

ТРАНЗИСТОРЫ

1. Устройство и принцип действия биполярного транзистора

Транзистором называется преобразовательный полупроводниковый прибор, имеющий не менее трех выводов, предназначенный для усиления мощности электрического сигнала.

Наиболее распространенные получили *биполярные* и *полевые* транзисторы. Первые имеют два *p-n* перехода. В формировании их тока участвуют носители заряда обеих полярностей (знаков), что и объясняет наименование «*биполярные*». В полевых транзисторах ток формируется носителями одной полярности – электронами или дырками. Поэтому полевые транзисторы достаточно часто называют *униполярными*. Их рассмотрение будет приведено дальше.

Схематическое изображение структуры биполярных транзисторов приведено на рисунке 2.1,а.

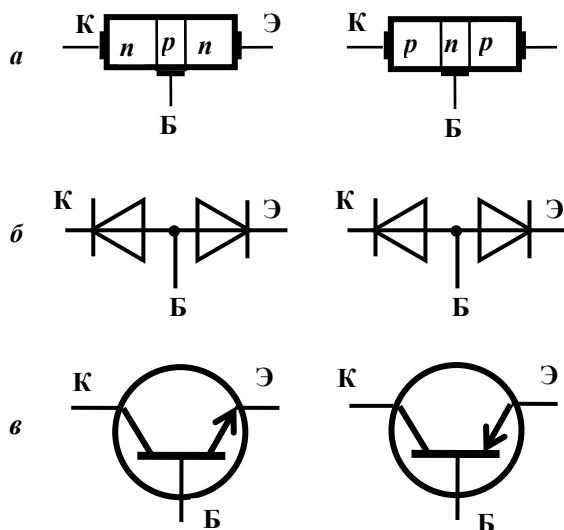


Рисунок 2.1. Возможные структуры и условное изображение биполярного транзистора.

Последовательное соединение полупроводника с электронной и дырочной проводимостью, которое необходимо для формирования двух $p-n$ переходов в одном приборе, приводит к образованию либо $n-p-n$, либо $p-n-p$ структуры. В соответствии с ними биполярные транзисторы бывают либо $n-p-n$, либо $p-n-p$ типа. Центральная область (а также вывод от нее) называется базой (Б), крайние, имеющие иной тип проводимости по сравнению с базой, - коллектором (К) и эмиттером (Э). К каждой из областей припаяны выводы, при помощи которых прибор включается в схему.

Переход между базой и эмиттером называется эмиттерным, а между базой и коллектором – коллекторным. Конструктивно транзисторы различаются в зависимости от мощности и метода образования $p-n$ переходов. Физические процессы, протекающие в транзисторах обоих типов, аналогичны.

В первом приближении транзистор может быть представлен двумя диодами, с соединенными вместе анодами или катодами ((рисунок 2.1,б)). Такое представление является достаточным при рассмотрении режимов работы при двух полностью открытых или закрытых переходах. В графическом условном изображении транзистора (рисунок 2.1,в) сохранилось, в виде стрелки, обозначение прямого направления эмиттерного $n-p$ перехода.

Для того чтобы транзистор мог эффективно выполнять свои функции, необходимо чтобы:

- расстояние между переходами было меньше длины свободного пробега неосновных носителей полупроводникового материала базы;
- концентрация примесей в области базы должна быть существенно ниже (на несколько порядков), чем концентрация примесей в области эмиттера.

Для выполнения первого условия область базы делают тонкой, В некоторых типах транзисторов поле коллекторного перехода простирается

вплоть до эмиттерного. Выполнение второго условия обеспечивается технологией изготовления прибора.

В большинстве случаев кристалл с переходами монтируется в специальный корпус, который выполняет следующие функции:

- изолирует кристалл с переходами от воздействия внешней среды;
- обеспечивает механическую прочность прибора, отвод тепла, выделяющегося на переходах при работе прибора, а также удобство монтажа прибора.

В зависимости от полярности напряжений, приложенных к эмиттерному и коллекторному переходам транзистора, различают четыре режима его работы:

Активный режим. На эмиттерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный – обратное. Этот режим является основным режимом работы транзистора при работе с аналоговыми сигналами.

Режим отсечки. К обоим переходам подводятся обратные напряжения. Поэтому через них проходит лишь незначительный ток, обусловленный движением неосновных носителей заряда. Транзистор в режиме отсечки оказывается запертым.

Режим насыщения. Оба перехода находятся под прямым напряжением. Ток в выходной цепи транзистора максимален и практически не регулируется током входной цепи. В этом режиме транзистор полностью открыт.

Инверсный режим. К эмиттерному переходу подводится обратное напряжение, а к коллекторному – прямое. Эмиттер и коллектор меняются своими ролями – эмиттер выполняет функции коллектора, а коллектор – функции эмиттера. Этот режим, как правило, не соответствует нормальным условиям эксплуатации транзистора.

Принцип работы биполярного транзистора в активном режиме рассмотрим на примере транзистора *n-p-n* типа. Для этого на эмиттерный

переход подадим прямое напряжение ($U_{бэ}$), а на коллекторный – обратное ($U_{кб}$, рисунок 2.2)

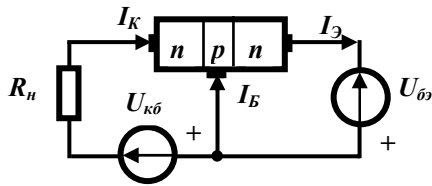


Рисунок 2.2.

Для отпираания p - n перехода требуется незначительное напряжение, поэтому величина $U_{бэ}$ небольшая, в то время как обратное напряжение на коллекторном переходе может быть существенно больше. Ток, проходящий через эмиттерный переход, получил название эмиттерного тока. Этот ток равен сумме дырочной и электронной составляющих

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{Эн}} + I_{\text{Бр}}, \quad (2.1)$$

$I_{\text{Эн}}$ – составляющая эмиттерного тока, обусловленная инжекцией электронов из области эмиттера;

$I_{\text{Бр}}$ – составляющая эмиттерного тока, обусловленная инжекцией дырок из области базы.

В транзисторах, как было сказано выше, концентрация носителей заряда в базе значительно меньше, чем в эмиттере. Это приводит к тому, что число электронов, инжектированных из эмиттера в базу, во много раз превышает число дырок, движущихся в противоположном направлении. Следовательно, почти весь ток через эмиттерный переход обусловлен электронами:

$$I_{\text{Э}} \approx I_{\text{Эн}}. \quad (2.2)$$

Инжектированные через эмиттерный переход электроны проникают вглубь базы, частично рекомбинируют и оставшаяся часть достигает коллекторного перехода.

Электрическое поле этого перехода переносят электроны в область коллектора.

Ток, возникший в коллекторной цепи:

$$I_K \approx I_{\text{Э}} + I_{\text{рек}} \approx I_{\text{Э}}. \quad (2.3)$$

Последнее упрощение в (2.3) сделано на основе того, что число рекомбинаций незначительно, т.к. база узка и имеет мало примесей. Таким образом, практически весь ток, возникший в цепи эмиттера, переносится в цепь коллектора. Вследствие того, что напряжение в цепи коллектора значительно превышает напряжение, подведенное к эмиттерному переходу, а токи в цепях эмиттера и коллектора практически равны, следует ожидать, что мощность полезного сигнала на выходе схемы (в коллекторной цепи) может оказаться намного больше, чем во входной (эмиттерной) цепи транзистора.

