

2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Транзистор – полупроводниковый трехэлектродный (т.е. имеющий 3 вывода – электрода) прибор, предназначенный для преобразования (усиления, генерации, прерывания) электрических сигналов. По структуре и принципу действия различают **биполярные транзисторы (БТ)**, в которых ток переносится носителями заряда обоих типов – основными и неосновными, и **полевые (униполярные) транзисторы (ПТ)**, в которых ток переносится только одним типом носителя, основным для данного полупроводника. Кроме этого, существуют составные транзисторы, сочетающие в себе биполярную и полевую структуру – **биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor)**.

2.1. Основные параметры и характеристики биполярных транзисторов

2.1.1. Устройство и принцип действия биполярного транзистора

Структуры и условные обозначения БТ показаны на рис. 2.1. Средний слой транзистора, слабо легированный носителями, называют базой (Б), один из крайних слоев, сильно легированный носителями, называют эмиттером (Э), другой – коллектором (К). Между эмиттером и базой возникает эмиттерный *p-n*-переход (ЭП), а между коллектором и базой – коллекторный *p-n*-переход (КП).

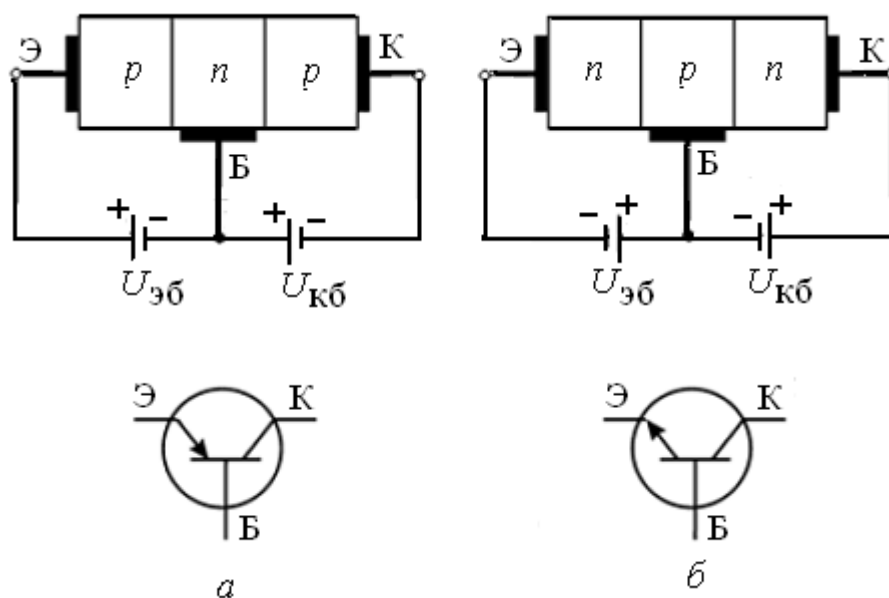


Рис. 2.1. Структуры и обозначения биполярных транзисторов:
a – *p-n-p*-типа; *б* – *n-p-n*-типа

Два *p-n*-перехода образуются в результате чередования областей с разным типом электропроводности. Различают БТ *n-p-n*- и *p-n-p*-типов. Физические процессы, протекающие в *n-p-n*- и *p-n-p*-транзисторах,

аналогичны. Отличие состоит в том, что при одинаковых рабочих режимах напряжение на одноименных электродах имеют противоположную полярность (рис. 2.1).

Вспомним принцип действия БТ. На рис. 2.2 показано движение носителей заряда для транзистора $n-p-n$ -типа. Внешнее напряжение к КП прикладывается в обратном направлении. При этом сопротивление КП очень велико, поскольку проводимость осуществляется только за счет неосновных носителей заряда. Работа БТ основана на изменении сопротивления обратно смещенного КП за счет инжекции носителей заряда из области эмиттера. ЭП смещен в прямом направлении, поэтому основные носители заряда из области эмиттера легко преодолевают $p-n$ -переход и попадают в область базы.

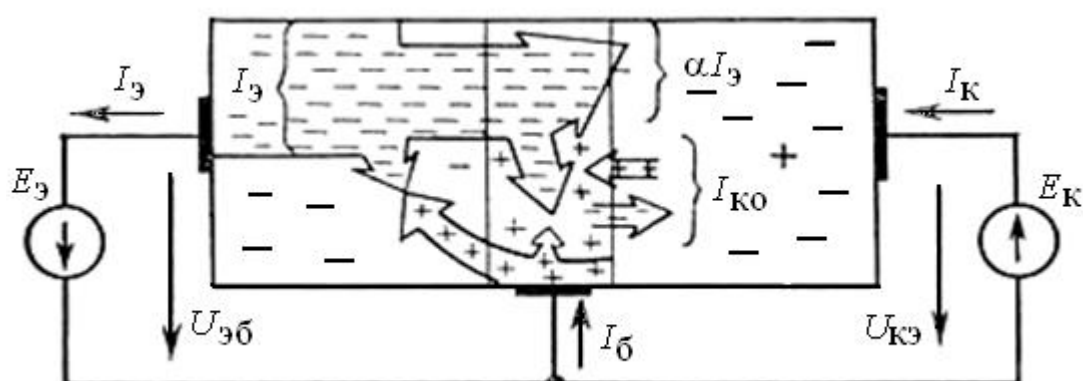


Рис. 2.2. Движение носителей заряда в транзисторе $n-p-n$ -типа

Основные носители эмиттера становятся неосновными для области базы и легко преодолевают коллекторный переход, резко уменьшая его сопротивление (инжекция). Основные носители эмиттера становятся неосновными для области базы и легко преодолевают КП, резко уменьшая его сопротивление (экстракция). В результате коллекторный ток за счет инжекций носителей из эмиттера может возрасти на 4–5 порядков (т.е. в десятки–сотни тысяч раз).

Возникает эмиттерный ток $I_э$, который создается в основном потоком электронов. При этом обратным током дырок из области базы в эмиттер можно пренебречь вследствие малой концентрации дырок в базе. Электроны через ЭП попадают в область базы. В базе часть электронов рекомбинируют с дырками, образуя ток базы $I_б$. Большая часть электронов за счет диффузии и дрейфа достигает коллектора. Для них КП открыт, и создается коллекторный ток $I_к$.

Таким образом, коллекторный ток состоит из двух составляющих: $I_{к0}$ при $I_э = 0$ и $I_к = \alpha \cdot I_э$, где $\alpha = dI_к/dI_э \approx I_к/I_э$ — коэффициент передачи эмиттерного тока при постоянном напряжении «коллектор – база»:

$$I_к = I_{к0} + \alpha I_э. \quad (2.1)$$

В свою очередь, как следует из рис. (2.2)

$$I_э = I_б + I_к. \quad (2.2)$$

Соответственно можно записать связь между коллекторным и базовым токами:

$$I_к = \beta I_б, \quad (2.3)$$

где β – коэффициент передачи базового тока,

$$\beta = \frac{I_к}{I_б} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (2.4)$$

Основные свойства транзистора определяются процессами, происходящими в базе.

Каждый из переходов может быть включен в прямом или обратном направлении, поэтому режим работы транзистора будет зависеть от способа его включения. Различают четыре режима работы транзистора:

- **активный режим** – напряжение на ЭП прямое, а на КП – обратное. Такой режим используется при работе транзистора в усилителях или генераторах

- **режим отсечки** – на обоих переходах обратные напряжения (транзистор заперт). Через транзистор протекает малый тепловой ток коллекторного перехода $I_к = I_{к0}$. Такой режим используется в электронных ключах на транзисторах и соответствует разомкнутому состоянию ключа;

- **режим насыщения** – на обоих переходах прямые напряжения (транзистор открыт). Для осуществления этого режима необходимо подавать ток базы $I_б > I_к/\beta$, т.е. соотношение (2.4) перестает выполняться, при этом через транзистор протекает максимально возможный ток, ограниченный сопротивлением коллекторной цепи – это ток коллектора насыщения $I_{к\text{нас}} = E_к/R_к$. Такой режим используется в электронных ключах на транзисторах и соответствует замкнутому (проводящему) состоянию ключа;

- **инверсный режим** – напряжение на эмиттерном переходе обратное, а на коллекторном – прямое. Инверсное включение применяют в схемах двунаправленных переключателей, использующих симметричные транзисторы, в которых обе крайние области имеют одинаковые свойства. У обычного транзистора при его включении в инверсном режиме усилительные свойства ухудшаются вследствие значительно меньших значений α и β .

