

1.3.8. Стабисторы

Стабистор — это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области прямого смещения слабо зависит от тока в заданном диапазоне его значений. Он используется для стабилизации напряжения.

Стабилизации постоянного напряжения можно также добиться, применяя диод, включенный в прямом направлении, и используя для этой цепи крутой участок прямой ветви вольт-амперной характеристики (рис. 1.25).

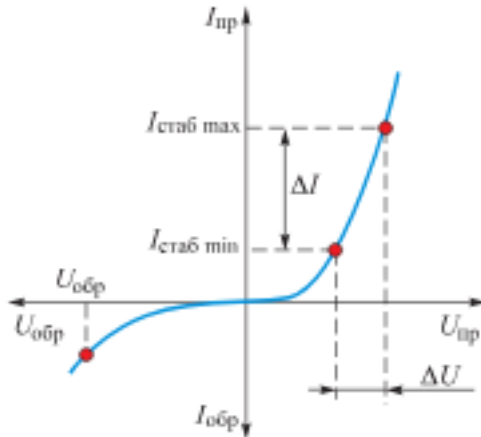


Рис. 1.25. Вольт-амперная характеристика стабилитрона $I_{пр} = f(U_{пр})$ и его основные параметры: $I_{пр}$, $I_{обр}$ — прямой и обратный токи стабилитрона соответственно; $I_{стаб min}$, $I_{стаб max}$ — минимально и максимально допустимые токи стабилизации соответственно; ΔI — диапазон изменения тока стабилизации; $U_{пр}$, $U_{обр}$ — прямое и обратное напряжения стабилитрона соответственно; ΔU — диапазон изменения напряжения стабилизации

При изменении прямого тока в диапазоне от $I_{стаб min}$ до $I_{стаб max}$ падение напряжения будет изменяться в относительно небольшом диапазоне ΔU .

Кремниевые диоды, предназначенные для этой цели, также называют стабилитронами. Для изготовления стабилитронов используют кремний с большой концентрацией примесей, что необходимо для получения меньшего сопротивления и слабой температурной зависимости прямой ветви ВАХ.

По сравнению со стабилизаторами стабилитроны имеют меньшее напряжение стабилизации, равное прямому падению напряжения на диоде и составляющее примерно 0,7 В. Последовательное соединение двух или трех стабилитронов позволяет получить удвоенное или утроенное значение напряжения стабилизации. Некоторые типы стабилитронов представляют собой единый прибор с последовательным соединением отдельных элементов.

Основные параметры стабилитронов такие же, как у стабилизаторов (см. рис. 1.25).

1.4. Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор — это полупроводниковый прибор с двумя или более взаимодействующими выпрямляющими электрическими переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических сигналов.

Транзистор был создан американскими учеными Дж. Бардином, У. Браттейном и У. Шокли в 1947 году. Это событие имело громадное значение для

полупроводниковой электроники. Транзисторы могут работать при существенно меньших напряжениях, чем ламповые триоды, и не являются простыми заменителями последних: их можно использовать не только для усиления и генерирования сигналов переменного тока, но и в качестве ключевых элементов. Определение «биполярный» указывает на то, что работа транзистора связана с процессами, в которых принимают участие как электроны, так и дырки.

Структура биполярного транзистора изображена на рис. 1.26.

Он представляет собой монокристалл полупроводника, в котором созданы три области с чередующимися типами электропроводности. На границах этих областей возникают электронно-дырочные переходы. От каждой области полупроводника сделаны токоотводы (омические контакты). Среднюю область транзистора, расположенную между электронно-дырочными переходами, называют *базой* и обозначают буквой Б). Примыкающие к базе области обычно делают неодинаковыми. Одну из областей изготавливают так, чтобы из нее наиболее эффективно проходила инжекция носителей заряда в базу, а другую — так, чтобы $p-n$ -переход между базой и этой областью наилучшим образом собирал инжектированные в базу носители заряда, т. е. осуществлял экстракцию носителей заряда из базы.

Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей заряда в базу, называют *эмиттером* и обозначают буквой Э, а $p-n$ -переход между базой и эмиттером — *эмиттерным*, обозначаемым буквами ЭП. Область транзистора, основным назначением которой является собирание, экстракция носителей заряда из базы, называют *коллектором* и обозначают буквой К, а $p-n$ -переход между базой и коллектором — *коллекторным*, который обозначают буквами КП. В зависимости от типа электропроводности крайних слоев (эмиттера и коллектора) различают транзисторы $p-n-p$ - и $n-p-n$ -типа. В обоих типах транзисторов физические процессы аналогичны, они различаются только типом инжектируемых и экстрагируемых носителей и имеют одинаково широкое применение.

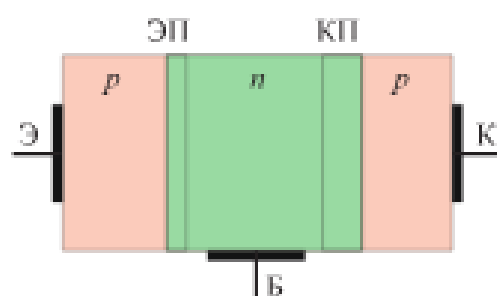


Рис. 1.26. Схематическое изображение структуры биполярного транзистора:

Б — база; Э — эмиттер; К — коллектор;
ЭП — эмиттерный $p-n$ -переход; КП —
коллекторный $p-n$ -переход

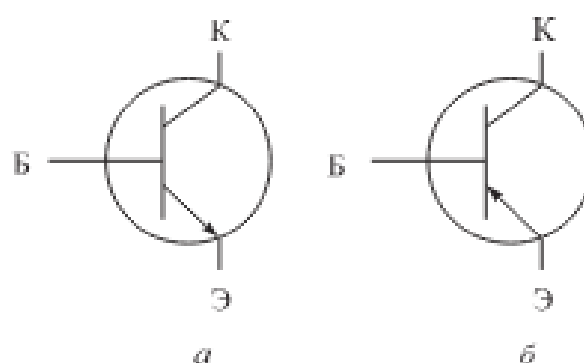


Рис. 1.27. Условные графические обозначения биполярных транзисторов $n-p-n$ -типа (а) и $p-n-p$ -типа (б):

Б — база; Э — эмиттер; К — коллектор

На принципиальных электрических схемах транзисторы изображают условными графическими обозначениями (рис. 1.27).

При работе транзистора к его электродам прикладываются напряжения от внешних источников питания. В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора, каждый из $p-n$ -переходов может быть смещен в прямом или в обратном направлении. Исходя из этого возможны четыре режима работы транзистора: активный (усилительный); насыщения; отсечки; инверсный.

Если на эмиттерном переходе напряжение прямое и он инжектирует носители в базу, а на коллекторном переходе напряжение обратное и он собирает носители из базы, то такое включение транзистора называют *нормальным*, а транзистор работает в *активном (усилительном)* режиме.

В режиме *насыщения* оба $p-n$ -перехода включены в прямом направлении, переходы насыщены подвижными носителями заряда, их сопротивления малы.

В режиме *отсечки* оба $p-n$ -перехода включены в обратном направлении. В электродах транзистора протекают тепловые токи обратно включенных переходов.

Если на коллекторном переходе напряжение прямое и он инжектирует носители в базу, а на эмиттерном переходе напряжение обратное и он осуществляет экстракцию носителей из базы, то такое включение транзистора называют *инверсным*, а транзистор работает в *инверсном* режиме.

При инверсном включении транзистора необходимо учитывать следующие особенности. Поскольку эмиттерный переход по площади меньше, чем коллекторный, то из того количества носителей, которые инжектируются коллекторным переходом, меньшее количество собирается эмиттерным переходом, что снижает ток этого перехода. Это приводит к изменению заряда носителей в базе и, следовательно, к изменению барьерной емкости переходов, т. е. к изменению частотных свойств транзистора.

При меньшей площади эмиттерного перехода необходимо снижать его ток, чтобы оставить прежней температуру нагрева полупроводниковой структуры.

1.4.1. Физические процессы в биполярном транзисторе

Рассмотрим физические процессы в $p-n-p$ -транзисторе при усилении электрических сигналов (рис. 1.28).

К транзистору подключают два источника ЭДС: E_1 — источника входного сигнала и E_2 — источника питания (мощного источника). Источник E_1 подключается так, чтобы эмиттерный переход был смещен в прямом направлении, а источник E_2 должен смещать коллекторный переход в обратном направлении. Если отсутствует ток в цепи источника входного сигнала (во входной цепи транзистора), то нет тока и в цепи источника питания (в выходной цепи). Строго говоря, в выходной цепи будет протекать очень слабый

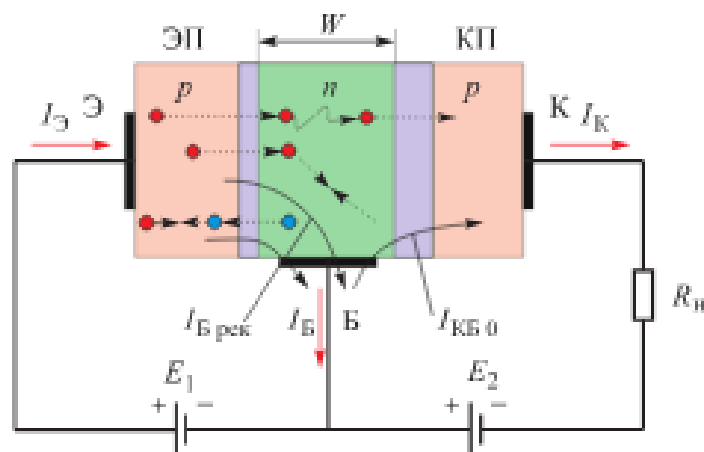


Рис. 1.28. Движение носителей заряда и токи в $p-n-p$ -транзисторе в активном режиме работы: E_1 — ЭДС источника входного сигнала; E_2 — ЭДС источника питания; W — ширина базового слоя; ЭП — эмиттерный $p-n$ -переход; КП — коллекторный $p-n$ -переход; Б — база; Э — эмиттер; К — коллектор; I_B — ток базы; I_K — ток коллектора; I_E — ток эмиттера; $I_{КБ0}$ — обратный ток закрытого коллекторного перехода; $I_{Брек}$ — базовый ток рекомбинации дырок; R_n — сопротивление нагрузки

ток — обратный ток закрытого коллекторного перехода $I_{КБ0}$, но им ввиду его малости можно пренебречь. Если во входной цепи транзистора создать под действием источника E_1 какой-то ток I_E , то дырки, являющиеся основными носителями в p -области эмиттера, будут инжектироваться в область базы, где они становятся неосновными носителями. Те из них, которые попадают в зону действия электрического поля коллекторного перехода, будут испытывать со стороны этого поля ускоряющее, притягивающее действие и будут переброшены через границу раздела в область коллектора (область p -типа), где дырки уже являются основными носителями. Таким образом, в цепи источника питания появится ток — ток коллектора I_K , который, протекая по сопротивлению нагрузки R_n , создает падение напряжения:

$$U = I_K R_n. \quad (1.21)$$

Это напряжение является выходным сигналом усилителя и в точности повторяет все изменения входного сигнала.