Реально ток эмиттера равен сумме токов базы и коллектора, т. е.

$$I_{\text{Э}} = I_K + I_B, \quad (2.4)$$

где ток базы обусловлен двумя составляющими

$$I_B = I_{Bp} + I_{\text{рек}}, \quad (2.5)$$

Если под воздействием $U_{\text{бэ}}$ ток эмиттера возрастет на некоторую величину, то соответственно возрастут и остальные токи транзистора

$$I_{\text{Э}} + \Delta I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + \Delta I_{\text{К}} + I_{\text{Б}} + \Delta I_{\text{Б}}. \quad (2.6)$$

Для характеристики соотношений между приращениями токов электродов вводят так называемые коэффициенты передачи токов эмиттера (α) и коллектора (β) при неизменном напряжений на коллекторном переходе:

$$\alpha = \left. \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Э}}} \right|_{U_{\text{КЕ}}=\text{const}}; \quad \beta = \left. \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}} \right|_{U_{\text{КЕ}}=\text{const}}. \quad (2.7)$$

На практике часто этими коэффициентами определяют и соотношения токов электродов на линейном участке их зависимости:

$$\alpha = \left. \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}}} \right|_{U_{\text{КЕ}}=\text{const}}; \quad \beta = \left. \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Б}}} \right|_{U_{\text{КЕ}}=\text{const}}. \quad (2.8)$$

Между введенными коэффициентами существует соотношение:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}. \quad (2.9)$$

Обычно $\alpha = 0,95 \dots 0,995$.

Чем больше коэффициент α , тем меньше отличаются между собой токи коллектора и эмиттера, тем более эффективно могут быть использованы усилительные свойства транзистора. Учитывая приведенные значения α , становится очевидным, что $\beta \gg 1$.

Поскольку в цепи коллектора кроме тока, обусловленного прохождением тока эмиттера, протекает также обратный ток коллекторного перехода $I_{\text{кб0}}$, то полный ток коллектора

$$I_K = \alpha I_{\text{э}} + I_{\text{кбо}} \quad (2.10)$$

Учитывая, что ток $I_{\text{кбо}}$ по величине незначителен,

$$I_K \approx \alpha I_{\text{э}} \quad (2.11)$$

Зная величины напряжений, вызвавших изменения соответствующих токов можно определить дифференциальное сопротивление эмиттерного, коллекторного переходов и сопротивление области базы:

$$r_E = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_E} \right|_{U_{KB}=\text{const}} ; r_K = \left. \frac{\Delta U_{KB}}{\Delta I_K} \right|_{I_E=\text{const}} ; r_B = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE}=\text{const}} . \quad (2.12)$$

2. Эквивалентные схемы биполярного транзистора

Для анализа и расчета электрических цепей, содержащих транзисторы, применяют их эквивалентные схемы.

Большинству электронных схем свойственен такой режим работы транзистора, при котором на фоне сравнительно больших постоянных токов и напряжений действуют малые переменные составляющие. В этом случае постоянные и переменные составляющие сигнала могут анализироваться отдельно, причем эквивалентные схемы в основном применяют при анализе переменных составляющих. Они и составляются с учетом незначительности переменных сигналов, поэтому носят наименование малосигнальных, хотя на практике достаточно часто используются в качестве первого приближения и при анализе работы схем при больших сигналах. Малосигнальные эквивалентные схемы формируют из линейных элементов, параметры которых получают линеаризацией исходных характеристик транзисторов в окрестности режима работы по постоянному току.

Широкое распространение получили так называемые Т-образные эквивалентные схемы и схемы на основе представления транзистора в виде активного четырехполюсника.

Достаточно простой Т-образной схемой является так называемая схема в физических параметрах. При ее построении исходят из того, что эмиттерный и коллекторный переходы и тонкий слой базы, обладают некоторыми определенными сопротивлениями, равными соответственно $r_{\text{Э}}$, $r_{\text{К}}$ и $r_{\text{Б}}$. Поэтому простейшей эквивалентной схемой транзистора должна служить цепь, составленная из сопротивлений $r_{\text{Э}}$, $r_{\text{К}}$ и $r_{\text{Б}}$, соединенных между собой, как показано на рисунке 2.3,а.

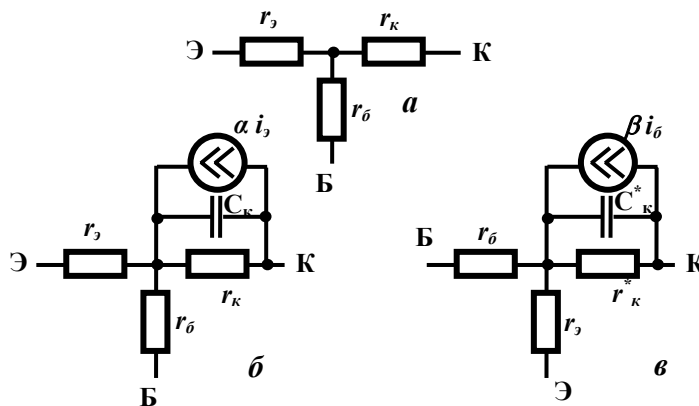


Рисунок 2.2. Эквивалентные Т-образные схемы транзистора:

А – без дополнительного генератора тока; б – для схемы с общей базой; в - схемы с общим эмиттером; г – для схемы с общим коллектором

У современных транзисторов в активном режиме работы величина $r_{\text{Э}}$ составляет обычно единицы - десятки Ом, $r_{\text{Б}}$ – сотни Ом, а $r_{\text{К}}$ – сотни тысяч Ом. При замене транзистора в схеме рисунка 2.2 ток в эмиттерной цепи будет существенно больше тока с цепи коллектора. Это не соответствует реальным токам электродов транзистора. Следовательно, такая схема не может быть эквивалентной. В действительности, как известно, через сопротивление нагрузки транзистора проходит ток $I_{\text{К}} \approx \alpha I_{\text{Э}}$. Для получения реальных токов в выходную цепь параллельно сопротивлению $r_{\text{К}}$ вводят источник

тока, значения которого определяются током в цепи входного электрода. Так называемый *зависимый* источник (генератор) тока. Поэтому необходимо изменить распределение тока между ветвями эквивалентной схемы. Это можно сделать, подключив в эквивалентной схеме дополнительный генератор, вырабатывающий ток $\alpha I_{\text{Э}}$ (рисунок 2.3,б). Прохождение в выходной цепи тока этого источника соответствует реальным условиям работы транзисторных схем. Наибольшее распространение получили эквивалентные схемы, у которых общим электродом для входной и выходной цепей является база (**ОБ**, рисунок 2.3,б) или эмиттер (**ОЭ**, рисунок 2.3,в). Чтобы обе эквивалентные схемы были равноценны, необходимо чтобы:

$$r_K^* = r_K / (\beta + 1). \quad (2.13)$$

Данное соотношение получено в результате приравнивания напряжения холостого хода ($\alpha i_{\text{Э}} r_K$ и $\beta i_{\text{б}} r_K^*$) в указанных схемах с учетом того, что в режиме холостого хода $i_{\text{б}} = i_{\text{б}}$.