2.1.2. Схемы включения биполярного транзистора

В зависимости от того, какой из электродов транзистора является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзисторов: схема с *общим эмиттером* (ОЭ), *общей базой* (ОБ) и *общим коллектором* (ОК). При любой схеме включения транзистора (в активном режиме) полярность включения источников питания должна быть выбрана так, чтобы ЭП был включен в прямом направлении, а КП – в обратном (рис. 2.3).

Схема с общей базой. Для схемы включения с ОБ входными параметрами являются $I_э$, $U_{эб}$; выходными – $I_к$, $U_{кб}$. Коэффициент усиления по переменному току для схемы с ОБ определяется по формуле:

$$K_{i_{об}} = \frac{I_{мк}}{I_{мэ}} = \alpha \Big|_{I_{ко}=\text{const}} \quad (2.5)$$

(где α – коэффициент усиления по току для схемы с ОБ). Обычно $\alpha \approx 0,95–0,998$. Таким образом, **схема с ОБ не обладает усилением по току.**

Коэффициент усиления по напряжению для схемы с ОБ $K_{u_{об}} = \frac{U_{мкб}}{U_{мэб}}$ принимает достаточно большие значения (десятки – сотни).

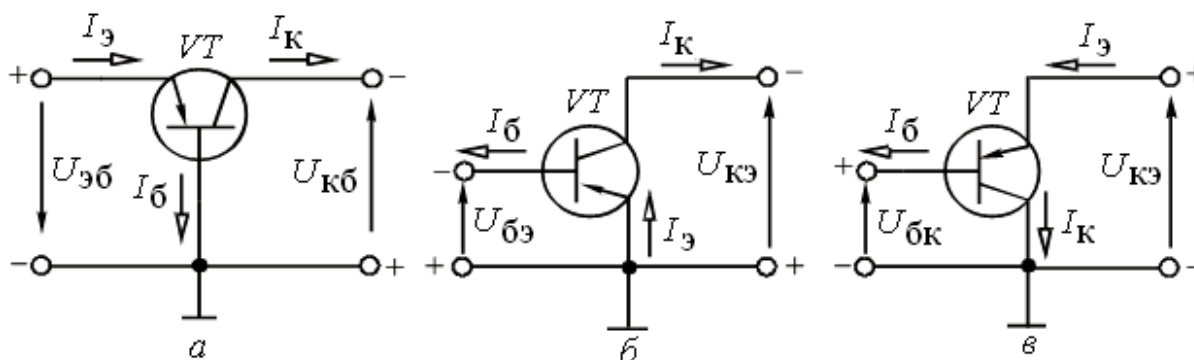


Рис. 2.3. Схемы включения биполярного транзистора $p-n-p$ -типа:
а – ОБ; б – ОЭ; в – ОК

Коэффициент усиления по мощности определяется по формуле:

$$K_{P_{об}} = \frac{P_{в\text{ых}}}{P_{в\text{х}}} = \frac{0,5 \cdot I_{м\text{вых}} \cdot U_{м\text{вых}}}{0,5 \cdot I_{м\text{вх}} \cdot U_{м\text{вх}}} = \frac{I_{мк} \cdot U_{мкэ}}{I_{мб} \cdot U_{мбэ}} = K_{i_{об}} \cdot K_{u_{об}} \quad (2.6)$$

Из выражения (2.6) видно, что схема с ОБ обладает усилением по мощности. **Схема с ОБ усиливает напряжение, мощность, но не усиливает ток.**

В схеме с ОБ фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями отсутствует.

Схема с общим эмиттером. Схема с ОЭ является наиболее распространенной, так как дает наибольшее усиление по мощности.

Входными параметрами являются $I_б$ и $U_{бэ}$, выходными – $I_к$ и $U_{кэ}$.

Коэффициент усиления по току для схемы с ОЭ:

$$K_{i_{оэ}} = \frac{\partial I_{мк}}{\partial I_{мб}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta \Big|_{I_{ко}=\text{const}} \quad (2.7)$$

Так как для транзисторов $\alpha = 0,9 – 0,99$, то коэффициент $\beta = 9 – 99$. Это является важнейшим преимуществом включения транзистора по схеме ОЭ: **схема с ОЭ обладает значительным усилением по току.**

Коэффициент усиления по напряжению для схемы с ОЭ $K_{u_{оэ}} = \frac{U_{мкэ}}{U_{мбэ}}$ приблизительно такой же, как для схемы с ОБ.

Коэффициент усиления по мощности получается очень большим:

$$K_{P_{\text{оэ}}} = K_{i_{\text{оэ}}} \cdot K_{u_{\text{оэ}}}.$$

Схема с ОЭ усиливает и ток, и напряжение, и мощность. Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.

Схема с общим коллектором. Для схемы с ОК входными параметрами являются $I_{\text{б}}, U_{\text{бк}}$; выходными – $I_{\text{э}}, U_{\text{эк}}$.

Коэффициент усиления по току для схемы с ОК определяется по формуле:

$$K_{i_{\text{ок}}} = \frac{\partial I_{\text{э}}}{\partial I_{\text{б}}} = \frac{1}{1 - \alpha} = \beta + 1 = \gamma \gg 1, \quad (2.8)$$

где γ – коэффициент передачи по току для схемы с ОК. Из выражения (2.8) видно, что схема с ОК обладает почти таким же усилением по току, что и схема с ОЭ.

Напряжение на открытом p - n -переходе база–эмиттер мало. Поэтому $U_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}} + U_{\text{вых}} \approx U_{\text{вых}}$, или $U_{\text{бк}} = U_{\text{бэ}} + U_{\text{эк}} \approx U_{\text{эк}}$. Таким образом, **усиления по напряжению в схеме с ОК нет.** Коэффициент усиления по напряжению схемы с ОК приближается к единице, но всегда меньше ее:

$$K_{u_{\text{ок}}} = \frac{U_{m_{\text{вых}}}}{U_{m_{\text{вх}}}} = \frac{U_{m_{\text{кэ}}}}{(U_{m_{\text{бэ}}} + U_{m_{\text{кэ}}})} \approx 1.$$

Коэффициент усиления по мощности схемы с ОК равен

$$K_{P_{\text{ок}}} = K_{i_{\text{ок}}} \cdot K_{u_{\text{ок}}}.$$

Схема с ОК усиливает ток и мощность, но не дает усиления по напряжению.

В схеме ОК фазовый *сдвиг между входным и выходным напряжением отсутствует.* Поскольку коэффициент усиления по напряжению близок к единице, выходное напряжение по фазе и амплитуде совпадает со входным, т.е. повторяет его. Поэтому такая схема называется **эмиттерным повторителем** (эмиттерным – потому, что выходное напряжение снимается с эмиттера относительно общего провода).

Достоинством схемы с ОК является ее большое входное и малое выходное сопротивления. В связи с этим данная схема широко применяется на практике в качестве согласующего устройства.

2.1.3. Статические характеристики биполярных транзисторов

Статические характеристики биполярных транзисторов – это графические зависимости напряжения и тока входной цепи (входные ВАХ) и выходной цепи (выходные ВАХ). Вид характеристик зависит от способа включения транзистора.

На рис. 2.4 приведены графики семейств *входных* $I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}}) \Big|_{U_{\text{вых}} = \text{const}}$ и *выходных* $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}}) \Big|_{I_{\text{вх}} = \text{const}}$ статических ВАХ транзистора, имеющего n - p - n -структуру, для включения с ОЭ.

Входной характеристикой транзистора, включенного по схеме ОЭ, является зависимость $I_{\bar{б}} = f(U_{\bar{бэ}})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ (рис. 2.4, а). Выходные характеристики по виду близки к прямой ветви ВАХ $p-n$ -перехода (диода). Входная характеристика при $U_{кэ} = 0$ соответствует режиму насыщения. Вторая характеристика на рис. 2.4, а ($U_{кэ} > 0$) относится к нормальному активному режиму (на самом деле, уточним, нужно $U_{кэ} > U_{\bar{бэ}}$, т.е. немного больше 1 В, чтобы коллекторный переход оказался смещенным в обратном направлении).

