

Рис. 2.14. Зонные диаграммы, поясняющие вольт-амперную характеристику туннельного диода

чем в обратном направлении. Поэтому через диод потечет прямой туннельный ток, значение которого при $U_{\text{пр}} = 0,18$ В наибольшее (точка 1 на рис. 2.13). При дальнейшем повышении прямого напряжения туннельный ток уменьшается. При напряжении $U_{\text{пр}} = 0,4$ В туннельный ток равен примерно половине максимального значения (точка 2 на рис. 2.13). При напряжении примерно 0,6 В туннельный ток становится равным нулю, так как взаимное перекрытие зон в P - и N -областях прекращается и туннельный эффект невозможен (точка 3 на рис. 2.13). Но при этом потенциальный барьер понижается настолько, что становится заметным обычный ток диффузии, который быстро растет с повышением прямого напряжения. Зонная диаграмма, изображенная на рис. 2.14, б, соответствует $U_{\text{пр}} = 0,85$ В (точка 4 на рис. 2.13). При обратном напряжении взаимное перекрытие зон по сравнению с исходным равновесным состоянием возрастает и через диод потечет обратный туннельный ток, резко увеличивающийся при повышении обратного напряжения. Зонная диаграмма, соответствующая этому случаю, была приведена на рис. 1.28, б.

По назначению туннельные диоды делятся на усиительные, генераторные и переключающие. Поскольку возникновение туннельного тока не связано с инженерной носителем заряда, туннельные диоды имеют очень малую инерционность, обусловленную лишь небольшой емкостью. Благодаря этому их применяют для усиления и генерирования колебаний СВЧ.

На практике находят применение так называемые *обратенные* диоды, изготовленные из полупроводника с несколько меньшей концентрацией примеси, чем у туннельных (критической),

при которой туннельный эффект при прямом напряжении выражен слабо или совсем отсутствует, а при обратном напряжении проявляется, как у туннельных диодов. Примерная вольт-амперная характеристика обращенного диода показана на рис. 2.15. У обратенных диодов обратная ветвь характеристики используется в качестве прямой, а прямая в качестве обратной (отсюда и название таких диодов). Достоинством обращенных диодов является очень малое «прямое» напряжение. Благодаря этому они обладают более высокой чувствительностью, чем другие диоды при работе в качестве детектора. «Обратное» напряжение у обращенных диодов тоже невелико (0,3...0,5 В).

Основные параметры туннельных диодов

$I_{\text{п}}$ — пиковый ток, прямой ток в точке максимума вольт-амперной характеристики (точка 1 на рис. 2.13);
 $U_{\text{п}}$ — напряжение пика, прямое напряжение, соответствующее пиковому току;
 $I_{\text{в}}$ — ток впадины, прямой ток в точке минимума вольт-амперной характеристики (точка 3 на рис. 2.13);
 $U_{\text{в}}$ — напряжение впадины, прямое напряжение, соответствующее току впадины;

$U_{\text{пр}}$ — напряжение раствора, прямое напряжение, большее напряжения впадины, при котором ток равен пиковому;

$C_{\text{д}}$ — емкость; $L_{\text{д}}$ — индуктивность диода.

Пределные параметры:

$I_{\text{пр max}}$ — максимально допустимый постоянный прямой ток на второй восходящей ветви;
 $I_{\text{обр max}}$ — максимально допустимый постоянный обратный ток;
 $U_{\text{пр}}$ — максимальное постоянное прямое напряжение, приводимое в справочниках для усиительных и генераторных диодов. Исходным материалом для изготовления туннельных диодов служит арсенид галлия или германий.

Устройство туннельного диода показано на рис. 2.16, а, а внешний вид и размеры одного из вариантов конструктивного оформления — на рис. 2.16, б.

Рис. 2.15. Вольт-амперная характеристика обращенного диода

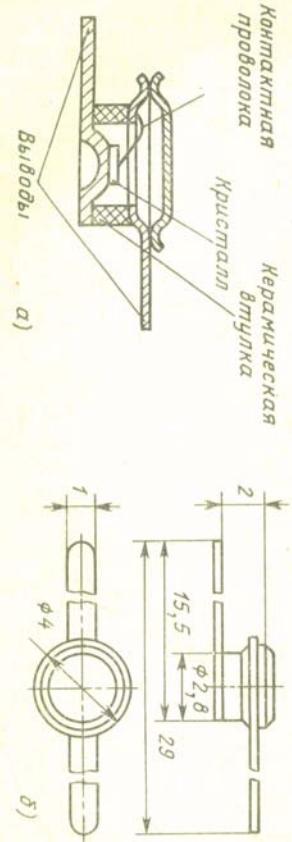


Рис. 2.16. Устройство (а) и конструктивное оформление (б) туннельного диода

Выводы. 1. Отличительной особенностью туннельных диодов является наличие на прямой ветви характеристики участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Благодаря этому туннельный диод может быть использован в качестве усиительного элемента. 2. В туннельных диодах туннельный эффект достигается за счет очень высокой концентрации примесей в P - и N -областиях. 3. Так как возникновение туннельного тока не связано с инжекцией носителей заряда, туннельные диоды имеют очень малую инерционность (за счет емкости) и поэтому могут применяться для усиления и генерирования колебаний СВЧ.

2.8. СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Согласно ГОСТ 10862—72 полупроводниковым диодам присваивается обозначение из четырех элементов:

первый элемент — буква или цифра, обозначающая исходный материал: Г или 1 — германий, К или 2 — кремний, А или 3 —

Таблица 2.1

| Классификация диодов по назначению | Обозначение | | |
|--|----------------|----------------------------|-------------------------|
| | Второй элемент | Первая цифра 3-го элемента | Графическое обозначение |
| Выпрямительные: Малой мощности прямой ток до 0,3 А средней мощности прямой ток 0,3...10 А Высокочастотные универсальные | Д | 1 2 4 5 | Ψ |
| Импульсные: Сверхвысокочастотные: смесительные демодекторные параметрические переключательные умножительные | A | 1 2 4 5 6 | |
| Стабилизаторы: мощностью не более 0,3 Вт с напряжением стабилизации: до 10 В 10...99 В 100...199 В | C | 1 2 3 | Ψ |
| Мощностью 0,3...5 Вт с напряжением стабилизации: до 10 В 10...99 В 100...199 В | B | 7 8 9 | Ψ |
| Барикапы | I | 1 2 3 4 | Ψ |

четвертый элемент — буква, указывающая разновидность прибора данного типа (для стабилитронов — очередность разработки).

В табл. 2.1 дана классификация диодов по назначению, их условные графические обозначения, а также указаны основные элементы буквенно-цифрового обозначения.

Для полупроводниковых диодов, разработанных до 1964 г., первый элемент — буква Д — диод, второй элемент — цифры, определяющие материал, из которого изготовлен диод, его назначение и порядковый номер разработки

точечные
германниевые
кремниевые

плоскостные
кремниевые

германниевые и кремниевые
смесительные

умножительные
видеодетекторы

параметрические
стабилизаторы
варикапы

третий элемент — буква, указывающая на разновидность данного типа прибора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему характеристика обратного тока выпрямительного диода, снятая при комнатной температуре, отличается от идеальной характеристики PN -перехода?

2. Почему выпрямительные диоды изготавливают, как правило, с кремниевым PN -переходом?

3. Что такое дифференциальное сопротивление диода? Как определяется соотвествие диода постоянному току?

4. Чем такое время восстановления обратного сопротивления диода?

5. В чем преимущество PIN -диодов и где они применяются?

6. Почему на СВЧ хорошо работают диоды Шотки?

арсенид галлия (цифровые обозначения имеют приборы, используемые в устройствах специального назначения);

второй элемент — буква, указывающая подкласс прибора; третий элемент — число, первая цифра которого указывает назначение прибора и его электрические свойства, а последующие две цифры (от 1 до 99) обозначают порядковый номер разработки (кроме стабилитронов, для которых обозначение — две цифры обозначают: при напряжении стабилизации менее 10 В — увеличенное в 10 раз напряжение стабилизации, например, КС147А — 4,7 В; при напряжении стабилизации 10...99 В — nominalное напряжение стабилизации, например КС213Б — 13 В; при напряжении стабилизации, например 2С950А — 150 В);

четвертый элемент — буква, указывающая разновидность прибора данного типа (для стабилитронов — очередность разработки).

В табл. 2.1 дана классификация диодов по назначению, их условные графические обозначения, а также указаны основные элементы буквенно-цифрового обозначения.

Для полупроводниковых диодов, разработанных до 1964 г., первый элемент — буква Д — диод,

второй элемент — цифры, определяющие материал, из которого изготовлен диод, его назначение и порядковый номер разработки

четвертый элемент — буква, указывающая разновидность прибора;

третий элемент — буква, указывающая на разновидность данного типа прибора.

7. В чём состоит конструктивное отличие СВЧ диодов?
8. Каким образом кремниевый стабилитрон стабилизирует напряжение?
9. Почему полупроводниковые стабилитроны изготавливают только на базе кремния?
10. Что такое стабистор?
11. Что такое варикап?
12. За счет чего в туннельном диоде получают туннельный эффект прином напряжении?

13. Изобразитевольт-амперную характеристику туннельного диода и покажите на ее прямой ветви участок, соответствующий туннельному эффекту?

14. За счет чего туннельный диод обладает усилительной способностью?

15. Что такое обращенный диод, какова его характеристика и в чём его достоинство?

16. Что означают обозначения: ГИЗ04Б, КС196А, ГД507А, 2А601А?

Глава 3. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. УСТРОЙСТВО

Биполярный транзистор является одним из основных элементов современных электронных устройств. Биполярные транзисторы широко применяются как в аппаратуре связи, так и в устройствах автоматики и вычислительной техники, а также в другой электронной аппаратуре.