Отметим, что не все носители, инжектированные из эмиттера в базу, достигают коллекторного перехода: часть из них рекомбинирует в базе по пути движения от эмиттерного перехода к коллекторному, образуя ток $I_{Брек}$, поэтому ток коллектора I_K принципиально меньше тока эмиттера I_E .

Отношение этих токов характеризует коэффициент передачи по току

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}. \quad (1.22)$$

Для увеличения коэффициента передачи по току область базы делают тонкой, чтобы меньшее количество носителей рекомбинировало в ней, а площадь коллекторного перехода выполняли больше площади эмиттерного перехода, чтобы улучшить процесс экстракции носителей из базы. Таким образом, удастся достичь значение коэффициента передачи по току $\alpha = 0,95 \dots 0,99$ и более.

Несмотря на то что в рассмотренной схеме (см. рис. 1.28) усиления по току нет, т. е. $\alpha \leq 1$, коэффициент передачи по мощности может быть значительно больше единицы за счет большого усиления по напряжению. При малом токе коллектора I_K падение напряжения на сопротивлении нагрузки $I_K R_n$ может быть значительным за счет большого напряжения источника питания.

В транзисторах $n-p-n$ -типа все описанные процессы протекают точно так же, как в $p-n-p$ -транзисторах, но полярность источников E_1 и E_2 должна быть противоположной. При этом из эмиттера в базу будут инжектироваться электроны, которые образуют ток коллектора в цепи источника E_2 .

При усилении электрического сигнала в транзисторе происходит изменение ширины базового слоя W , так как под действием внешних источников E_1 и E_2 толщина эмиттерного и коллекторного переходов изменяется. Это приводит к модуляции ширины базового слоя. Данное явление получило название *эффекта Эрли*. Чем уже становится база, тем меньшее количество инжектированных носителей будет рекомбинировать в ней и, следовательно, большее количество их достигнет коллекторного перехода.

1.4.2. Схемы включения транзистора

Поскольку транзистор имеет три вывода (эмиттер, база, коллектор), а два источника питания имеют четыре вывода, то обязательно один из выводов транзистора будет общим для обоих источников, т. е. одновременно будет принадлежать и входной цепи, и выходной. По этому признаку различают три возможные схемы включения: с общей базой, с общим эмиттером и с общим коллектором.

Схема с общей базой (ОБ)

Рассмотренный в 1.4.1 пример построения усилителя электрических сигналов с помощью транзистора является схемой включения с ОБ. На рис. 1.29 приведена электрическая принципиальная схема включения транзистора с ОБ.

Определим основные параметры, характеризующие эту схему включения.

Коэффициент усиления по току

$$K_{ЮБ} = \alpha = \frac{I_K}{I_Э} \approx 0,95 \dots 0,99. \quad (1.23)$$

Входное сопротивление

$$R_{вх\text{ ОБ}} = \frac{E_1}{I_Э}. \quad (1.24)$$

Из (1.24) следует, что входное сопротивление транзистора, включенного в схему с ОБ, очень невелико и определяется в основном сопротивлением эмиттерного $p-n$ -перехода в прямом направлении. На практике его значение составляет от единицы до десятков ом. Это следует отнести к недостаткам усилительного каскада, поскольку приводит к нагружению источника входного сигнала.

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_{УОБ} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{I_K R_n}{E_1} = \frac{I_K R_n}{I_Э R_{вх\text{ ОБ}}} = \alpha \frac{R_n}{R_{вх\text{ ОБ}}}.$$

Коэффициент усиления по напряжению может быть достаточно большим (десятки — сотни единиц), так как определяется главным образом соотношением между сопротивлением нагрузки R_n и входным сопротивлением.

Коэффициент усиления по мощности

$$K_{РОБ} = K_{ЮБ} K_{УОБ} = \alpha^2 \frac{R_n}{R_{вх\text{ ОБ}}}.$$

Для реальных схем коэффициент усиления по мощности равняется десяткам — сотням единиц.

Схема с общим эмиттером (ОЭ)

В рассматриваемой схеме (рис. 1.30) источник входного сигнала E_1 по-прежнему включен в прямом направлении по отношению к эмиттерному переходу, а источник питания E_2 — в обратном направлении по отношению к коллекторному переходу и в прямом по отношению к эмиттерному.

Под действием источника входного сигнала E_1 в базовой цепи протекает ток I_B , происходит инжекция носителей из эмиттерной области в базовую, часть из них под действием поля коллекторного перехода перебрасывается

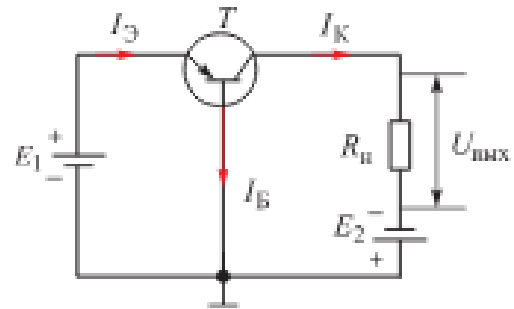


Рис. 1.29. Включение транзистора T по схеме с ОБ:

$I_Э$ — ток эмиттера; I_K — ток коллектора; I_B — ток базы; E_1 и E_2 — источники напряжений во входной и выходной цепях соответственно; $U_{вых}$ — выходное напряжение на нагрузке; R_n — сопротивление нагрузки

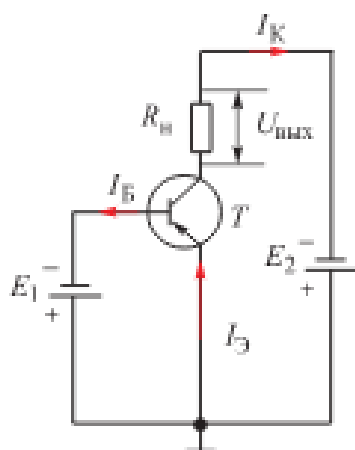


Рис. 1.30. Включение транзистора T по схеме с ОЭ:

$I_{\text{Э}}$ — ток эмиттера; $I_{\text{К}}$ — ток коллектора; $I_{\text{Б}}$ — ток базы; E_1 и E_2 — источники напряжений во входной и выходной цепях соответственно; $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение на нагрузке; $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки

в коллекторную область, образуя таким образом ток в цепи коллектора $I_{\text{К}}$, который протекает под действием источника питания E_2 через эмиттер и базу. Поэтому

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Б}} + I_{\text{К}}. \quad (1.25)$$

Входным током является ток базы $I_{\text{Б}}$, а выходным — ток коллектора $I_{\text{К}}$. Выходным напряжением является падение напряжения на сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}$.

Определим основные параметры, характеризующие эту схему включения.

Коэффициент усиления по току

$$K_{\text{ЮЭ}} = \beta = \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}}.$$

Разделим в этом выражении числитель и знаменатель дроби на ток эмиттера $I_{\text{Э}}$ и получим

$$\beta = \frac{\frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}}}}{\frac{I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (1.26)$$

Из формулы (1.26) следует, что в схеме с ОЭ коэффициент усиления по току достаточно большой, так как значение α около единицы, а значение β составляет десятки — сотни единиц.

Входное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ

$$R_{\text{вх ОЭ}} = \frac{E_1}{I_{\text{Б}}} = \frac{E_1}{I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}}.$$

Разделим в этом выражении числитель и знаменатель на ток эмиттера $I_{\text{Э}}$ и получим

$$R_{\text{вх ОЭ}} = \frac{\frac{E_1}{I_{\text{Э}}}}{\frac{I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}}}} = \frac{R_{\text{вх ОБ}}}{1 - \alpha}.$$

Отсюда следует, что $R_{\text{вх ОЭ}} \gg R_{\text{вх ОБ}}$, т. е. по этому параметру схема с ОЭ значительно превосходит схему с ОБ. Для схемы с ОЭ входное сопротивление находится в диапазоне от сотен ом до единиц килоом.

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_{UOЭ} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{I_K R_H}{E_1} = \frac{I_K R_H}{I_B R_{\text{вх} OЭ}} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{R_H}{R_{\text{вх} OЭ}}.$$

Подставив в это выражение $R_{\text{вх} OЭ}$ из (1.26), получим

$$K_{UOЭ} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{R_H}{R_{\text{вх} OЭ}} = \alpha \frac{R_H}{R_{\text{вх} OБ}},$$

т. е. коэффициент усиления по напряжению в этой схеме точно такой же, как и в схеме с ОБ: $K_{UOЭ} = K_{UOБ}$, и составляет десятки—сотни единиц.

Коэффициент усиления по мощности

$$K_{POЭ} = K_{JOЭ} K_{UOЭ} = \frac{\alpha^2}{1-\alpha} \frac{R_H}{R_{\text{вх} OБ}}.$$

Он значительно больше, чем в схеме с ОБ (сотни—десятки тысяч единиц).

Схема с общим коллектором (ОК)

На рис. 1.31, *а* приведена схема включения транзистора с ОК. В этом случае транзистор оказывается в инверсном включении, что нежелательно из-за ряда особенностей, отмеченных в 1.4. Поэтому в схеме меняют местами выводы эмиттера и коллектора и получают нормальное включение тран-

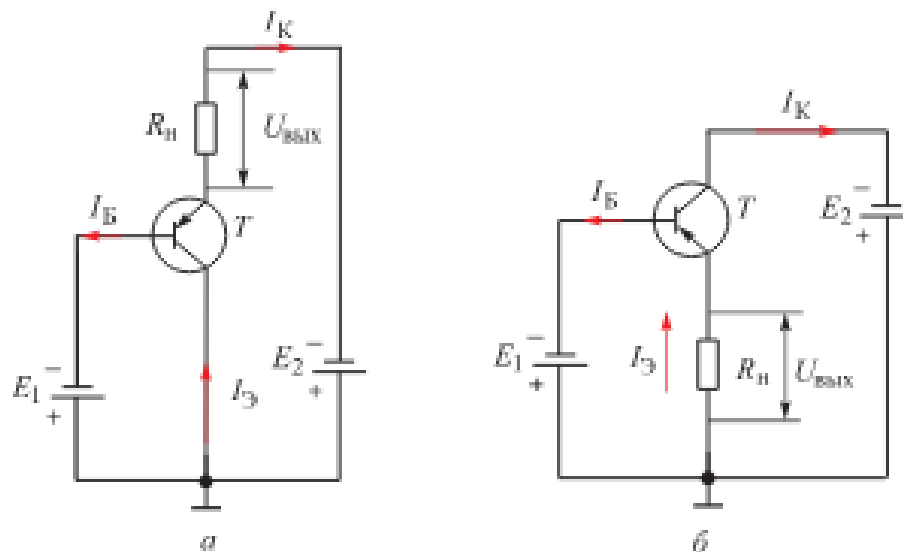


Рис. 1.31. Включение транзистора T по схеме с ОК:

$I_Э$ — ток эмиттера; I_K — ток коллектора; I_B — ток базы; E_1 и E_2 — источники напряжений во входной и выходной цепях соответственно; $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение на нагрузке; R_K — сопротивление нагрузки

зистора (рис. 1.31, б). В этой схеме сопротивление нагрузки R_H включено во входную цепь, входным током является ток базы I_B , выходным током является ток эмиттера $I_Э = I_B + I_K$.