Выходной характеристикой является зависимость $I_{к} = f(U_{кэ})$ при $I_{\bar{б}} = \text{const}$ (рис. 2.4, б).

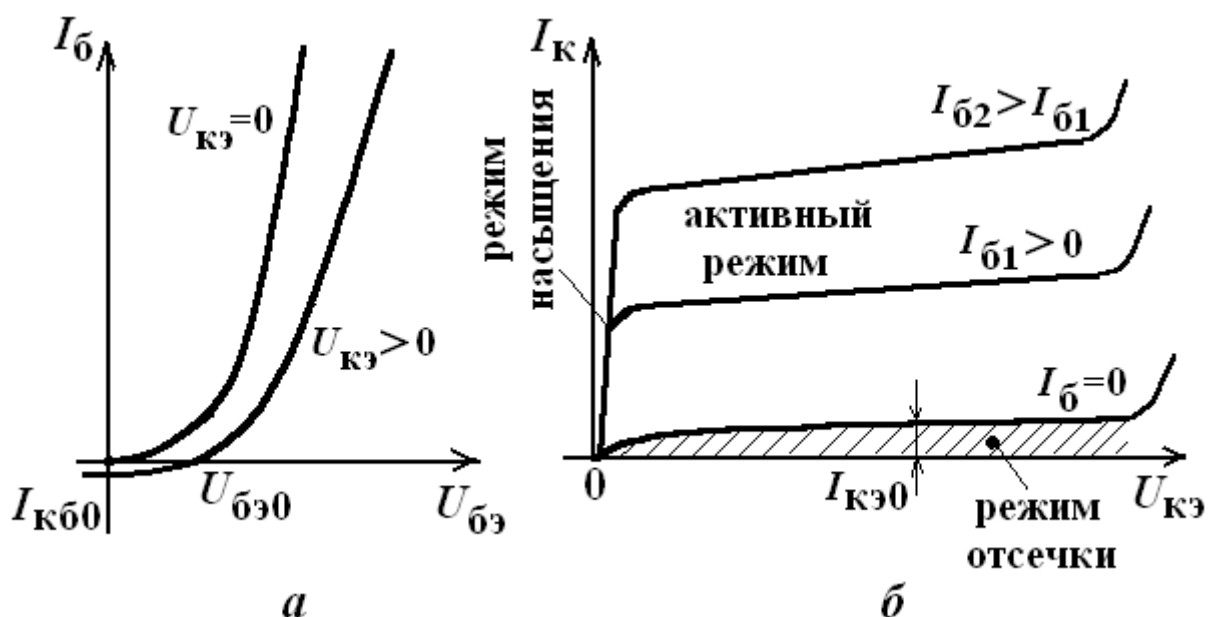


Рис. 2.4. Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме ОЭ: а – входная, б – выходная

Крутые начальные участки характеристик относятся к режиму насыщения, а участки с малым наклоном – к нормальному активному режиму. В режиме насыщения характеристики сливаются в одну линию, т.е. ток коллектора не зависит от тока базы. Выходная характеристика с параметром $I_{\bar{б}} = 0$ принята за границу между активным режимом и режимом отсечки.

2.1.4. h - и y -параметры биполярных транзисторов

При анализе работы усилителя на биполярном транзисторе по переменному току (малосигнальный анализ) транзистор заменяют его малосигнальной моделью, представляющей собой классический четырехполюсник. Наиболее распространены малосигнальные модели в так называемых h - (рис. 2.5, а) и y -параметрах (рис. 2.5, б). При этом h -параметры легче определить, зато y -параметры удобнее использовать.

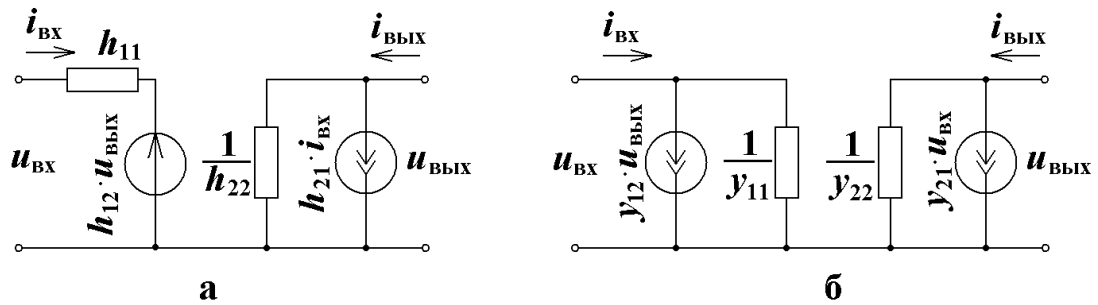
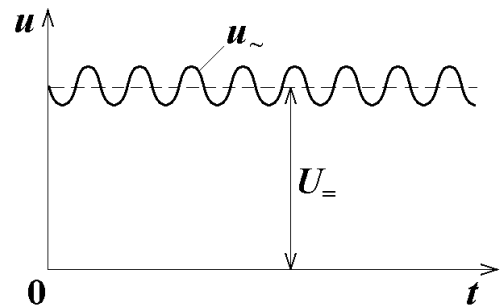


Рис. 2.5. Малосигнальные модели биполярного транзистора: а – модель в h -параметрах; б – модель в y -параметрах

При малосигнальном анализе рассматривается работа транзистора в режиме усиления переменного входного сигнала малой амплитуды, когда абсолютные значения входного тока и входного напряжения транзистора мало изменяются по сравнению с их постоянными составляющими (рис. 2.6). В этом случае транзистор можно описать системой линейных уравнений.

Рис. 2.6. Временная диаграмма напряжения в режиме малого сигнала: $U_{=}$ – постоянная составляющая напряжения; u_{\sim} – переменная составляющая



Для модели в h -параметрах независимыми величинами являются переменные составляющие входного тока $i_{вх}$ и выходного напряжения $u_{вых}$, а зависящими от них величинами – переменные составляющие выходного тока $i_{вых}$ и входного напряжения $u_{вх}$:

$$\begin{cases} u_{вх} = h_{11} i_{вх} + h_{12} u_{вых}; \\ i_{вых} = h_{21} i_{вх} + h_{22} u_{вых}. \end{cases} \quad (2.9)$$

При включении биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером систему (2.9) следует записать в виде

$$\begin{cases} u_{бэ} = h_{11э} i_{бэ} + h_{12э} u_{кэ}; \\ i_{кэ} = h_{21э} i_{бэ} + h_{22э} u_{кэ}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Буква «Э» в индексах h -параметров обозначает схему включения транзистора (при включении транзистора по схеме с общей базой или общим коллектором в обозначениях h -параметров появятся буквы «Б» и «К» соответственно; входными токами и напряжениями, выходными токами и напряжениями будут $i_{э}$, $u_{бэ}$, $i_{кэ}$, $u_{кэ}$ и $i_{бэ}$, $u_{бэ}$, $i_{э}$, $u_{кэ}$ соответственно).

Значения h -параметров можно определить по входным и выходным ВАХ транзистора в окрестностях предварительно найденной точки покоя. Исходя из уравнений (7) параметр $h_{11э}$ должен определяться как

$$h_{11э} = \left. \frac{u_{бэ}}{i_{б}} \right|_{u_{кэ}=0} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{б}} \right|_{U_{кэ}=U_{кэ.п}}, \quad (2.11)$$

где $\Delta U_{бэ}$, $\Delta I_{б}$ – малые изменения абсолютных значений напряжения и тока базы транзистора вблизи точки покоя; $U_{кэ.п}$ – выходное (в данном случае коллекторное) напряжение транзистора в точке покоя.

Поскольку параметр h_{11} определяется как отношение входных напряжения и тока, он должен называться входным сопротивлением транзистора.

