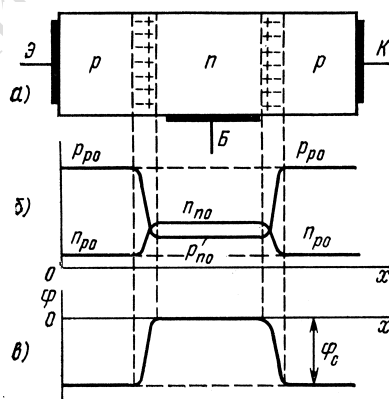


Рис. 4.2. Транзисторная структура типа $p-n-p$ (а),
распределение концентраций носителей заряда (б)
и внутренней разности потенциалов (в) в отсутствие внешних напряжений

Обозначение концентраций основных и неосновных носителей заряда здесь то же, что и для диода. Индекс «0» в обозначениях указывает на распределение концентраций в слоях в отсутствие внешних напряжений.

Соотношение концентраций основных носителей заряда в эмиттерном и коллекторном слоях транзистора несущественно, и на рис. 4.2, б они приняты одинаковыми. Отличие же в концентрациях основных носителей заряда эмиттерного и базового слоев весьма важно, так как оно влияет (что будет показано в дальнейшем) на параметры транзистора, в частности на коэффициент передачи тока α . Концентрация основных носителей заряда в базе должна быть много меньше концентрации основных носителей заряда в эмиттере, т.е. $p_{po} \gg n_{no}$. Таким образом, для транзистора базовый слой должен быть более высокоомным, чем эмиттерный. Это достигается за счет использования высокоомного исходного полупроводника n -типа. С учетом того, что для определенной температуры произведение p_n — величина постоянная, полная картина распределения концентраций в слоях транзистора будет иметь вид, показанный на рис. 4.2, б.

В отсутствие внешних напряжений на границах раздела трех слоев образуются объемные заряды, создается внутреннее электрическое поле и между слоями действует внутренняя разность потенциалов. Потенциальный барьер в каждом из переходов устанавливается такой величины, чтобы обеспечивалось равновесие диффузионного и дрейфового потоков носителей заряда, движущихся через переходы в противоположных направлениях, т.е. равенство нулю протекающего через них тока. Поскольку концентрации основных (и неосновных) носителей заряда в эмиттерном и коллекторном слоях приняты одинаковыми, потенциальные барьеры в обоих p - n -переходах будут равны. Если за нулевой уровень отсчета принять потенциал базы, то распределение разности потенциалов в транзисторе в отсутствие внешних напряжений будет иметь вид, показанный на рис. 4.2, в.

Внешние напряжения подключают к транзистору таким образом, чтобы обеспечивалось смещение эмиттерного перехода в прямом направлении, а коллекторного перехода — в обратном направлении. Это достигается с помощью двух источников напряжения $U_э$ и $U_к$ (рис. 4.3, а). Напряжение $U_э$ подключается положительным полюсом к эмиттеру относительно базы, напряжение $U_к$ — отрицательным полюсом к коллектору относительно базы (схема с общей базой).

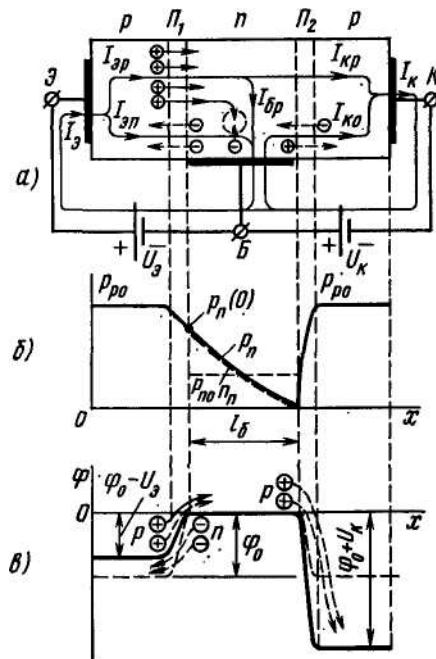


Рис. 4.3. Транзисторная структура типа $p-n-p$ (а),
распределение концентраций носителей заряда (б),
и внутренней разности потенциалов (в) при наличии внешних напряжений

Изучим процессы, протекающие в эмиттерном переходе, базовом слое и коллекторном переходе транзистора.

Поскольку в эмиттерном переходе внешнее напряжение U_3 действует в прямом направлении, потенциальный барьер для дырок — основных носителей зарядов эмиттерного слоя — уменьшается и дырки из эмиттера под действием диффузии будут в большем количестве переходить (инжектировать) в область базы (рис. 4.3, а, в). Аналогичным образом увеличится диффузионный поток электронов (основных носителей заряда области базы) в эмиттер. С учетом достаточно малой для смещенного в прямом направлении $p-n$ -перехода составляющей дрейфового тока, создаваемой неосновными носителями заряда областей, ток эмиттерного перехода и цепи эмиттера можно записать в виде

$$I_3 = I_{3p} + I_{3n}. \quad (4.1)$$

Дырочная составляющая тока I_{3p} создается потоком дырок, переходящих из эмиттера в базу. Большинство дырок в последующем достигает коллектора и вызывает коллекторный ток транзистора. Электронная составляющая тока I_{3n} обусловлена движением электронов из базы в эмиттер. Она замыкается по входной цепи через источник U_3 и не используется полезно (для создания тока в коллекторной цепи). Таким образом, функция эмиттерного перехода и процессы в эмиттерном переходе сводятся к инжекции носителей заряда (дырок) в базу.