Определим основные параметры, характеризующие эту схему включения. Коэффициент усиления по току

$$K_{ЮК} = \gamma = \frac{I_Э}{I_B} = \frac{I_Э}{I_Э - I_K}.$$

Разделим числитель и знаменатель этой дроби на ток эмиттера $I_Э$ и получим

$$\gamma = \frac{\frac{I_Э}{I_Э}}{\frac{I_Э - I_K}{I_Э}} = \frac{1}{1 - \alpha}, \quad (1.27)$$

т. е. коэффициент усиления по току в схеме с ОК почти такой же, как в схеме с ОЭ: $\gamma \approx \beta$.

Входное сопротивление

$$R_{вх\text{ ОК}} = \frac{E_1 - I_Э R_H}{I_B}.$$

Преобразовав это выражение, получим

$$R_{вх\text{ ОК}} = \frac{I_Э \left(\frac{E_1}{I_Э} + I_Э R_H \right)}{I_B} = \frac{R_{вх\text{ ОБ}} + R_H}{1 - \alpha}. \quad (1.28)$$

Из (1.28) следует, что входное сопротивление в этой схеме включения оказывается наибольшим из всех рассмотренных схем (десятки—сотни килоом).

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_{УОК} = \frac{I_Э R_H}{I_B R_{вх\text{ ОК}}}.$$

Преобразуем это выражение с учетом выражений (1.27) и (1.28) и получим

$$K_{УОК} = \frac{R_H}{(1 - \alpha) R_{вх\text{ ОК}}} = \frac{R_H}{R_{вх\text{ ОБ}} + R_H}.$$

Поскольку $R_{вх\text{ ОБ}}$ представляет собой очень малую величину, то можно считать, что $K_{УОК} \approx 1$, т. е. усиления по напряжению в этой схеме нет.

Коэффициент усиления по мощности

$$K_{POK} = K_{ЮК} K_{УОК} = \frac{1}{1 - \alpha} \frac{R_n}{R_{вх\text{ ОБ}} + R_n}$$

на практике он составляет десятки—сотни единиц.

Схему с ОК часто называют эмиттерным повторителем, потому что, во-первых, нагрузка включена здесь в цепь эмиттера, а во-вторых, выходное напряжение в точности повторяет входное и по величине ($K_{УОК} \approx 1$), и по фазе.

В табл. 1.1 приведены диапазоны значений параметров схем включения биполярного транзистора.

Таблица 1.1

Параметры схем включения биполярного транзистора

Параметр	Схема с ОБ	Схема с ОЭ	Схема с ОК
Коэффициент усиления по току K_I	~ 1	10—1000	10—1000
Коэффициент усиления по напряжению K_U	~ 10 —1000	10—1000	~ 1
Коэффициент усиления по мощности K_P	~ 10 —1000	100—100 000	10—1000
Входное сопротивление $R_{вх}$	1—100 Ом	100 Ом—10 кОм	10—1000 кОм
Выходное сопротивление $R_{вых}$	100 кОм—10 МОм	1—100 Ом	100 Ом—10 кОм
Фазовый сдвиг между $U_{вых}$ и $U_{вх}$	0°	180°	0°

В отличие от схемы с ОБ схема с ОЭ наряду с усилением по напряжению дает также усиление по току. Транзистор, включенный по схеме с ОЭ, усиливает ток базы в десятки—сотни раз. Усиление по напряжению в данной схеме остается таким же, как в схеме с ОБ. Поэтому усиление по мощности в схеме с ОЭ значительно больше, чем в схеме с ОБ.

Схема с ОЭ имеет более приемлемые, чем в схеме с ОБ, значения входного и выходного сопротивлений: входное сопротивление больше, а выходное меньше.

Благодаря указанным преимуществам схема с ОЭ находит наибольшее применение.

Однако несмотря на то, что у схемы с ОБ меньшее усиление по мощности и меньшее входное сопротивление, ее иногда применяют на практике, так как она имеет лучшие температурные свойства.

Схема с ОК дает усиление по току и по мощности, но не дает усиления по напряжению.

Схему с ОК очень часто применяют в качестве входного каскада усиления из-за его высокого входного сопротивления и способности не нагружать источник входного сигнала. Кроме того, данная схема имеет наименьшее выходное сопротивление.

1.4.3. Статические характеристики биполярного транзистора

Статическими характеристиками называют зависимости между входными и выходными токами и напряжениями транзистора при отсутствии нагрузки. Каждая из схем включения транзистора характеризуется четырьмя семействами статических характеристик. К ним относятся входные характеристики, выходные характеристики, характеристики обратной связи по напряжению и характеристики передачи по току.

Входная характеристика — это зависимость входного тока от входного напряжения при постоянстве напряжения на выходе:

$$I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})|_{U_{\text{вых}} = \text{const.}}$$

Выходная характеристика — это зависимость выходного тока от выходного напряжения при фиксированном значении входного тока:

$$I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}})|_{I_{\text{вх}} = \text{const.}}$$

Характеристика обратной связи по напряжению

$$U_{\text{вх}} = f(U_{\text{вых}})|_{I_{\text{вх}} = \text{const.}} \quad (1.29)$$

Характеристика передачи по току

$$I_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})|_{U_{\text{вых}} = \text{const.}} \quad (1.30)$$

Наиболее часто на практике используют входные и выходные характеристики, которые обычно приводятся в справочной литературе. Две последние характеристики (см. (1.29) и (1.30)) применяют реже, и, кроме того, они могут быть построены на основе входных и выходных характеристик.

Статические характеристики для схемы с ОБ

Семейство входных статических характеристик (рис. 1.32) представляет собой следующую зависимость:

$$I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}})|_{U_{\text{КБ}} = \text{const.}}$$

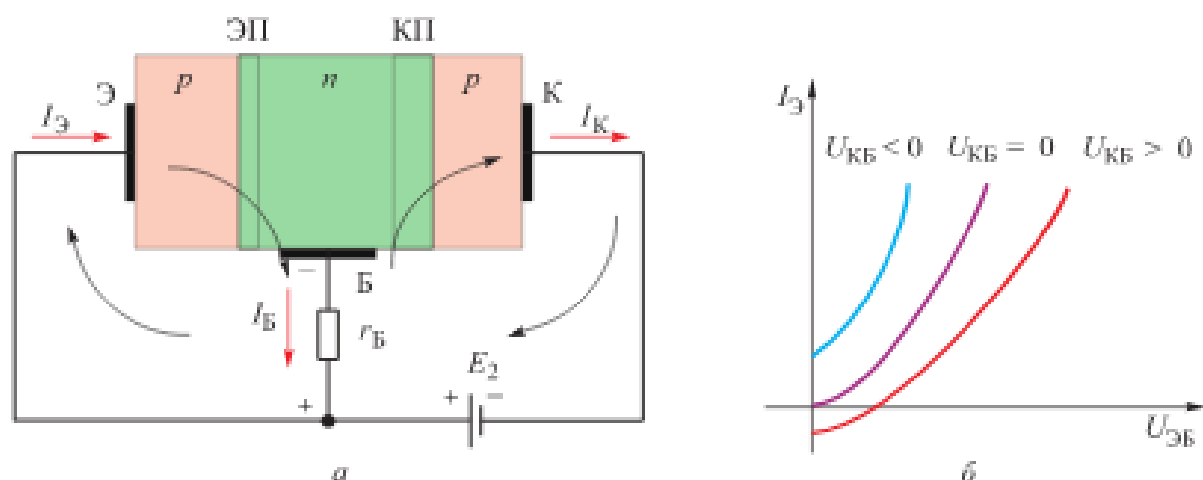


Рис. 1.32. Направление токов в транзисторе (а) и семейство входных характеристик схемы с ОБ (б):

$I_{\text{Э}}$ — ток эмиттера; $I_{\text{К}}$ — ток коллектора; $I_{\text{Б}}$ — ток базы; E_2 — источник напряжения в выходной цепи; $r_{\text{Б}}$ — сопротивление базы транзистора; $U_{\text{КБ}}$ — напряжение на коллекторном переходе; $U_{\text{ЭБ}}$ — напряжение на эмиттерном переходе; Э — эмиттер; К — коллектор; Б — база; ЭП — эмиттерный p — n -переход; КП — коллекторный p — n -переход

При $U_{\text{КБ}} = 0$ входная характеристика является прямой ветвью вольт-амперной характеристики эмиттерного перехода. При $U_{\text{КБ}} < 0$ данная характеристика смещается немного выше оси $U_{\text{ЭБ}}$.

При $U_{\text{КБ}} > 0$ коллекторный переход смещается в прямом направлении, через него протекает прямой ток, и в результате падение напряжения на сопротивлении базы $r_{\text{Б}}$ изменяет полярность на противоположную, что при отсутствии входного сигнала вызывает протекание через эмиттерный переход маленького обратного тока и, следовательно, смещение входной характеристики вниз (рис. 1.32, б).

Семейство выходных статических характеристик (рис. 1.33) представляет собой следующую зависимость:

$$I_{\text{К}} = f(U_{\text{КБ}}) \big|_{I_{\text{Э}} = \text{const}}$$

Если $I_{\text{Э}} = 0$, то выходная характеристика является обратной ветвью ВАХ коллекторного перехода. При $I_{\text{Э}} > 0$ ток в коллекторной цепи будет протекать даже при отсутствии источника коллекторного питания ($E_2 = 0$) за счет экстракции инжектированных в базу носителей полем коллекторного перехода. При увеличении напряжения $U_{\text{КБ}}$ ток

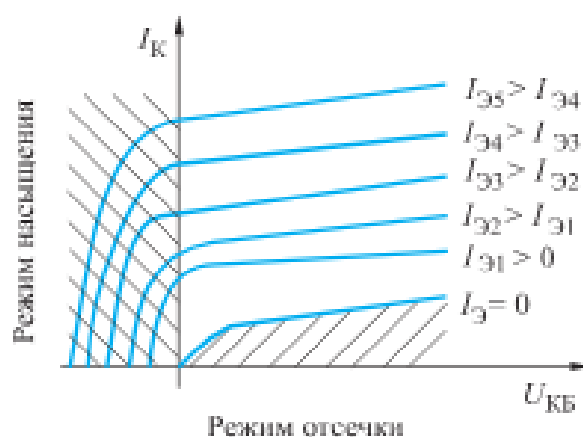


Рис. 1.33. Выходные характеристики схемы с ОБ:

$I_{\text{К}}$ — ток коллектора; $I_{\text{Э}}$, $I_{\text{Э}1}$ — $I_{\text{Э}5}$ — значения тока эмиттера; $U_{\text{КБ}}$ — напряжение, приложенное между коллектором и базой транзистора

коллектора практически не меняется, так как количество инжектированных в базу носителей остается прежним ($I_{\text{Э}} = \text{const}$), только возрастает скорость их перемещения через коллекторный переход. Чем выше уровень тока $I_{\text{Э}}$, тем больше и ток коллектора $I_{\text{К}}$.

При изменении полярности $U_{\text{КБ}}$ на противоположную меняется и включение коллекторного перехода с обратного на прямое. Поэтому ток $I_{\text{К}}$ вначале очень быстро снижается до нуля, а затем изменяет свое направление на противоположное.

Статические характеристики для схемы с ОЭ

Семейство входных статических характеристик представляет собой зависимость

$$I_{\text{Б}} = f(U_{\text{БЭ}}) \Big|_{U_{\text{КЭ}} = \text{const}}$$

Вид этих характеристик показан на рис. 1.34.