Аналогично определяются остальные h -параметры биполярного транзистора:

$$h_{12э} = \left. \frac{u_{бэ}}{u_{кэ}} \right|_{i_{б}=0} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{б}=I_{б.п}}; \quad (2.12)$$

$$h_{21э} = \left. \frac{i_{к}}{i_{б}} \right|_{u_{кэ}=0} = \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}} \right|_{U_{кэ}=U_{кэ.п}}; \quad (2.13)$$

$$h_{22э} = \left. \frac{i_{к}}{u_{кэ}} \right|_{i_{б}=0} = \left. \frac{\Delta I_{к}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_{б}=I_{б.п}}. \quad (2.14)$$

Здесь $I_{б.п}$ – входной ток транзистора (ток базы) в точке покоя; $\Delta U_{кэ}$, $\Delta I_{к}$ – малые изменения абсолютных значений коллекторных напряжения и тока вблизи точки покоя.

Параметры h_{12} , h_{21} , h_{22} называются соответственно коэффициентом обратной связи по напряжению, коэффициентом передачи входного тока и выходной проводимостью транзистора.

Параметры h_{11} и h_{12} определяются по входным ВАХ биполярного транзистора, а h_{21} и h_{22} – по выходным ВАХ. При этом коэффициент обратной связи по напряжению h_{12} обычно настолько мал, что на практике можно считать его равным нулю.

Простые, как было только что показано, в определении, h -параметры, тем не менее, не очень удобно применять при расчетах схемы. Все дело в их «разнородности» – среди них есть и безразмерные коэффициенты (h_{12} , h_{21}), и сопротивление (h_{11}), и проводимость (h_{22}). Поэтому при составлении системы уравнений для транзисторной схемы по методу узловых потенциалов, когда потенциалы узлов схемы связывают друг с другом посредством проводимостей ветвей, удобнее использовать малосигнальную модель биполярного транзистора в y -параметрах (рис. 2.5, б). Эта модель описывается системой уравнений

$$\begin{cases} i_{вх} = y_{11} u_{вх} + y_{12} u_{вых}; \\ i_{вых} = y_{21} u_{вх} + y_{22} u_{вых}. \end{cases} \quad (2.15)$$

При включении транзистора по схеме с общим эмиттером система (2.15) преобразуется к виду

$$\begin{cases} i_{\text{б}} = y_{11\text{э}} u_{\text{бэ}} + y_{12\text{э}} u_{\text{кэ}}; \\ i_{\text{к}} = y_{21\text{э}} u_{\text{бэ}} + y_{22\text{э}} u_{\text{кэ}}. \end{cases} \quad (2.16)$$

Очевидно, что y -параметры, связывающие переменные составляющие напряжений (независимые величины) с переменными составляющими токов (зависимые величины), имеют размерность проводимостей.

Значения y -параметров биполярного транзистора удобнее определять не из вольт-амперных характеристик, а из полученных ранее значений h -параметров:

$$y_{11} = \frac{1}{h_{11}}; \quad y_{12} = -\frac{h_{12}}{h_{11}}; \quad y_{21} = \frac{h_{21}}{h_{11}}; \quad y_{22} = \frac{h_{11} h_{22} - h_{12} h_{21}}{h_{11}}. \quad (2.17)$$

2.1.5. Предельно допустимые параметры транзистора

Предельно допустимые параметры транзистора – это параметры, которые не должны быть превышены при любых условиях эксплуатации и при которых обеспечивается заданная надежность.

Транзистор, как и любой другой электронный прибор, характеризуется рядом эксплуатационных параметров, предельные значения которых указывают на возможности практического применения того или иного транзистора.

К числу таких параметров относятся: *максимально допустимая мощность* $P_{\text{к макс}}$, *рассеиваемая коллектором* (на рис. 2.7 – гипербола допустимой мощности), *максимально допустимый ток коллектора*.

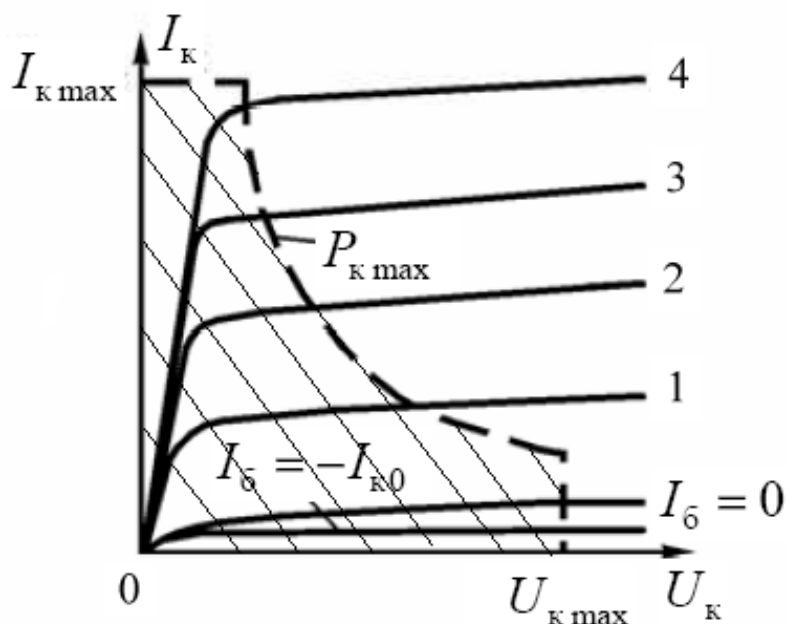


Рис. 2.7. Области допустимых режимов работы транзистора

Транзистор может выйти из строя при превышении тока коллектора свыше определенных пределов ($I_{\text{к макс}}$). *Максимально допустимое напряжение между коллектором и эмиттером* ($U_{\text{кэ макс}}$).

Заштрихованная область, выделенная этими тремя ограничительными линиями (рис. 2.7) является рабочей областью характеристик транзистора.

2.2. Основные параметры и характеристики полевых транзисторов

Полевым транзистором (ПТ) называют полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления мощности электромагнитных колебаний. В ПТ ток канала управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором и истоком.

Каналом называют центральную область транзистора. Электрод, из которого в канал входят основные носители заряда, называют **истоком (И)**, а электрод, через который основные носители уходят из канала – **стоком (С)**. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, называют **затвором (З)**.

Так как в ПТ ток определяется движением носителей только одного знака, раньше их называли *униполярными* транзисторами.

Существует 2 типа полевых транзисторов: ПТ с управляющим *p-n*-переходом и ПТ с изолированным затвором. Последние подразделяются на транзисторы со встроенным (собственным) каналом и с индуцированным (инверсным) каналом. На рис. 2.8 показаны классификация и условные графические обозначения полевых транзисторов с *p*-каналом и *n*-каналом.

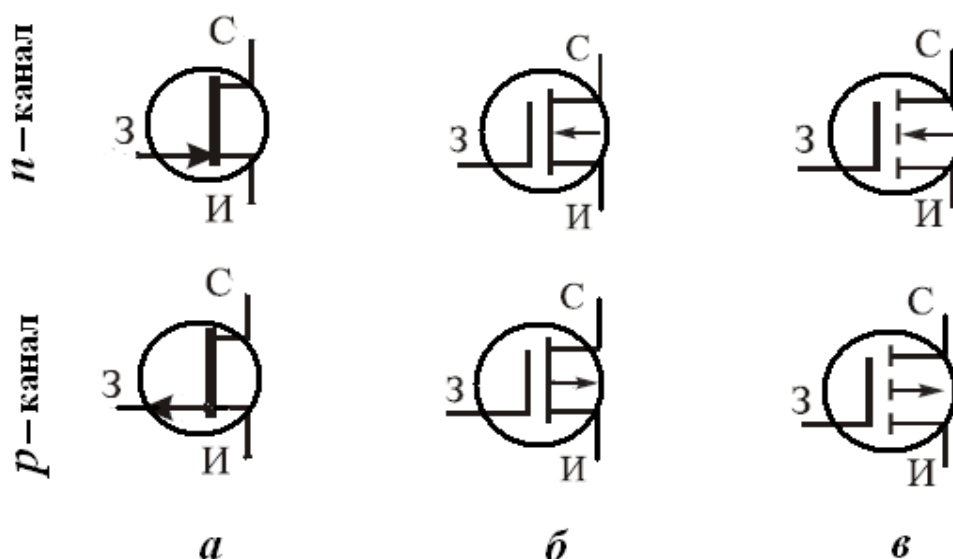


Рис. 2.8. Обозначения ПТ: а – с управляющим *p-n*-переходом; б – с изолированным затвором и встроенным каналом; в – с изолированным затвором и в – индуцированным каналом

Полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом – транзистор, у которого затвор электрически отделен от канала закрытым *p-n*-переходом.

