

## Лабораторная работа #3

### Исследование характеристик полевого транзистора и усилителя на полевом транзисторе

**Цель работы:** Исследование вольтамперных характеристик полевого транзистора и усилителя на его основе.

#### Теоретическое введение

Полевыми или униполярными транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых изменение тока производится изменением проводимости проводящего канала с помощью электрического поля, перпендикулярного направлению тока. Прохождение тока в канале только одним типом зарядов. Электроды, подключенные к каналу, называются стоком (Drain) и истоком (Source). Управляющий электрод называется затвором (Gate). Напряжение управления прикладывается между затвором и истоком.

В зависимости от выполнения затвора униполярные транзисторы делятся на две группы: с управляющим р-п переходом и с изолированным затвором на основе конструкции металл-диэлектрик-полупроводник (так называемые МДП-транзисторы).

Устройство полевого транзистора с управляющим р-п переходом показано на рис.3.1.

Между истоком *I* и стоком *C* расположен п-канал из полупроводника п-типа и включен источник напряжения положительным полюсом к стоку. В п-канале есть ток проводимости  $I_C$ , значение которого зависит от сопротивления канала, связанного с его шириной. Ширину канала можно изменять, включив между затвором *З* и истоком *I* источник управляющего напряжения  $E_3$  отрицательным полюсом к затвору. Передаточные характеристики полевых транзисторов, которые выражают зависимость тока стока от напряжения затвор-исток  $I_C(U_{ЗИ})$ , показаны на рис 3.4.