Биполярный транзистор представляет собой полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими переходами и тремя или более выводами, усиительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. Слово «биполярный» означает, что работа транзистора зависит от носителей обеих полярностей: отрицательно заряженных свободных электронов и положительно заряженных дырок. Поскольку в данной главе рассматриваются только биполярные транзисторы, слово «биполярный» в дальнейшем для краткости изложениия опущено.

Наиболее просто транзистор можно изготовить с помощью сплавной технологии, при которой на противоположных плоскостях исходной (базовой) пластины из слабо легированного полупроводника, например, N -типа вплавлением создают P -области с несколькою различной концентрацией примеси. Одна область с большей концентрацией примеси служит эмиттером, а другая — коллектором (собирателем носителей заряда). Между ними находится тонкий слой базы. На границе раздела областей эмиттера и базы образуется эмиттерный, а на границе между областями коллектора и базы — коллекторный PN -переходы. Полученный таким образом транзистор представляет собой трехслойную структуру PNP . Если транзистор создается на базовой пластинке из P -полупроводника, то на ее поверхностях получают N -области и транзистор имеет структуру NPN .

При работе транзистора в усилительном режиме на эмиттерный переход подают прямое напряжение порядка десятых долей вольта, а на коллекторный переход — обратное напряжение порядка единиц или десятков вольт.

На рис. 3.1 показаны структурные схемы транзисторов PNP и NPN , их условные схемные обозначения и график распределения концентрации основных носителей заряда вдоль структуры транзистора, а на рис. 3.2 — разрез сплавного транзистора структуры PNP . Поскольку принцип действия транзисторов структуры PNP и NPN одинаков, в дальнейшем будут рассматриваться процессы, протекающие в транзисторе, и его свойства на примере транзистора структуры PNP .

Выходы. 1. Транзистор содержит эмиттерный и коллекторный переходы и может иметь структуру PNP и NPN . 2. В усилительном режиме на эмиттерный переход подают небольшое прямое напряжение, а на коллекторный переход — обратное.

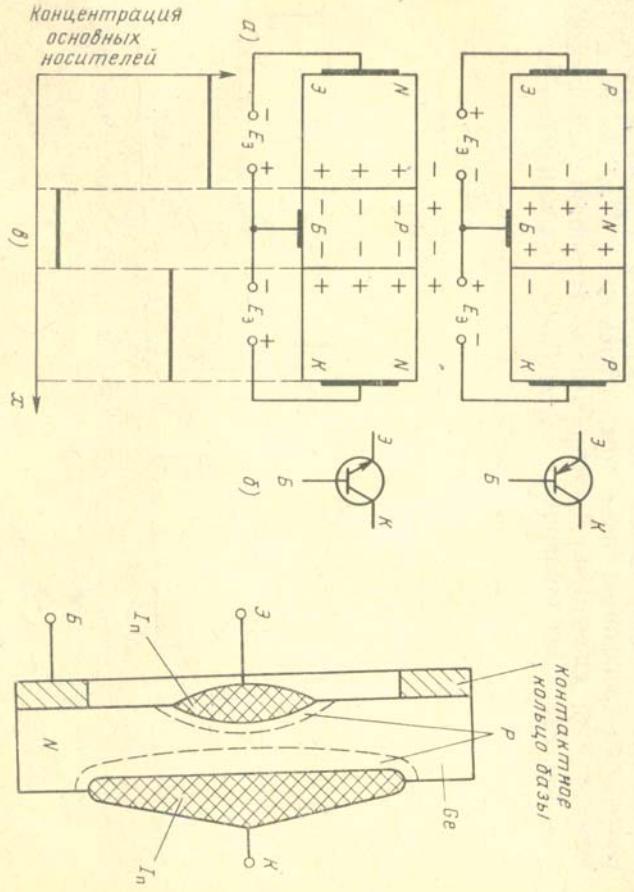


Рис. 3.1. Структурные схемы транзисторов PNP и NPN (а), их условные схемные обозначения (б) и график распределения концентраций основных носителей заряда вдоль структуры транзистора (в).



Рис. 3.2. Разрез сплавного германиевого транзистора типа PNP

3.2. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ТРАНЗИСТОРЕ. ТОКИ ТРАНЗИСТОРА

Рассмотрение процессов, протекающих в транзисторе, начнем со случая, когда подано напряжение только на коллекторный переход, а источник эмиттерного напряжения отключен с помощью клона K (рис. 3.3, а). В этом случае эмиттерный переход находится в равновесном состоянии ($I_{\text{диф}} = -I_{\text{др}}$), а в коллекторном переходе $I_{\text{диф}} = 0$ и поэтому через переход и в цепи коллектора будет протекать малый обратный ток I_{KBO} , равный дрейфовому (тепловому) току.

Рассмотрим второй случай: коллекторное напряжение равно нулю (коллектор соединен с базой), а на эмиттерный переход подано прямое напряжение (рис. 3.3, б). В данном случае потенциальный барьер в эмиттерном переходе понизится и через переход потечет значительный ток дифузии $I_{\text{диф}} = I_{\text{диф}P} + I_{\text{диф}N}$. Встречным дрейфовым током можно пренебречь, так как он много меньше тока дифузии неодинаковы: $I_{\text{диф}N} \ll I_{\text{диф}P}$, так как из-за низкой

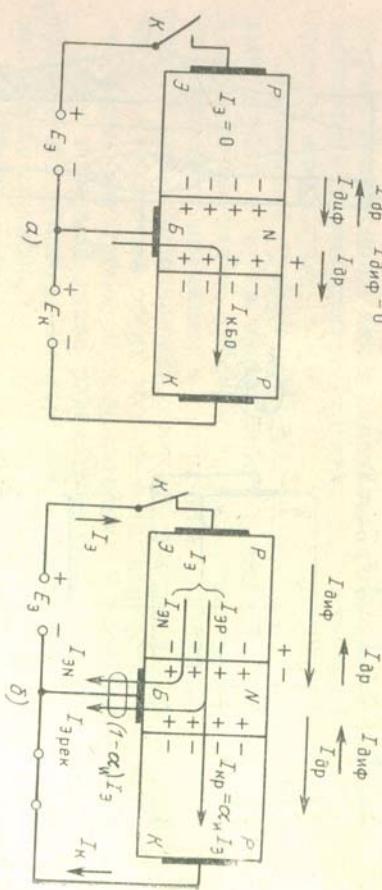


Рис. 3.3. Токи в транзисторе при подключении источника:
а — только эмиттерного и при соединении коллектора с базой; б — эмиттерного и коллекторного

концентрации основных носителей заряда в базе градиент концентрации свободных электронов в направлении базы — эмиттерного меньшее градиента концентрации дырок в направлении эмиттера — база.

Итак, ток эмиттера — это ток дифузии, состоящий из значительной дыроочной составляющей и малой электронной составляющей: $I_3 = I_{\text{ЭР}} + I_{\text{ЭН}}$. Из-за ухода свободных электронов из базы в эмиттер в результате дифузии база зарядится положительно. Это значит, что потенциал базы станет выше потенциала соединенного с ней проводника. Под действием этой разности потенциалов из соединительного проводника в базу будут поступать электроны. Таким образом, электронная составляющая $I_{\text{ЭН}}$ тока эмиттера замыкается через базовый вывод и поэтому является однотипной из составляющих тока базы. Электронная составляющая тока эмиттера в рассматриваемом транзисторе структуры PNP является бесполезной, так как она не участвует в создании управляющего тока коллектора. Чем меньше эта составляющая, тем выше эффективность эмиттера, оцениваемая коэффициентом инжекции

$$\gamma = I_{\text{ЭР}} / (I_{\text{ЭР}} + I_{\text{ЭН}}) = I_{\text{ЭР}} / I_3 \approx 1 - \rho_b / \rho_e. \quad (3.1)$$

Обычно ρ_b на 2—3 порядка больше ρ_e и значение γ близко к 1 ($\gamma = 0,998 \dots 0,999$). Дырки, перешедшие в результате дифузии из эмиттера в базу (инжекция), продолжают дифундировать в базе в сторону коллектора, поскольку их концентрация вблизи коллектора меньше, чем около эмиттера. Так как толщина базы очень мала (10 ... 25 мкм) и концентрация свободных электронов в ней низкая, то 95 ... 99% перешедших из эмиттера дырок успевают рекомбинировать в базе. Они достигают коллекторного перехода и как неосновные носители перебрасываются полем этого перехода в коллектор (экстракция), образуя управляемый ток коллектора $I_{\text{др}}$. Влияние рекомбинации дырок в базе на ток коллектора характеризуется коэффициентом передачи дырок через базу κ , равным отношению той части дыроочной составляющей тока эмиттера, которая дошла до коллекторного перехода, к дыроочной составляющей тока эмиттера, поступившей из эмиттера в базу $\kappa = I_{\text{др}} / I_{\text{ЭР}}$. Согласно теории транзисторов коэффициент передачи

$$\kappa = 1 / \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_{P\delta}} \right)^2 \right] \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_{P\delta}} \right)^2, \quad (3.2)$$

где W — толщина базы, $L_{P\delta}$ — диффузионная длина дырок в базе. Коэффициент передачи имеет значения, близкие к единице. Приведение коэффициентов инжекции и передачи называется *интегральными (статическим) коэффициентом передачи тока эмиттера*:

$$\alpha_n = \gamma \kappa = I_{\text{др}} / I_3.$$

Поскольку коэффициенты γ и κ меньше единицы, интегральный коэффициент передачи тока эмиттера также меньше единицы (0,95 ... 0,98). Дырки, успевшие рекомбинировать в базе, вносят в

нее положительный заряд. Для компенсации этого заряда в базу из соединительного проводника поступит соответствующее число электронов. Таким образом, примерно 2..5% дырочной составляющей $I_{\text{ЭР}}$ тока эмиттера замыкается через цепь базы, образуя вторую, рекомбинационную $I_{\text{Э рек}}$, составляющую тока базы.

