

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского**

# Полевые транзисторы

## *Практикум*

Рекомендовано методической комиссией физического факультета  
для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки  
210100 – Электроника и наноэлектроника,  
222900 – Нанотехнологии и микросистемная техника

Нижний Новгород  
2013

УДК 621.38  
ББК 32.852.3  
Т46

Т46 ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ: Составители С.В. Тихов, П.А. Шиляев. Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – 28 с.

Рецензент: к.ф.–м.н. **Е. В. Курильчик**

В настоящей работе описаны феноменологическая теория работы полевых транзисторов, управляемых *p-n*-переходом и с изолированным затвором, эквивалентные схемы и методика исследования вольтамперных характеристик и однокаскадного усилителя на полевом транзисторе в системе LabVIEW с помощью станции NI ELVIS. Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 210100 – Электроника и наноэлектроника, 222900 – Нанотехнологии и микросистемная техника

Ответственный за выпуск:  
председатель методической комиссии  
физического факультета ННГУ, к.ф.-м.н., доцент Сдобняков В.В.

УДК 621.38  
ББК 32.852.3

## Содержание

Введение .....	4
1. Теоретическая часть .....	5
1.1. Полевые транзисторы с управляющим переходом .....	5
1.2. Полевые транзисторы с изолированным затвором .....	9
1.3. Эквивалентные схемы полевых транзисторов.....	13
2. Экспериментальная часть.....	16
2.1. Описание лабораторного стенда .....	16
2.2. Рабочее задание и порядок выполнения работы .....	18
2.2.1. Получение передаточной характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком.....	20
2.2.2. Получение зависимости сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор - исток.....	21
2.2.3. Получение семейства выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком.....	22
2.2.4. Исследование работы транзисторного каскада с общим истоком .....	24
2.3. Контрольные вопросы .....	25
2.4. Вопросы для сдачи допуска к лабораторной работе.....	26
Литература .....	27

## ЦЕЛИ РАБОТЫ

- получение передаточной характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком;
- получение зависимости сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор–исток;
- получение семейства выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком;
- исследование работы транзисторного каскада с общим истоком.

## Введение

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем.

В отличие от биполярных транзисторов, у которых оба типа носителей, как основные, так и неосновные, являются ответственными за транзисторный эффект, в полевых транзисторах для реализации транзисторного эффекта применяются только один тип носителей. По этой причине полевые транзисторы называют униполярными. В зависимости от условий реализации эффекта поля полевые транзисторы делятся на два класса: полевые транзисторы с изолированным затвором и полевые транзисторы с затвором в виде  $p$ - $n$ -перехода или барьера Шоттки.

Электрод, через который в проводящий канал втекают носители заряда, называется истоком, а электрод, через который из проводящего канала вытекают носители заряда – стоком. Проводящий канал – это область в полупроводнике, в которой регулируется поток носителей заряда. Затвор – это электрод полевого транзистора, на который подается управляющий электрический сигнал.

Полевые транзисторы обладают рядом достоинств при использовании их в аналоговых переключателях, усилителях и интегральных схемах. Они имеют более высокое входное сопротивление, чем биполярные транзисторы, термостабильны, не чувствительны к эффектам накопления неосновных носителей и поэтому имеют более высокие граничные частоты и скорости переключения, менее чувствительны к наводкам.

# 1. Теоретическая часть

## 1.1. Полевые транзисторы с управляющим переходом

### Структура и принцип действия

Полевой транзистор с управляющим переходом — это полевой транзистор, управление потоком основных носителей в котором происходит с помощью выпрямляющего электрического перехода, смещённого в обратном направлении.

В качестве выпрямляющего перехода может быть использован гомо  $p-n$ -переход, гетеропереход или выпрямляющий переход Шоттки. Полевые транзисторы с управляющим гетеропереходом изготавливают в основном методом эпитаксии соединений типа  $A_3B_5$  на кристаллы арсенида галлия. Выпрямляющие переходы Шоттки осуществляют нанесением металла на кристаллы кремния, арсенида галлия или на различные гетероструктуры. Наиболее распространены полевые транзисторы с управляющим  $p-n$ -гомопереходом в кристаллах кремния. Принцип действия полевых транзисторов с различными управляющими переходами идентичен.

