

Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им А.Н.ТУПОЛЕВА

---

Кафедра радиоэлектроники и информационно-измерительной техники

## **Исследование полевых транзисторов**

*Методические указания  
к лабораторной работе № 208*

Казань, 2011

УДК 621.38

Исследование полевых транзисторов: Методические указания к лабораторной работе №208. Сост. И. К. Насыров, Н.Б.Куншина, Л.М. Урманчиев. Казанский Государственный Технический Университет, Казань, 2005, 12 с.

Таблиц: 4, Иллюстраций: 8, Библиография: 2 названия.

Рецензенты: Кафедра радиофизики Казанского Государственного Университета; доктор физико-математических наук Р. Г. Минуллин

Цель работы: ознакомление с физическими основами работы полевых транзисторов и изучение их основных характеристик и параметров.

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ.

Полевыми транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых ток через канал управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором и истоком.

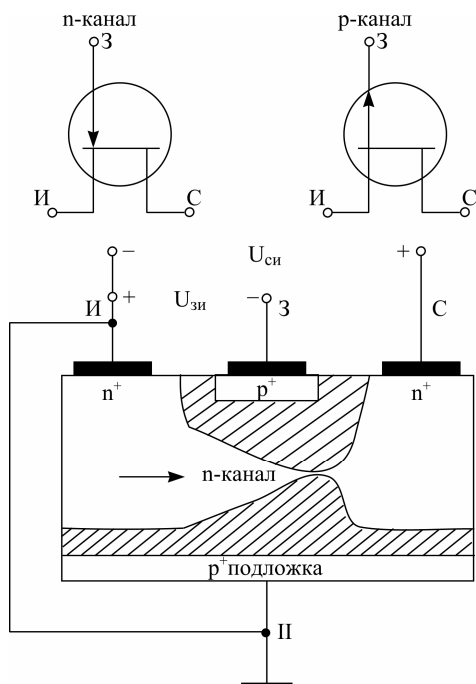
Истоком называют электрод полевого транзистора, через который в канал втекают носители заряда, собираемые при выходе из канала другим электродом – стоком.

Электрод полевого транзистора, к которому прилагается управляющее напряжение, называют затвором.

Канал – область полупроводникового кристалла, в которой поток носителей регулируется изменением ее поперечного сечения (с помощью управляющего напряжения затвора).

Полевые транзисторы называют также униполярными, так как принцип их работы основан на управлении движением носителей только одного знака (основных носителей). Различают два типа полевых транзисторов: полевые транзисторы с управляющим *p-n* переходом и полевые транзисторы с изолированным затвором (МДП- или МОП- транзисторы). Все полевые транзисторы различаются также по виду проводимости канала: *p*- или *n* - типа.

### *Полевые транзисторы с управляющим p-n переходом.*



Условное обозначение и устройство полевого транзистора с управляющим *p-n* переходом показано на рис. 1.

На подложке из *p*-кремния создается тонкий слой полупроводника *n* – типа, выполняющий функцию токопроводящей области (канала). Канал изолирован *p-n* переходами от подложки и затвора. Затвор используется для управления величиной поперечного сечения канала. На концах канала находятся – сильно легированные  $n^+$  - области, благодаря которым формируется омический контакт с металлическими электродами стока и истока.

При подключении положительного напряжения  $U_{СИ}$  между стоком и истоком возникает дрейфовое движение основных носителей заряда (электронов) от истока через канал к стоку. Появится ток стока  $I_C$ , который будет максимальным ( $I_{C\ MAX}$ ) при полностью открытом канале, то есть при  $U_{ЗИ}=0$ . При подаче отрицательного напряжения на затвор ( $U_{ЗИ}<0$ ) запирающий слой расширяется, канал уменьшается, увеличивается его сопротивление, уменьшается ток стока  $I_C$ . Отрицательное напряжение на затворе, при котором независимо от напряжения на стоке произойдет перекрытие канала, называется напряжением отсечки тока стока ( $U_{ОТС}<0$ ).