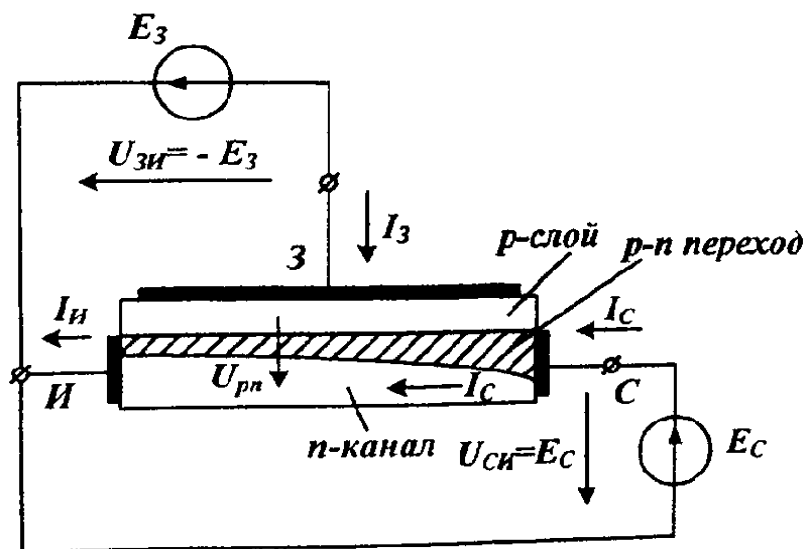


Рис.3.1 Устройство полевого транзистора с управляющим р-п переходом

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором показано на рис.3.2

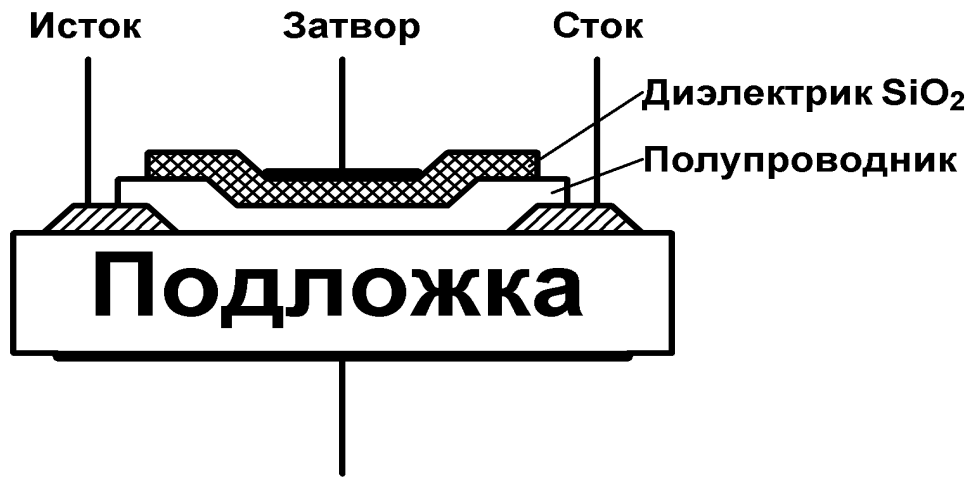


Рис.3.2 Устройство полевого транзистора с изолированным затвором

В полевых транзисторах с изолированным затвором электрод затвора изолирован от полупроводникового канала с помощью слоя диэлектрика из двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$ . Ток утечки затвора пренебрежимо мал. Полупроводниковый канал может быть обеднен носителями заряда или обогащен ими. При обедненном канале электрическое поле затвора повышает его проводимость, поэтому канал называется *индуцированным*. Если канал обогащен носителями, то он называется *встроенным*. Электрическое поле в этом случае в зависимости от полярности напряжения  $U_{зи}$  может приводить либо к обеднению канала носителями зарядов, либо к обогащению его. В результате изменяется проводимость канала.

Проводимость канала может быть электронной или дырочной. Если канал имеет электронную проводимость, то он называется *n*-каналом. Каналы с дырочной проводимостью называются *p*-каналами. Подложка *П* является полупроводником, отличающимся по проводимости от канала. Как правило, подложку соединяют с истоком.

Схематические изображения полевых транзисторов показаны на рис.3.3.

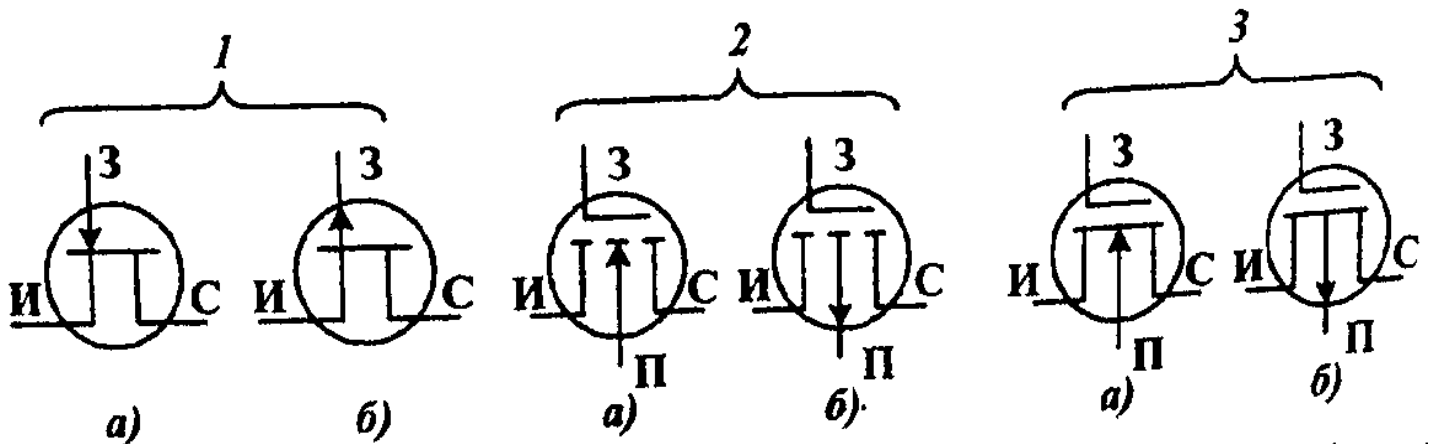


Рис 3.3 Схематические изображения полевых транзисторов: 1 - с управляющим р-п переходом; 2 — с индуцированным каналом; 3 — со встроенным каналом; а) для канала *n*- типа, б — для канала *p*- типа.

Важное значение имеют передаточные характеристики полевых транзисторов, позволяющие определить полярность управляющего напряжения, направление тока в канале и диапазон изменения управляющего напряжения (рис.2.4).

Полевые транзисторы с каналом *n*- типа имеют положительный ток и работают при положительном напряжении на стоке, а полевые транзисторы с каналом *p*- типа имеют отрицательный ток и работают при отрицательном напряжении на стоке. Характеристики полевых транзисторов с управляющим р-п переходом при нулевом значении напряжения  $U_{зи}$  имеют максимальное значение тока  $I_{снач}$ . При увеличении запирающего напряжения ток стока уменьшается и при напряжении отсечки  $U_{отс}$  становится близким к нулю.