При включении источника E_2 ($U_{\text{КЭ}} < 0$) входная характеристика пойдет несколько ниже предыдущей, так как в случае $U_{\text{БЭ}} = 0$ источник E_1 отсутствует и через коллекторный переход протекает маленький обратный ток I_1 под действием источника E_2 , направление которого в базе противоположно тому, когда включен источник E_1 (рис. 1.35, а).

При включении E_2 ($U_{\text{БЭ}} > 0$) этот ток будет уменьшаться, так как в цепи его протекания источники E_1 и E_2 будут включены встречно, а затем он перейдет через нуль и будет возрастать в положительном направлении под действием источника E_1 (рис. 1.35, б). Однако в справочной литературе этим малым значением тока пренебрегают и входные характеристики представляют исходящими из начала координат.

Выходные статические характеристики имеют следующий вид:

$$I_{\text{К}} = f(U_{\text{КЭ}}) \Big|_{I_{\text{Б}} = \text{const}} \quad (1.31)$$

Семейство выходных статических характеристик показано на рис. 1.36.

При $I_{\text{Б}} = 0$ эта выходная характеристика (см. (1.31)) представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики коллекторного перехода. При $I_{\text{Б}} > 0$ она имеет большую крутизну в области малых значений, так как при условии $E_2 < E_1$ (рис. 1.37) коллекторный переход включен в прямом направлении, а его сопротивление незначительно. Достаточно небольшого изменения напряжения на коллекторном переходе,

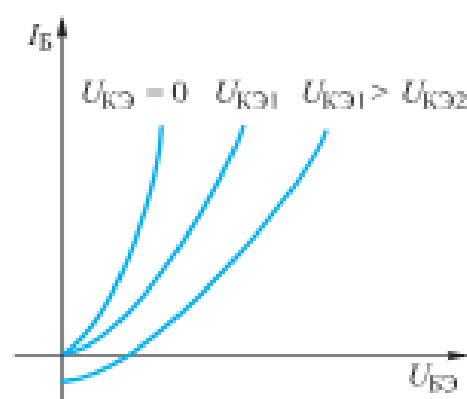


Рис. 1.34. Входные характеристики схемы с ОЭ:

$I_{\text{Б}}$ — ток базы; $U_{\text{КЭ}}$, $U_{\text{ЭБ}}$, $U_{\text{КБ}}$ — напряжения, приложенные к коллектору транзистора; $U_{\text{БЭ}}$ — напряжение, приложенное к базе транзистора

Небольшой наклон характеристики все же имеется, поскольку с ростом $U_{кэ}$ увеличивается ширина коллекторного перехода, а ширина базовой области с учетом ее и без того малой величины уменьшается. Это приводит к уменьшению числа рекомбинаций инжектированных в базу носителей и, следовательно, к увеличению количества носителей, переброшенных в область коллектора. Кроме того, по этой же причине несколько снижается ток базы I_B , а поскольку характеристики снимаются при условии $I_B = \text{const}$, то при этом необходимо несколько увеличивать напряжение $U_{бэ}$, что приводит к некоторому возрастанию тока эмиттера $I_э$ и, следовательно, тока коллектора $I_к$.

Еще одной причиной некоторого роста $I_к$ является то, что с увеличением $I_{кэ}$ возрастает и та его часть, которая приложена к эмиттерному переходу в прямом направлении. Это тоже приводит к некоторому увеличению тока эмиттера $I_э$ и в результате тока коллектора $I_к$.

Статические характеристики транзистора, включенного по схеме с ОК, аналогичны характеристикам транзистора с ОЭ.

Две оставшиеся статические характеристики — характеристика обратной связи по напряжению и характеристика передачи по току — могут быть построены для всех схем включения транзистора на основе его входных и выходных характеристик.

1.4.4. Эквивалентные схемы биполярного транзистора

Реальный транзистор при расчете электронных схем можно представить в виде эквивалентной схемы (рис. 1.38). В этой схеме оба электронно-дырочных перехода (эмиттерный и коллекторный) представлены в виде встречно

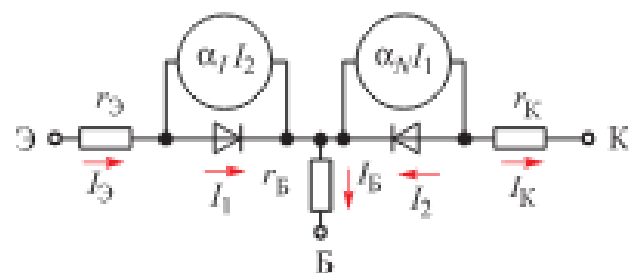


Рис. 1.38. Эквивалентная схема биполярного транзистора по постоянному току:

Э, К, Б — эмиттер, коллектор, база соответственно; $r_б$ — сопротивление базы; $r_э$ — сопротивление эмиттера; $r_к$ — сопротивление коллектора; I_1 , I_2 — прямой ток эмиттера и обратный ток коллектора соответственно; α_N — коэффициент передачи транзистора в нормальном включении; α_I — коэффициент передачи транзистора в инверсном включении; $\alpha_N I_1$ — источник тока с коэффициентом передачи по току α_N ; $\alpha_I I_2$ — источник тока с коэффициентом передачи по току α_I .

включенных диодов, а их взаимодействие учитывается генераторами токов: $\alpha_N I_1$ — в нормальном включении (α_N — коэффициент передачи транзистора в активном режиме); $\alpha_I I_1$ — в инверсном режиме.

Собственные сопротивления различных областей транзистора включают: $r_э$ — сопротивление эмиттерной области; $r_б$ — сопротивление базы; $r_к$ — сопротивление коллектора.

Рассмотренная схема является эквивалентной схемой транзистора по постоянному току, так как не учитывает ряда факторов, оказывающих существенное влияние на переменную составляющую.

$$h_{12Э} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б} = \text{const}} ;$$

$$h_{21Э} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}} ;$$

$$h_{22Э} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{КЭ}} \right|_{I_{Б} = \text{const}} .$$

Типовые значения параметра $h_{11Э}$ составляют от сотен ом до единиц килоом, параметра $h_{12Э}$ — обычно $10^{-4} \dots 10^{-3}$, т. е. напряжение, передаваемое с выхода за счет обратной связи, составляет тысячные или десятитысячные доли выходного напряжения, параметра $h_{21Э}$ — десятки—сотни единиц, $h_{22Э}$ — десятые — сотые доли мегаом, а выходное сопротивление $1/h_{22}$ — от единиц до десятков килоом.

1.4.6. Активные режимы работы биполярного транзистора

Рассмотрим усилительный каскад на транзисторе, включенном по схеме с ОЭ (рис. 1.44). При изменении входного сигнала $U_{БЭ}$ будет изменяться ток базы $I_{Б}$. Ток коллектора $I_{К}$ изменяется пропорционально току базы $I_{Б}$:

$$I_{К} = \beta I_{Б}. \quad (1.33)$$

Изменение тока коллектора можно проследить по выходным характеристикам транзистора (рис. 1.45). На оси абсцисс отложим отрезок, равный напряжению источника питания коллекторной цепи $E_{КЭ}$, а на оси ординат — отрезок, соответствующий максимально возможному току в цепи этого источника $I_{К\text{max}}$:

$$I_{К\text{max}} = \frac{E_{К}}{R_{К}}. \quad (1.34)$$

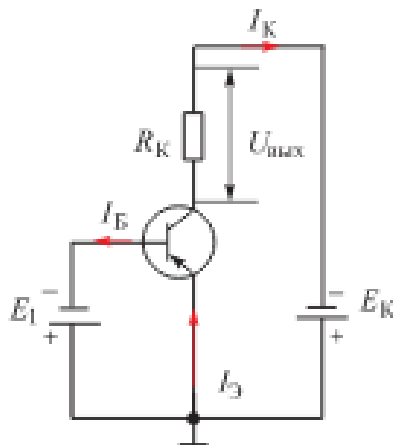


Рис. 1.44. Схема усилительного каскада на транзисторе с ОЭ:

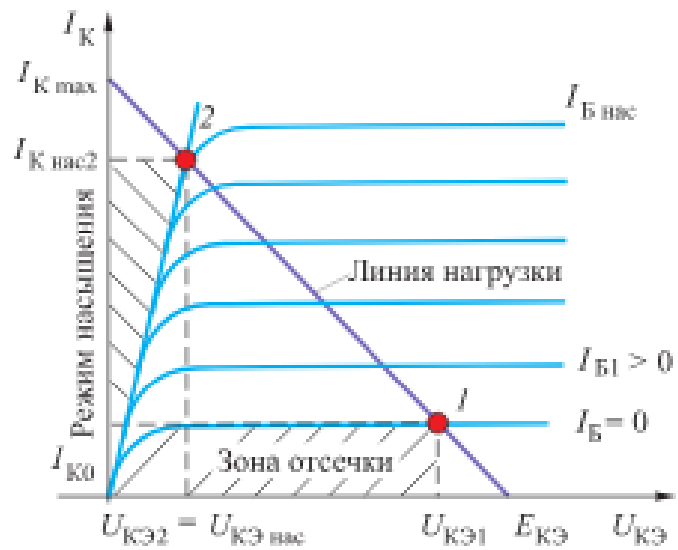
$I_{Э}$ — ток эмиттера; $I_{К}$ — ток коллектора; $I_{Б}$ — ток базы; E_1 и E_2 — источники напряжений во входной и выходной цепях соответственно; U_{max} — выходное напряжение на нагрузке; $R_{К}$ — сопротивление коллектора

Соединим концы этих отрезков прямой линией, которая называется линией нагрузки и описывается уравнением

$$I_{К} = \frac{E_{К} - U_{КЭ}}{R_{К}}, \quad (1.35)$$

Рис. 1.45. Режимы работы биполярного транзистора:

I_K — ток коллектора; I_B — ток базы; $I_{B\text{нас}}$ — ток базы насыщения; $U_{KЭ}$ — напряжение на коллекторе транзистора; $E_{KЭ}$ — напряжение источника питания в выходной цепи; $I_{K\text{max}}$ — максимальный ток источника коллекторного питания; $I_{K\text{нас2}}$ — максимальное значение тока коллектора; I_{K0} — обратный ток коллекторного перехода; I_{B1} — базовый ток в активном режиме; $U_{KЭ\text{нас}}$ — падение напряжения на открытом транзисторе; $U_{KЭ1}$, $U_{KЭ2}$ — напряжения между коллектором и эмиттером открытого транзистора; 1 — точка, определяемая пересечением линии нагрузки с выходной характеристикой при $I_B = 0$; 2 — точка, определяемая пересечением линии нагрузки с начальным круто возрастающим участком выходных характеристик



где $U_{KЭ}$ — напряжение между коллектором и эмиттером транзистора; R_K — сопротивление нагрузки в коллекторной цепи.