Подложка может служить вторым управляющим электродом. Напряжение на  $p-n$  - переходе вблизи истока будет равно  $U_{ЗИ}$ , а вблизи стока  $U_{ЗИ}+U_{СИ}$  и область запирающего слоя у стокового конца расширится.

Обычно для полевого транзистора используются две статические характеристики: выходные характеристики  $I_C=f(U_{СИ})$  при  $U_{ЗИ}=const$  (рис.2,а) и характеристика прямой передачи  $I_C=f(U_{ЗИ})$  при  $U_{СИ}=const$  (рис. 2,б).

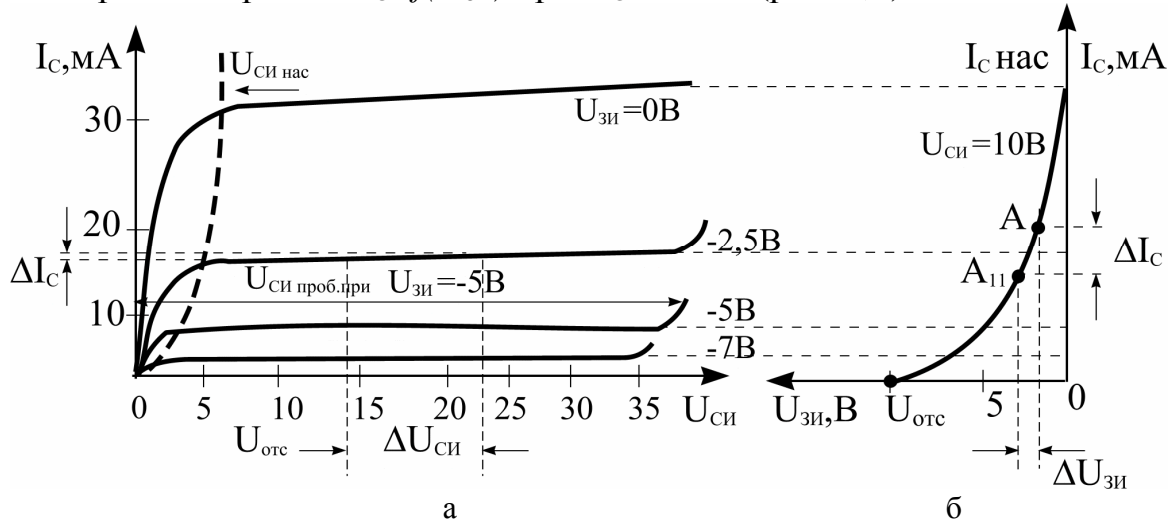


Рис.2

Теоретически выходная (стоковая) характеристика (начальный участок) описывается уравнением

$$I_C = \frac{1}{R_{КК}} \left[ U_{СИ} + \frac{2}{3} \left( \sqrt{\frac{U_{ЗИ}^3}{U_{ОТС}}} - \sqrt{\frac{(U_{ЗИ} + U_{СС})^3}{U_{ОТС}}} \right) \right] \quad (1)$$

при  $U_{СИ} \leq U_{СИ\ НАС} = U_{ОТС} - U_{ЗИ}$ ;  $R_{КО} = \frac{U_{ОТС}}{3I_{C\ МАХ}}$  - сопротивление канала.

Передаточная характеристика полевого транзистора в режиме насыщения ( $U_{СИ} > U_{СИ\ НАС}$ ) аппроксимируется зависимостью

$$I_C = I_{C\ МАХ} \left[ 1 - 3 \frac{U_{ЗИ}}{U_{ОТС}} + 2 \left( \frac{U_{ЗИ}}{U_{ОТС}} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (2)$$

В качестве параметров полевого транзистора используют следующие величины (для схемы с ОИ):

выходное дифференциальное сопротивление

$$R_{\text{ВЫХ.ДИФ.}} = R_{IC} = \frac{dU_{СИ}}{dI_{СНАС}} \approx \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta I_C} \quad \text{при } U_{ЗИ} = \text{const}; \quad (3)$$

Крутизна характеристики прямой передачи

$$S = \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}} \quad \text{при } U_{СИ} = \text{const}; \quad (4)$$

статический коэффициент усиления

$$\mu = SR_{IC} = \frac{dU_{СИ}}{dU_{ЗИ}} = \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta U_{ЗИ}} \quad \text{при } I_{СНАС} = \text{const}; \quad (5)$$

При работе полевого транзистора на высоких частотах необходимо учесть влияние межэлектродных емкостей и распределенных сопротивлений канала  $r'_k$ , стока  $r_c$ , истока  $r_i$ .