Итак, при наличии прямого напряжения на эмиттере и коллекторном напряжении, равном нулю, в цепи коллектора протекает ток, почти равный току эмиттера:

$$I_{\text{КР}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{Б}} \approx I_{\text{Э}}.$$

Если теперь, оставив включенным эмиттерный источник, подать напряжение на коллектор (третий случай), то под действием коллекторного напряжения повысится потенциальный барьер в коллекторном переходе и ток диффузии в этом переходе станет равным нулю. В результате через коллекторный переход будет протекать еще малый обратный ток $I_{\text{КБ}}$ (рис. 3.3, б), как в первом случае. Таким образом, ток коллектора

$$I_{\text{К}} = \alpha_{\text{и}} I_{\text{Э}} + I_{\text{КБ}}. \quad (3.3)$$

Ток $I_{\text{КБ}}$ является третьей составляющей тока базы. Причем эта составляющая направлена навстречу составляющим $I_{\text{ЭН}}$ и $I_{\text{Э рек}}$, т. е. вычитается из них:

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{ЭН}} + I_{\text{Э рек}} - I_{\text{КБ}}. \quad (3.4)$$

Выходы. 1. Под действием прямого напряжения, приложенного к эмиттерному переходу, потенциальный барьер понижается и в базу дифундируют (инжектируются) дырки. 2. Инжектированные в базу дырки дифундируют в сторону коллекторного перехода. 3. Так как база очень тонкая и концентрация основных носителей заряда — свободных электронов — в ней низкая, почти все инжектированные в базу дырки достигают коллекторного перехода и перебрасываются полем этого перехода в коллектор, образуя управляемый ток коллектора. 4. Небольшая часть инжектированных дырок, успевшая рекомбинировать в базе, образует рекомбинационную составляющую тока эмиттера $I_{\text{Э рек}}$, замыкающуюся через цепь базы 5. Через цепь базы замыкаются также небольшая электронная составляющая тока эмиттера $I_{\text{ЭН}}$, образованная диффузией свободных электронов из базы в эмиттер, и обратный ток коллекторного перехода $I_{\text{КБ}}$. Последний направлен паверчено составляющим $I_{\text{ЭН}}$ и $I_{\text{Э рек}}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Объясните сущность процессов инжекции и экстракции неосновных носителей заряда в транзисторе.
- Что такое интегральный коэффициент передачи тока эмиттера?
- Как образуется ток базы?
- Почему обратный ток коллектора $I_{\text{КБ}}$ сильно возрастает при повышении температуры?

3.3 ТРИ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРА

СХЕМА С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

В рассматриваемой схеме включения транзистора относительное источников питания базовый вывод является общей точкой подключения эмиттерной цепи с источником эмиттерного напряжения и коллекторной цепи с коллекторным источником. Поэтому данную схему включения транзистора называют схемой с общей базой (ОБ). В практических схемах общую точку обычно заземляют. Поэтому данную схему включения транзистора иногда называют схемой с заземленной базой. Однако заземление общей точки не оказывает влияния на процессы, происходящие в транзисторе, и поэтому не является необходимым условием для его нормальной работы.

Различают статический режим транзистора, при котором на его электроды поданы только напряжения от источников питания, и динамический, при котором кроме этих напряжений на вход транзистора подается усиливаемый сигнал, а в цепь выходного электрода включено сопротивление нагрузки. В данной главе рассматривается статический режим транзистора и соответствующие этому режиму статические характеристики и параметры транзистора.

Статические характеристики транзистора представляют собой зависимость тока в цепи одного из электродов от изменяющегося питающего напряжения на этом электроде при неизменном питющем напряжении на другом электроде или токе в цепи последнего. На рис. 3.4 приведена схема для снятия статических характеристик с ОБ. Различают входные и выходные характеристики транзистора. Для схемы с ОБ входной является эмиттерная характеристика, представляющая собой зависимость тока эмиттера от напряжения эмиттер — база при неизменном напряжении на коллекторе:

$$I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭВ}}) \text{ при } U_{\text{КБ}} = \text{const} ;$$

выходной или коллекторной характеристикой — зависимость тока коллектора от напряжения коллектор — база при неизменном напряжении на эмиттере:

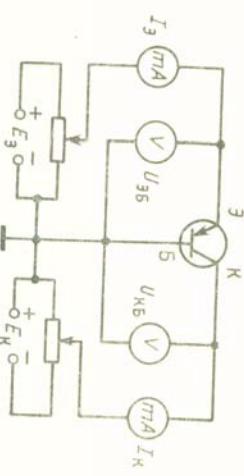


Рис. 3.4. Схема для снятия статических характеристик транзистора при включении с ОБ

ка коллектора от напряжения на коллекторе при неизменном токе эмиттера:

$$I_K = f(U_{KB}) \text{ при } I_E = \text{const.}$$

Несколько одноименных статических характеристик, сняты при различных значениях поддерживаемой постоянной третьей величины и построены в одной общей системе координат, называются *семейством статических характеристик*. На рис. 3.5 показаны семейства эмиттерных и коллекторных статических характеристик транзистора, включенного по схеме с ОБ. В справочниках обычно приводятся две входные статические характеристики: для коллекторного напряжения, равного нулю и минус 5 В. **Эмиттерная характеристика** при $U_{KB} = 0$ представляет собой вольт-амперную характеристику диода при прямом включении. При $|U_{KB}| > 0$ эмиттерная характеристика смещается влево. Это означает, что при $U_{EB} = \text{const}$ увеличение (по модулю) коллекторного напряжения вызывает увеличение тока эмиттера, причем значительное. Из приведенных на рис. 3.5, а эмиттерных характеристик видно, что при неизменном напряжении $U_{EB} = 0,25$ В прирост коллекторного напряжения в 5 В вызывает увеличение тока эмиттера с 8 до 14,5 мА, т. е. почти вдвое. Коллекторное напряжение влияет и на ток базы. Посмотрим, каким образом происходят эти влияния. Коллекторный переход находится под обратным напряжением.

Повышение обратного напряжения вызывает расширение коллекторного перехода. При этом последний приближается к эмиттерному переходу, в результате чего уменьшается рабочая толщина базы (от значения W и W' на рис. 3.6). Явление изменения рабочей толщины базы под действием изменяющегося коллекторного напряжения принято называть *модуляцией толщины базы*. Уменьшение рабочей толщины базы приводит, во-первых, к увеличению градиента концентрации инжектированных в базу дырок (штри-

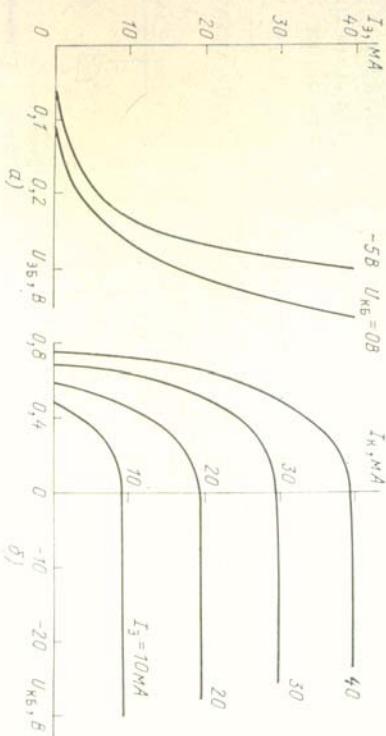


Рис. 3.5. Семейство входных (а) и выходных (б) статических характеристик транзистора при включении с ОБ

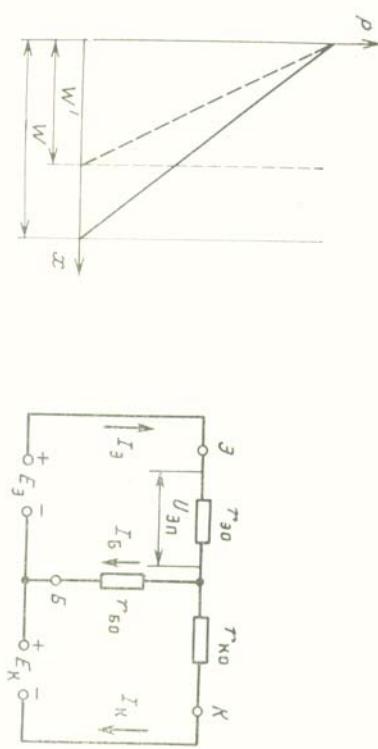


Рис. 3.6. График, иллюстрирующий увеличение градиента концентрации в базе при уменьшении ее толщины

ховая линия на рис. 3.6 идет круче), в результате чего увеличивается ток диффузии, т. е. ток эмиттера, а во-вторых, — к уменьшению рекомбинационной составляющей $I_{\text{Эrek}}$, так как уменьшение числа дырок, успевающих рекомбинировать в базе, происходит быстрее, чем увеличение тока эмиттера.

Поясним последнее числовым примером. Пусть при первоначальном значении U_{KB} из 1000 инжектированных в базу дырок до коллекторного перехода в среднем доходит 990 дырок, а 10 рекомбинируют в базе, создавая ток $I_{\text{Эrek}}$. Предположим, что повышение напряжения U_{KB} на 5 В вызывает увеличение тока диффузии вдвое, т. е. теперь за тот же промежуток времени в базу инжектируется не 1000, а 2000 дырок. Но из-за уменьшения толщины базы теперь из каждой 1000 дырок рекомбинируют, например, только 3 дырки, а из 2000 дырок — 6. Таким образом, рекомбинационная составляющая $I_{\text{Эrek}}$ уменьшается. Поскольку $I_{\text{Эrek}}$ является основной составляющей тока базы, последний при этом также уменьшится.