Из (1.35) следует

$$R_K = \frac{E_K}{I_{K\text{max}}} = \text{tg } \alpha. \quad (1.36)$$

Наклон линии нагрузки определяется сопротивлением R_K . На рис. 1.45 видно, что в зависимости от тока базы I_B , протекающего во входной цепи транзистора, рабочая точка транзистора, которая определяет его коллекторный ток и напряжение $U_{KЭ}$, будет перемещаться вдоль линии нагрузки от самого нижнего положения точки 1, определяемой пересечением линии нагрузки с выходной характеристикой при $I_B = 0$, до точки 2, определяемой пересечением линии нагрузки с начальным круто возрастающим участком выходных характеристик.

Область, расположенная между осью абсцисс и начальной выходной характеристикой, соответствующей $I_B = 0$, называется областью отсечки и характеризуется тем, что оба перехода транзистора — эмиттерный и коллекторный — смещены в обратном направлении. Ток коллектора при этом представляет собой обратный ток коллекторного перехода I_{K0} , который очень мал, и поэтому почти все напряжение источника питания E_K падает между эмиттером и коллектором закрытого транзистора:

$$U_{KЭ1} \approx E_K.$$

Падение напряжения на нагрузке U_{R_K} очень мало:

$$U_{R_K} = I_{K0} R_K \quad (1.37)$$

В этом случае транзистор работает в *режиме отсечки*. Поскольку в этом режиме ток, протекающий по нагрузке, исчезающе мал, а почти все напряжение источника питания приложено к закрытому транзистору, то в этом режиме транзистор можно представить в виде разомкнутого ключа.

Если теперь увеличивать ток базы I_B , то рабочая точка будет перемещаться вдоль линии нагрузки, пока не достигнет точки 2 (см. рис. 1.45). Базовый ток, соответствующий характеристике, проходящей через точку 2, называется *током базы насыщения* $I_{B\text{нас}}$. При этом транзистор входит в *режим насыщения* и дальнейшее увеличение базового тока не приведет к увеличению коллекторного тока I_K . Область между осью ординат и круто изменяющимся участком выходных характеристик называется *областью насыщения*. В этом случае оба перехода транзистора смещены в прямом направлении, ток коллектора достигает максимального значения и почти равен максимальному току источника коллекторного питания:

$$I_{K\text{max}} \approx I_{K\text{нас2}}, \quad (1.38)$$

а напряжение между коллектором и эмиттером открытого транзистора $U_{КЭ0}$ оказывается очень маленьким. Поэтому в режиме насыщения транзистор можно представить в виде замкнутого ключа.

Промежуточное положение рабочей точки между областью отсечки и областью насыщения определяет работу транзистора в *режиме усиления*, а область, где она находится, называется *активной областью*. При работе в этой области эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный — в обратном.

1.4.7. Предельные режимы работы биполярного транзистора

В паспортных данных каждого транзистора указывается его предельно допустимая мощность рассеяния

$$P_{\text{доп}} = U_{КЭ} I_{K\text{доп}}, \quad (1.39)$$

превышение которой недопустимо, так как ведет к тепловому разрушению полупроводниковой структуры.

Будем задавать дискретные значения напряжения $U_{КЭ}$: $U_{КЭ1}$, $U_{КЭ2}$ и т. д. Для каждого из этих значений напряжения вычислим предельно допустимые

значения тока коллектора $I_{K\text{доп}}$: $I_{K\text{доп1}} = \frac{P_{\text{доп}}}{U_{КЭ1}}$; $I_{K\text{доп2}} = \frac{P_{\text{доп}}}{U_{КЭ2}}$ и т. д.

Отложим эти значения напряжений и токов в осях координат (рис. 1.46) и построим по полученным точкам 1–4 кривую, называемую гиперболой допустимых мощностей $P_{K\text{доп}}$.

Эта кривая делит всю площадь первого квадранта семейства выходных характеристик на рабочую и нерабочую области. При совмещении этой кри-

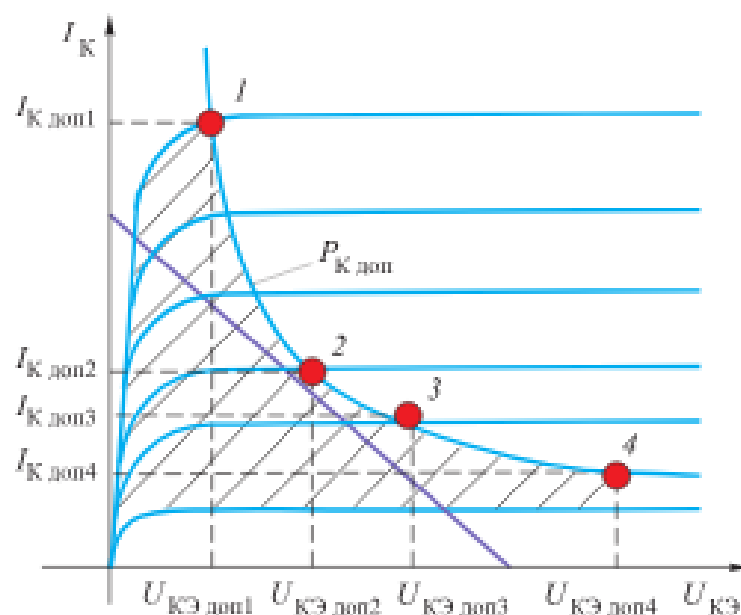


Рис. 1.46. Гипербола допустимых мощностей $P_{K \text{ доп}}$

I_K — ток коллектора; $U_{КЭ}$ — напряжение на коллекторе транзистора; $I_{K \text{ доп}1} - I_{K \text{ доп}4}$ — вычисленные предельно допустимые значения тока коллектора; $U_{КЭ \text{ доп}1} - U_{КЭ \text{ доп}4}$ — задаваемые дискретные значения напряжения; 1–4 — точки, образующие кривую допустимых мощностей

вой с выходными характеристиками транзистора линия нагрузки не должна выходить за пределы рабочей области, чтобы не вывести транзистор из строя.

На рис. 1.46 заштрихована рабочая область семейства выходных характеристик транзистора для схемы с ОЭ.

1.4.8. Расчет усилительного режима работы биполярного транзистора

В подавляющем большинстве случаев транзистор усиливает сигналы переменного тока, т. е. на вход транзистора чаще всего подается знакопеременный сигнал. Но поскольку эмиттерный $p-n$ -переход обладает вентильными свойствами, то через него пройдет только положительная полуволна входного сигнала, а отрицательная полуволна будет им срезана и, следовательно, усиливаться не будет. Для усиления сигнала во входную цепь транзистора вводят смещение усиливаемого сигнала (рис. 1.47).

Знакопеременный входной сигнал $U_{\text{вх}}$ накладывается на постоянное напряжение смещения $E_{\text{см}}$ таким образом, что результирующее напряжение $U_{БЭ}$ остается однополярным и, следовательно, может быть усилено транзистором. Поэтому принципиальная схема усилительного каскада в этом случае выглядит так, как показано на рис. 1.48, а.

Источник напряжения смещения создает во входной цепи транзистора постоянный ток смещения $I_{\text{см}}$. Для того чтобы исключить влияние источника

1.5. Полевые транзисторы

Полевой транзистор — это полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем. Полевые транзисторы иначе называют *униполярными*, поскольку в создании электрического тока в отличие от биполярных транзисторов участвуют только основные носители заряда. В англоязычной литературе эти транзисторы называют транзисторами типа FET (Field Effect Transistor).

Полевые транзисторы подразделяют на два вида:

- 1) с управляющим p — n -переходом;
- 2) с изолированным затвором.

Конструктивно полевые транзисторы оформляются в металлических, пластмассовых или керамических корпусах, их конструкции практически не отличаются от конструкций биполярных транзисторов.

1.5.1. Полевой транзистор с управляющим p — n -переходом

Полевой транзистор с управляющим p — n -переходом — это полевой транзистор, в котором управление потоком основных носителей происходит с помощью выпрямляющего электрического перехода, смещенного в обратном направлении.

Рассмотрим принцип действия полевого транзистора, упрощенная структура которого приведена на рис. 1.51.

Он представляет собой монокристалл полупроводника n -типа; по его

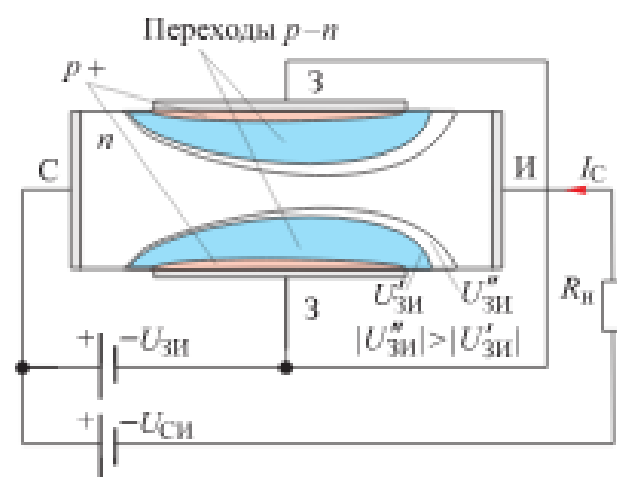


Рис. 1.51. Упрощенная структура полевого транзистора с управляющим p — n -переходом: С — сток; И — исток; З — затвор; R_n — сопротивление нагрузки; $U_{зи}$ — напряжение затвор—исток; $U_{си}$ — напряжение сток—исток; I_c — ток стока; $U_{зи}'$, $U_{зи}''$ — значения напряжения $U_{зи}$, где $|U_{зи}''| > |U_{зи}'|$

торцам методом напыления сформированы электроды, а посередине, с двух сторон, созданы две области противоположного типа проводимости и тоже с электрическими выводами от этих областей.

На границе раздела областей различного типа проводимости возникнет p — n -переход. Электрические выводы от торцевых поверхностей полупроводника называют *истоком* (И) и *стоком* (С), а вывод от боковой поверхности противоположного типа проводимости — *затвором* (З).

Подключим внешние источники $U_{зи}$ и $U_{си}$ так, чтобы источник $U_{зи}$ входного сигнала смещал p — n -переход в обратном направлении, а в цепь источника $U_{си}$ введем сопротивление

нагрузки R_H . Под действием напряжения этого источника между торцевыми поверхностями полупроводника потечет ток основных носителей заряда и возникнет токопроводящий канал.

Площадь поперечного сечения этого канала, а следовательно, и его сопротивление зависят от ширины p — n -перехода.

Изменяя напряжение источника $U_{ЗИ}$, меняем обратное напряжение на p — n -переходе, а значит, и его ширину. При возрастании этого напряжения ширина p — n -перехода увеличивается, а поперечное сечение канала между истоком и стоком уменьшается. Можно подобрать такое напряжение на затворе, при котором p — n -переход полностью перекроет канал и ток в цепи нагрузки прекратится. Это напряжение называют *напряжением отсечки*. Таким образом, в цепи мощного источника $U_{СИ}$ протекает ток стока I_C , который зависит от управляющего сигнала — напряжения источника $U_{ЗИ}$ и повторяет все изменения этого сигнала. Падение напряжения на сопротивлении нагрузки при протекании тока стока I_C является выходным сигналом, мощность которого значительно больше мощности, затраченной во входной цепи.