Полевой транзистор с управляющим  $p-n$ -переходом (рис.1) имеет два омических контакта к области полупроводника (сток, исток) и один или два управляющих  $p-n$ -перехода, включенных в обратном направлении (затвор).

При изменении обратного напряжения на управляющем переходе изменяется толщина области пространственного заряда (ОПЗ), и, следовательно, изменяется сопротивление проводящего канала, поэтому такой транзистор представляет собой резистор, управляемый напряжением на затворе. Проводящий канал может иметь проводимость как  $n$ - так и  $p$ -типа. Все полярности напряжений смещения, подаваемые на электроды с  $n$ - и  $p$ -каналами, противоположны.

Управление током стока, т. е. током от внешнего источника питания в цепи нагрузки, происходит при изменении обратного напряжения на  $p-n$ -переходе затвора. Так как обратные токи малы, мощность, необходимая для управления током стока и потребляемая от источника сигнала в цепи затвора, также ничтожно мала. Поэтому полевой транзистор (ПТ) обеспечивает усиление электрических сигналов по мощности, току и напряжению.

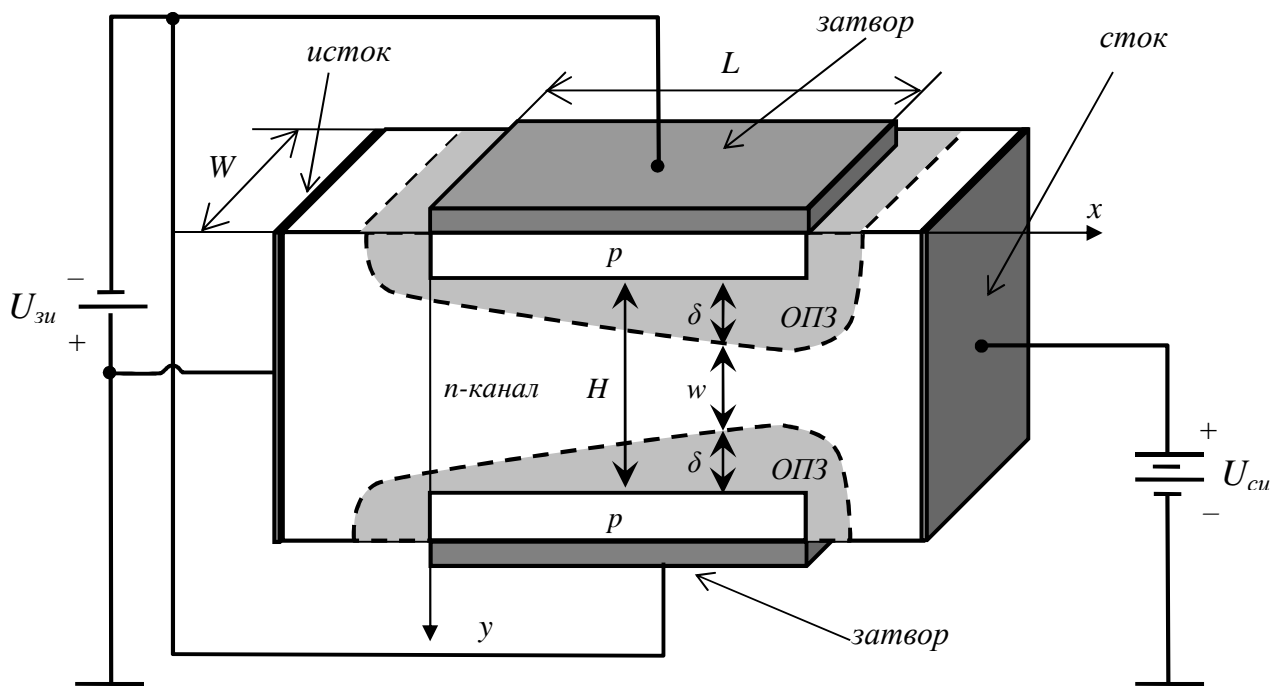


Рис.1. Структура транзистора с каналом  $n$ -типа проводимости ( $L$  – длина канала,  $W$  – ширина канала,  $\delta$  — толщина ОПЗ,  $w$  – толщина канала,  $H$  — вертикальный размер кристалла)

### Статические характеристики

Выходные статические вольт–амперные характеристики полевого транзистора представлены на рисунке 2. Они являются зависимостью тока стока  $I_C$  от напряжения между истоком и стоком  $U_{СИ}$ .

