Полевые транзисторы

Полевой транзистор является очень широко используемым активным (т. е. способным усиливать сигналы) полупроводниковым прибором. Впервые он был предложен в 1930 году.

Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля (в биполярных транзисторах выходной ток управляется входным током).

Полевые транзисторы называют также униполярными, так как в процессе протекания электрического тока участвуют только основные носители.

Различают два вида полевых транзисторов: с управляющим переходом и с изолированным затвором.

Устройство полевого транзистора. Схематическое изображение структуры полевого транзистора с управляющим переходом и каналом *p*-типа приведено на рис 4.1,*а* условное графическое обозначение этого транзистора – на рис. 4.2,*а*. Стрелка указывает направление от слоя *p* к слою *n* (как и стрелка в изображении эмиттера биполярного транзистора). В интегральных микросхемах линейные размеры транзисторов могут быть меньше 1 мкм.

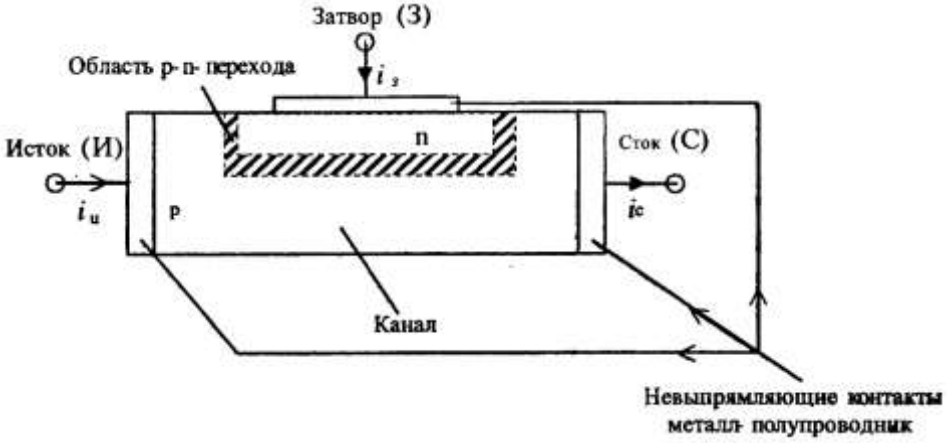

Рис. 4.1. Структура полевого транзистора

Рис. 4.2. Графическое изображение полевого транзистора:
а) с управляющим переходом и каналом p-типа;
б) с управляющим *p-n*–переходом и каналом n-типа

Удельное сопротивление слоя *n* (затвора) намного меньше удельного сопротивления слоя *p* (канала), поэтому область *p-n*–перехода, обедненная подвижными носителями заряда и имеющая очень большое удельное сопротивление, расположена главным образом в слое *p*.

Если типы проводимости слоев полупроводника в рассмотренном транзисторе изменить на противоположные, то получим полевой транзистор с управляющим *p-n*–переходом и каналом *n*–типа. Его условное графическое обозначение представлено на рис. 4.2,*б*.

Выходные (стоковые) характеристики. Выходной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f\left(u_{uc}\right)\Big|_{u_{зu}=const},$$

где *f* – некоторая функция.

Полевой транзистор характеризуется следующими предельными параметрами (смысл которых понятен из обозначений): $U_{ис.макс}$, $U_{зс.макс}$, $P_{макс}$.

На рис. 4 приведены выходные вольт-амперные характеристики полевых транзисторов с управляющим переходом с каналом *n*-типа. Характеристики других типов транзисторов имеют аналогичный вид, но отличаются напряжением на затворе и полярностью приложенных напряжений. На этих вольт-амперных характеристиках можно выделить две области: линейную и насыщения.