При подаче на коллектор напряжения $|U_{KB}| > 0$ появляется обратный ток коллектора I_{KB0} , который тоже уменьшает ток базы. Уменьшение тока базы вызывает дополнительный прирост тока эмиттера, так как уменьшается падение напряжений на объемном сопротивлении базы r_{b0} , и поэтому возрастает прямое напряжение, приложенное непосредственно к эмиттерному переходу:

$$U_{\text{в-п}} = E_3 - I_b r_{b0}.$$

На рис. 3.7 приведена эквивалентная схема сопротивлений транзистора для постоянного тока, поясняющая сказанное. В этой схеме r_{b0} и r_{k0} — сопротивления эмиттерного и коллекторного переходов постоянному току, r_{b0} — объемное сопротивление базы в направлении, перпендикулярном потоку дырок.

Из характеристик, приведенных на рис. 3.5, а, видно, что малые изменения эмиттерного напряжения вызывают значительные

изменения тока эмиттера, а значит, и тока коллектора. Для объяснения этого явления рассмотрим эквивалентную схему транзистора для постоянного тока при включении с ОБ (рис. 3.7). Транзистор включен по схеме с общим истоком (эмиттером). Источник эмиттерного напряжения E_3 подключен между эмиттером и базой. Источник коллекторного напряжения E_K подключен между коллектором и базой. Источник базового напряжения E_B подключен между базой и землей. Транзистор включен по схеме с общим истоком (эмиттером). Ток эмиттера I_3 проходит через сопротивление r_{b0} и выходит из базы в коллекторную область. Ток коллектора I_K проходит через сопротивление r_{k0} и возвращается в эмиттерную область. Ток базы I_B проходит через сопротивление r_{b0} и выходит из базы в эмиттерную область. Ток эмиттера I_3 проходит через сопротивление r_{b0} и выходит из базы в коллекторную область. Ток коллектора I_K проходит через сопротивление r_{k0} и возвращается в эмиттерную область. Ток базы I_B проходит через сопротивление r_{b0} и выходит из базы в эмиттерную область.

Приросты тока эмиттера. Это говорит о том, что транзистор, включенный по схеме с ОБ, имеет малое входное дифференциальное сопротивление

$$R_{\text{вх},6} = dU_{\text{ЭБ}}/dI_9 \approx \Delta U_{\text{ЭБ}}/\Delta I_9 \text{ при } U_{\text{КВ}} = \text{const.}$$

Для транзисторов малой мощности это сопротивление в зависимости от точки, в которой оно определяется, составляет единицы — десятки ом.

В семействе коллекторных характеристик, изображенных на рис. 3.5, б, нет характеристики, соответствующей $I_9 = 0$. При $I_9 = 0$ в базу из эмиттера не поступают дырки и в цепи коллектора протекает только обратный ток $I_{\text{КБ}}$, который при комнатной температуре даже у германевых транзисторов настолько мал, что в одном масштабе с характеристиками для $I_9 > 0$ изобразить характеристику для $I_9 = 0$ невозможно, так как она сольется с горизонтальной осью. Коллекторные характеристики идут почти параллельно горизонтальной оси, т. е. ток коллектора почти не зависит от коллекторного напряжения. Объясняется это тем, что при $I_9 = \text{const}$ прирост тока коллектора при увеличении коллекторного напряжения происходит лишь за счет уменьшения рекомбинационного тока $I_{\text{ЭРек}}$, который очень мал. Слабая зависимость тока коллектора от коллекторного напряжения свидетельствует об очень высоком выходном сопротивлении транзистора с общей базой

$$R_{\text{вых},6} = dU_{\text{КВ}}/dI_k \approx \Delta U_{\text{КВ}}/\Delta I_k \text{ при } I_9 = \text{const.}$$

Для транзисторов малой мощности $R_{\text{вых},6}$ имеет порядок сотен тысяч ом, а у некоторых типов транзисторов может даже превышать 1 МОм.

Транзистор, включенный по схеме с ОБ, характеризуется также дифференциальным коэффициентом передачи тока эмиттера

$$\alpha = dI_k/dI_9 \approx \Delta I_k/\Delta I_9 \text{ при } U_{\text{КВ}} = \text{const.}$$

Поскольку всегда $\Delta I_k < \Delta I_9$, а $\alpha < 1$ ($\alpha = 0.96 \dots 0.99$), т. е. транзистор, включенный по схеме с ОБ, не дает усиления по току. Но в то же время он обладает способностью усиления по напряжению и мощности. Это может быть объяснено следующим образом. Входное сопротивление транзистора мало. Поэтому с помощью малого прироста входного напряжения $\Delta U_{\text{ЭБ}}$ можно получить значительный прирост входного тока ΔI_9 . Этот прирост тока почти полностью передается в коллекторную цепь: $\Delta I_k \approx \Delta I_9$. Благодаря тому, что выходное сопротивление транзистора велико и напряжение коллекторного источника $E_k \gg E_9$, в коллекторную цепь можно включить нагрузочное сопротивление R_k , во много раз превышающее входное сопротивление транзистора, от этого прирост коллекторного тока практически не уменьшится. Прирост коллекторного тока ΔI_k создаст прирост падения напряжения на нагрузочном резисторе примерно в столько раз больший, чем прирост входного напряжения, во сколько раз $R_k > R_{\text{вх},6}$. При

этом возникает такой же по величине, но с обратным знаком прирост падения напряжения на коллекторе $\Delta U_{\text{КВ}} = -\Delta I_k R_k$. Коэффициент усиления по напряжению определяется отношением

$$K_{\text{об}} = \Delta U_{\text{КВ}}/\Delta U_{\text{ЭБ}} = |\Delta I_k R_k|/\Delta I_9 R_{\text{вх},6} \approx R_k/R_{\text{вх},6}.$$

Таким образом, транзистор дает возможность перейти от цепи с малым сопротивлением к цепи с большим сопротивлением, но практически с тем же приростом тока, т. е. транзистор как бы преобразует сопротивление цепи. Отсюда и его название, состоящее из начала слова transfer (преобразователь) и окончания слова resistor (сопротивление). Наличие усиления по напряжению при $\Delta I_k \approx \Delta I_9$ означает, что транзистор вносит также усиление по мощности.

На рис. 3.8 показана простейшая схема усилителя на транзисторе с ОБ.

Выходы. 1. В схеме с ОБ входная (эмиттерная) характеристика представляет собой характеристику PN-перехода при прямом включении. 2. Дифференциальное входное сопротивление транзистора в схеме с ОБ мало (единицы — десятки ом), так как малые изменения напряжения на эмиттере вызывают значительные приросты тока эмиттера. 3. В схеме с ОБ коллекторное напряжение существенно влияет на ток эмиттера. Причем с увеличением (по абсолютному значению) коллекторного напряжения ток эмиттера увеличивается (эмиттерная характеристика сдвигается влево). 4. У транзистора с ОБ ток коллектора очень слабо зависит от коллекторного напряжения. Это означает, что выходное сопротивление транзистора с ОБ очень велико (может превышать 1 МОм). 5. Дифференциальный коэффициент передачи тока эмиттера $\alpha < 1$. Это говорит о том, что транзистор в схеме с ОБ не дает усиления по току. 6. Транзистор, включенный по схеме с ОБ, вносит усиление по напряжению и по мощности.

СХЕМА С ОБЩИМ ЭМИТЕРОМ

Рассмотренная схема включения транзистора с ОБ имеет ряд недостатков, наиболее существенный из которых состоит в том, что схема с ОБ не дает усиления по току. Кроме того, из-за малого входного сопротивления транзистор с общей базой потреб-

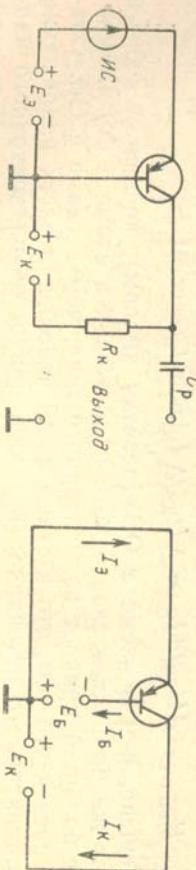


Рис. 3.8. Схема простейшего усилителя на транзисторе с ОБ

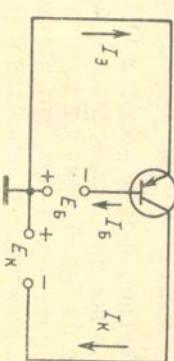


Рис. 3.9. Схема с общим эмите-

ляет относительно большой ток от источника сигнала. Чрезмерно большое выходное сопротивление транзистора в схеме с ОБ также в большинстве случаев является нежелательным, так как затрудняет согласование с нагрузкой. Указанные недостатки устраняются, если источник эмиттерного напряжения (а в рабочем режиме и источник сигнала) включить не в эмиттерный, а в базовый провод (рис. 3.9). В этом случае общей точкой подключения входной и выходной цепей транзистора является вывод эмиттера. Поэтому данную схему включения транзистора называют схемой с общим эмиттером (ОЭ). При таком включении транзистора воздействие приростов напряжения источника E_B на эмиттерный переход (а значит, и на ток эмиттера) остается по существу тем же, что и в схеме с ОБ, поскольку они также приложены между выводами эмиттера и базы. Но теперь источник включен в участок входной цепи с малым током базы. Последний в данном случае является входным током и поэтому усиительное свойство транзистора в схеме с ОЭ характеризуется дифференциальным коэффициентом передачи тока базы:

$$\beta = dI_K/dI_B \approx \Delta I_K/\Delta I_B \text{ при } U_{K\alpha} = \text{const.}$$