Межэлектродные емкости:

- емкость затвора на исток  $C_{ЗИ}$  и подложку  $C_{ЗП}$ ;
- емкость затвора по отношению к каналу  $C_{ЗК}$ ;
- емкость стока на затвор  $C_{ЗС}$ ;
- емкость стока на подложку  $C_{СП}$ .

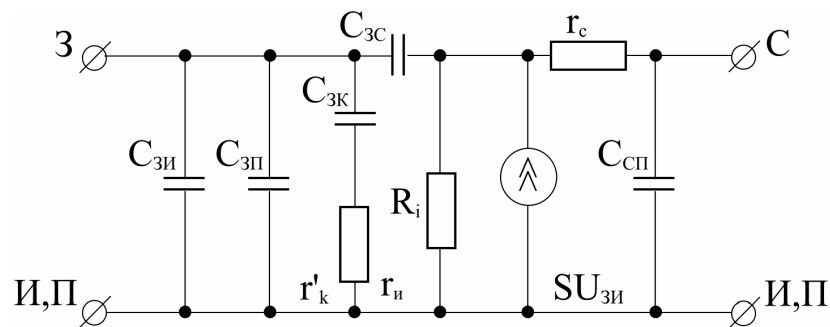
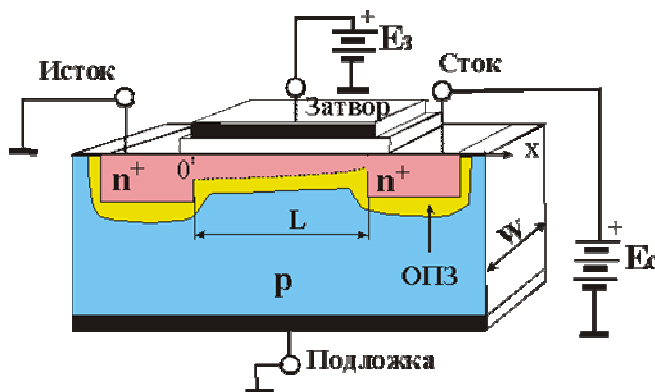


Рис. 3. Эквивалентная схема полевого транзистора.

### МДП-транзисторы с изолированным затвором



В отличие от полевых транзисторов с управляющим  $p-n$  - переходом, в МДП-транзисторах электрод затвора изолирован от полупроводниковой области канала диэлектриком.

В подложке – пластине кремния, например  $p$ -типа, образованы путем локальной диффузии две области  $n^+$ -типа – сток и исток. Эти области соединены тонким поверхностным слоем – каналом  $n$ -типа. Поверхность кристалла полупроводника покрыта пленкой диэлектрика, обычно пленкой двуокиси кремния  $SiO_2$ . Поверх этой пленки, над каналом, нанесена металлическая пленка – затвор. Отсюда и название транзистора – МДП – металл – диэлектрик – проводник.

МДП-транзисторы с изолированным затвором подразделяются на МДП-транзисторы со встроенным и индуцированным каналом. Устройство МДП-транзисторов со встроенным каналом показано на рис.4,б.