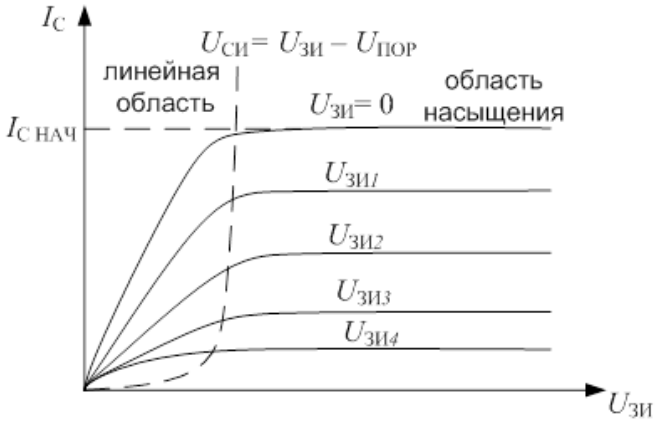

Рис. 4. Выходные характеристики полевых транзисторов с управляющим переходом и каналом *n*-типа

В линейной области вольт-амперные характеристики вплоть до точки перегиба представляют собой прямые линии, наклон которых зависит от напряжения на затворе. В области насыщения вольт-амперные характеристики идут практически горизонтально, что позволяет говорить о независимости тока стока от напряжения на стоке. Особенности этих характеристик обусловливают применение полевых транзисторов. В линейной области полевые транзисторы используют как сопротивление, управляемое напряжением на затворе, а в области насыщения – как усилительный элемент.

3. **Схемы включения полевых транзисторов**

Включение полевых транзисторов с управляющим *p-n* переходом и каналом *n* типа в схемы усилительных каскадов с общим истоком и общим стоком показано на рис. 5, *а, б*.

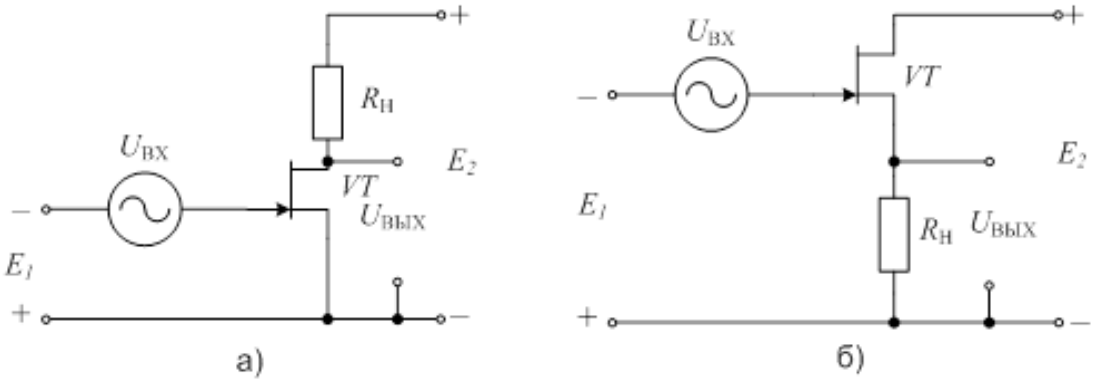

Рис. 5. Включение полевых транзисторов в схемы: *а*) с общим истоком, *б*) с общим стоком

Постоянное напряжение $\boldsymbol{E_1}$ обеспечивает получение определенного значения тока стока $\boldsymbol{I_C = E/(r_{СИ} + R_Н)}$ в зависимости от сопротивления канала $\boldsymbol{r_{СИ}}$. При подаче входного усиливаемого напряжения $\boldsymbol{U_{ВХ}}$ потенциал затвора меняется, а соответственно меняются и токи стока и истока, а также падение напряжения на резисторе $\boldsymbol{R_Н}$. Приращение падения напряжения на резисторе $\boldsymbol{R_Н}$ при большом его значении гораздо больше приращений входного напряжения. За счет этого осуществляется усиление сигнала. При изменении типа проводимости канала меняются только полярности приложенных напряжений и направления токов.