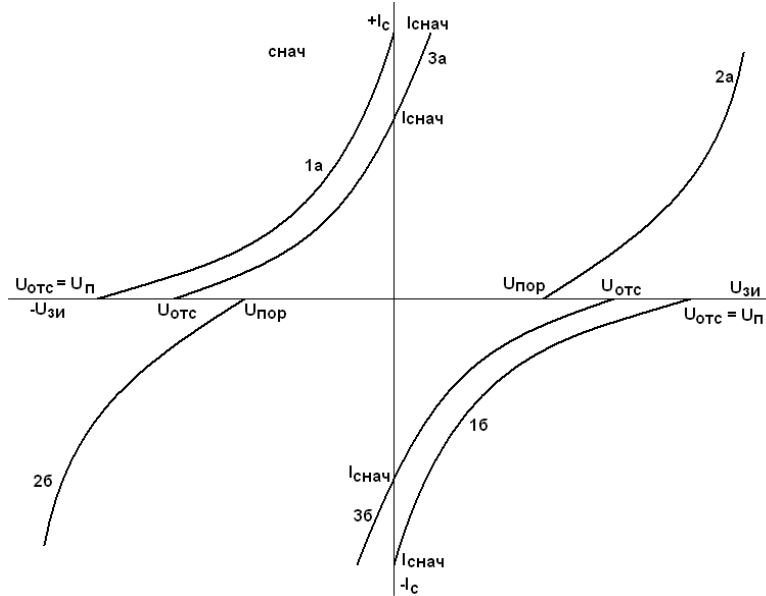


Рис.3.4. Передаточные характеристики полевых транзисторов разных типов

Характеристики транзисторов с индуцированным каналом при нулевом напряжении на затворе имеют нулевой ток. Ток стока появляется при напряжении на затворе больше порогового и увеличивается с ростом напряжения  $U_{зи}$ .

Характеристики транзисторов со встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе имеют начальное значение тока  $I_{снач}$ . Эти транзисторы работают как при положительных, так и при отрицательных напряжениях на затворе.

Выходные характеристики МДП — транзистора с индуцированным каналом n- типа показаны на рис.3.5.

В линейной области полевой транзистор используется как сопротивление, управляемое напряжением на затворе, а в области насыщения — как усилительный элемент. Усилительные свойства определяются крутизной вольтамперной характеристики:  $S = \left| \frac{di_c}{dU_{зи}} \right|$

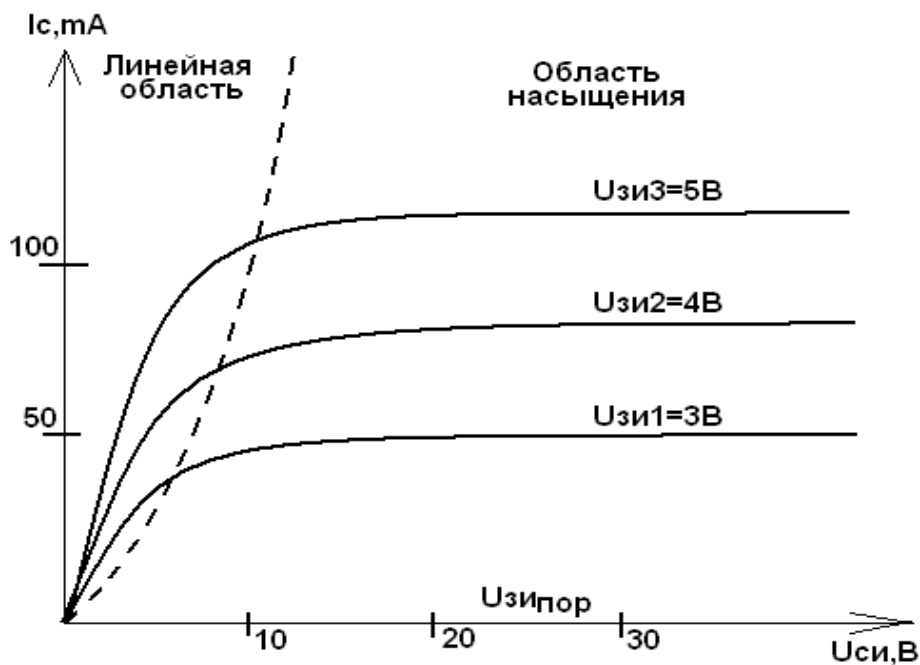


Рис.3.5. Выходные характеристики полевого транзистора КП1902

## Описание схемы измерений

Схема усилительного каскада с общим истоком, которая исследуется в лабораторной работе, показана на рис.3.6.