На семействе ВАХ можно выделить три области. В линейной части  $I$  области выходной статической характеристики ток стока  $I_C$  линейно увеличивается с ростом напряжения  $U_{СИ}$ . Угол наклона ВАХ соответствует начальному статическому сопротивлению канала. Во второй области ВАХ практически не зависит от  $U_{СИ}$ . В  $III$  области характеристики  $I_C$  резко увеличивается с ростом  $U_{СИ}$  вследствие пробоя  $p$ - $n$ -перехода.

Линейная зависимость  $I_C = f(U_{СИ})$  наблюдается только при малых напряжениях. По мере увеличения  $U_{СИ}$  ширина области пространственного заряда в конце канала вблизи стока увеличивается и толщина канала  $w$  – уменьшается. Это приводит к увеличению сопротивления и ограничению роста тока стока. При некотором напряжении  $U_{СИ}$  области ОПЗ верхнего и нижнего  $p$ - $n$ -переходов перекрываются (рис.1) и  $I_C$  перестаёт увеличиваться, достигая значения  $I_C$  насыщения. Это происходит при напряжении  $U_{СИнас}$ . При напряжениях  $U_{СИ} > U_{ЗИнас}$  формируется пологая часть ВАХ. При этом ОПЗ  $p$ - $n$ -переходов перекрыты и концентрация носителей заряда в них понижена. Но любой электрон,

попавший в эту область, вследствие наличия продольного поля, достигает стока. Со стороны истока электроны попадают в эту область не только за счёт дрейфа, но и за счёт диффузии. При сильном перекрытии канала длина непокрытой части канала изменится не пропорционально  $U_{СИ}$ , что приводит к некоторому увеличению  $I_C$  с ростом  $U_{СИ}$ . Основным рабочим режимом полевого транзистора — режим насыщения тока стока. Поэтому представляет интерес зависимость  $I_C = f(U_{ЗИ})$  при  $U_{СИ} = const$  и  $U_{СИ} > U_{СИнас}$  (Рис.2, б).