Структурная схема и схема включения полевого транзистора с *n*-каналом и управляющим *p-n*-переходом показаны на рис. 2.9. В транзисторе с *n*-каналом основными носителями заряда в канале являются электроны,

которые движутся вдоль канала от истока с низким потенциалом к стоку с более высоким потенциалом, образуя ток стока I_c .

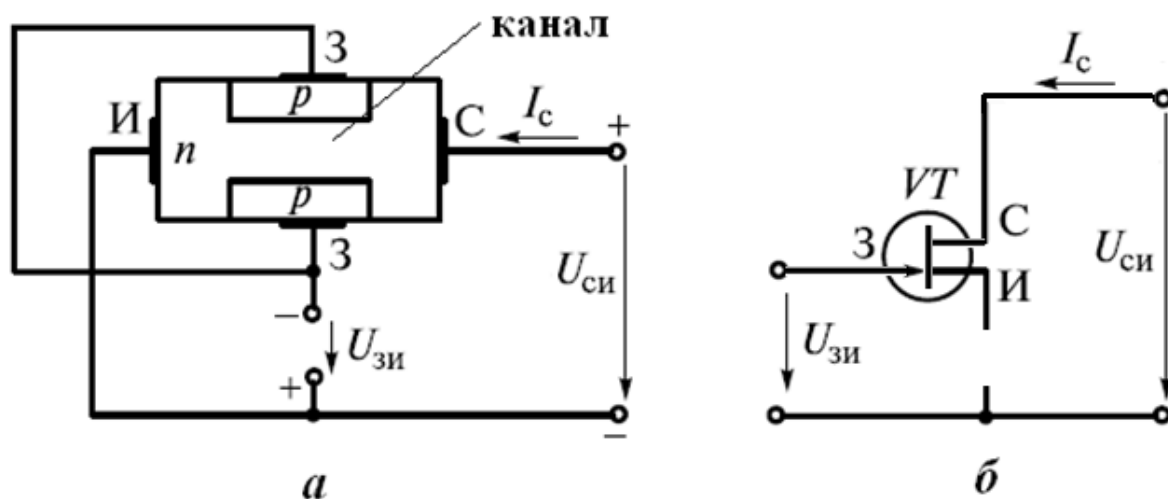


Рис. 2.9. ПТ с управляющим p - n -переходом (с n -каналом): a – структурная схема; $б$ – и схема включения

Между затвором и истоком приложено напряжение, запирающее p - n -переход, образованный n -областью канала и p -областью затвора.

Таким образом, в полевом транзисторе с n -каналом следующие полярности приложенных напряжений: $U_{си} > 0$, $U_{зи} < 0$. В транзисторе с p -каналом основными носителями заряда являются дырки, которые движутся в направлении снижения потенциала, поэтому полярности приложенных напряжений должны быть: $U_{си} < 0$, $U_{зи} > 0$.

Рассмотрим работу ПТ с n -каналом (транзисторы с p -каналом работают аналогично).

На рис. 2.10 показано, как происходит изменение поперечного сечения канала при подаче напряжения на электроды транзистора.

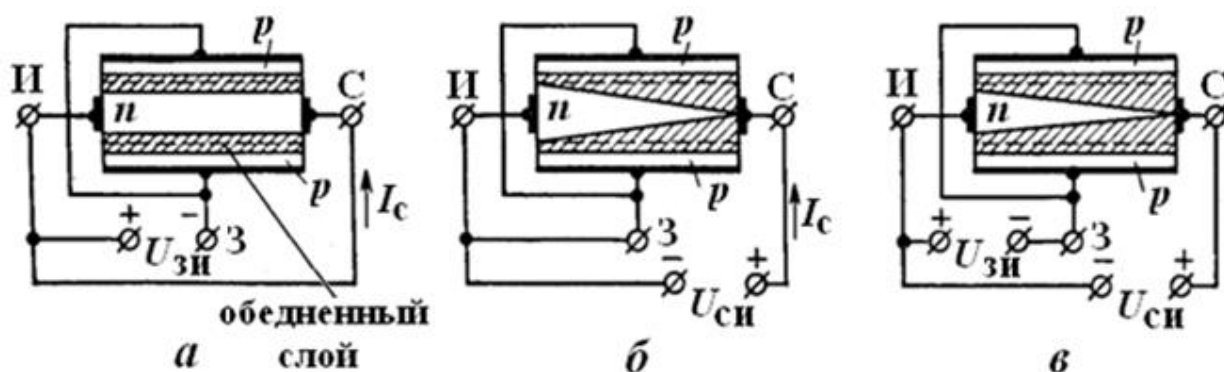


Рис. 2.10. Поведение ПТ с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа при подключении внешних напряжений: a – $U_{зи} < 0$, $U_{си} = 0$; $б$ – $U_{зи} = 0$, $U_{си} > 0$; $в$ – $U_{зи} < 0$, $U_{си} > 0$

При подаче запирающего напряжения на p - n -переход между затвором и каналом (рис. 2.10, *а*) на границах канала возникает равномерный слой, обедненный носителями заряда и обладающий высоким удельным сопротивлением. Это приводит к уменьшению проводящей ширины канала.

Напряжение, приложенное между стоком и истоком (рис. 2.10, *б*), приводит к появлению неравномерного обедненного слоя, так как разность потенциалов между затвором и каналом увеличивается в направлении от истока к стоку и наименьшее сечение канала расположено вблизи стока. Если одновременно подать напряжения $U_{си} > 0$ и $U_{зи} < 0$ (рис. 2.10, *в*), то толщина обедненного слоя, а следовательно, и сечение канала будут определяться действием этих двух напряжений. При этом минимальное сечение канала определяется их суммой. Когда суммарное напряжение достигает напряжения запирания $U_{си} + |U_{зи}| = U_{зап}$, обедненные области смыкаются и сопротивление канала резко возрастает.

Зависимости тока стока от напряжения $I_c = f(U_{си})$ при постоянном напряжении на затворе $U_{зи}$ определяют **выходные**, или **стокосвые**, характеристики ПТ (рис. 2.11, *а*). На начальном участке характеристик $U_{си} + |U_{зи}| < U_{зап}$ ток стока I_c возрастает с увеличением $U_{си}$.