Одним из важнейших показателей эмиттерного перехода является так называемый коэффициент инжекции γ , показывающий, какую часть от полного эмиттерного тока составляет его дырочная составляющая:

$$\gamma = I_{\text{эп}} / I_{\text{э}}. \quad (4.2)$$

С точки зрения качества эмиттерного перехода необходимо, чтобы электронная составляющая эмиттерного тока $I_{\text{эп}}$ была существенно меньше его дырочной составляющей $I_{\text{эр}}$. Это достигается значительным (на два-три порядка) превышением концентрации основных носителей заряда (дырок) в эмиттере над концентрацией основных носителей заряда (электронов) в базе ($p_{\text{р0}} \gg n_{\text{н0}}$). Как указывалось, задача решается применением высокоомного исходного полупроводника для создания базового слоя и введением большой концентрации акцепторной примеси для получения эмиттерного слоя. Для выпускаемых промышленностью транзисторов коэффициент инжекции $\gamma = 0,97 \div 0,995$.

Процессы в базовом слое определяются в основном поведением дырок, перешедших в базу через эмиттерный переход. Инжектируемые дырки, попадая в базовый слой, повышают концентрацию дырок в базе вблизи эмиттера по сравнению с равновесной концентрацией $p_{\text{н0}}$ (рис. 4.3, б). На границе с эмиттерным переходом создается концентрация дырок $p_{\text{н}}(0)$. Величину этой концентрации, зависящей от подведенного напряжения $U_{\text{э}}$, находят из соотношения, аналогичного для диода:

$$p_{\text{н}}(0) = p_{\text{н0}} e^{U_{\text{э}} / \Phi_{\text{Т}}}. \quad (4.3)$$

Под действием концентрации $p_{\text{н}}(0)$ развивается диффузионное движение дырок в базе в сторону коллектора, т.е. в направлении меньшей концентрации. Концентрация дырок в базе на границе с коллекторным переходом устанавливается близкой к нулю, так как дошедшие до коллекторного перехода под действием диффузии дырки ускоряются полем перехода и перебрасываются в коллектор. Установившееся при определенном напряжении $U_{\text{э}}$ (определенном токе эмиттера и соответствующей величине $p_{\text{н}}(0)$) распределение концентрации дырок в базе показано на рис. 4.3, б.

Ввиду относительно малой толщины базового слоя $l_{\text{б}}$ (соизмеримой с диффузионной длиной дырок $L_{\text{р}}$) закон распределения концентрации дырок в базе при диффузии $p_{\text{н}}(x)$ близок к линейному. Градиент концентрации дырок в базе определяет диффузионный ток дырок в ней в направлении коллекторного перехода.

Описанный характер движения дырок в базе возможен только тогда, когда количество находящихся в объеме базы дырок равно количеству электронов, а распределения их концентраций близки (объемный заряд

дырок скомпенсирован объемным зарядом электронов), т.е. при условии электрической нейтральности базы.

Электроны, компенсирующие объемный заряд дырок, поступают по цепи базы одновременно с дырками, входящими в слой базы сразу же после подключения напряжений U_3 и U_k . В установившемся режиме концентрации дырок p_n и электронов n_n близки. Распределение концентрации электронов на рис. 4.3, б показано пунктирной кривой.

Наличие дырок и электронов в базе приводит к тому, что в процессе диффузии некоторая часть дырок рекомбинирует с электронами (рис. 4.3, а). В результате актов рекомбинации количество дырок, дошедших до коллектора, не будет равно количеству дырок, поступивших из эмиттера, и, следовательно, дырочная составляющая коллекторного тока $I_{кр}$ будет меньше дырочной составляющей эмиттерного тока $I_{эр}$. Вследствие рекомбинации некоторого числа дырок с электронами в процессе их движения через базу концентрация дырок уменьшается, что приводит к уменьшению их градиента концентрации по оси x и некоторому отличию кривой $p_n(x)$ от линейного закона (рис. 4.3, б).