В эквивалентные схемы транзистора введены емкости коллекторного перехода. Несомненно, в то же время коллекторная емкость

$$C_K^* = (\beta + 1) C_K \quad (2.14)$$

Таким образом, в схеме с **ОЭ** активное и емкостное сопротивления коллекторной цепи значительно (в $\beta + 1$ раз) меньше, чем для транзистора в схеме с **ОБ**.

Параметры эквивалентной схемы могут быть определены либо расчетным, либо экспериментальным путем. Однако расчет не всегда обеспечивает требуемую точность из-за трудности учета контролируемых и неконтролируемых явлений в транзисторе. В свою очередь, при выполнении эксперимента для измерения сопротивлений резисторов необходим доступ к

общей точке соединения цепей эмиттера, базы и коллектора практически не в транзисторах. Более удобными для экспериментального определения значений параметров являются эквивалентные схемы, построенные на основе представления транзистора в виде активного четырехполюсника (рисунок 2.4).

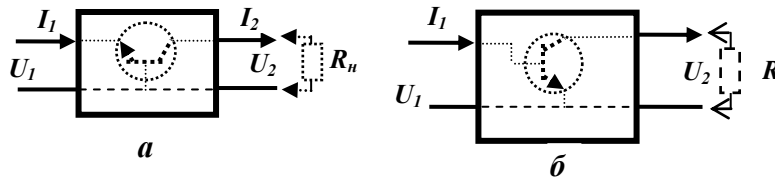


Рисунок 2.4.

Во входную цепь транзистора подается сигнал U_1 , что приводит к появлению тока I_1 . В выходной цепи (на нагрузке R_n) возникает напряжение U_2 и ток I_2 . Токи и напряжения считаются переменными. Вместо напряжений можно использовать их приращения ΔU и ΔI . В предположении малости сигналов входные и выходные величины можно связать алгебраическими уравнениями. В зависимости от того, какие из величин стоят по разные стороны знака равенства используют различные обозначения коэффициентов алгебраических выражений.

Наиболее часто используют выражения, у которых коэффициенты получили обозначения h и y . Коэффициенты обычно называют параметрами, а соответствующие эквивалентные схемы – семами в h - и y -параметрах. Выражение для определения h -параметров:

$$\begin{cases} U_1 = h_{11} I_1 + h_{12} U_2; \\ I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} U_2. \end{cases} \quad (2.15)$$

Коэффициенты уравнений (2.16) равны:

$$h_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{\text{при } U_2=0} ; \quad h_{21} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{\text{при } U_2=0} ; \quad h_{12} = \left. \frac{I_1}{I_2} \right|_{\text{при } I_1=0} ; \quad h_{22} = \left. \frac{I_1}{U_2} \right|_{\text{при } I_1=0} . \quad (2.16)$$

Из этих выражений видно, что

- h_{11} и h_{21} – входное сопротивление и коэффициент передачи тока (коэффициент усиления по току) при коротком замыкании на выходе транзистора;

- h_{12} и h_{22} – параметры, измеряемые при холостом ходе на входе транзистора. h_{12} характеризует степень влияния выходного напряжения на режим входной цепи транзистора (коэффициент обратной связи по напряжению). h_{22} – выходная проводимость.

При реализации короткого замыкания на выходе транзистора используют конденсатор, реактивное сопротивление которого на частоте измерения должно быть существенно меньше сопротивления нагрузки. Для создания режима холостого хода по входу в цепь вводят катушку индуктивности, реактивное сопротивление которой должно быть существенно больше входного сопротивления транзистора.

В связи с тем, что транзистор имеет всего три электрода его подсоединение к входной и выходной цепи четырехполюсника может быть осуществлено только в результате объединения одного из вводов входной и выходной цепи и подсоединения к объединенной цепи одного из трех электродов транзистора. В соответствии с этим общим электродом вводят наименование схемы. Возможно три вида транзисторных схем: с общей базой (**ОБ**), общим эмиттером (**ОЭ**) и общим коллектором (**ОК**). На рисунке 2.4 показаны две из них – **ОБ** и **ОЭ**. Каждая схема будет отличаться входными и/или выходными электродами, следовательно, будут различаться и значения h -параметров. Например, входное сопротивление транзистора (h_{11}) в схеме с общим эмиттером значительно больше, чем в схеме с общей базой. Это следует из очевидного неравенства

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{npu U_2=0} \Rightarrow \frac{\Delta U_1}{\Delta I_B} \gg \frac{\Delta U_1}{\Delta I_Э}. \quad (2.17)$$

Поэтому в обозначение h -параметров вводят индекс, указывающий по какой схеме проводилось его определение. Обычно используют параметры схем **ОБ** (индекс B , например, h_{11B}) и **ОЭ** ($h_{21Э}$). Ниже приведены формулы пересчета h -параметров, полученных по схеме **ОБ**, в параметры **ОЭ** и **ОК**.

$$\begin{cases} h_{11Э} \approx \frac{h_{11B}}{1+h_{21B}}; & h_{12Э} \approx \frac{h_{11B} h_{22B} - h_{12B} (h_{21B} + 1)}{1+h_{21B}}; \\ h_{21Э} \approx -\frac{h_{21B}}{1+h_{21B}} = \beta; & h_{22Э} \approx \frac{h_{22B}}{1+h_{21B}}. \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} h_{11К} \approx \frac{h_{11B}}{1+h_{21B}}; & h_{12К} \approx 1; \\ h_{21К} \approx -\frac{1}{1+h_{21B}}; & h_{22К} \approx \frac{h_{22B}}{1+h_{21B}}. \end{cases} \quad (2.19)$$

Между h - параметрами и параметрами транзистора, соответствующими Т-образным эквивалентным схемам, существует определенная зависимость. Для схемы с общей базой эта зависимость выражается соотношениями

$$\begin{cases} r_Э = h_{11B} - \frac{h_{12B}}{h_{22B}}(1-h_{21B}); \\ r_B = \frac{h_{12B}}{h_{22B}}; & r_K = \frac{1}{h_{22B}}; & \alpha = -h_{21B}. \end{cases} \quad (2.20)$$

Эквивалентная схема транзистора в $h_Э$ -параметрах приведена на рисунке 2.5,а. Так как величина h_{12} (коэффициент обратной связи по напряжению) у современных транзисторов приближается к нулю, то его обычно не вводят в эквивалентную схему (рисунок 2.5,б).

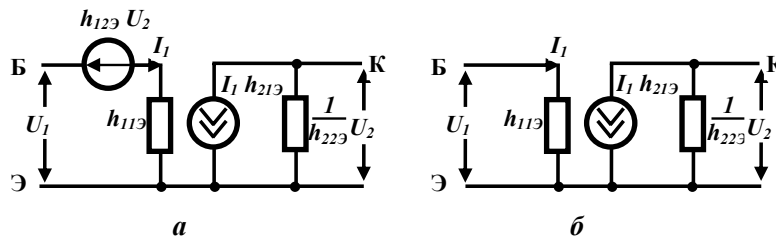


Рисунок 2.5. Эквивалентные схемы транзистора в h -параметрах для включения с **ОЭ**

Источник $I_1 h_{21э}$ эквивалентной схемы называют зависимым источником тока, так как значение тока этого источника зависит от тока другой ветви – входного тока (в данном случае тока базы). Этот источник характеризует усиление входного тока. Аналогично источник напряжения $U_2 h_{21э}$ называют зависимым источником ЭДС. Как было указано выше, он характеризует обратную связь по выходному напряжению.