Но $\Delta I_B = \Delta I_\beta - \Delta I_K$. В свою очередь, $\Delta I_K = \alpha \Delta I_\beta$, откуда $\Delta I_\beta = \Delta I_K/\alpha$. Поэтому $\Delta I_B = \Delta I_K/\alpha - \Delta I_K = \Delta I_K(1-\alpha)/\alpha$. Подставив значение ΔI_B в выражение для β , получим $\beta = \alpha/(1-\alpha)$. При $\alpha = 0,98$ $\beta = 0,98/(1-0,98) = 49$; при $\alpha = 0,99$ $\beta = 0,99/(1-0,99) = 99$. Таким образом, транзистор, включенный по схеме с ОЭ, усиливает приращения тока базы (амплитуду тока сигнала) в десятки раз. Усиление по напряжению в данной схеме остается примерно таким же, как и в схеме с ОБ, т. е. тоже порядка десятков. Поэтому коэффициент усиления по мощности в схеме с ОЭ

$$K_{po} = K_{uo} K_{ia} = 10^3 - 10^4.$$

Дифференциальное входное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ

$$R_{vх,э} = dU_{B\beta}/dI_B \approx \Delta U_{B\beta}/I_B \text{ при } I_{K\alpha} = \text{const.}$$

значительно больше, чем в схеме с ОБ (сотни ом), так как при одном и том же приросте напряжения на эмиттерном переходе прирост тока базы много меньше прироста тока эмиттера.

Выходное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ

$$R_{вых,э} = dU_{K\beta}/dI_K \approx \Delta U_{K\beta}/\Delta I_K \text{ при } I_B = \text{const.}$$

меньше, чем в схеме с ОБ (десятки килоом), поскольку один и тот же прирост коллекторного напряжения в схеме с ОЭ вызывает больший прирост коллекторного тока, чем в схеме с ОБ. Объясняется это тем, что в схеме с ОЭ небольшая часть напряжения коллекторного источника (а также приростов коллекторного напряжения) прикладывается к эмиттерному переходу (плюс к эmitterу непосредственно, а минус через коллектор и коллекторный переход к базе). При этом, например, повышение $U_{K\beta}$ на $\Delta U_{K\beta}$

вызывает дополнительное понижение потенциального барьера в эмиттерном переходе, что приводит к увеличению токов эмиттера и коллектора. Кроме того, повышение $U_{K\beta}$ приводит к увеличению и $U_{K\alpha}$, а от этого расширяется коллекторный переход, что, в свою очередь, приводит к уменьшению тока базы. Но $R_{вых,э}$ определяется при условии $I_B = \text{const}$. Поэтому для восстановления прежнего значения I_B приходится несколько повысить напряжение $U_{B\beta}$, а от этого возрастают токи I_β и I_K .

Схема для снятия статических характеристик транзистора с ОЭ приведена на рис. 3.10, а на рис. 3.11 — семейства входных и выходных статических характеристик для схемы с ОЭ.

Входная статическая характеристика для схемы с ОЭ представляет собой зависимость тока базы от напряжения на базе при неизменном напряжении на коллекторе:

$$I_B = f(U_{B\beta}) \text{ при } U_{K\alpha} = \text{const.}$$

Рассматривая зависимость тока базы от напряжения на базе, следует иметь в виду, что последнее воздействует на ток базы

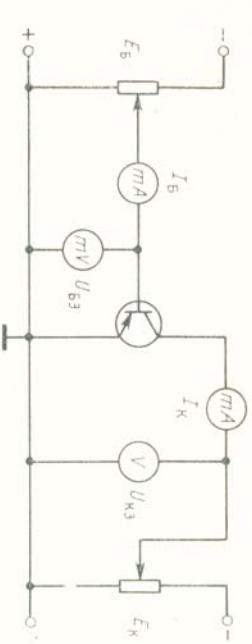


Рис. 3.10. Схема для снятия статических характеристик транзистора при включении с ОЭ

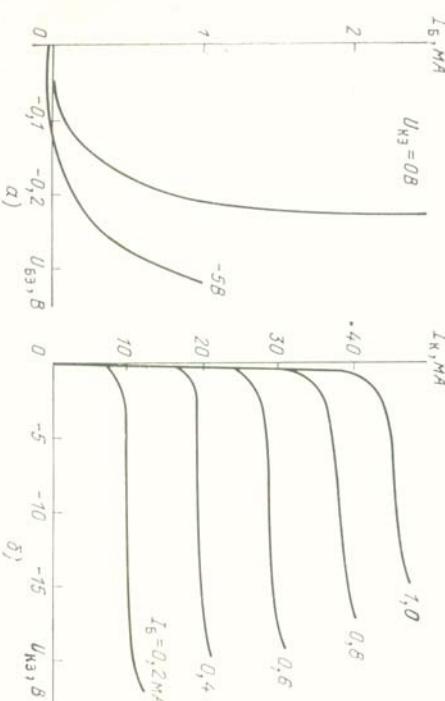


Рис. 3.11. Семейство входных (a) и выходных (b) статических характеристик транзистора при включении с ОЭ

не непосредственно, а, как и в схеме с ОБ, через ток эмиттера. Так, например, увеличение напряжения $U_{\text{б}}$ вызовет увеличение тока эмиттера. При этом за счет роста составляющих $I_{\text{ЭН}}$ и $I_{\text{Эрек}}$ увеличится и ток базы.

Сравнивая входные статические характеристики транзистора в схеме с ОЭ с одноименными характеристиками для схемы с ОБ, можно заметить некоторые различия между ними. Во-первых, в схеме с ОЭ коллекторное напряжение не увеличивает входной ток базы все же уменьшается, но очень мало. Поэтому статические базовые характеристики, снятые при различных значениях $|U_{\text{КЭ}}| > |E_{\text{б}}|$, почти сливаются.

Наличие отрицательного начального участка У характеристики тока базы можно объяснить следующим образом. При малых значениях напряжения на базе (на эмиттерном переходе) суммарный ток, образованный составляющими тока базы $I_{\text{ЭН}}$ и $I_{\text{Эрек}}$, оказывается меньше встречной составляющей — тока $I_{\text{КБ}}$. Поэтому результатирующий ток базы совпадает с направлением тока $I_{\text{КБ}}$, т. е. втекает в базу. Входная характеристика пересекает горизонтальную ось в точке, для которой выполняется равенство

$$I_{\text{ЭН}} + I_{\text{Эрек}} = -I_{\text{КБ}}$$

Выходная или коллекторная статическая характеристика транзистора, включенного по схеме с ОЭ (см. рис. 3.11, б), представляет собой график зависимости тока коллектора от напряжения на коллекторе при неизменном токе базы:

$$I_{\text{К}} = f(U_{\text{КЭ}}) \text{ при } I_{\text{б}} = \text{const.}$$

Поскольку при $U_{\text{КЭ}} = 0$ ток коллектора представляет собой диффузионный ток, протекающий в обратном направлении, статические коллекторные характеристики начинаются не с нуля, а с некоторого отрицательного значения тока. При $U_{\text{КЭ}} = 0,15..0,2$ В, когда коллекторное напряжение компенсирует напряжение $E_{\text{б}}$ и коллекторный переход оказывается под обратным напряжением, ток коллектора меняет свое направление на обычное, т. е. становится положительным. Однако в принятом для $U_{\text{КЭ}}$ масштабе отложить напряжение 0,15..0,2 В практически трудно и к тому же это не имеет существенного значения, поскольку напряжение на коллекторе обычно не уменьшается до величины напряжения на базе. Поэтому коллекторные характеристики транзистора с ОЭ изображают исходящими из начала координат.

Коллекторные характеристики в схеме с ОЭ имеют заметно больший угол наклона к горизонтальной оси, чем в схеме с ОБ. Это говорит о меньшем сопротивлении транзистора по сравнению со схемой ОБ, о чем было сказано выше.

Простейшая схема усилителя на транзисторе с ОЭ приведена на рис. 3.13.

Выходы. 1. В отличие от схемы с ОБ схема с ОЭ наряду с усиливанием по напряжению дает также усиление по току. Поэтому усиление по мощности в схеме с ОЭ значительно больше, чем в схеме с ОБ. 2. Транзистор, включенный по схеме с ОЭ, имеет более приемлемые значения входного и выходного сопротивлений (входное больше, а выходное меньше), чем в схеме с ОБ. 3. Благодаря указанным преимуществам схема с ОЭ находит наибольшее применение на практике.