Вместе с тем акты рекомбинации дырок с электронами создают недостаток электронов, требующихся для компенсации дырок, постоянно входящих в базу из эмиттера. Необходимые электроны поступают по цепи базы, создавая базовый ток транзистора $I_{бр}$ (рис. 4.3, а). Следовательно, разность между дырочными составляющими эмиттерного и коллекторного токов представляет собой ток базы, обусловленный рекомбинацией в ней дырок. В соответствии с этим запишем соотношение для дырочных составляющих токов транзистора:

$$I_{эр} = I_{кр} + I_{бр}. \quad (4.4)$$

Для определения части дырок, прошедшей из эмиттера в коллектор, вводят коэффициент переноса дырок в базе δ , который равен отношению дырочной составляющей коллекторного тока к дырочной составляющей эмиттерного тока:

$$\delta = I_{кр} / I_{эр}. \quad (4.5)$$

Желательно, чтобы величина коэффициента δ как можно меньше отличалась от единицы. Способы приближения к единице коэффициента δ направлены на сокращение потерь дырок в базе за счет актов рекомбинации. Это достигается увеличением времени жизни дырок в базе и сокращением времени их нахождения в базе. Сокращение времени нахождения дырок в базе связано с уменьшением толщины базового слоя l_b и увеличением скорости их прохождения через базу. Последнее используется в так называемых дрейфовых транзисторах путем создания в слое базы ускоряющего поля. Типовые значения коэффициента δ для транзисторов лежат в пределах 0,96—0,996.

Изложенное позволяет уяснить и роль коллекторного p - n -перехода, предназначенного для перевода дырок, достигших этого перехода, в коллекторную область (рис. 4.3, в).

Коллекторный ток транзистора I_k , обусловленный дырочной составляющей I_{kp} (рис. 4.3, а), связан с током эмиттера $I_э$ коэффициентом передачи тока α :

$$\alpha = I_{kp} / I_э. \quad (4.6)$$

Умножив числитель и знаменатель равенства (4.6) на $I_{эp}$, получим

$$\alpha = (I_{эp} / I_э)(I_{kp} / I_{эp}) = \gamma\delta \quad (4.7)$$

Следовательно, коэффициент α тем ближе к 1, чем меньше отличаются от 1 коэффициенты γ и δ . Способы приближения к 1 коэффициента α связаны со способами увеличения коэффициентов γ и δ (увеличение разности концентраций основных носителей заряда в слоях эмиттера и базы, увеличение времени жизни дырок в базе, уменьшение ширины базового слоя, создание ускоряющего поля в слое базы).

Наличие коллекторного перехода, включенного в обратном направлении, приводит к появлению дополнительной неуправляемой составляющей тока коллектора, обусловленной протеканием обратного тока коллекторного перехода I_{k0} (рис. 4.3, а). Как известно, обратный ток создается дрейфом неосновных носителей заряда из близлежащих областей обратно включенного p - n -перехода, в данном случае концентрациями дырок p_{n0} в базе и электронов n_{p0} в коллекторе (см. рис. 4.2, б).

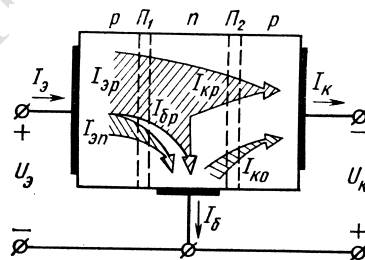


Рис. 4.4. Диаграмма составляющих токов в транзисторе

Поскольку концентрации неосновных носителей заряда зависят от температуры, величина обратного тока также зависит от нее, поэтому этот ток часто называют тепловым. От величины тока эмиттера ток I_{k0} не зависит. На рис. 4.4 дана наглядная картина протекания токов через транзистор в рассматриваемой схеме.

В соответствии с изложенным ток эмиттера $I_э$ равен сумме дырочной $I_{эp}$ и электронной $I_{эn}$ составляющих: $I_э = I_{эp} + I_{эn}$. Ток коллектора $I_к$ состоит из дырочной составляющей I_{kp} и теплового тока I_{k0} ($I_к = I_{kp} + I_{k0}$). Ток базы $I_б$ равен

алгебраической сумме электронной составляющей тока эмиттера $I_{эп}$, рекомбинационной дырочной составляющей $I_{бр}$ и теплового тока $I_{к0}$ ($I_{б} = I_{эп} + I_{бр} - I_{к0}$).

Управляющее свойство транзистора, характеризующее изменение выходного (коллекторного) тока $I_{к}$ под действием подводимого входного тока $I_{э}$ (или напряжения $U_{э}$), обуславливается изменением дырочной составляющей коллекторного тока $I_{кр}$ за счет изменения дырочной составляющей эмиттерного тока $I_{эр}$ (рис. 4.4). Таким образом, принцип действия биполярного транзистора основан на создании транзитного (проходящего) потока носителей заряда из эмиттера в коллектор через базу и управлении коллекторным (выходным) током за счет изменения эмиттерного (входного) тока. Следовательно, биполярный транзистор управляется током.

Основное соотношение для токов транзистора составляется по первому закону Кирхгофа:

$$I_{э} = I_{к} + I_{б}. \quad (4.8)$$

С учетом теплового тока $I_{к0}$ и соотношения (1.21) токи $I_{к}$ и $I_{б}$ можно выразить через $I_{э}$:

$$I_{к} = \alpha I_{э} + I_{к0}. \quad (4.9)$$

$$I_{б} = (1 - \alpha) I_{э} - I_{к0} \quad (4.10)$$