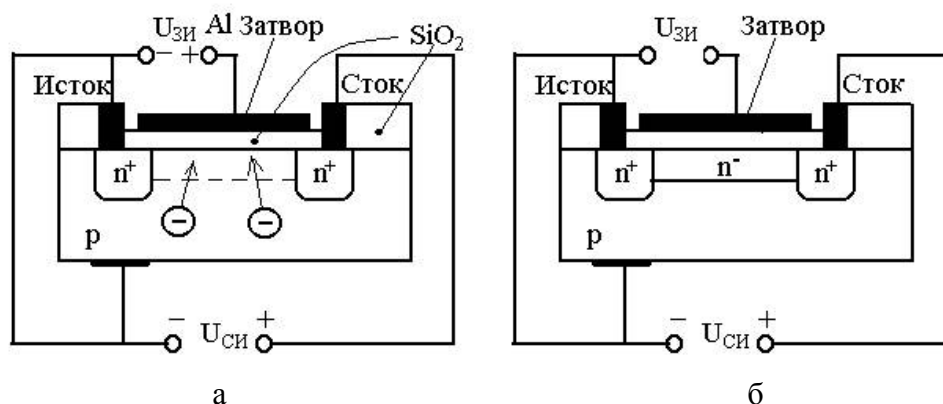


Рис.4

В МДП транзисторе со встроенным каналом ( $n$ -канал) (рис.4.б), области стока и истока ( $n^+$ -области) выполнены в процессе изготовления прибора.

Если на затвор транзистора со встроенным  $n$ -каналом подано отрицательное напряжение, то в канале создается поле, под влиянием которого электроны выталкиваются из канала, обедняя его основными носителями. Чем меньше носителей, тем меньше тока в канале. Если на затвор подано положительное напряжение, то электрическое поле втягивает электроны в канал, обогащая его основными носителями. Таким образом, меняя величину и полярность напряжения  $U_{зи}$  можно, как и в транзисторе с управляющим  $p$ - $n$  – переходом, менять величину проводимости канала.

Проводимость канала в МДП-транзисторе меняется не за счет изменения поперечного сечения канала, а за счет изменения концентрации носителей в нем под действием напряжения на затворе. МДП-транзистор со встроенным каналом может работать как при отрицательном, так и при положительном напряжении на затворе.

Схемы включения МДП – транзисторов приведены на рис.5, (а - со встроенным  $p$  -каналом, б - с индуцированным  $n$  - каналом)

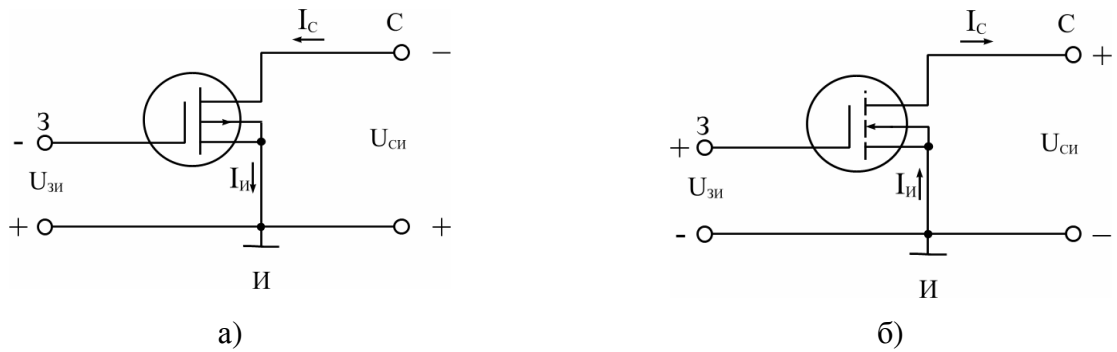


Рис.5. Схема включения МДП транзистора с общим истоком:  
а) со встроенным каналом, б) с индуцированным каналом.

Характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом приведены на рис.5:

- а) выходные (стоковые);
- б) прямой передачи (стоко - затворные).