Для иных схем включения поменяются расположение электродов и индексы при h -параметрах. Также возможна иная индексация напряжений и токов. Например, для указанной схемы включения можно внести следующие изменения в индексацию:

$$U_1 \Rightarrow U_{бэ}; \quad U_2 \Rightarrow U_{кэ}; \quad I_1 \Rightarrow I_{б}; \quad I_2 \Rightarrow I_{к}.$$

Напоминаем, что вместо токов (I) и напряжений (U) в выражении (2.17) можно использовать их приращения (ΔI и ΔU). Это позволяет определить значения коэффициентов по входным и выходным характеристикам транзистора (рисунок 2.6).

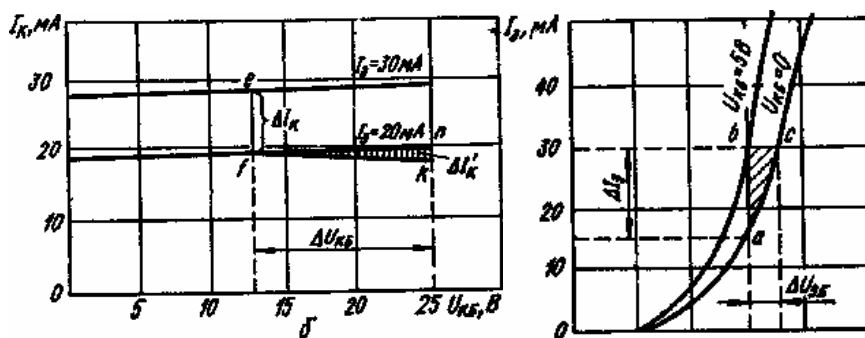


Рисунок 2.6. Определение h_B -параметров транзистора по входным (а) и выходным (б) характеристикам транзистора.

Эквивалентная схема транзистора в y -параметрах обычно используется для анализа высокочастотных схем. В этом случае независимыми переменными являются напряжения U_1 и U_2 , а зависимыми – токи I_1 и I_2 . Тогда систему уравнений, характеризующих работу транзистора как четырехполюсника, можно представить в общем виде:

$$\begin{cases} \Delta I_1 = y_{11} \Delta U_1 + y_{12} \Delta U_2; \\ \Delta I_2 = y_{21} \Delta U_1 + y_{22} \Delta U_2. \end{cases} \quad (2.21)$$

Как и в случае уравнений с h -параметрами вместо приращений токов и напряжений можно использовать сами токи и напряжения (в комплексном виде), считая их незначительными по величине. y -коэффициенты системы уравнений (2.21) определяются аналогично способам определения h -параметрам (при коротком замыкании четырехполюсника по входу и выходу или по входным и выходным характеристикам при условиях $U_1 = 0$ или $U_2 = 0$). Коэффициенты (y -параметры) имеют следующий смысл:

- y_{11} – величина обратная входному сопротивлению, т. е. входная проводимость при коротком замыкании по выходу;
- y_{21} – проводимость прямой передачи, т.е. величина, характеризующая воздействие входного напряжения на выходной ток при коротком замыкании по выходу;
- y_{12} – проводимость обратной передачи, т.е. величина,

характеризующая воздействие выходного напряжения на входной ток при коротком замыкании по выходу;

- y_{22} – выходная проводимость при коротком замыкании по выходу;

Следует напомнить, что при измерениях условия короткого замыкания должны реализовываться по переменному току.

Эквивалентная схема, соответствующая системе уравнений (2.21) показана на рисунке 2.7.

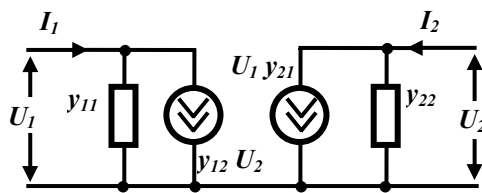


Рисунок 2.7. Эквивалентная схема транзистора в y -параметрах

3. Статические характеристики транзистора

Статические характеристики транзистора отражают зависимость между токами и напряжениями на его входе и выходе.

Для схемы с общим эмиттером статической входной характеристикой является график зависимости тока базы I_B от напряжения при постоянном значении напряжении коллектора:

$$I_B = f(U_{БЭ}) \text{ при } U_{КЭ} = const.$$

Выходные характеристики транзистора для схемы с общим эмиттером представляют собой зависимости тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при постоянном токе базы:

$$I_K = \varphi(U_{КЭ}) \text{ при } I_B = const.$$

Типичные входные и выходные статические характеристики транзистора для схемы с общим эмиттером показаны на рисунке 2.8. Она имеет вид обычной характеристике прямого тока $p-n$ перехода, на которую оказывает влияние напряжение на коллекторе. Из рисунка 2.8,а видно, что с ростом напряжения $U_{кэ}$ ток I_b уменьшается. Это объясняется тем, что при увеличении $U_{кэ}$ растет напряжение, приложенное к коллекторному переходу в обратном направлении, переход расширяется, захватывая часть базы и, соответственно, уменьшается вероятность рекомбинации носителей заряда в ней (в соответствии с (2.5) ток рекомбинации является частью тока базы).

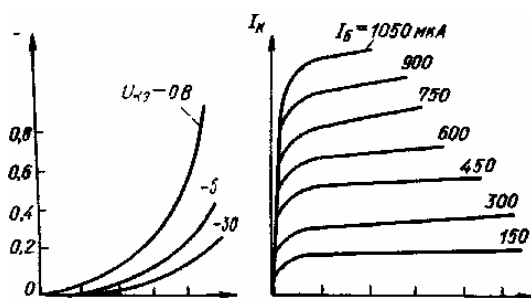


Рисунок 2.8. Статические характеристики транзистора для схемы ОЭ: а – входные; б – выходные

Выходные характеристики (рисунок 2.8,б) имеют начальный участок быстрого роста, нелинейную зону, переходящую в область насыщения.

4. Температурные и частотные свойства транзистора

Диапазон рабочих температур транзисторов, определяемый свойствами $p-n$ переходов, такой же, как и у полупроводниковых диодов. Особенно сильно на работу транзисторов влияет нагрев и менее существенно – охлаждение (до минус 60°C). Исследования показывают, что при нагреве от 20 до 60°C параметры плоскостных транзисторов изменяются следующим образом: r_K падает примерно вдвое, r_B – на $15-20\%$, а $r_{Э}$ возрастает на $15-20\%$.

Особенно существенное влияние на работу транзистора при нагреве оказывает обратный ток коллекторного перехода, $I_{КБО}$. Для практических расчетов можно принять, что при повышении температуры на каждые 10°C ток $I_{КБО}$ возрастает примерно вдвое.

Нестабильность режима работы транзистора, обусловленная током $I_{КБО}$, очень существенна, так как обратный ток коллектора в значительной степени влияет на токи эмиттера и коллектора, а, следовательно, на усилительные свойства транзистора.

Наиболее часто для работы при повышенных температурах применяются кремниевые транзисторы. Предельная рабочая температура у этих приборов составляет $125 \dots 150^{\circ}\text{C}$ в то время как для германиевых транзисторов – около 60°C .