Стокозатворные характеристики (характеристики передачи, передаточные, переходные, проходные характеристики). Стокозатворной характеристикой называют зависимость вида

$$i_c = f\left(u_{зи}\right)\Big|_{u_{ис}=\text{ const}},$$

где f – некоторая функция.

<u>Передаточная (стоко-затворная) характеристика.</u>

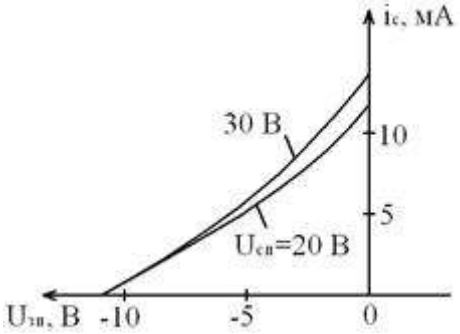

Рис. 4. Передаточные характеристики полевого транзистора с управляющим p-n-переходом

Передаточной характеристикой полевого транзистора называется графически выраженная зависимость $I_c=f(U_{зи})$ при $U_{си}$=const (рис.4). При $U_{зи}=0$ ток I_c достигает максимального значения, т.к. в данном случае ширина канала максимальна, а сопротивление минимально. С ростом $U_{обр}$ при неизменном $U_{си}$ уменьшается ток I_c.

При $U_{зи}=U_{зи\ отс}$ канал перекрывается, ток I_c становится близким к нулю. Однако при этом в цепи течет незначительный ток неосновных носителей заряда. При тех же значения напряжения $U_{зи}$, но разных напряжениях $U_{си}$ ток I_c меняется мало, что объясняется тем, что напряжения $U_{си}$ берутся при насыщении тока I_c.

Таким образом, передаточная характеристика определяет эффективность управления током I_c с помощью изменения входного напряжения $U_{зи}$. В то время как в режиме насыщения большие изменения напряжения $U_{си}$ почти не влияют на изменение тока I_c, даже незначительные изменения напряжения $U_{зи}$ вызывают большое изменение этого же тока I_c. В отличие от биполярных транзисторов входные характеристики $I_{вх}=f(U_{вх})$ при $U_{вых}$=const не представляют особого интереса, т.к. входной ток, который является током неосновных носителей заряда, очень мал и при изменении $U_{зи}$ практически не меняется.

Такие характеристики не дают принципиально новой информации по сравнению с выходными, но иногда более удобны для использования. Для некоторых транзисторов задается максимальное (по модулю) допустимое отрицательное напряжение $u_{зи}$, например, для транзистора 2П103Д это напряжение не должно быть по модулю больше чем 0,5 *В*.

Параметры, характеризующие свойства транзистора усиливать напряжение.

Крутизна стокозатворной характеристики S (крутизна характеристики полевого транзистора):

$$S = \left|\frac{di_c}{du_{зи}}\right|_{\substack{u_{зи}-\text{заданное}\\ u_{ис}=\text{const}}}.$$

Обычно задается $u_{зи}$=0. При этом для транзисторов рассматривается крутизна максимальная Для КП103Л S=1,8…3,8 *мА/В* при $u_{ис}$=0, t=20°С.

Внутреннее дифференциальное сопротивление $R_{ис.диф}$ (внутреннее сопротивление) определяется выражением:

$$R_{ис.диф} = \left| \frac{du_{ис}}{di_c} \right|_{\substack{u_{ис}-\text{заданное} \\ u_{зи}=\text{const}}}.$$

Для КП103Л $R_{ис.диф} \approx 25$ *кОм* при $u_{ис}$=10 *В*, $u_{зи}$=0.

Коэффициент усиления

$$M = \frac{du_{ис}}{du_{зи}} \Bigg|_{\substack{u_{зи}-\text{заданное} \\ i_c=\text{const}}}.$$

Можно отметить, что

$$M = S \cdot R_{ис.диф}.$$

Для КП103Л при S=2 *мА/В* и $R_{ис.диф}$=25 *кОм* М=2 (*мА/В*)·25 *кОм*=50.