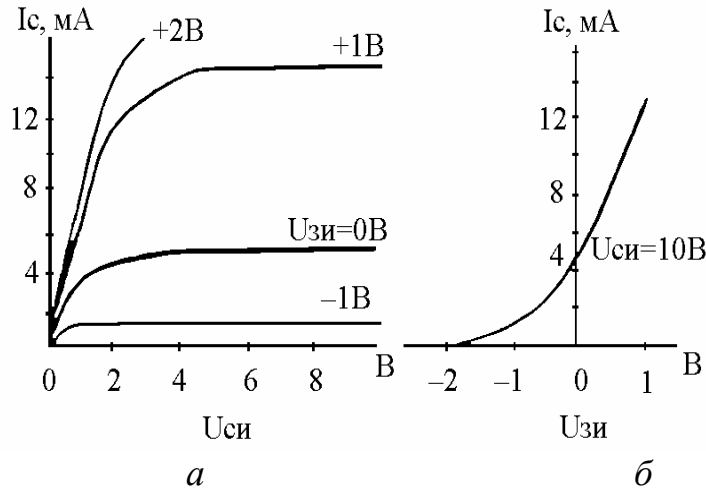


Рис.5

В МДП-транзисторе с индуцированным каналом в исходном состоянии между истоком и стоком отсутствует токопроводящий канал, который индуцируется только при соответствующем напряжении на затворе, называемом пороговым напряжением  $U_0$ .

Устройство МДП - транзисторов с индуцированным каналом показано на рис.4,а.

При подаче на затвор положительного напряжения возникающее электрическое поле отталкивает дырки от поверхности в глубь  $p$ -полупроводника. И при дальнейшем увеличении положительного напряжения на затворе приповерхностная область  $p$ -полупроводника продолжает обедняться дырками с инверсной электронной проводимостью. В этом слое под действием электрического поля накапливаются электроны между стоком и истоком, формируется  $n$ -

канал. Изменяя напряжение на затворе, изменяем концентрацию электронов в канале и управляем проводимостью канала.

Характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом даны на рис 6:

- а) выходные (стоковые);
- б) прямой передачи (стоко – затворные).

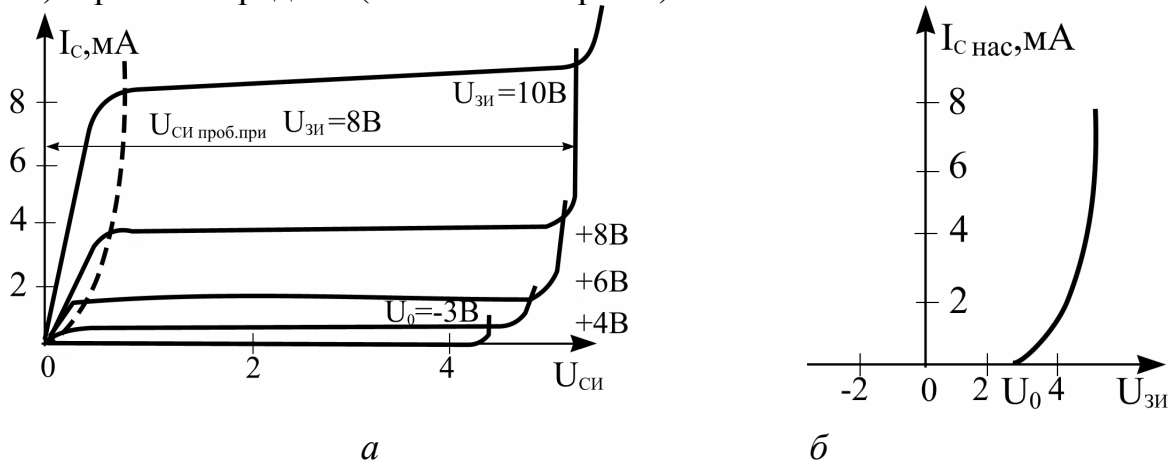


Рис.6.

$$\text{Зависимость } I_C = 2\beta \left[ (U_{ЗИ} - U_0)U_{СИ} - \frac{U_{СИ}^2}{2} \right]^2 \quad (6)$$

описывает выходную характеристику МДП-транзистора до перехода в режим насыщения, т.е. при  $U_{СИ} \leq U_{ЗИ} - U_0 = U_{НАС}$ .

Зависимость  $I_C = b(U_{ЗИ} - U_0)^2$  описывает передаточную характеристику транзистора с индуцированным каналом ( $b$  - удельная крутизна характеристики МДП-транзистора, обусловленная геометрией канала); типичные значение  $b=0,1 \dots 0,2 \text{ mA/B}^2$ .