Принципиальное отличие полевого транзистора от биполярного заключается в том, что источник входного сигнала подключен к p — n -переходу в обратном, запирающем направлении, и, следовательно, входное сопротивление здесь очень большое, а потребляемый от источника входного сигнала ток очень маленький. В биполярном транзисторе управление осуществляется входным током, а в полевом транзисторе — входным напряжением. Поскольку потенциал от истока к стоку возрастает, то соответственно увеличивается и обратное напряжение на p — n -переходе, а следовательно, и его ширина. Так же как и биполярные транзисторы, полевые транзисторы могут быть разных типов. В рассматриваемом случае это полевой транзистор с каналом n -типа. На принципиальных схемах полевые транзисторы с управляющим p — n -переходом обозначаются, как показано на рис. 1.52.

Если полевой транзистор усиливает сигнал переменного тока, то в цепь затвора необходимо вводить смещение достаточной величины, чтобы суммарное напряжение на p — n -переходе не изменяло свой знак на положительный, поскольку p — n -переход в таком полевом транзисторе должен быть всегда смещен в обратном направлении. Тогда электрическое поле p — n -перехода, поперечное по отношению к каналу, будет изменяться в точном соответствии с изменением входного сигнала, расширяя и сужая канал. В цепи стока появляется переменная составляющая тока, которая и будет представлять собой усиленный входной сигнал.

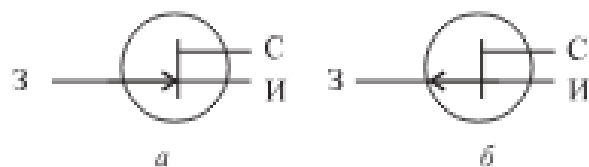


Рис. 1.52. Условные графические обозначения полевого транзистора с каналом n -типа (а) и p -типа (б):

С — сток; И — исток; З — затвор

1.5.2. Схемы включения полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом

Полевые транзисторы могут иметь три схемы включения: с общим истоком, с общим стоком и с общим затвором. Схема включения определяется тем, какой из трех электродов транзистора является общим для входной и выходной цепи. Наиболее распространенной схемой включения полевых транзисторов является схема с *общим истоком* (рис. 1.53, *а*).

Схема с *общим затвором* (рис. 1.53, *б*) аналогична схеме с ОБ у биполярных транзисторов. Она не дает усиления по току, а входное сопротивление в этой схеме маленькое, так как входным током является ток стока, вследствие чего данная схема на практике не используется.

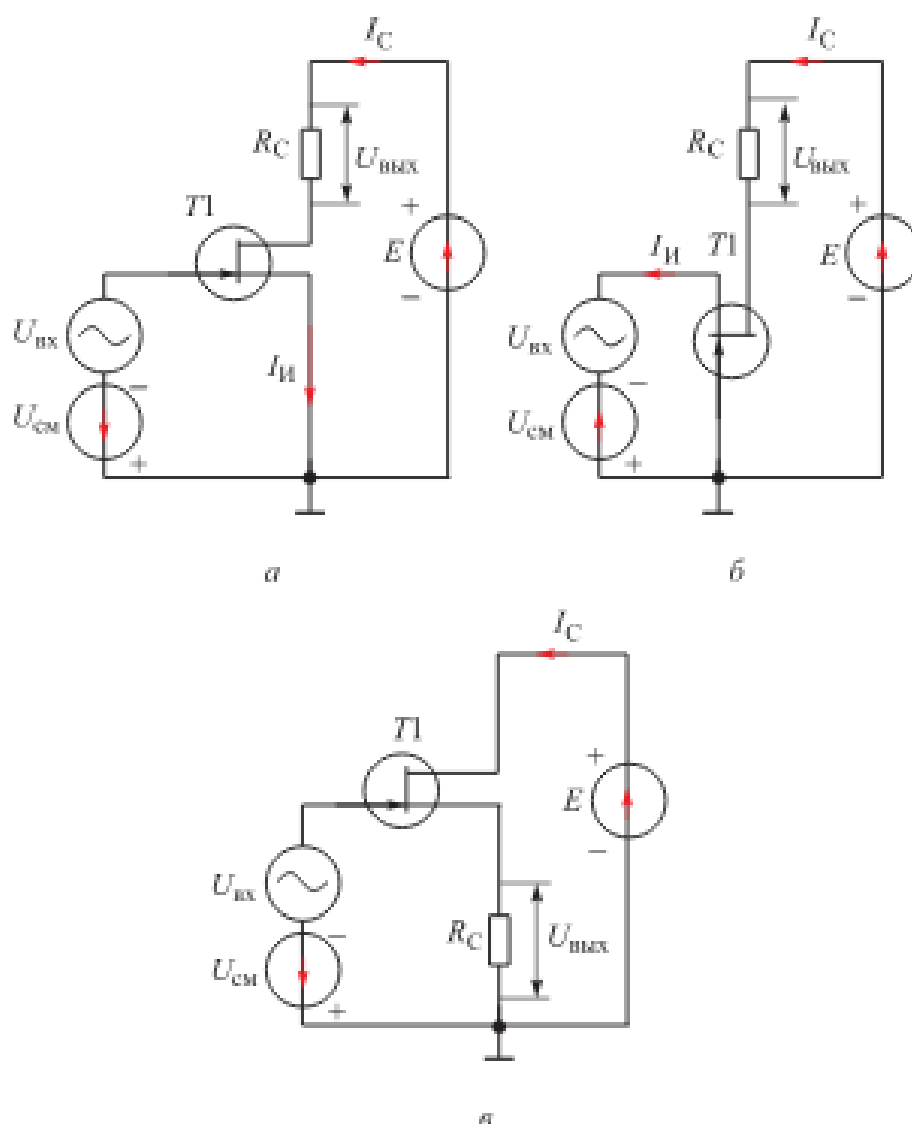


Рис. 1.53. Схемы включения полевого транзистора:

а — с общим истоком; *б* — с общим затвором; *в* — с общим стоком; R_C — сопротивление стока; $T1$ — полевой транзистор; E — напряжение источника питания; I_C — ток стока; I_H — ток истока; $U_{см}$ — источник напряжения смещения; $U_{вых}$ — выходное напряжение; $U_{вх}$ — переменное напряжение входного сигнала

Схема с общим стоком (рис. 1.53, в) подобна схеме эмиттерного повторителя на биполярном транзисторе, и ее называют *истоковым повторителем*. Для данной схемы коэффициент усиления по напряжению близок к единице. Выходное напряжение по амплитуде и фазе повторяет входное. В этой схеме очень высокое входное сопротивление и малое выходное.

1.5.3. Статические характеристики полевых транзисторов

Статическими характеристиками полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом являются управляющие (стокозатворные) и выходные (стоковые) характеристики. Очень малый входной ток (практически его отсутствие) в полевом транзисторе исключает наличие входных характеристик и характеристик обратного действия.

Стокозатворные характеристики (рис. 1.54, а) показывают управляющее действие затвора и представляют собой зависимость тока стока от напряжения на затворе при постоянстве напряжения стока:

$$I_C = f(U_{ЗИ})|_{U_{СИ} = \text{const} > U_{СИ\text{нас}}}. \quad (1.47)$$

Стоковые характеристики (рис. 1.54, б) представляют собой зависимость тока стока от напряжения стока при неизменном напряжении на затворе:

$$I_C = f(U_{СИ})|_{U_{ЗИ} = \text{const}}. \quad (1.48)$$

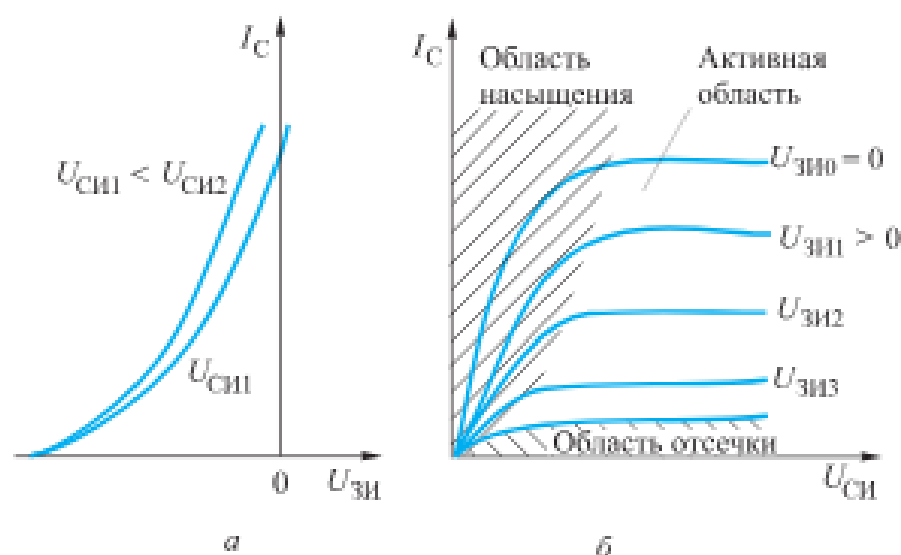


Рис. 1.54. Статические характеристики полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом с каналом n -типа:

а — при постоянном напряжении стока; б — при постоянном напряжении на затворе; $I_C = f(U_{ЗИ})$ — управляющая (стокозатворная); $I_C = f(U_{СИ})$ — выходная (стоковая); $U_{СИ}$, $U_{СИ1}$, $U_{СИ2}$ — значения напряжения сток—исток; $U_{ЗИ0}$, $U_{ЗИ1}$, $U_{ЗИ2}$ — значения напряжений на затворе

С увеличением U_C ток сначала увеличивается довольно быстро, но затем его рост замедляется и наступает явление, напоминающее насыщение. Это объясняется тем, что с повышением U_C возрастает обратное напряжение на $p-n$ -переходе и, как следствие, увеличивается ширина запирающего слоя, а ширина канала соответственно уменьшается. Это приводит к увеличению его сопротивления и уменьшению тока стока I_C . В результате ток остается почти неизменным. Чем большее запирающее напряжение $U_{ЗИ}$ подается на затвор, тем ниже идет выходная характеристика $I_C(U_{СИ})$. Повышение напряжения стока в результате может привести к электрическому пробоем $p-n$ -перехода, и ток стока начнет лавинообразно нарастать. Напряжение пробоя является одним из предельных параметров полевого транзистора.

При некотором напряжении на стоке $U_{СИ\text{нас}}$, напряжении насыщения, происходит перекрытие канала из-за увеличения толщины $p-n$ -перехода затвора. Область работы при напряжениях, меньших $U_{СИ} < U_{СИ\text{нас}}$, называют областью насыщения (или областью линейного сопротивления) полевого транзистора. При дальнейшем увеличении напряжения $U_{СИ}$ ток стока почти не растет, что соответствует области активной работы (режиму усиления) транзистора.

Напряжение между затвором и истоком полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом, при котором ток стока достигает заданного низкого значения (область отсечки), называют напряжением отсечки ($U_{ЗИ\text{отс}}$), а режим работы транзистора — режимом отсечки.

Полевой транзистор, как и биполярный, может работать в инверсном режиме. При этом роль истока играет сток, а роль стока — исток.

1.5.4. Основные параметры полевых транзисторов

Крутизна стокзатворной характеристики определяет управляющее действие затвора:

$$S = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = \text{const}}, \quad (1.49)$$

где ΔI_C — приращение тока стока; $\Delta U_{ЗИ}$ — приращение напряжения на затворе.