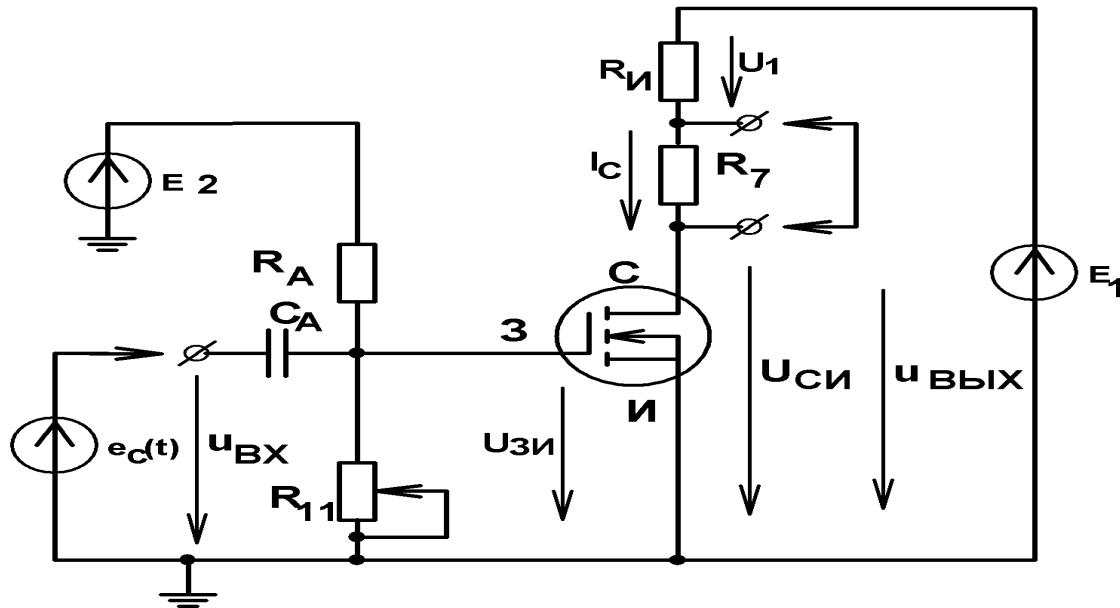


Рис 3.6. Схема усилительного каскада на полевом транзисторе

Источник постоянного напряжения  $E_1$  создает режим по постоянному току в цепи стока. Источник  $E_2$  создает смещение на затворе, которое регулируется потенциометром  $R_{11}$ . Сопротивление в цепи стока  $R_C = R_7 + R_{II}$ . Входное сопротивление каскада без учета разделительной емкости  $C_A$  равно

$$R_{BX} = \frac{R_A \cdot R_{11}}{R_A + R_{11}} \quad (3.1)$$

Значения элементов:  $R_{II}=10$  Ом,  $R_7=510$  Ом,  $R_{11}= 2,2$  кОм,  $R_A=2,2$  кОм,  $C_B=2,2$  мкФ.

Коэффициент усиления каскада по напряжению для малого переменного сигнала в режиме холостого хода без учета  $C_A$  равен  $K'_{U_x} = -SR_C$ . С учетом коэффициента передачи входной цепи коэффициент усиления по напряжению составит:

$$K_{U_x} = SR_C K_{BC} = SR_C \frac{R_{BX} \cdot \omega C_A}{\sqrt{1 + (R_{BX} \cdot \omega C_A)^2}} \quad (3.2)$$

## Лабораторное задание

### А. Исследование передаточной характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком и определение крутизны вольтамперной характеристики

1. В схеме рис.3.6 установить  $E1=10В$ ,  $E2=10В$ ,  $R_{11}$  в крайнее левое положение, не подключать,  $R_7$  закоротить перемычкой.
2. Увеличивая  $R_{11}$ , измерять мультиметрами напряжения  $U_{зи}$  и  $U_1$ . Результаты записать в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

$U_{зи}, В$	0	1	2	3	4	5
$U_1, В$						
$I_C, мА$						

Построить график передаточной характеристики.