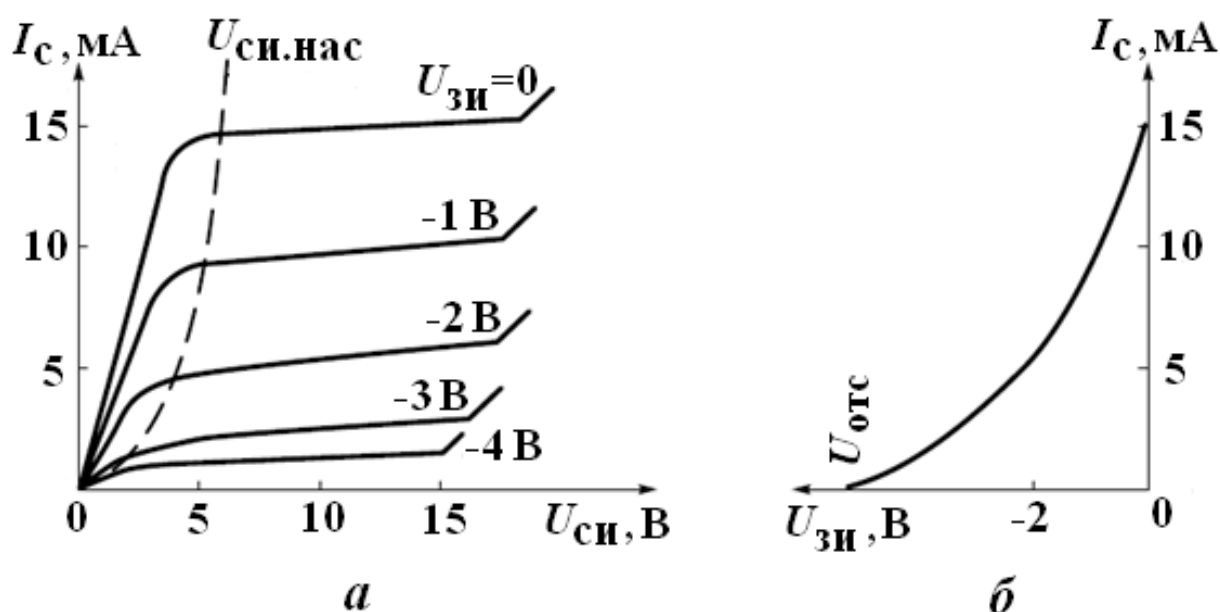


Рис. 2.11. ВАХ полевого транзистора: *а* – выходные; *б* – проходная

При повышении напряжения сток – исток до значения $U_{си} = U_{зап} - |U_{зи}|$ происходит перекрытие канала и дальнейший рост тока I_c прекращается (участок насыщения). Отрицательное напряжение $U_{зи}$ между затвором и истоком смещает момент перекрытия канала в сторону меньших значений напряжения $U_{си}$ и тока стока I_c . Участок насыщения является рабочей областью выходных характеристик полевого транзистора.

По выходным характеристикам может быть построена **проходная** (стокозатворная) характеристика $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$, рис. 2.11, *б*. На участке насыщения она практически не зависит от напряжения $U_{си}$. Анализ

стокзатворных ВАХ ПТ показывает, что ПТ с управляющим p - n -переходом работает строго при одной полярности напряжения на затворе. Таким образом, ПТ с управляющим p - n -переходом *работает только в режиме обеднения канала*. Напряжение на затворе, при котором перекрывается токопроводящий канал, называется *напряжением отсечки* $U_{отс}$.

Полевой транзистор с изолированным затвором – ПТ, затвор которого электрически отделен от канала слоем диэлектрика. Поэтому такие ПТ называют МДП – (металл – диэлектрик – полупроводник) или МОП – (металл – оксид – полупроводник) транзисторами.

Принцип действия МОП-транзисторов основан на эффекте изменения проводимости приповерхностного слоя полупроводника на границе с диэлектриком под воздействием поперечного электрического поля.

МОП транзистор со встроенным каналом отличается от транзистора с индуцированным каналом тем, что может работать как при положительном, так и при отрицательном напряжении на затворе. Устройство МОП-транзистора со встроенным n -каналом показано на рис. 2.12, *а*.

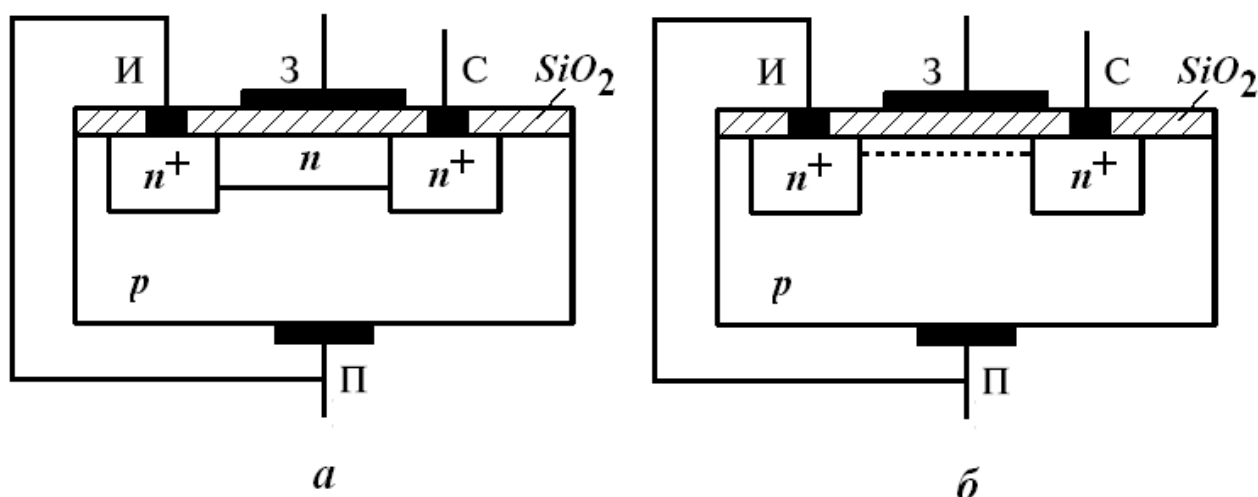


Рис. 2.12. МОП-транзисторы: *а* – со встроенным каналом; *б* – с индуцированным каналом

Основанием этого транзистора служит кремниевая пластинка p -типа. В ней созданы две области с повышенной проводимостью n^+ . Эти области являются истоком и стоком. Между истоком и стоком имеется тонкий приповерхностный канал n -типа. Ширина канала меньше его длины на несколько порядков. Канал и все электроды в приповерхностном слое изолированы друг от друга слоем диэлектрика – обычно оксидом кремния (на рис. 2.12 показан штриховкой). Кристалл МОП-транзистора обычно соединен с истоком, и его потенциал принимается за нулевой так же, как и потенциал истока.

Если при нулевом напряжении затвора приложить между стоком и истоком напряжение $U_{си}$, то через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. Через кристалл ток не пойдет, так как один из p - n -переходов находится под обратным напряжением. При подаче на затвор

отрицательного напряжения относительно истока (а следовательно, относительно кристалла) $U_{зи} < 0$, в канале создается поперечное электрическое поле, под влиянием которого электроны проводимости выталкиваются из канала в области истока и стока, а также в кристалл. Канал обедняется электронами, сопротивление его увеличивается, и ток стока уменьшается. Такой режим транзистора называется **режимом обеднения**.

Если на затвор подать положительное напряжение $U_{зи} > 0$, то проводимость канала увеличивается, и ток стока возрастает. Такой режим называется **режимом обогащения**.

Выходные характеристики $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ и проходная характеристика $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$ для МОП-транзистора со встроенным каналом показаны на рис. 2.13, а и 2.13, б соответственно.

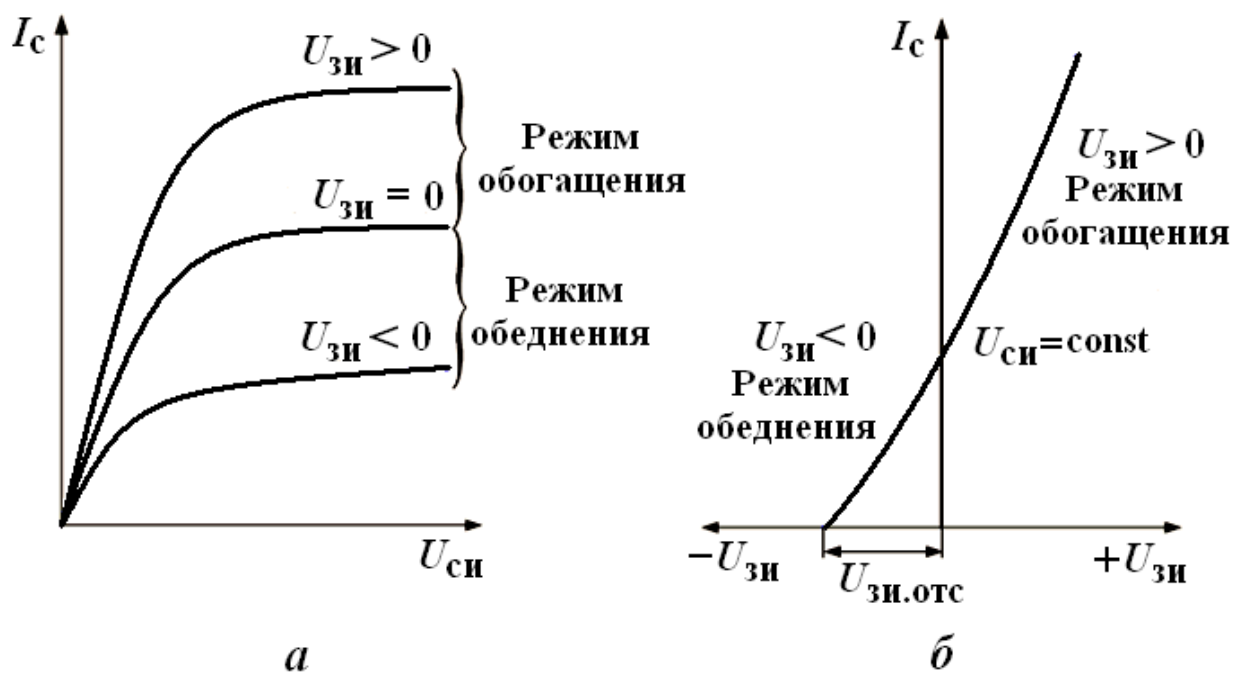


Рис. 2.13. ВАХ МОП транзистора со встроенным каналом: а – выходная; б – проходная

Рассмотренный транзистор может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения токопроводящего канала.