Внутреннее (выходное) сопротивление

$$R_I = \left. \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta I_C} \right|_{U_{ЗИ} = \text{const}}, \quad (1.50)$$

где $\Delta U_{СИ}$ — приращение напряжения стока; ΔI_C — приращение тока стока.

Параметр R_i представляет собой сопротивление транзистора между стоком и истоком (сопротивление канала) для переменного тока. На пологих участках выходных характеристик значение R_i достигает сотен килоом и оказывается во много раз больше сопротивления транзистора по постоянному току R_0 .

Коэффициент усиления

$$\mu = - \left. \frac{\Delta U_{\text{СИ}}}{\Delta U_{\text{ЗИ}}} \right|_{I_{\text{С}} = \text{const}}. \quad (1.51)$$

Коэффициент усиления показывает, во сколько раз сильнее действует на ток стока изменение напряжения затвора, чем изменение напряжения стока, т. е. выражается отношением таких изменений $\Delta U_{\text{СИ}}$ и $\Delta U_{\text{ЗИ}}$, которые компенсируют друг друга, в результате чего ток остается постоянным. Для подобной компенсации величины $\Delta U_{\text{СИ}}$ и $\Delta U_{\text{ЗИ}}$ должны иметь разные знаки, что определяет наличие знака «—» в правой части выражения (1.51).

Параметры μ , S , R_i связаны между собой следующей зависимостью:

$$\mu = SR_i. \quad (1.52)$$

Входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = \left. \frac{\Delta U_{\text{ЗИ}}}{\Delta I_{\text{З}}} \right|_{U_{\text{СИ}} = \text{const}}, \quad (1.53)$$

где $\Delta U_{\text{ЗИ}}$ — приращение напряжения на затворе; $\Delta I_{\text{С}}$ — приращение тока стока.

Поскольку током затвора является обратный ток p — n -перехода, который очень мал, то входное сопротивление оказывается очень большим, что является основным преимуществом полевого транзистора.

Входная емкость между затвором и истоком $C_{\text{ЗИ}}$, которая является барьерной емкостью p — n -перехода, может составлять единицы — десятки пикофард в зависимости от способа изготовления полевого транзистора.

В полевом транзисторе в отличие от биполярного отсутствуют инжекция неосновных носителей и их перемещение по каналу, что влияет на динамические свойства транзистора. Инерционность полевого транзистора определяется в основном процессами перезаряда барьерной емкости p — n -перехода. Свое влияние оказывают также паразитные емкости между выводами и паразитные индуктивности выводов.

В справочных данных часто указывают значения следующих дифференциальных емкостей:

- входная емкость $C_{\text{ЗИ}}$ (емкость между затвором и истоком при коротком замыкании по переменному току выходной цепи);
- проходная емкость $C_{\text{ЗС}}$ (емкость между затвором и стоком при разомкнутой по переменному току входной цепи);
- выходная емкость $C_{\text{ИС}}$ (емкость между истоком и стоком при коротком замыкании по переменному току входной цепи).

1.5.6. Полевые транзисторы с изолированным затвором

Дальнейшим развитием полевых транзисторов являются транзисторы с *изолированным затвором*. У них металлический затвор отделен от полупроводникового канала тонким слоем диэлектрика. В результате этого входное сопротивление таких транзисторов велико (для современных транзисторов достигает 10^{17} Ом).

Полевые транзисторы с изолированным затвором бывают двух типов:

- 1) со встроенным (собственным) каналом;
- 2) с индуцированным (инверсионным) каналом.

Структура в обоих типах полевых транзисторов с изолированным затвором одинакова: металл — оксид (диэлектрик) — полупроводник. Такие транзисторы еще называют МОП-транзисторами (металл — оксид — полупроводник) или МДП-транзисторами (металл — диэлектрик — полупроводник).

В последнее время МДП-транзисторы все чаще обозначают термином MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), заимствованным из зарубежной литературы.

1.5.7. Полевой транзистор с изолированным затвором и встроенным каналом

Структура полевого транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом *n*-типа показана на рис. 1.58. На рис. 1.59 приведены условные графические обозначения полевых транзисторов со встроенным каналом. Он

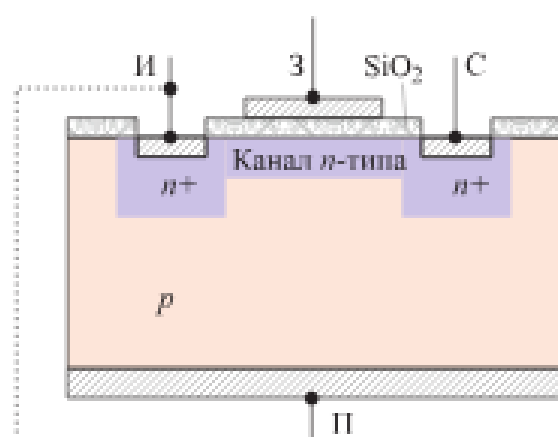


Рис. 1.58. Структура МДП-транзистора с изолированным затвором и встроенным каналом *n*-типа:

И — исток; С — сток; З — затвор; П — подложка; *n* + — сильнолегированная область с электронной проводимостью; *p* — область с дырочной проводимостью; SiO₂ — диоксид кремния (материал подложки)

представляет собой монокристалл полупроводника, обычно кремния, где создана проводимость какого-либо типа, в рассматриваемом случае *p*-типа. В нем созданы две сильнолегированные области с проводимостью типа *n* +, которые соединены между собой тонким приповерхностным слоем проводимости *n*. От этих областей сформированы электрические выводы, которые называют истоком и стоком. На поверхности канала имеется слой диэлектрика (обычно диоксида кремния SiO₂) толщиной порядка 0,1 мкм, а на него методом напыления наносится тонкая металлическая пленка, от которой также выполняется электрический вывод — затвор. Иногда от основания (называемого *подложкой*) также делается вывод, который накоротко соединяют с истоком.

Если при отсутствии напряжения на затворе приложить между истоком и стоком напряжение $U_{СИ}$ любой полярности, то через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. Через подложку ток не потечет, так как один из $p-n$ -переходов будет находиться под действием обратного напряжения.

При подаче на затвор отрицательно-го напряжения относительно истока, а следовательно, и кристалла в канале возникает поперечное электрическое поле, которое будет выталкивать электроны из области канала в основание транзистора (область p). Канал обедняется основными носителями — электронами, его сопротивление увеличивается, и ток стока уменьшается. Чем больше отрицательное напряжение на затворе, тем меньше этот ток. Такой режим называется *режимом обеднения*.

При подаче на затвор положительного напряжения относительно истока направление поперечного электрического поля изменится на противоположное и будет, наоборот, притягивать электроны из областей истока и стока, а также из кристалла полупроводника. Проводимость канала увеличивается, и ток стока возрастает. Такой режим называется *режимом обогащения*.

Рассмотренный МДП-транзистор с изолированным затвором и встроенным каналом n -типа может работать как в режиме обеднения, так и режиме обогащения токопроводящего канала, что иллюстрируют его статические характеристики (рис. 1.60).

Выходные характеристики МДП-транзистора подобны выходным характеристикам полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом. Это объ-

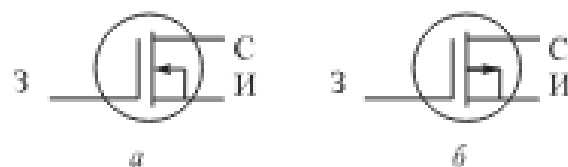


Рис. 1.59. Условные графические обозначения МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа (а) и p -типа (б):

И — исток; С — сток; 3 — затвор

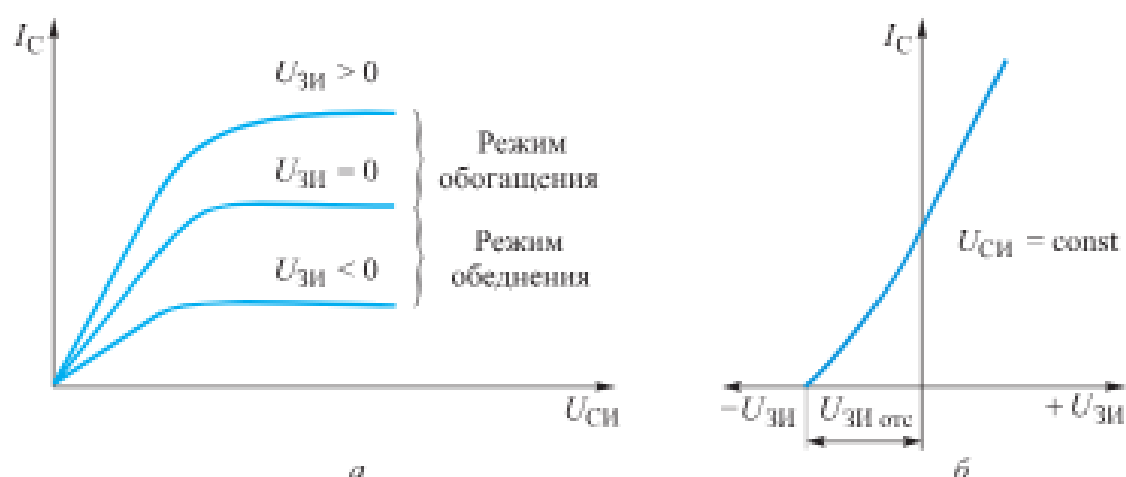


Рис. 1.60. Статические характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа:

а — $I_C = f(U_{СИ})$ — выходная; б — $I_C = f(U_{ЗИ})$ — управляющая; $U_{ЗИ\text{отс}}$ — напряжение отсечки между затвором и истоком

ясняется тем, что при увеличении напряжения $U_{СИ}$ от нуля сначала действует закон Ома и ток растет практически прямо пропорционально напряжению, а затем при некотором напряжении $U_{СИ}$ канал начинает сужаться в большей мере возле стока, так как на p — n -переходе между каналом и кристаллом увеличивается обратное напряжение, область этого перехода, обедненная носителями, расширяется и сопротивление канала растет. В результате ток стока остается практически постоянным до такого напряжения $U_{СИ}$, при котором наступает электрический пробой.

Если кристалл полупроводника полевого транзистора имеет проводимость n -типа, токопроводящий канал должен быть p -типа. При этом полярность напряжений необходимо изменить на противоположную.

1.5.8. Транзистор с индуцированным каналом

Структура МДП-транзистора с индуцированным (инверсионным) каналом приведена на рис. 1.61. Условные графические обозначения полевых транзисторов с изолированным затвором показаны на рис. 1.62.