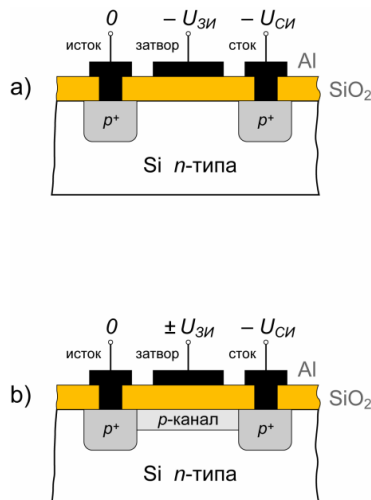


Рис.7. Структура МДП транзисторов с  $p$ -каналом

Если выбрать подложку  $n$ -типа, а слои истока и стока сделать  $p^+$ -типа, то получится МДП-транзистор с индуцированным  $p$ -каналом (рис. 7,а). Он характерен обратными полярностями порогового и рабочих напряжения:  $U_0 < 0$ ,  $U_{ЗИ} < 0$ ,  $U_{СИ} < 0$ .

И соответственно можно получить МДП транзистор со встроенным  $p$ -каналом (рис. 7,б).



## 2. ОПИСАНИЕ МАКЕТА

Передняя панель макета дана на рис. 8.

С помощью переключателя *П* выбирается тип исследуемого транзистора: полевого или МДП. К клеммам подключаются вольтметры для измерения напряжения на затворе  $U_{зи}$  и стоке  $U_{си}$ . Напряжение на стоке и затворе транзистора устанавливается с помощью потенциометров *R1*, *R2*, *R3*. Ток стока регистрируется миллиамперметром на лицевой панели макета.

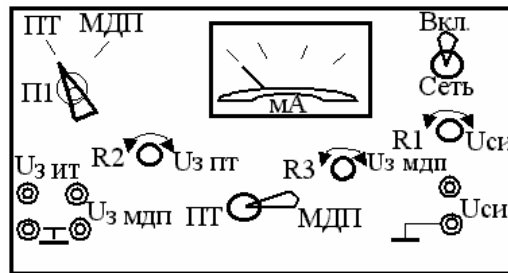


Рис.8

## 3. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

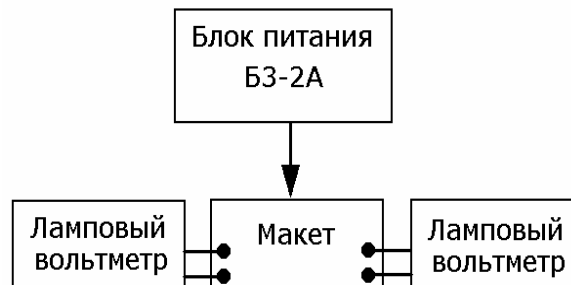


Рис.9

Собрать блок-схему измерения (рис.9), установить на источнике *I* выпрямителя ВЗ-2А напряжение, равное 25 В.

**Задание 1.** Исследовать полевой транзистор с управляющим *p-n* переходом и *p*-каналом.

- Снять статические стоко - затворные характеристики, т.е. зависимости тока стока от напряжения на затворе  $I_C = f_i(U_{зи})$  при  $U_{си} = -5, -8, -10$  В. Полученные данные занести в табл.1, и по ее данным построить передаточные характеристики. Напряжение  $U_{зи}$  начинают задавать с  $U_{отс}$ , т.е. с напряжения, при котором транзистор запирается и  $I_C = 0$ .

Таблица 1

$U_{зи}, В$	$I_C, mA$		
	$U_{си} = -5В$	$-8 В$	$-10 В$
$+U_{отс}$			
·			
0			

- Снять статические стоковые характеристики, т.е. зависимости тока стока от напряжения стока  $I_C = f_2(U_{си})$  при  $U_{зи} = 0; 0,25; 0,5В$ . Полученные данные занести в табл.2 и построить по данным таблицы выходные характеристики.