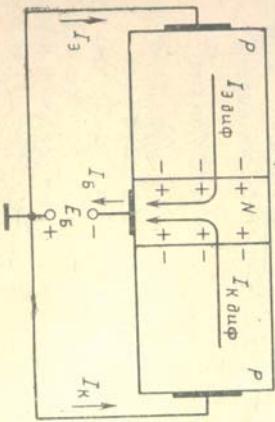


Рис. 3.12. Цепи прохождения токов в транзисторе с ОЭ при коллекторном напряжении, равном нулю

СХЕМА С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

В отличие от схемы с ОЭ в схеме с общим коллектором (ОК) нагрузочный резистор включают не в цепь коллектора, а в цепь эмиттера, а с указанного нагрузочного резистора в цепи эмиттера транзистора, а с выходное напряжение снимают не с коллектора транзистора, а с указанного нагрузочного резистора в цепи эмиттера (рис. 3.14). Особенность данной схемы состоит в том, что входное напряжение сигнала действуют в одной цепи база — эмиттер. Причем приросты напряжения, создаваемые источником сигнала, вызывают близкие по значению приросты падения напряжения на нагрузочном резисторе R_9 , но противоположной полярности. Поэтому непосредственно между базой и эмиттером будет приложена разность указанных приростов напряжения, которая во много раз меньше прироста напряжения источника сигнала, поступающего на базу транзистора в отсутствие R_9 , т. е. в схеме с ОЭ. Соответственно будут меньшими и приросты токов в транзисторе, в частности тока базы. Последним объясняется то, что схема с ОК имеет наибольшее из всех схем включения транзистора дифференциальное входное сопротивление

$$R_{\text{вых}} = dU_{\text{бк}}/dI_B \approx \Delta U_{\text{бк}}/\Delta I_B \text{ при } U_K = \text{const.}$$

($R_{\text{вых}}$ может составлять десятки килоом). Выходное сопротивление схемы с ОК наименьшее из всех схем включения транзистора (десятки — сотни ом). Очевидно, что в данной схеме прирост падения напряжения на R_9 , т. е. $U_{\text{вых}}$ всегда меньше $U_{\text{бк}}$. Это означает, что схема с ОК не дает усиления по напряжению. В то же время схема с ОК дает усиление по току и мощности.

Статические характеристики транзистора снимаются при отсутствии нагрузочного резистора ($R_k = R_9 = 0$). Но в этом случае схема с ОК превращается в схему с ОЭ. Поэтому статические характеристики для схемы с ОК те же, что и для схемы с ОЭ.

Выходы. 1. Схема с ОК вносит усиление по току и мощности, но не дает усиления по напряжению. 2. Схема с ОК имеет наибольшее из всех схем включения транзистора входное и наименьшее выходное сопротивления.

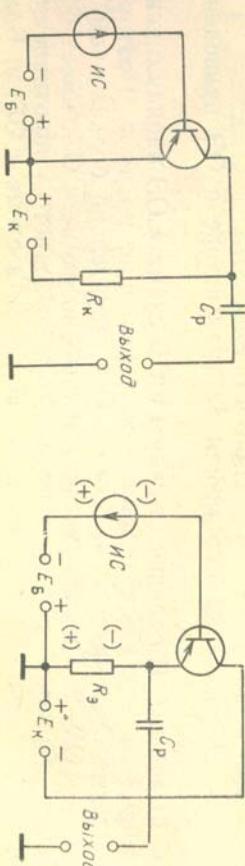


Рис. 3.13. Схема простейшего усилителя на транзисторе с ОЭ

Рис. 3.14. Схема с общим коллектором

1. Почему в схеме с ОБ ток коллектора почти не зависит от напряжения на коллекторе и остается почти равным току эмиттера даже при напряжении на коллекторе равном нулю?

2. Каков механизм влияния коллекторного напряжения на эмиттерную характеристику?

3. Какие недостатки имеет схема с ОБ?

4. Изобразите структурную схему с ОЭ и объясните, в чем состоит отличие ее от схемы с ОБ.

5. Почему схема с ОЭ не имеет недостатков, присущих схеме с ОБ? Что такое дифференциальный коэффициент передачи тока базы?

6. Каким образом в схеме с ОЭ напряжение на коллекторе влияет на входную характеристику?

7. Изобразите схему с ОК. Как отличаются основные показатели схемы с ОК от показателей схем с ОБ и ОЭ? Чем объясняется это отличие?

НА СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА

Изменения температуры окружающей среды влияют на температуру PN -переходов транзистора. Это приводит к изменению токов транзистора (так как изменяется число носителей заряда в P - и N -областях) и, следовательно, влияет на статические характеристики транзистора. Так, при изменении температуры окружающей среды от t_h до t эмиттерная характеристика сдвигается примерно на

$$\Delta U_{\text{бк}} = 0,002 (t_h - t) \text{ В},$$

где t_h — температура, при которой снималась приводимая в справочнике характеристика (обычно $+20$ или $+25^\circ\text{C}$). Из рис. 3.15 видно, что при температуре $+20^\circ\text{C}$ и напряжении на эмиттере $U_{\text{эбо}} = 0,2$ В ток эмиттера $I_{\text{эо}} = 5$ мА. При повышении температуры до $+70^\circ\text{C}$ ток эмиттера возрастает до $I'_{\text{эо}} = 40$ мА. Прежнему значению тока $I_{\text{эо}} = 5$ мА теперь соответствует напряжение на эмиттере, равное 0,1 В. Таким образом, эмиттерная характеристика получила сдвиг $\Delta U_{\text{бк}} = 0,002(20 - 70) = -0,1$ В.

Столь большое увеличение прямого тока через PN -переход можно объяснить следующим образом. Значительное повышение температуры вызывает усиленную ионизацию атомов полупроводника, в результате чего резко возрастает число носителей заряда в каждой из областей PN -перехода. В частности, в P -области возрастает число свободных электронов, и они переходят в N -область, где компенсируют положительные заряды атомов акцепторной примеси. В результате резко снижается потенциальный барьер и возрастает прямой ток через PN -переход.

Изменения температуры оказывают влияние и на коллекторные характеристики. Причиной этого влияния являются температурные изменения обратного тока коллектора $I_{\text{кбо}}$, являющегося,



Рис. 3.15. Влияние температуры окружающей среды на эмиттерные характеристики транзистора

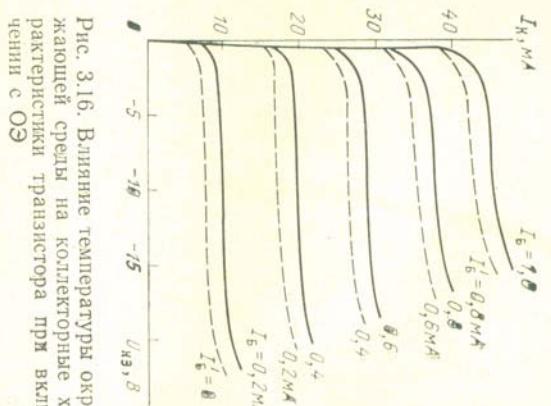


Рис. 3.16. Влияние температуры окружающей среды на коллекторные характеристики транзистора при включении с ОЭ

как известно, составной частью и тока коллектора (3.3), и тока базы (3.4). При комнатной температуре ток $I_{\text{КБо}}$ у маломощных германьевых транзисторов составляет 3...5 мА, а у кремниевых 0,1...0,5 мА. Ток $I_{\text{КБо}}$ у германьевых транзисторов примерно удваивается на каждые 10°С приращения температуры. При повышении температуры на 50°С (от +20 до +70°С) ток $I_{\text{КБо}}$ германевого транзистора возрастет в 2⁵=32 раза и составит 5×32=160 мА=0,16 мА. Степень влияния температурных изменений тока $I_{\text{КБо}}$ на коллекторные характеристики в схемах с ОБ и с ОЭ различна. В схеме с ОБ коллекторные характеристики снимаются при фиксированых значениях тока эмиттера, которые не зависят от тока базы и его составляющей $I_{\text{КБо}}$. Поэтому влияние температурных изменений тока $I_{\text{КБо}}$ на коллекторные характеристики в схеме с ОБ проявляется лишь в том, что согласно (3.3) к управляемому току коллектора добавляется ток $I_{\text{КБо}}$. В нашем примере температурный прирост тока $I_{\text{КБо}}$ составляет $\Delta I_{\text{КБо}} = 160 - 5 = 155$ мА=0,155 мА. Поскольку ток коллектора у транзисторов малой мощности имеет порядок единиц и десятков миллиампер, относительное изменение его за счет температурного прироста тока $I_{\text{КБо}}$ получается настолько незначительным, что им в большинстве случаев можно пренебречь. Посмотрим теперь, как этот же температурный прирост тока $I_{\text{КБо}}$ повлияет на коллекторные характеристики в схеме с ОЭ. При температуре +20°С ток $I_{\text{КБо}}$ равен 5 мА. В схеме с ОЭ начальная коллекторная характеристика снимается при $I_{\text{Б}} = 0$. Для выполнения этого условия с помощью напряжения $U_{\text{ВЭ}}$ должны быть установлены со-

тавляющие $I_{\text{ЭН}}$ и $I_{\text{ЭРек}}$ такими, чтобы их сумма стала равной по величине току $I_{\text{КБо}}$, т. е. тоже 5 мА; $I_{\text{ЭН}} + I_{\text{ЭРек}} = (1-a)I_{\text{Э}} = I_{\text{КБо}} = 5$ мА.

Откуда

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{КБо}} / (1-a) = 5 / (1-0,98) = 250 \text{ мА} = 0,25 \text{ мА.}$$

При $I_{\text{Б}} = 0$ ток коллектора равен току эмиттера: $I_{\text{К}} = I_{\text{Э}} = 0,25 \text{ мА} = 0$ получается малым. Поэтому данную характеристику в семействе коллекторных характеристик не показывают. При повышении температуры до +70°С обратный ток коллектора возрастает до $I'_{\text{КБо}} = 0,16 \text{ мА}$ и при $I_{\text{Б}} = 0$

$$I_{\text{К}} = I_{\text{Э}} = I_{\text{КБо}} / (1-a) = 0,16 / (1-0,98) = 8 \text{ мА.}$$

Таким образом, все коллекторные характеристики семейства смесиятся вверх на 8 мА (рис. 3.16), т. е. влияние температуры на коллекторные характеристики в схеме с ОЭ достаточно большое. Как следует из приведенных выше данных, у кремниевых транзисторов значение тока $I_{\text{КБо}}$ при +20°С примерно на порядок меньше, чем у германьевых. Но это не значит, что в такой же мере у них меньше и влияние температуры на коллекторные характеристики в схеме с ОЭ. У кремниевых транзисторов ток $I_{\text{КБо}}$ с повышением температуры растет быстрее, чем у германьевых: увеличивается примерно втройне на каждые 10°С приращения температуры. При повышении температуры на 50°С ток $I_{\text{КБо}}$ у кремниевого транзистора возрастет в 3⁵=243 раза и составит 0,5×243=122 мА=0,122 мА. При этом токе $I_{\text{КБо}}$ и принятом в рассмотренном примере значении $a=0,98$ условию $I_{\text{Б}}=0$ будет соответствовать ток коллектора $I'_{\text{К}}=0,122/(1-0,98)=6$ мА; т. е. влияние температуры на коллекторные характеристики в схеме с ОЭ у кремниевых транзисторов не намного меньше, чем у германьевых.