На частотные свойства транзисторов большое влияние оказывают емкости эмиттерного и коллекторного $p-n$ переходов. С увеличением частоты емкостное сопротивление уменьшается и возрастает их шунтирующее действие. Как указывалось при составлении T -образной эквивалентной схемы транзистора наиболее вредное влияние на работу транзистора оказывает емкость коллекторного перехода C_k , так как она стоит параллельно сопротивлению r_k , величина которого значительна. Поэтому нарушение распределения токов в выходных цепях, которое характерно для низких частот, начинает сказываться при более низких значениях частоты сигнала: ток зависимого источника βI_b вместо того чтобы поступать в нагрузку начинает замыкаться через емкость C_k .

Второй причиной ухудшения работы транзистора на высоких частотах является отставание по фазе переменного тока коллектора от переменного тока эмиттера. Это обусловлено инерционностью процесса прохождения носителей заряда через базу, а также инерционностью процессов накопления и рассасывания зарядов в базе. Хотя время пролета носителей через базу незначительное, порядка долей микросекунды, но на частотах порядка единиц – десятков мегагерц становится заметным сдвиг фаз между

переменными составляющими токов I_b и I_k . Это явление иллюстрируется векторными диаграммами рисунка 2.9 при различных частотах сигнала.

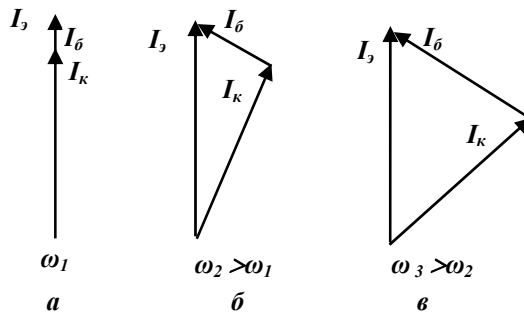


Рисунок 2.9. Векторные диаграммы токов транзистора на разных частотах

С изменением частоты будет изменяться также величина фазового сдвига выходного тока транзистора по отношению к входному. Выражение (2.4) должно соблюдаться и при векторной форме представления токов. Поэтому при сдвиге по фазе между токами эмиттера и коллектора ток базы увеличивается, что приводит к уменьшению коэффициента β (см. выражение (2.9)) с ростом частоты сигнала.

Необходимо отметить, что с увеличением частоты коэффициент β уменьшается значительно сильнее, чем α . Коэффициент α снижается лишь вследствие влияния емкости C_k , а на величину β влияет, кроме этого, еще и сдвиг фаз между I_b и I_k . Следовательно, схема с общей базой имеет лучшие частотные свойства, чем схема с общим эмиттером.

Для определения коэффициентов усиления по току на частоте f могут быть использованы формулы:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\alpha}\right)^2}}, \quad \beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}}. \quad (2.22)$$

где f_α и f_β – частоты, на которых коэффициенты усиления по току β или α уменьшается до 0,7 (в $\sqrt{2}$ раз) своего значения на низких частотах (β_0 или α_0).

Оценивая частотные свойства транзистора, следует учитывать также, что диффузия – процесс хаотический. Носители зарядов, инжектированные эмиттером в базу, передвигаются в ней разными путями. Поэтому носители, одновременно вошедшие в область базы, достигают коллекторного перехода в разное время. Таким образом, закон изменения тока коллектора может не соответствовать закону изменения тока эмиттера, что приводит к искажению усиливаемого сигнала. Следует подчеркнуть вполне очевидную вещь, что чем тоньше база, тем в меньшей степени искажается сигнал на выходе и допускается работа транзистора на более высоких частотах. Поэтому, чем более высокочастотный транзистор, тем тоньше у него должна быть база.

Классификация биполярных транзисторов. Выпускаемые промышленностью дискретные биполярные транзисторы классифицируют обычно по двум параметрам: по мощности и частотным свойствам.

По мощности они подразделяются на маломощные ($P_{\text{вых}} \leq 0,3$ Вт), средней мощности ($0,3 \text{ Вт} < P_{\text{вых}} \leq 1,5$ Вт) и мощные ($P_{\text{вых}} > 1,5$ Вт); по частотным свойствам – на низкочастотные ($f_\alpha \leq 0,3$ МГц), средней частоты ($0,3 \text{ МГц} < f_\alpha \leq 3$ МГц), высокой частоты ($3 \text{ МГц} < f_\alpha \leq 30$ МГц) и сверхвысокой частоты ($f_\alpha > 30$ МГц).

5. Эксплуатационные параметры транзистора

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_{kmax} , рассеиваемая коллектором.

В общем случае мощность, рассеиваемая транзистором, складывается из мощностей, рассеиваемых каждым $p-n$ переходом:

$$P = P_K + P_э = I_K U_{кб} + I_э U_{эб}.$$

Обычно в усилительном режиме

$$I_э U_{эб} \ll I_K U_{кб}. \text{ Поэтому } P \approx P_K \approx I_K U_{кб} \approx I_K U_{кэ}.$$

При недостаточном теплоотводе разогрев коллекторного перехода может привести к резкому увеличению тока I_K . Это в свою очередь приводит к возрастанию мощности, рассеиваемой на коллекторе, и к еще большему нагреву коллекторного перехода. Процесс приобретает лавинообразный характер, и транзистор необратимо выходит из строя. Следует учитывать также, что при повышении температуры окружающей среды предельно допустимая мощность уменьшается. Поэтому необходимо тщательно следить за режимом работы транзисторов, исключая внешний нагрев прибора, особенно работающего при повышенных мощностях.

Максимально допустимый ток коллектора.

Транзистор может выйти из строя при превышении тока коллектора выше определенных пределов. Процесс разрушения обусловлен неравномерным прохождением тока по площади $p-n$ перехода, местным с разогревом и последующим прожиганием.

Максимально допустимое напряжение между коллектором и общим электродом транзистора ($U_{кэ max}$ или $U_{кб max}$).

Это напряжение определяется величиной пробивного напряжения перехода. Кроме того, оно зависит от мощности, тока коллектора и температуры окружающей среды.

Из соображений надежности работы схемы не рекомендуется использовать величины токов, напряжений и мощностей выше 70 % их наибольших допустимых значений. Следует, однако, отметить, что при работе в ключевом режиме значительная мощность выделяется на транзисторе только в течение перехода из открытого состояния к запертому и обратно (на активном участке характеристики). Поэтому среднее за период значение мощности, рассеиваемой в транзисторе, относительно невелико, что позволяет допускать мгновенные значения токов коллектора и эмиттера в 2 – 3 раза больше паспортных, предельных для режима усиления значений, не опасаясь перегрева транзистора.

Предельная частота усиления по току – частота, при которой коэффициент усиления по току β или α уменьшается до 0,7 (в $\sqrt{2}$ раз) своего значения на низких частотах.

Выше перечислены лишь наиболее важные эксплуатационные параметры транзисторов. В паспортах транзисторов и справочниках указывается ряд других параметров: максимально допустимый ток базы, обратный ток эмиттера, максимально допустимый импульсный ток коллектора, напряжение насыщения коллектор-эмиттер, емкость коллекторного перехода, максимальная температура работы транзистора и т.д.

6. Полевые транзисторы

Полевым транзистором называется трехэлектродный полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающих через проводящий канал, а управление величиной тока осуществляется поперечным электрическим полем, создаваемым напряжением, приложенным к управляющему электроду. Проводящий слой называют *каналом*, управляющий электрод – *затвором*.

Полевой транзистор – полупроводниковый усилительный прибор, которым управляет не ток (как биполярным транзистором), а напряжение (электрическое поле, отсюда и название – *полевой*), осуществляющее изменение площади поперечного сечения проводящего канала, в результате чего изменяется выходной ток транзистора. Управление же электрическим полем предполагает отсутствие статического входного тока, что позволяет уменьшить мощность, требуемую для управления транзистором.