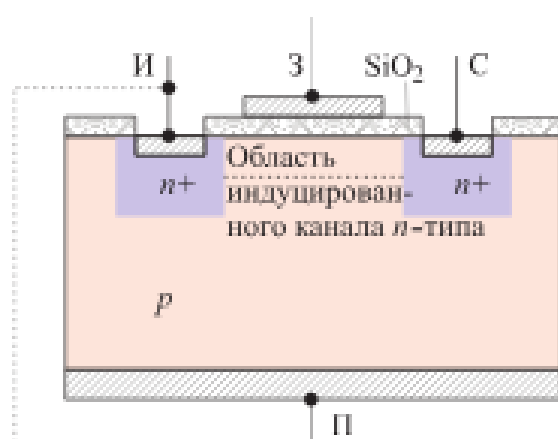


Рис. 1.61. Структура МДП-транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом n -типа:

И — исток; С — сток; З — затвор; П — подложка; $n+$ — сильнолегированная область с электронной проводимостью; p — область с дырочной проводимостью; SiO_2 — диоксид кремния (материал подложки)

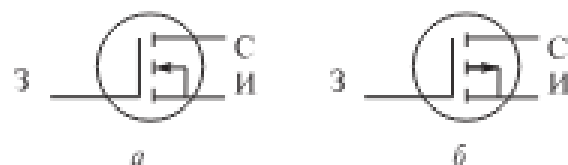


Рис. 1.62. Условные графические обозначения МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа (а) и p -типа (б):

И — исток; С — сток; З — затвор

В этом транзисторе нет встроенного канала между областями истока и стока. При отсутствии напряжения на затворе ток между истоком и стоком не потечет ни при какой полярности напряжения, так как один из p — n -переходов будет обязательно заперт.

Если подать на затвор напряжение положительной полярности относительно истока, то под действием возникающего поперечного электрического поля электроны из областей истока и стока, а также из областей кристалла будут перемещаться в приповерхностную область по направлению к затвору. Когда напряжение на затворе превысит некоторое пороговое значение, то в приповерхностном слое концентрация электронов увеличится настолько, что превысит концентрацию дырок в этой области и здесь произойдет инверсия типа проводимости, т. е. образуется тонкий канал n -типа и в цепи стока появится ток. Чем выше положительное напряжение на затворе, тем больше проводимость канала и ток стока.

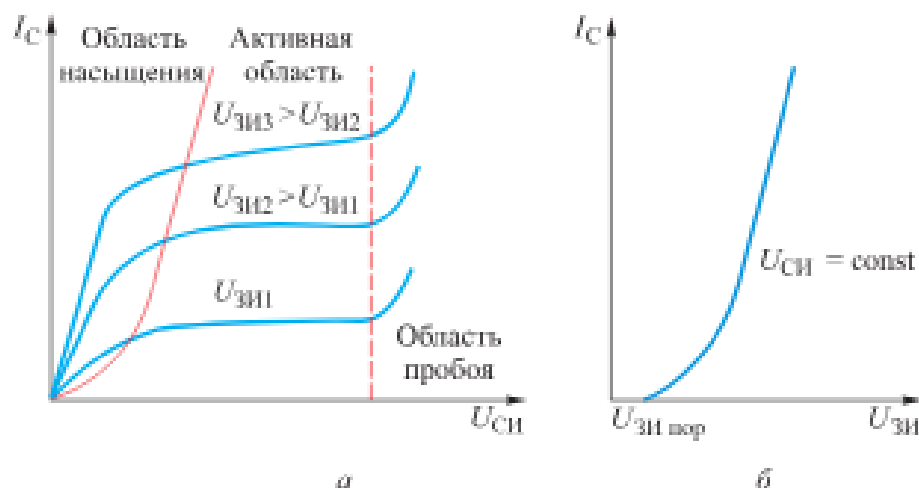


Рис. 1.63. Статические характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом *n*-типа:

a — $I_C = f(U_{CН})$ — выходная; *б* — $I_C = f(U_{3Н})$ — управляющая; $U_{3Н1} - U_{3Н3}$ — значения напряжения между затвором и истоком; $U_{3Нпер}$ — пороговое напряжение между затвором и истоком

Такой транзистор может работать только в *режиме обогащения*. Его статические характеристики показаны на рис. 1.63.

Если кристалл полупроводника имеет проводимость *n*-типа, то области истока и стока должны быть *p*-типа. Такого же типа проводимости будет индуцироваться канал, если на затвор подавать отрицательное напряжение относительно истока.

1.5.9. Сравнение МДП-транзистора и биполярного транзистора

МДП- и биполярные транзисторы выполняют одинаковые функции: работают в схеме в качестве линейного усилителя или ключа. В табл. 1.2 приведено краткое обобщающее сравнение транзисторов этих двух типов.

Таблица 1.2

Свойства биполярных и МДП-транзисторов

Биполярные транзисторы	МДП-транзисторы
<i>Физические свойства</i>	
Управляемый физический процесс — инжекция неосновных носителей заряда: при изменении тока управления изменяется поток инжектированных носителей заряда, что приводит к изменению выходного тока	Управляемый физический процесс — эффект поля, вызывающий изменение концентрации носителей заряда в канале: при изменении управляющего напряжения изменяется проводимость канала, что приводит к изменению выходного тока

Биполярные транзисторы	МДП-транзисторы
Выходной ток обеспечивается носителями заряда обоих знаков (дырками и электронами)	Выходной ток обеспечивается основными носителями заряда одного знака (или дырками, или электронами)
Низкая теплоустойчивость: с увеличением тока растет температура структуры, что приводит к большему увеличению тока	Высокая теплоустойчивость: рост температуры структуры приводит к увеличению сопротивления канала, и ток уменьшается
<i>Особенности эксплуатации</i>	
Прибор управляется током, так как на входе имеется прямосмещенный $p-n$ -переход и входное сопротивление мало	Прибор управляется напряжением, входное сопротивление очень велико, так как входная цепь от выходной цепи изолирована диэлектриком
Относительно небольшой коэффициент усиления по току	Очень большой коэффициент усиления по току
Необходимость специальных мер по повышению помехоустойчивости	Высокая помехоустойчивость
Высокая вероятность самонагрева и вторичного пробоя: сужение области безопасной работы	Низкая вероятность теплового самонагрева и вторичного пробоя — расширение области безопасной работы
Высокая чувствительность к токовым перегрузкам	Низкая чувствительность к токовым перегрузкам

В настоящее время полевые транзисторы вытесняют биполярные в ряде областей применения. Это связано с тем, что, во-первых, управляющая цепь полевых транзисторов потребляет ничтожную энергию, поскольку входное сопротивление этих приборов очень велико. Как правило, усиление мощности и тока в МДП-транзисторах намного больше, чем в биполярных. Во-вторых, вследствие того, что управляющая цепь изолирована от выходной цепи, значительно повышаются надежность работы и помехоустойчивость схем на МДП-транзисторах. В-третьих, МДП-транзисторы имеют низкий уровень собственных шумов, что связано с отсутствием инжекции носителей заряда. В-четвертых, полевые транзисторы обладают более высоким быстродействием, так как в них нет инерционных процессов накопления и рассасывания носителей заряда. В результате мощные МДП-транзисторы все больше вытесняют биполярные транзисторы там, где требуются высокое быстродействие и повышенная надежность работы.

Однако МДП-транзисторы имеют и недостатки. Во-первых, вследствие высокого сопротивления канала в открытом состоянии у МДП-транзисторов происходит большее падение напряжения, чем на насыщенном биполярном транзисторе. Во-вторых, МДП-транзисторы имеют существенно меньшее значение предельной температуры структуры, равное 150 °С (для биполярных транзисторов 200 °С).

К числу основных недостатков мощных МДП-транзисторов также следует отнести вредное влияние на его работу ряда паразитных элементов, возникающих в структуре транзистора на стадии его изготовления. Все базовые ячейки мощного МДП-транзистора содержат внутренний *паразитный* биполярный $n-p-n$ -транзистор (рис. 1.64), образованный истоком n^+ (эмиттер), p -областью инверсного канала (база) и эпитаксиальным n -слоем (коллектор). Паразитный транзистор фактически параллельно подключен к рабочему каналу МДП-транзистора.

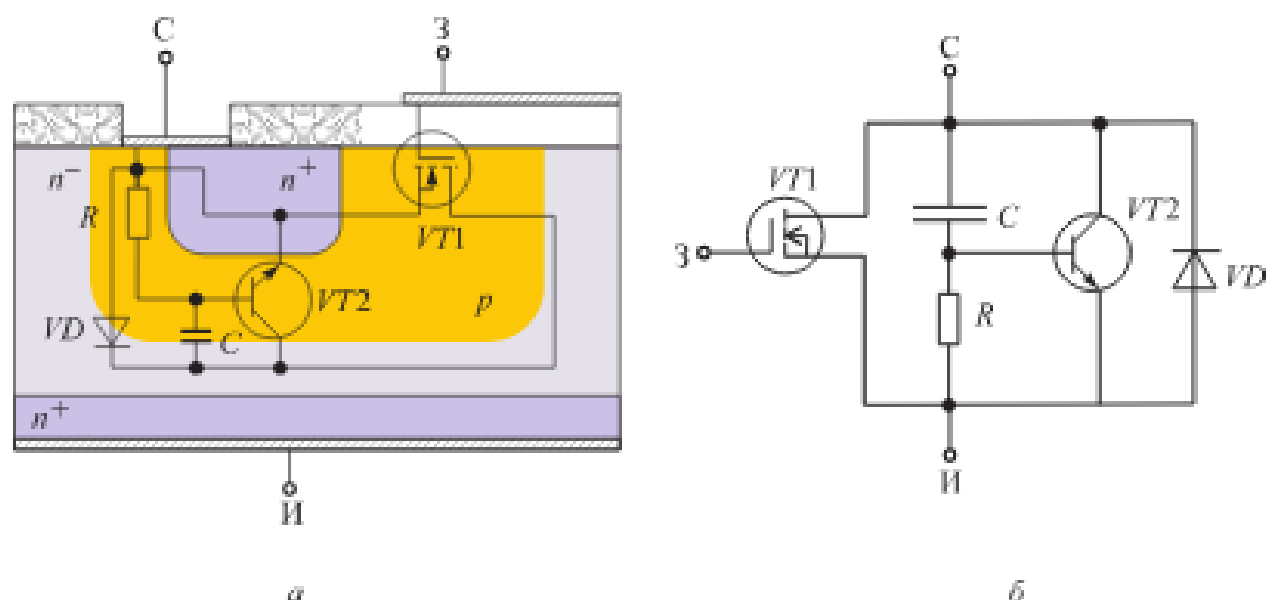


Рис. 1.64. Паразитные элементы структуры мощного МДП-транзистора (а) и эквивалентная схема базовой ячейки (б):

И — исток; С — сток; З — затвор; $VT1$ — транзистор рабочего канала; $VT2$ — паразитный транзистор; VD — паразитный диод; C — паразитная барьерная емкость диода; R — объемное сопротивление структуры полупроводника; n^- — слаболегированная область с электронной проводимостью; n^+ — сильнолегированная область с электронной проводимостью; p — область с дырочной проводимостью

Для сохранения положительных свойств МДП-транзистора и исключения начала работы биполярного транзистора часть p -области всегда подключают к металлизированному контакту истока (это эквивалентно закорачиванию эмиттерного перехода паразитного транзистора). Биполярный транзистор будет запертым и не окажет существенного влияния на работу полевого транзистора. Однако быстрый спад или, наоборот, рост напряжения сток — исток полевого транзистора, что является обычным в динамических режимах, может привести к несанкционированному открытию паразитного транзистора, а это, в свою очередь, может привести к выходу из строя всей силовой схемы.

Подключение p -области транзистора к истоку создает еще один дополнительный элемент — *обратно включенный диод*. Поэтому МДП-транзистор проектируют таким образом, чтобы данный диод соответствовал аналогичным показателям МДП-транзистора и имел малое время восстановления запирающих свойств.