В транзисторных усилителях и других устройствах применяются меры по температурной стабилизации режима работы транзисторов, о чем будет сказано в гл. 14.

Выводы. 1. Изменения температуры окружающей среды влияют на статические характеристики транзистора: на входные — за счет изменения количества носителей заряда в P - и N -областиах, на выходные — из-за изменения величины обратного тока коллектора. 2. Эмиттерная характеристика сдвигается примерно на 2 мВ на 1°С. Соответствующий сдвиг получает и базовая характеристика. 3. Коллекторные характеристики в схеме с ОЭ намного сильнее подвержены температурному влиянию, чем в схеме с ОБ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как влияют изменения температуры окружающей среды на эмиттерную характеристику транзистора?

2. Почему температурные изменения почти не влияют на коллекторные характеристики транзистора при включении по схеме с ОБ и сильно влияют при включении по схеме с ОЭ?

3.5. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ И СИСТЕМЫ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРА

Т-ОБРАЗНАЯ ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА
И ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРА

При анализе и расчете транзисторных схем, в частности усиленной, обычно пользуются эквивалентной схемой транзистора для переменных составляющих токов и напряжений, параметры которой соответствуют электрическим параметрам транзистора. Эффект передачи входного тока в выходную цепь транзистора учитывается путем включения в выходную цепь управляемого генератора, величина тока или ЭДС которого зависит от входного сигнала. Имеется несколько эквивалентных схем транзистора и соответствующих им систем параметров. Наилучшим образом отражает структуру транзистора и проходящие в нем физические процессы Т-образная эквивалентная схема с управляемым генератором тока (рис. 3.17, а). Этой схеме соответствует система физических или собственных параметров транзистора, характеризующих свойства самого транзистора и не зависящих от схемы его включения. Наиболее важными физическими параметрами являются:

1. Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода

$$r_{\text{e}} = \left. \frac{dU_{\text{e},\text{п}}}{dI_{\text{e}}} \right|_{U_{\text{K}}=\text{const}} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{e},\text{п}}}{\Delta I_{\text{e}}} \right|_{U_{\text{K}}=\text{const}} = \left. \frac{u_{\text{e},\text{п}}}{i_{\text{e}}} \right|_{u_{\text{K}}=0}$$

где $U_{\text{e},\text{п}}$ — напряжение, приложенное к эмиттерному переходу, т. е. напряжение между клеммой эмиттера и внутренней точкой базы.

Б'. Условие $U_{\text{K}}=\text{const}$ означает, что на выходе схемы должен быть обеспечен режим короткого замыкания (КЗ) по переменному току $i_{\text{K}}=0$.

2. Объемное сопротивление базы r_{b} .

3. Дифференциальное сопротивление коллекторного перехода

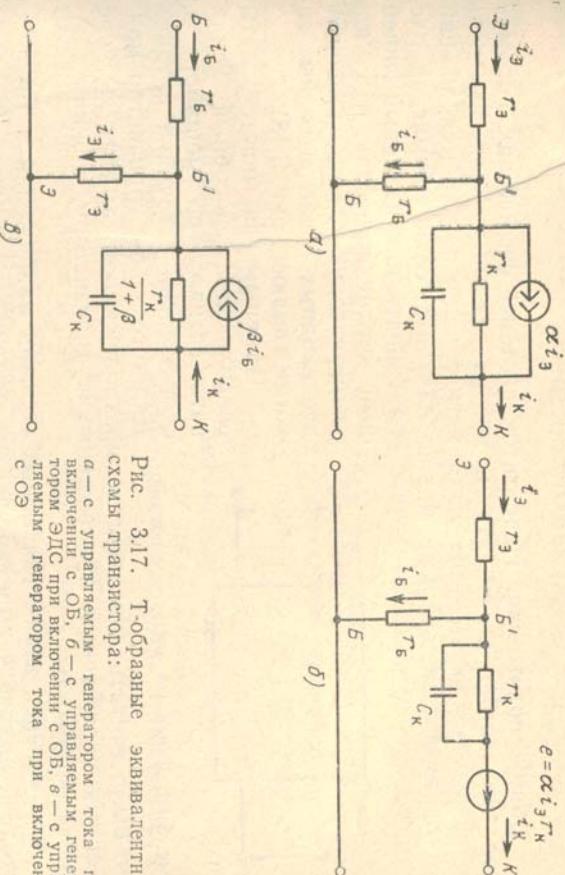
$$r_{\text{k}} = \left. \frac{dU_{\text{k},\text{п}}}{dI_{\text{k}}} \right|_{I_{\text{e}}=\text{const}},$$

где $U_{\text{k},\text{п}}$ — обратное напряжение на коллекторном переходе. Поскольку падение напряжения на сопротивлении базы много меньше напряжения на коллекторе, можно считать $U_{\text{k},\text{п}}=U_{\text{k}}$ и дифференциальное сопротивление коллекторного перехода определять как

$$r_{\text{k}} = \left. \frac{dU_{\text{k}}}{dI_{\text{k}}} \right|_{I_{\text{e}}=\text{const}} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{k}}}{\Delta I_{\text{k}}} \right|_{I_{\text{e}}=\text{const}} = \left. \frac{u_{\text{k}}}{i_{\text{k}}} \right|_{i_{\text{e}}=0}.$$

4. Дифференциальный коэффициент передачи эмиттерного тока

$$\alpha = \left. \frac{dI_{\text{k}}}{dI_{\text{e}}} \right|_{U_{\text{K}}=\text{const}} \approx \left. \frac{\Delta I_{\text{k}}}{\Delta I_{\text{e}}} \right|_{U_{\text{K}}=\text{const}} = \left. \frac{i_{\text{k}}}{i_{\text{e}}} \right|_{u_{\text{K}}=0}.$$



На эквивалентных схемах транзистора принято показывать стрелками направление мгновенных значений токов при положительной полуволне напряжения на входном электроде. Токи в транзисторе при наличии сигнала на его входе являются пульсирующими. Увеличение мгновенного значения пульсирующего тока можно рассматривать как результат сложения постоянного тока (при отсутствии сигнала) и мгновенного значения переменного тока (сигнала) того же направления, а уменьшение — как результат вычитания из постоянного тока мгновенного значения переменного тока обратного направления. В схеме с ОБ входным электродом является эмиттер. При положительной полуволне сигнала на входе (при «+» на эмиттере) ток эмиттера возрастает. Это значит, что переменная составляющая тока эмиттера совпадает по направлению с постоянной, т. е. втекает в эмиттер. Поскольку при увеличении тока эмиттера увеличиваются также токи базы и коллектора, переменные составляющие этих токов тоже текут из базы и коллектора.

На рис. 3.17, б показана эквивалентная схема транзистора с управляемым генератором ЭДС.

Эквивалентные схемы, изображенные на рис. 3.17, а и б, соответствуют включению транзистора с ОБ. Эквивалентная схема транзистора, включенного по схеме с ОЭ, приведена на рис. 3.17, б'. В данной схеме изменилось направление всех токов. Объясняется это тем, что в схеме с ОЭ входным электродом является база, а при «+» на базе все токи в транзисторе уменьшаются. Это означает, что переменные составляющие токов теперь имеют встречное направление с постоянными составляющими.

Общие положения. Недостаток системы физических параметров транзистора в том, что не все из них могут быть измерены непосредственно. Поэтому на практике чаще пользуются внешними параметрами, которые можно получить, если транзистор рассматривать как активный линейный четырехполюсник, т. е. как электрическую схему, имеющую два входных и два выходных зажима (полюса, рис. 3.18).

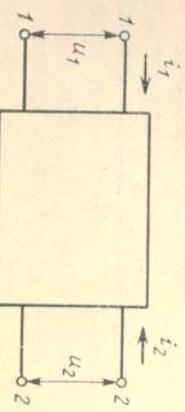


Рис. 3.18. Линейный четырехполюсник

Активным называется четырехполюсник, способный усиливать сигналы по мощности за счет энергии источника питания.

Для того чтобы транзистор можно было считать линейным четырехполюсником, амплитуды переменных напряжений, приложенных к транзистору, должны быть достаточно малы.

Из четырех взаимосвязанных величин напряжений и токов на входе и выходе четырехполюсника можно выбрать любую пару в качестве независимых переменных. Тогда оставшиеся две величины будут зависимыми переменными. При этом возможны шесть вариантов указанного выбора и соответственно шесть систем параметров четырехполюсника.

Z-параметры. Если выбрать в качестве независимых переменных i_1 и i_2 , то можно записать уравнения:

$$u_1 = Ai_1 + Bi_2, \quad u_2 = Ci_1 + Di_2.$$

Коэффициенты (параметры) A , B , C и D в этих уравнениях должны иметь размерность сопротивления, так как при умножении каждого из них на ток должно быть получено напряжение. Поэтому данные уравнения можно переписать в виде

$$u_1 = Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2, \quad u_2 = Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2.$$

Эта система параметров носит название системы Z-параметров. Двухзначные индексы при коэффициентах показывают, какую пару величин связывает данный параметр. Например, параметр Z_{12} (читается: «зэт один два») связывает между собой i_1 и i_2 , параметр $Z_{21} = u_2 - i_1$ и т. д. При этом первая цифра индекса относится к зависимой, а вторая — к независимой переменной.