Полевой транзистор (**ПТ**) в отличие от биполярного иногда называют *униполярным*, так как его работа основана на использовании только основных носителей заряда одного типа – либо электронов, либо дырок. Поэтому в полевых транзисторах отсутствуют процессы изменения (накопления и рассасывания) объемного заряда неосновных носителей, оказывающие заметное влияние на быстродействие биполярных транзисторов.

Два электрода на торцах канала называются *истоком (И)* и *стоком (С)*. Исток и сток в принципе обратимы. Истоком служит тот из них, из которого при соответствующей полярности напряжения между истоком и стоком в канал поступают основные носители заряда, а стоком – тот, через который эти носители уходят из канала.

Подобно биполярному транзистору в зависимости от того, какой из выводов является общим для входных и выходных цепей, различают три схемы включения полевого транзистора: с общим истоком (**ОИ**), с общим затвором (**ОЗ**) и общим стоком (**ОС**). Наибольшее распространение на практике нашла схема с **ОИ**.

Все **ПТ** по своим конструктивным особенностям можно разделить на две группы:

- 1) полевые транзисторы с *управляющим p-n переходом* (канальные, или униполярные транзисторы);
- 2) полевые транзисторы с *изолированным затвором* (**МДП**- или **МОП**-транзисторы).

На рисунке 2.10 приведены схематическое изображение конструкции полевого транзистора с управляющим p - n переходом и схема его включения¹. Канал образован тонким слоем полупроводника одного типа проводимости – в случае проводимостью n типа². На торцах канала расположены два электрода, образующие омические выводы для подсоединения к внешним электрическим цепям. Один из них называется истоком (**И**), а второй – стоком (**С**). В средней части канала расположена небольшая зона полупроводника p типа, образующая с каналом p - n переход. Вывод, подсоединенный к областям p типа, является управляющим электродом и называется затвором (**З**). Выводы **И**, **С** и **З** соответствуют (в порядке перечисления) катоду, аноду и сетке электровакуумного триода или эмиттеру, коллектору и базе обычного биполярного транзистора.

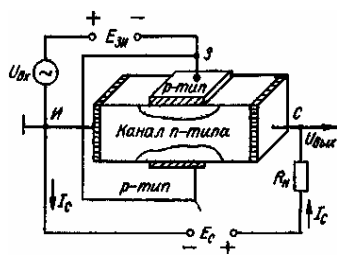


Рисунок 2.10. Схематическое изображение конструкции и схема включения полевого транзистора с управляющим p - n переходом

Величина тока в канале зависит от напряжения, приложенного между стоком и истоком, нагрузочного сопротивления и сопротивления канала (полупроводниковой пластинки между стоком и истоком). При постоянных источнике E_c и R_n ток в канале I_c (ток стока) зависит только от электрического сопротивления канала, которое, в свою очередь определяется длиной и эффективной площадью поперечного сечения канала. На p - n переход с помощью источника $E_{жн}$ подается обратное напряжение, что приводит к увеличению толщины p - n перехода, уменьшению

¹ При ее анализе все напряжения будем рассматривать с учетом их знаков.

² Принцип действия транзисторов с каналом типа n или p аналогичен; различие заключается лишь в полярности напряжений источников питания.

сечения канала и увеличению сопротивления между истоком и стоком. Изменение величины обратного напряжения в соответствии с входным сигналом приводит к модуляции сопротивления канала, изменению тока стока и появлению сигнала на нагрузочном сопротивлении R_n . При соответствующем подборе величины R_n можно добиться повышения уровня выходного напряжения по сравнению с напряжением на входе, т.е. усилить сигнал.

Полевые транзисторы, подобно биполярным, могут быть охарактеризованы входными и выходными характеристиками. Однако для полевых транзисторов входная характеристика (зависимость I_3 от $U_{ЗИ}$ при фиксированном значении $U_{СИ}$) не имеет практического применения так как описывала бы незначительные изменения обратного тока p - n перехода. Поэтому и при расчетах используют только передаточные и выходные **ВАХ**. На рисунке 2.11 приведены выходные и передаточные (зависимость тока стока от напряжения на затворе) характеристики полевого транзистора с управляющим p - n переходом для схемы включения с **ОИ**.

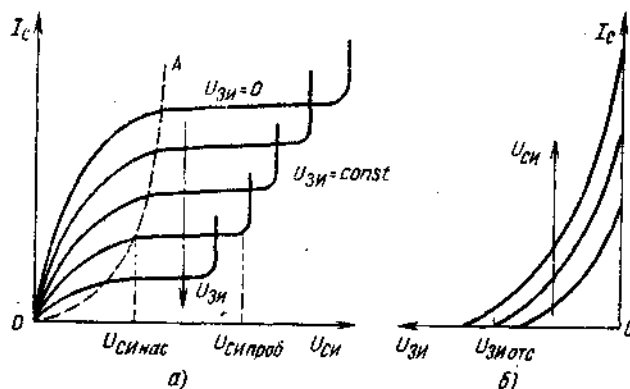


Рисунок 2.11. Статические вольт-амперные характеристики полевых транзисторов с управляющим p - n переходом (схема **ОИ**): а – выходные; б – передаточные (входные)

Пусть напряжение между затвором и истоком $U_{зи} = 0$. При увеличении положительного напряжения $U_{си}$ на стоке ток I_c будет нарастать. Вначале

зависимость $I_c = f(U_c)$ будет почти линейной. Однако с возрастанием I_c увеличивается падение напряжения на канале ($U_c = I_c R_k$, где R_k – сопротивление канала). Это напряжение распределяется вдоль канала: вблизи истока оно равно нулю, а вблизи стока – максимальной величине. На $p-n$ переходе, несмотря на нулевой потенциал затвора, появляется обратное смещающее напряжение, величина которого нарастает по направлению к истоку, что ведет к сужению сечения токопроводящего канала и замедляет рост тока I_c . В конечном итоге, при дальнейшем росте стока, у стокового конца канал сужается настолько, что дальнейшее повышение напряжения уже не приводит к росту I_c . Этот режим получил наименование название *режима насыщения*, а напряжение U_c , при котором происходит насыщение, называется *напряжением насыщения* ($U_{c.нас}$).

При подаче на затвор обратного напряжения (для ПТ с каналом n типа, как указывалось ранее, оно будет отрицательным по отношению к истоку) канал изначально будет сужен. Поэтому начальный участок зависимости $I_c = f(U_c)$ пойдет с меньшим наклоном и насыщение наступит при меньших токах стока.

Напряжение насыщения равно $U_{си\ нас} = U_{зи} - U_{зи\ отс}$, где $U_{зи\ отс}$ – *напряжение отсечки*, управляющее напряжение, при котором $I_c = 0$ (*режим отсечки*), а $U_{зи}$ – управляющее напряжение, соответствующее рассматриваемой **ВАХ** транзистора.