Таблица 2

$U_{си}, В$	$I_C, mA$		
	$U_{зи} = 0В$	$0,25 В$	$0,5 В$
0			
·			
·			
-10			

- графически, методом характеристического треугольника, определить в рабочей точке с координатами  $U_{зи} = 0,25В$  и  $U_{си} = -4В$  статические параметры полевого транзистора  $S, R_i, \mu$

- построить нагрузочные прямые по формуле

$$E_C = I_C \cdot R_H + U_{си} \quad (8)$$

для  $R_{H2} = 10кОм$  и  $E_C = 10В$ , и нанести на статические выходные характеристики.

- Определить коэффициенты нагруженного режима;

$K_U = -SR_H, P_{вых.мах} = \frac{1}{8} R_H S^2 U_{отс}^2$  и сравнить с аналогичными значениями, найденными графически при  $U_{зи} = 0,25В$ .

**Задание 2.** Исследовать МДП-транзистор с индуцированным каналом  $p$ -типа.

- снять статические характеристики транзистора  $I_C = f_3(U_{ЗИ})$  при  $U_{СИ} = -5; -8, -10\text{В}$ . Полученные данные занести в табл. 3, построить передаточные характеристики.

Таблица 3

$U_{ЗИ}, \text{В}$	$I_C, \text{mA}$		
	$U_{СИ} = -5\text{В}$	$-8\text{В}$	$-10\text{В}$
$-U_0$			
-.			
-.			

- Снять статические характеристики  $I_C = f_4(U_{СИ})$  при  $U_{ЗИ} = -5; -6, -7\text{В}$ . Полученные данные занести в табл.4, построить выходные характеристики.

Таблица 4

$U_{СИ}, \text{В}$	$I_C, \text{mA}$		
	$U_{ЗИ} = -5\text{В}$	$-7\text{В}$	$-8\text{В}$
0			
.			
.			
-10			

- графически определить статические параметры МДП-транзистора в рабочей точке  $U_{ЗИ} = -7\text{В}$ ,  $U_{СИ} = -8\text{В}$ .

#### 4. ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Выполнить домашнее задание по теме «Полевые транзисторы», в соответствии с вариантом, указанным преподавателем.

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать: схемы, поясняющие принцип измерения, характеристики; таблицы и графики экспериментальных данных; расчетные данные; выводы.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Нарисовать и объяснить устройство полевого транзистора с управляющим *p-n* переходом.
2. Нарисовать и объяснить устройство МДП-транзистора с индуцированным каналом.
3. Нарисовать и объяснить устройство МДП-транзистора со встроенным каналом.
4. Характеристики полевого транзистора.
5. Параметры полевого транзистора и определение их по характеристикам.
6. Особенности полевых транзисторов МДП - типа.
7. Поясните физический смысл основных параметров МДП-транзистора: пороговое напряжение, крутизна стока - затворной характеристики, внутреннее сопротивление, коэффициент усиления по напряжению.
8. Напишите формулы и поясните зависимости тока стока  $I_C$  от напряжений  $U_{зи}$ ,  $U_{си}$  для пологого и крутого участков выходной вольт - амперной характеристики.
9. Чем определяется наклон выходной вольт - амперной характеристики на пологом участке?
10. Нарисуйте и поясните эквивалентную схему полевого транзистора для малого сигнала для низких и высоких частот.
11. Что означает предельная частота крутизны и почему крутизна полевого транзистора зависит от частоты?
12. Какие физические и конструктивно – технологические параметры полевого транзистора определяют его частотные свойства?
13. Нарисуйте схему включения МОП (МДП, с *p-n* затвором) транзистора с нагрузкой. Как строится нагрузочная прямая?
14. Пользуясь эквивалентной схемой МОП-транзистора с нагрузкой, вычислите коэффициент усиления по напряжению и выходную мощность.
15. Поясните физический смысл граничной частоты полевого транзистора. От каких параметров зависит граничная частота?
16. Нарисуйте схемы ключей на полевом транзисторе с резистивной и динамической нагрузкой.
17. Какими физическими процессами определяются время спада и время нарастания выходного напряжения ключей?
18. Какие особенности МДП-транзисторов с коротким каналом?

## 7. ЛИТЕРАТУРА:

1. Дулин В. К. Электронные приборы, М., Энергия, 1977.
2. Батушев В. А. Электронные приборы, М., Высшая Школа, 1980.