Данные уравнения справедливы для любых значений независимых переменных, в том числе и для $i_1 = 0$ и $i_2 = 0$. Если положить $i_2 = 0$ (холостой ход на выходе четырехполюсника, т. е. замкнуть 2—2 разомкнуть 1—1 для переменного тока), то уравнения примут вид

$$u_1 = Z_{11}i_1, \quad u_2 = Z_{21}i_1.$$

Откуда $Z_{11} = \frac{u_1}{i_1} \Big|_{i_2=0}$ — входное сопротивление транзистора в

режиме холостого хода (ХХ) на выходе; $Z_{21} = \frac{u_2}{i_1} \Big|_{i_2=0}$ — параметр, характеризующий степень воздействия входного тока на выходное напряжение, т. е. усиительную способность транзистора. Если же положить $i_1 = 0$ (ХХ на входе транзистора, т. е. зажмы I—I разомкнуты для переменного тока), то получим $Z_{12} = \frac{u_1}{i_2} \Big|_{i_1=0}$ — параметр, характеризующий влияние выходного тока на входное напряжение, т. е. обратную связь в транзисторе;

$$Z_{22} = \frac{u_2}{i_2} \Big|_{i_1=0} \quad \text{— выходное сопротивление транзистора в режиме ХХ на входе.}$$

Система Z-параметров на практике неудобна тем, что при измерении параметров Z_{11} и Z_{21} необходимо обеспечить на выходе режим ХХ по переменному току (а для постоянного тока цепь обрывать нельзя, так как необходимо подавать напряжение питания на коллектор). Для этого в цепь коллектора необходимо включить индуктивность, сопротивление которой для переменного тока звуковой частоты было бы много больше выходного сопротивления транзистора. Это условие трудно выполнить, поскольку выходное сопротивление транзистора очень велико. Поэтому система Z-параметров не нашла широкого применения на практике.

y-параметры. Если в качестве независимых переменных принять u_1 и u_2 , то получим систему y-параметров, имеющих размерность проводимости:

$$i_1 = y_{11}u_1 + y_{12}u_2, \quad i_2 = y_{21}u_1 + y_{22}u_2.$$

При $u_2 = 0$ (короткое замыкание на выходе) получим $y_{11} = \frac{i_1}{u_1} \Big|_{u_2=0}$ — входная проводимость в режиме КЗ на выходе;

$y_{21} = \frac{i_2}{u_1} \Big|_{u_2=0}$ — проводимость прямой передачи (крутизна проходной характеристики) — параметр, характеризующий усилительную способность транзистора.

При $u_1 = 0$ (КЗ на входе)

$$y_{12} = \frac{i_1}{u_2} \Big|_{u_1=0} \quad \text{— проводимость обратной связи:}$$

$y_{22} = \frac{i_2}{u_2} \Big|_{u_1=0}$ — выходная проводимость в режиме КЗ на выходе. В системе y-параметров для измерения y_{12} и y_{22} требуется режим КЗ на входе транзистора, что также трудно практически обеспечить, так как входное сопротивление транзистора мало и для получения режима КЗ параллельно входу транзистора должен быть включен конденсатор очень большой емкости (чтобы на

низкой частоте выполнялось условие: $1/\omega C \ll R_{\text{вх}}$). Другой недостаток системы y-параметров в том, что для практического использования этой системы параметров необходимо иметь семейство

коллекторных статических характеристик, снятых при фиксированных значениях напряжения на входе ($U_{\text{Э}} = \text{const}$ или $U_{\text{Б}} = \text{const}$), а в справочниках обычно приводятся статические коллекторные характеристики, снятые при фиксированных значениях входного тока ($I_{\text{Э}} = \text{const}$ или $I_{\text{Б}} = \text{const}$). Поэтому необходимо перестраивать указанные характеристики, что создает определенные неудобства. Тем не менее система y -параметров находит практическое применение при расчетах транзисторных усилителей и других устройств. Объясняется это, во-первых, тем, что при анализе схем различных каскадов усиления приходится рассматривать цепи с параллельным соединением большого числа элементов. А в этом случае, как известно, удобнее пользоваться проводами. Во-вторых, в системе y -параметров основным параметром, характеризующим усиительные свойства транзистора, как и у электронной лампы — пентода, является крутизна проходной характеристики $I_{\text{K}} = f(U_{\text{БЭ}})$.

$$y_{21} = i_2 / u_1 = \Delta I_{\text{K}} / \Delta U_{\text{БЭ}} = S_{\text{п.}}$$

Это в известной мере дает возможность при расчетах транзисторных устройств воспользоваться хорошо разработанной методикой расчета ламповых схем.

h -параметры. На практике наибольшее применение нашла смешанная система h -параметров, в которой параметры имеют различные размерности и легко измеряются. В системе h -параметров в качестве независимых переменных принимают i_1 и u_2 . При этом

$$u_1 = h_{11} i_1 + h_{12} u_2, \quad i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} u_2.$$

Если положить $u_2 = 0$, то получим

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0} - \quad \text{входное сопротивление транзистора в режиме КЗ на выходе;}$$

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0} - \quad \text{коэффициент передачи (усиления) тока в режиме КЗ на выходе.}$$

При $i_1 = 0$

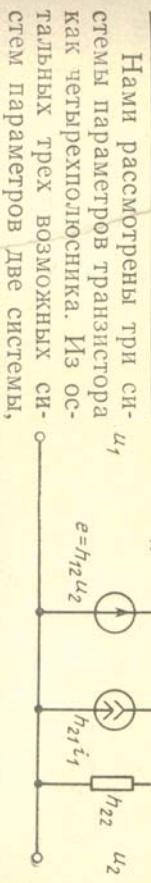
$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0} - \quad \text{коэффициент обратной связи в режиме КХ на входе;}$$

$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0} - \quad \text{выходная проводимость в режиме КХ на входе.}$

Указанные условия измерений: $u_2 = 0$ (КЗ на выходе) и $i_1 = 0$ (КХ на входе) обеспечиваются включением конденсатора достаточно большой емкости параллельно выходу транзистора и включением последовательно в цепь эмиттера катушки достаточной индуктивности. Необходимые при этом соотношения: $1/\omega C \ll R_{\text{вых}}$ и $\omega L \gg R_{\text{вх}}$ практически легко выполняются, поскольку $R_{\text{вых}}$ очень велико, а $R_{\text{вх}}$ мало.

На рис. 3.19 приведена эквивалентная схема транзистора как четырехполюсника, соответствующая h -параметрам.

Рис. 3.19. Эквивалентная схема транзистора как четырехполюсника, соответствующая h -параметрам



Нами рассмотрены три системы параметров транзистора h -параметров, две системы, у которых независимые переменные u_1 и i_1 , а также u_2 и i_2 вообще не могут быть использованы, так как не содержат таких важных параметров как входное и выходное сопротивления (проводимости), а оставшаяся система g -параметров (тоже смешанная, но в качестве независимых переменных приняты u_1 и i_2) не находит применения на практике, так как требует обеспечения трубо выполнимых режимов КХ на выходе и КЗ на входе транзистора.

h -параметры транзистора, включенного по схеме с ОБ. Низкочастотные h -параметры транзистора можно с достаточной для практики точностью измерить без источника переменного напряжения (сигнала), используя приращения постоянных напряжений и токов. В этом случае отпадает также необходимость включения конденсатора параллельно выходу и катушки индуктивности — последовательно со входом транзистора, так как режим КЗ по переменному току на выходе $u_2 = 0$ в данном случае обеспечивается неизменностью постоянного напряжения на выходе ($U_2 = \text{const}$), а режим ХХ по переменному току на входе ($i_1 = 0$) — неизменностью постоянного входного тока ($I_1 = \text{const}$). Для измерения h -параметров транзистора при включении с ОБ может быть использована схема для снятия статических характеристик транзистора с ОБ (см. рис. 3.4).

Для схемы с ОБ

$$u_1 = u_{\text{ЭБ}} = \Delta U_{\text{ЭБ}}; \quad i_1 = i_{\text{Э}} = \Delta I_{\text{Э}}, \quad u_2 = u_{\text{КБ}} = \Delta U_{\text{КБ}}, \quad i_2 = i_{\text{К}} = \Delta I_{\text{К}}.$$

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{U_{\text{КБ}}=\text{const}} - \quad \text{входное дифференциальное сопротивление транзистора в заданной точке. Условие } U_{\text{КБ}} = \text{const} \text{ необходимо соблюдать для того, чтобы изменения } U_{\text{КБ}} \text{ не влияли на } \Delta I_{\text{Э}}, \text{ а значит, и на } h_{11}. \quad$$

$h_{12} = \left. \frac{u_1}{\Delta U_{\text{ЭБ}}} \right|_{I_{\text{Э}}=\text{const}} - \quad \text{коэффициент обратной связи по}$

напряжению, показывающий, какому изменению напряжения на эмиттере в вольтах равноценен по своему воздействию на ток эмиттера один вольт изменения напряжения на коллекторе. Условие $I_{\text{Э}} = \text{const}$ означает, что приrostы $\Delta U_{\text{ЭБ}}$ и $\Delta U_{\text{КБ}}$ вызывают одинаковые по величине и противоположные по знаку приросты тока эмиттера и поэтому последний остается неизменным.

$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta U_{\text{ЭБ}}} \right|_{U_{\text{КБ}}=\text{const}} - \quad \text{коэффициент передачи тока эмиттера. Условие } U_{\text{КБ}} = \text{const} \text{ говорит о том, что прирост тока кол-$