При дальнейшем увеличении выходного напряжения ток I_c практически остается неизменным вплоть до *пробивного напряжения* $U_{си\ проб}$. Как видно из рисунка.2.11,а с уменьшением напряжения $U_{зи}$ пробивное напряжение транзистора $U_{си\ проб}$ уменьшается. При этом (с учетом знака $U_{зи}$) всегда выполняется равенство

$$U_{си\ проб} = U_{си\ проб} \Big|_{при\ U_{зи}=0} + U_{зи}. \quad (2.23)$$

При входном напряжении $U_{зи} = U_{зи\text{ омс}}$, соответствующем обратному напряжению на p - n переходе (затвор–исток) при котором токопроводящий канал транзистора будет полностью перекрыт, выходной ток I_c транзистора будет равен нулю (рисунок 2.11,б).

При $U_{зи} > U_{зи\text{ омс}}$ в токопроводящем канале появляется проток и по нему от стока к истоку начинает протекать ток I_c . Зависимость $I_c = F(U_{зи})$ при $U_c = \text{const}$ получила название *стокозатворной* характеристики. Выходные характеристики ПТ также часто называют *стокостокowymi* или, просто, *стокowymi*.

Полевые транзисторы с изолированным затвором имеют структуру металл–диэлектрик (окисел)–полупроводник. Поэтому, их часто называют МДП- или МОП-транзисторами.

На рисунке 2.11 приведены схематические изображения конструкций таких транзисторов с каналами n типов. Основной приборой служит пластинка (подложка) монокристаллического кремния p типа. Области истока и стока представляют собой участки кремния, сильно легированные примесью n типа³.

Расстояние между истоком и стоком примерно 1 мкм. На этом участке (рисунок 2.11,а) расположена узкая слабо легированная полоска кремния n типа (канал). Затвором служит металлическая пластинка, изолированная от канала тонким слоем диэлектрика (толщиной долей микрометра). В качестве диэлектрика наиболее часто используют пленка двуокиси кремния, образованная из материала подложки при высокой температуре. В последнее время в качестве диэлектрика применяют другие материалы, например, нитрид кремния.

³ Если концентрации основных носителей заряда в контактируемых полупроводниковых областях резко отличаются (на два порядка и более), то область с большей концентрацией отмечается символом $+$

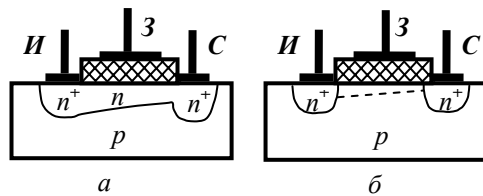


Рисунок 2.12. Схематическое изображение ПТ с изолированным затвором

Электрическое поле, возникающее от напряжения, приложенного к затвору, проникает в поверхностный слой подложки. В зависимости от полярности этого напряжения в канал может либо притягиваться, либо выталкиваться часть основных носителей заряда канала (на приведенном рисунке это электроны). При отрицательном напряжении на затворе электроны проводимости выталкиваются из области канала в объем полупроводника подложки. При этом канал обедняется носителями заряда, что ведет к уменьшению тока в канале. Положительное напряжение на затворе способствует втягиванию электронов проводимости из подложки в канал. В этом режиме, получившем название *режима обогащения*, ток канала возрастает.

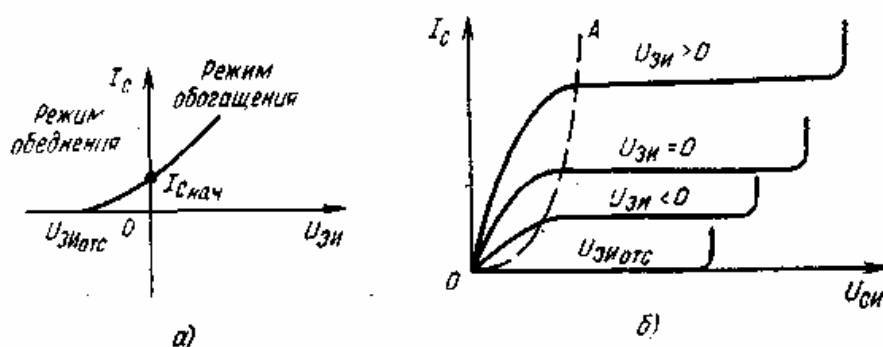


Рисунок 2.12. Передаточная (а) и выходная (б) ВАХ МДП-транзистора со встроенным *n* каналом

Таким образом, в отличие от полевого транзистора с *p-n* переходами транзистор с изолированным затвором может работать с нулевым,

отрицательным или положительным напряжением на затворе (рисунок 2.12,а). Управляющее напряжение на затворе, при котором $I_c = 0$, также как у ПТ с управляющим p - n переходом, называется напряжением *отсечки*.

Выходные характеристики полевого транзистора с изолированным затвором (рисунок 2.12,б) имеют такой же вид, как и характеристики транзистора с p - n переходами. Различие заключается лишь в том, что транзисторы с p - n переходом могут работать только в режиме обеднения (сужения) канала, а транзисторы типа МДП (или МОП) работают как в режиме обеднения (при отрицательных напряжениях на затворе), так и в режиме обогащения (при положительных напряжениях на затворе).

Рассмотренный тип ПТ с изолированным затвором получил наименование МДП (или МОП) транзисторов *со встроенным каналом*. Канал у него был введен (встроен) в процессе изготовления. Если же между зонами n^+ под истоком и стоком отсутствует канал, то при нулевом потенциале на затворе на пути от истока к стоку окажутся два встречно включенных p - n перехода. Поэтому при подаче напряжения между стоком и истоком любой полярности выходной ток I_c окажется ничтожно мал (примерно равен обратному току p - n перехода). Если к затвору приложить небольшое положительное напряжение $U_{зи}$, то под действием поля из подложки к поверхности начнут притягиваться электроны дырки, а дырки – выталкиваться в глубину. При определенном положительном напряжении ($U_{зи\ пор}$), которое получило наименование *порогового*, в подложке под затвором образуется обогащенный электронами поверхностный слой, который замкнет области под стоком и истоком. Последующее повышение напряжения на затворе приведет к тому, что по образовавшемуся каналу потечет ток стока. Такой тип ПТ с изолированным затвором носит наименование МДП (или МОП) транзисторов с *индуцированным каналом*.

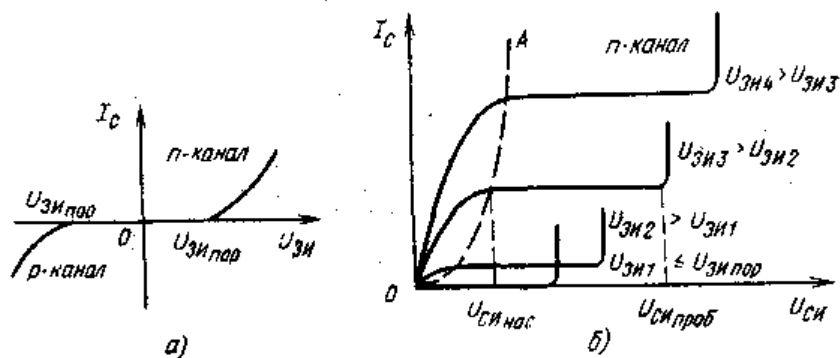


Рисунок 2.12. Передаточные (а) и выходные (б) ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом

Напряжение на затворе, при котором возникает токопроводящий канал, называется пороговым ($U_{зи\ пор}$). Если выбрать подложку n типа, а области истока и стока сделать p^+ типа, то получится МДП-транзистор с индуцированным p каналом.