МОП-транзистор с индуцированным каналом отличается от предыдущего тем, что у него нет встроенного канала между областями истока и стока. При отсутствии напряжения на затворе ток между истоком и стоком не потечет при любой полярности напряжения, так как один из p - n -переходов будет заперт (рис. 2.12, б).

Канал возникает только при подаче на затвор напряжения определенной полярности. При отсутствии этого напряжения канала нет, между стоком и истоком n^+ -типа расположен только кристалл p -типа. В этом состоянии транзистор закрыт. Если подать на затвор положительное напряжение $U_{зи} > 0$, то под влияние электрического поля затвора электроны

проводимости будут перемещаться из областей истока и стока, и из p -области кристалла по направлению к затвору. При определенном пороговом напряжении затвора $U_{зи\ пор}$ в приповерхностном слое концентрация электронов настолько увеличивается, что превышает концентрацию дырок p -полупроводника. Это состояние называют **инверсией типа электропроводности**. Таким образом, образуется тонкий канал n -типа и транзистор начинает проводить ток. Чем больше положительное напряжение затвора, тем больше проводимость канала и ток стока I_c . Таким образом, изменяя напряжение на затворе, можно управлять током стока транзистора. Такой транзистор может работать только в режиме обогащения.

Вид выходных характеристик и передаточной характеристики показан на рис. 2.14.

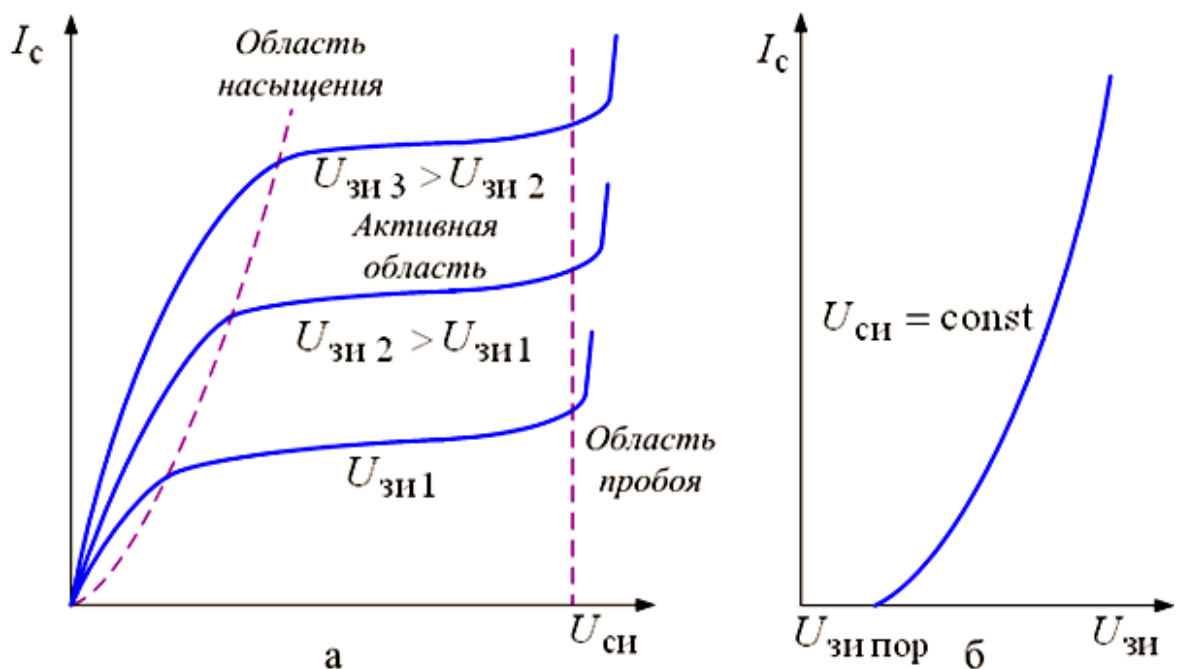


Рис. 2.14. Статические характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа: a – выходная; b – передаточная

Вид ВАХ этого типа транзистора отличается от предыдущих тем, что ток возникает при положительных напряжениях $U_{зи} > U_{зи\ пор}$, где $U_{зи\ пор}$ – напряжение отпирания транзистора.

Статическими параметрами МДП-транзисторов являются:

1. Крутизна проходной ВАХ, определяющая усилительные свойства транзистора:

$$S = \frac{dI_c}{dU_3}, \text{ при } U_{си} = \text{const}. \quad (2.18)$$

Как мы видим, крутизна имеет размерность проводимости.

2. Дифференциальное сопротивление R_d (сопротивление переменному току):

$$R_d = \frac{dU_c}{dI_c}, \text{ при } U_{зи} = \text{const}. \quad (2.19)$$

Предельно допустимые параметры: максимально допустимые напряжения $U_{си \max}$ и $U_{зи \max}$; максимально допустимая мощность стока $P_{с \max}$; максимально допустимый ток стока $I_{с \max}$.

При этом, поскольку ПТ в открытом состоянии представляет собой, по сути, полупроводниковый резистор с сопротивлением $r_{си}$, зависящим от напряжения $U_{зи}$, рассеиваемая в транзисторе мощность определяется как $P = I_c^2 r_{си}$.

В зависимости от того, какой из электродов полевого транзистора является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения: с общим истоком (ОИ); с общим стоком (ОС); с общим затвором (ОЗ), аналогично схемам включения биполярного транзистора ОЭ, ОК, ОБ.

2.3. Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)

Биполярный транзистор с изолированным затвором (*Insulated Gate Bipolar Transistor – IGBT*) – это составной транзистор, сочетающий в своей структуре входной полевой транзистор с изолированным затвором – МОП-транзистор с индуцированным каналом n -типа – и выходной биполярный p - n - p -транзистор (рис. 2.15).

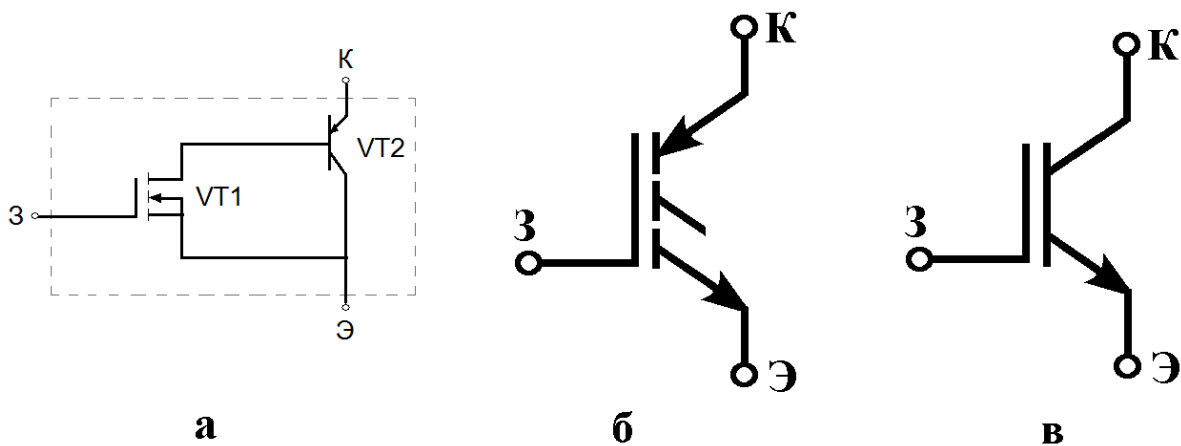


Рис. 2.15. Схема замещения биполярного транзистора с изолированным затвором (а) и его условные обозначения: стандартное (б) и упрощенное (в)

IGBT изначально создавался как мощный ключевой транзистор для различных преобразователей электроэнергии, и его работа в усилительном режиме не предусмотрена.