### Б. Исследование выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком

3. В схеме измерений рис.3.6 установить  $E2=10В$ ,  $U_{зи}=1В$ . Входной сигнал  $e_c(t)$  не подключать,  $R_7$  закоротить перемычкой.  
Изменяя  $E1$ , провести измерения зависимости тока стока  $I_C$  от напряжения сток-исток  $U_{си}$ .  
Результаты записать в таблицу 3.2

Таблица 3.2

		$U_{си}, В$	0	2	4	6	8	10
$U_{зи}, В$	1	$I_C, мА$						
	2	$I_C, мА$						
	3	$I_C, мА$						
	4	$I_C, мА$						
	5	$I_C, мА$						

4. Выполнить измерения для других значений напряжения затвор-исток, указанных в таблице 3.2.
5. По данным таблицы 3.2 построить семейство выходных характеристик полевого транзистора.

### В. Исследование работы транзисторного усилителя с общим истоком в режиме малого сигнала

6. В схеме рис.3.6 включить  $R_7$ . Установить  $E1=10В$ . Регулируя  $R_{11}$ , установить  $U_{си}=5В$ .
7. Установить в функциональном генераторе частоту синусоидального сигнала 2 кГц, амплитуду входного сигнала  $u_{вх}= 200 мВ$  установить по осциллографу. Подключить входной сигнал к транзисторному усилителю.
8. Осциллографом наблюдать сигнал на выходе усилителя в режиме холостого хода без подключенной нагрузки. Если выходной сигнал не имеет существенных отличий от синусоидальной формы, измерить осциллографом амплитуду выходного сигнала. Если форма выходного сигнала существенно искажена, уменьшить амплитуду входного сигнала до 100 мВ. Записать измеренное

значение  $u_{\text{ВЫХ}}$ . Рассчитать коэффициент усиления по напряжению  $K_{U_x} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$ .

9. Снять амплитудно-частотную характеристику транзисторного усилителя в режиме усиления малого сигнала, изменяя частоту входного сигнала в диапазоне от 200 Гц до 20 кГц. Результаты записать в таблицу 3.3.

Таблица 3.3

$U_{\text{ВХ}} =$ мВ						
F, кГц	0.2	2	5	10	15	20
$U_{\text{ВЫХ}}$						
$K_U(f)$						

#### Д. Исследование искажений выходного сигнала

10. Установить частоту входного сигнала 20 кГц, напряжение 200 мВ. Наблюдая форму выходного сигнала, увеличить амплитуду входного сигнала до появления заметных искажений выходного сигнала. Зарисовать осциллограмму выходного сигнала и записать значение напряжения входного сигнала  $u_{\text{ВХ МАХ}}$ .

11. Установить частоту и амплитуду входного сигнала по п.п.7. Изменяя сопротивление  $R_{11}$ , наблюдать появление искажений формы выходного сигнала. Зарисовать осциллограмму выходного сигнала. Отключить входной сигнал и измерить напряжение затвор-исток, ток стока и напряжение сток-исток.

#### Домашнее задание

1. По данным таблиц 3.1 и 3.2 построить графики передаточной характеристики, семейство выходных характеристик полевого транзистора и найти крутизну характеристики  $S$  при напряжении  $U_{\text{СИ}}=10\text{В}$  и токе стока  $I_{\text{С}}=10\text{ мА}$ .

2. Построить для схемы транзисторного усилителя (рис.3.6) на выходных характеристиках линию нагрузки по постоянному току и отметить положение рабочей точки по п.6.

3. По формулам (3.1) и (3.2) рассчитать коэффициенты усиления транзисторного каскада на частотах 200 Гц, 5 кГц и 20 кГц. Сравнить результаты расчетов с экспериментальными данными из таблицы 3.3.

4. По графикам передаточной характеристики и выходных характеристик проиллюстрировать причины возникновения нелинейных искажений выходного сигнала, которые наблюдались в п.10 и 11. Отметить на нагрузочной прямой по постоянному току положение рабочей точки, соответствующей п.11.

## Практическая часть

$U_{зи}, В$	0	1	2	3	4	5
$U_1, В$	0.03	0.18	0.38	0.61	0.81	0.95
$I_C, мА$	3	18	38	61	81	95

		$U_{си}, В$	0(1.22)	2	4	6	8	10
$U_{зи}, В$	1	$I_C, мА$	9	11	13	14	14	14
	2	$I_C, мА$	15	21	28	31	32	31
	3	$I_C, мА$	17	26	42	48	57	52
	4	$I_C, мА$	18	31	53	66	71	73
	5	$I_C, мА$	19	32	57	75	85	90