Передаточные и выходные ВАХ для МДП-транзистора при включении с ОИ приведены на рисунке 2.12. Выходные характеристики приведены только для индуцированного канала n типа. На графике стокзатворной характеристике показан ход зависимости для МДП-транзисторов с индуцированным каналом p типа. При этом учтено, что направление тока стока для такого транзистора будет противоположным направлению тока у МДП-транзисторов с индуцированным каналом n типа.

Температурные свойства полевых транзисторов. Как ранее было отмечено, что ток полевых транзисторов обусловлен перемещением носителей заряда канала, т.е. он определяется концентрацией основных носителей. Однако известно, что концентрация основных носителей в полупроводнике почти не зависит от температуры, обуславливается концентрацией примесей. Поэтому и свойства ПТ слабо изменяются с изменением температуры.

От температуры зависят напряжение отсечки и пороговое напряжение. Это обусловлено действием в ПТ двух противоположных механизмов, происходящих при изменении температуры.

У полевого транзистора с управляющим $p-n$ переходом при повышении температуры окружающей среды растет собственное сопротивление полупроводникового материала, что приводит к уменьшению тока стока. Этот эффект особенно сильно проявляется при больших токах стока. Однако увеличение температуры ведет к уменьшению толщины $p-n$ перехода, что расширяет канал. Последнее вызывает увеличение тока стока, что особенно заметно при малых его значениях. Поэтому при увеличении температуры стокзатворная (передаточная) характеристика становится более полой, а напряжение отсечки увеличивается. При некоторых значениях тока стока оба фактора компенсируют друг друга и величина тока стока не зависит от изменения температуры.

Для МДП-транзистора с увеличением температуры также характерно уменьшение тока стока, что объясняется ростом собственного сопротивления полупроводника. В то же время увеличение температуры ведет к увеличению числа пар электрон – дырка в канале, т.е. к увеличению концентрации носителей заряда. Это способствует росту тока стока, особенно при небольших его значениях. Следовательно, и в МДП-транзисторе существуют две противоположные тенденции, которые приводят к изменениям передаточной характеристики, наблюдаемым и у ПТ с управляющим переходом (рисунок 2.13).

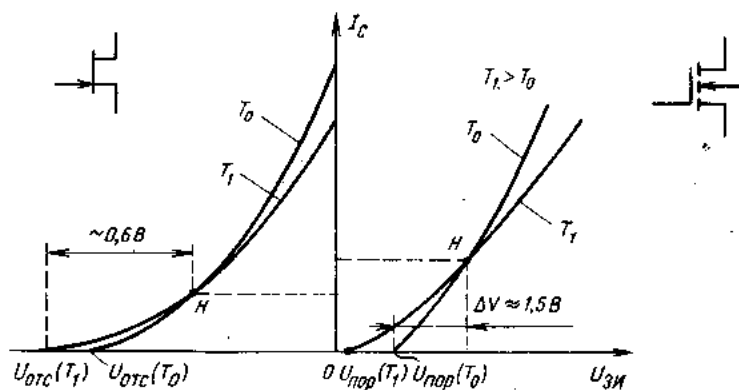


Рисунок 2.13. Зависимость передаточных характеристик полевого транзистора от температуры

Следствием этого является наличие на передаточной характеристике прибора точки (**Н** на рисунке), для которой ток стока не зависит от изменения температуры окружающей среды.

Основными параметрами полевых, транзисторов являются:

Крутизна характеристики:

$$S = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \right|_{U_c = \text{const}} \quad (2.24)$$

Этот параметр характеризует эффективность управляющего действия затвора.

Выходное сопротивление $R_{вых}$ (определяется в режиме насыщения):

$$R_{вых} = \left. \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c} \right|_{U_{зи} = \text{const}} \quad (2.25)$$

Выходное сопротивление характеризуется тангенсом угла наклона выходных характеристик. В рабочей области этот угол близок к нулю и, следовательно, выходное сопротивление оказывается достаточно большим (сотни килоом).

Статический коэффициент усиления:

$$\mu = \frac{\Delta U_c}{\Delta U_{зи}} \quad (2.26)$$

Эти параметры связаны между собой соотношением:

$$\mu = S R_{вых} \quad (2.27)$$

Напряжение отсечки (пороговое напряжение для ПТ с индуцированным каналом)– обратное напряжение на затворе, при котором токопроводящий канал окажется перекрытым.

Кроме указанных, полевые транзисторы, подобно биполярным, характеризуются рядом максимально допустимых параметров, определяющих предельные режимы работы прибора.

Эквивалентные схемы полевых транзисторов. Рассмотрим наиболее распространенные схемы замещения полевых транзисторов. На рисунке 2.14 приведены схемы замещения ПТ. В этих схемах принято, что вывод подложки электрически соединен с истоком. Такое включение наиболее часто используется при разработке схем на ПТ.

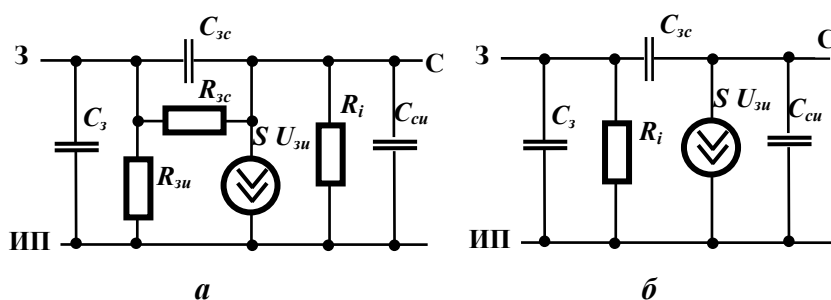


Рисунок 2.14. Эквивалентные схемы полевого транзистора с управляющим *p-n* переходом (а) и изолированным затвором (б)

Следует отметить, что входное и выходное сопротивления ПТ носят явно выраженный емкостный характер, т.к. конструкция полевого транзистора обуславливает наличие больших входных и выходных емкостей. Поэтому увеличение частоты входного сигнала приводит к фактическому падению коэффициента усиления каскада на полевом транзисторе. При увеличении частоты входного сигнала входной ток полевого транзистора, определяемый его входной емкостью, растет, что эквивалентно снижению значения коэффициента усиления. Поэтому принято считать, что в общем случае по быстродействию, усилению и частотным свойствам полевой транзистор, как правило, не имеет преимуществ перед биполярным

транзистором.

К важнейшим достоинствам полевых транзисторов следует отнести:

1. Высокое входное сопротивление, достигающее в канальных транзисторах с *p-n* переходом величины 10^8 – 10^9 Ом, а в транзисторах с изолированным затвором 10^{13} – 10^{16} Ом. Такое высокое значение входного сопротивления объясняется тем, что в первых управляющий переход включен в обратном направлении, а в транзисторах с изолированным затвором входное сопротивление определяется очень большим сопротивлением утечки диэлектрического слоя.

2. Малый уровень собственных шумов, т.к. в полевых транзисторах в формировании тока участвуют заряды только одного знака, что исключает появление рекомбинационного шума.

3. Высокая устойчивость к температурным и радиоактивным воздействиям.

4. Высокая плотность расположения элементов при использовании приборов в интегральных схемах.

Полевые транзисторы могут быть использованы в схемах усилителей, генераторов, переключателей. Особенно широко применяются они в маломощных усилителях с высоким входным сопротивлением. Весьма перспективным является также использование их (с изолированным затвором) в цифровых и логических схемах.