Пусть между коллектором и эмиттером *IGBT* (т.е. между эмиттером и коллектором *VT2* на рис. 2.14, а) приложено положительное напряжение («+» к коллектору *IGBT*, «-» к эмиттеру). При подаче на затвор положительного относительно эмиттера *IGBT* (коллектора *VT2*) напряжения больше

порогового значения $U_{зз\text{ пор}}$ входной МОП-транзистор $VT1$ открывается, создавая путь для протекания тока базы $VT2$. Соответственно $VT2$ также открывается.

Для запираания $IGBT$ с его затвора необходимо снять отпирающее напряжение.

С учетом схемы замещения транзистора на рис. 2.15, а выходной ток $IGBT$ будет связан со входным напряжением как

$$i_k = i_э = u_{зз} S_1 (\beta_2 + 1) = u_{зз} S_{экв}, \quad (2.20)$$

где S_1 – крутизна проходной ВАХ МОП-транзистора $VT1$; β_2 – коэффициент передачи базового тока транзистора $VT2$.

Из выражения (2.20) видно, что при одном и том же значении крутизны S_1 через $IGBT$, благодаря усилению в транзисторе $VT2$, протекает больший ток, чем через МОП-транзистор с аналогичными размерами кристалла. Другими словами, $IGBT$, рассчитанный на тот же ток, что и МОП-транзистор, имеет гораздо меньшие размеры, что обуславливает его более низкую стоимость.

Условные обозначения $IGBT$, приведенные на рис. 2.15, б и в, показывают, что в его составе есть полевая и биполярная части.

На рис. 2.16 представлены выходные ВАХ мощного $IGBT$ фирмы *Motorola MGP20N50*. Здесь же для сравнения показаны выходные ВАХ мощного МОП-транзистора этой же фирмы с аналогичными размерами кристалла *MTP4N50* и рассчитанного на такое же предельно допустимое напряжение (500 В). Максимальные значения постоянного тока для этих транзисторов равны соответственно 20 и 4 А.

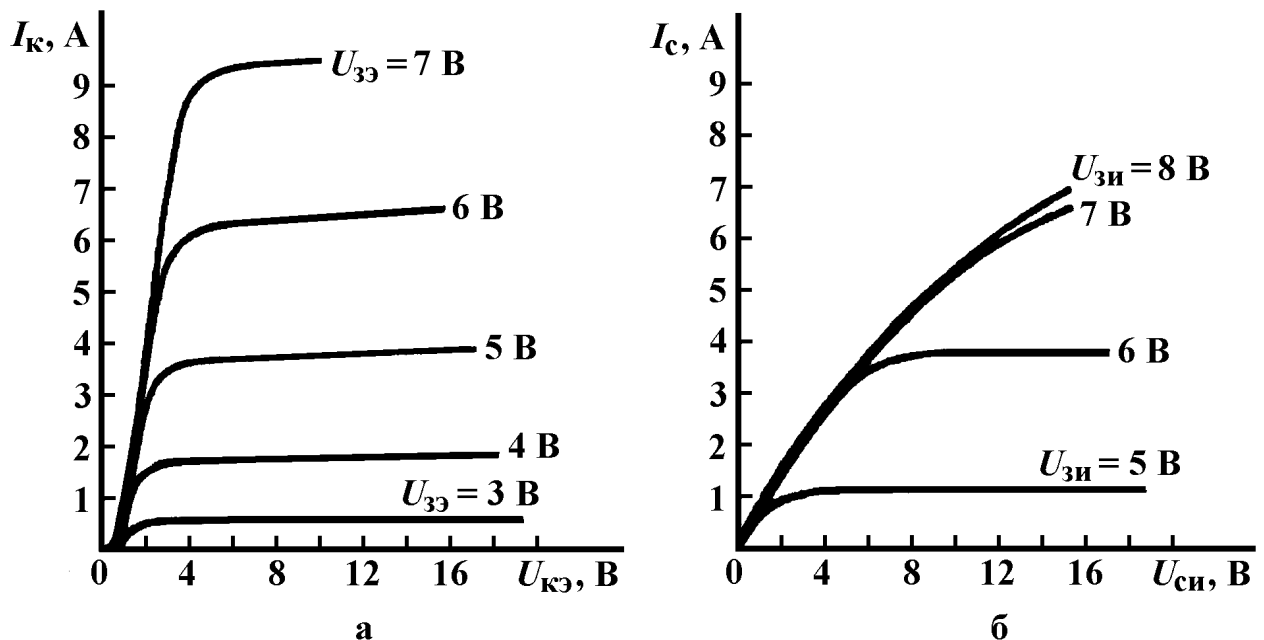


Рис. 2.16. Выходные ВАХ мощных $IGBT$ (а) и МОП-транзистора (б) с одинаковыми размерами кристалла и классом по напряжению ($U_{си\text{ макс}} = U_{кэ\text{ макс}}$)

Как видно из вольт-амперных характеристик, в области больших токов *IGBT* обладает намного более низким падением напряжения и соответственно потерями в открытом состоянии по сравнению с МОП-транзистором. Внутреннее сопротивление в открытом состоянии у современных *IGBT* меньше примерно на порядок, чем у аналогичных МОП-транзисторов:

$$r_{\text{отк}} = \frac{r_{\text{си,отк1}}}{\beta_2 + 1}. \quad (2.21)$$

где «номера» параметров транзисторов соответствуют схеме на рис. 2.15, а.

Заметим, что, поскольку силовым транзистором в составе *IGBT* является биполярный *p-n-p*-транзистор *VT2* (рис. 2.15, а), потери мощности в открытом состоянии у *IGBT* определяются как $P = U_{\text{кз}} I_{\text{к}}$, в отличие от МОП-транзистора, у которого, мы помним, $P = I_{\text{с}}^2 r_{\text{си}}$.

Напряжение на открытом *IGBT* $U_{\text{кз нас}}$ лежит в пределах от 1,0 до 3,5 В в зависимости от тока и типа транзистора. Вообще говоря, в одинаковом режиме для разных типов транзисторов $U_{\text{кз нас}}$ тем выше, чем выше пробивное напряжение и предельная скорость переключения.

Согласно (2.21), при одном и том же отпирающем напряжении на затворе ток *IGBT* в $(\beta_2 + 1)$ раз превышает ток аналогичного МОП-транзистора, благодаря его усилению биполярным транзистором *VT2* (рис. 2.15, а). Другими словами, эквивалентная крутизна *IGBT* $S_{\text{эКВ}} = i_{\text{к}}/u_{\text{зз}}$ больше крутизны МОП-транзистора с такими же размерами кристалла в $(\beta_2 + 1)$ раз.

Прежде чем *IGBT* начнет проводить ток, эмиттерный переход его *p-n-p*-транзистора *VT2* должен быть смещен в прямом направлении. Поэтому кривые тока *IGBT* несколько смещены от нуля вправо (рис. 2.16, б).

Проходные ВАХ *IGBT* $i_{\text{к}} = f(u_{\text{зз}})$ качественно такие же, как у МОП-транзистора с индуцированным каналом (рис. 2.14, б). Пороговое напряжение $U_{\text{зз пор}}$, при котором входной МОП-транзистор *VT1* в структуре *IGBT*, а значит, и сам *IGBT* начинают отпираться, составляет 3,5–5,5 В. Значение порогового напряжения уменьшается с ростом температуры. Напряжение $U_{\text{зз нас}}$, при котором транзистор полностью открыт и может пропускать максимально допустимый ток, изменяется от 8 В вплоть до предельно допустимого напряжения $U_{\text{зз макс}} = 20$ В в зависимости от типа транзистора.