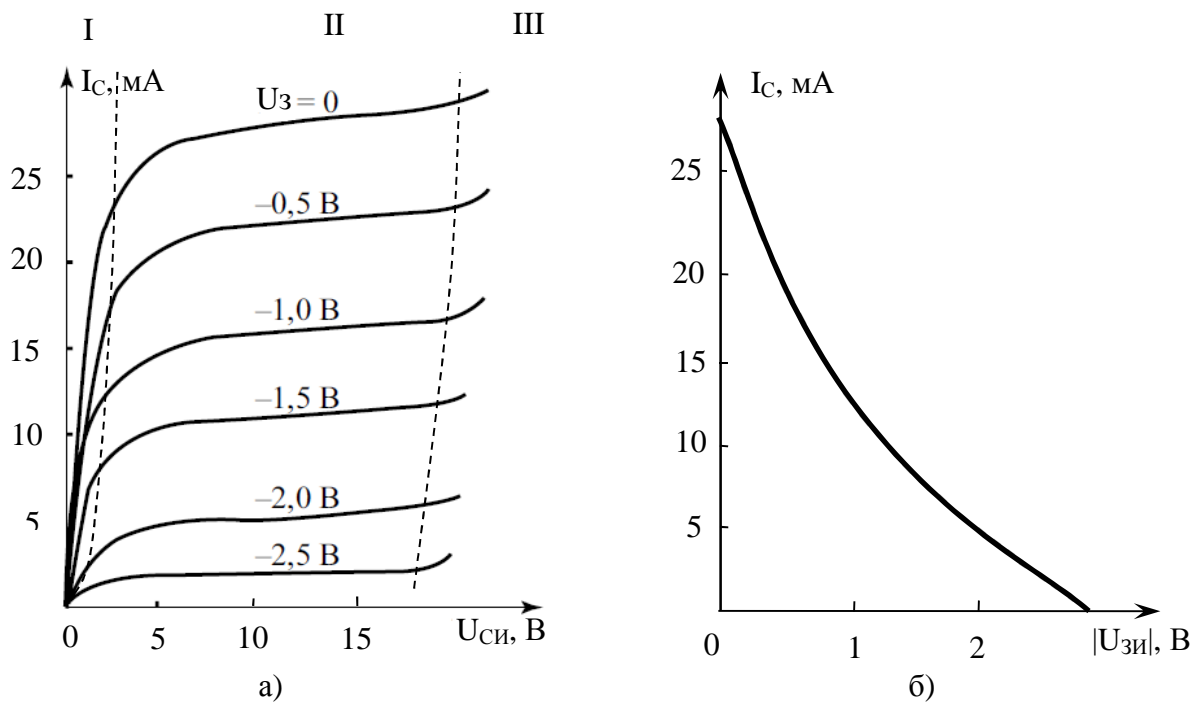


Рис.2. Выходные (а) и переходные (б) вольт–амперные характеристики полевого транзистора КП302Б (канал  $n$ -типа проводимости)

### Расчёт вольт–амперных характеристик

Рассмотрим длинноканальный транзистор ( $L \gg H$ ). Предположим, что канал однородный, подвижность носителей заряда  $\mu_n$  не зависит от величины электрического поля,  $p$ - $n$ -переход резкий. Из рис.1 видно, что локальная толщина канала

$$w = H - 2\delta. \quad (1)$$

Подставляя, сюда выражения для размера ОПЗ имеем:

$$w = H - 2\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(U_{СИ}(x) + U_{ЗИ})}{qN_d}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$  — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника и абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума,  $N_d$  — концентрация легирующей примеси в канале.

Под  $U_{3И}$  принимается модуль обратного напряжения. При напряжении между стоком истоком, называемым напряжением отсечки,  $U_{СИ\ отс}$  канал в квазиравновесных условиях ( $U_{3И}=0$ ) перекрывается ( $w=0$ ). Из (2) находим

$$U_{СИ\ отс} = \frac{qN_d}{8\varepsilon_0\varepsilon} H^2. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что напряжение отсечки прямо пропорционально концентрации  $N_d$  и зависит от начальной толщины канала  $H$ .

Толщина канала с учётом (2) и (3) может быть записана в следующем виде:

$$w = H \left( 1 - \sqrt{\frac{U_{СИ}(x) + U_{3И}}{U_{3И\ отс}}} \right). \quad (4)$$

Сопротивление участка сток–исток от  $x$  до  $x+dx$  в открытом состоянии полевого транзистора (при  $U_{3И} = 0$  и очень малом  $U_{СИ}$ ) определяется шириной канала в данной точке:

$$dR(x) = \frac{\rho \cdot dx}{w \cdot h(x)} = \frac{\rho \cdot dx}{w} \left( 1 - \sqrt{\frac{U_{СИ}(x) + U_{3И}}{U_{3И\ отс}}} \right), \quad (5)$$

где  $\rho = (q\mu_n n_0)^{-1}$  – удельное сопротивление канала.

На данном участке канала толщиной  $dx$  будет падать напряжение  $dU_{СИ}(x)$ :

$$dU_{СИ}(x) = I_C \cdot dR(x). \quad (6)$$

Подставим (6) в (7) и проведем интегрирование по всей длине канала:

$$\int_0^L I_C dx = \frac{WH}{\rho} \int_0^{U_{СИ}} \left( 1 - \sqrt{\frac{U_{СИ}(x) + U_{3И}}{U_{3И\ отс}}} \right) dU_{СИ}. \quad (7)$$

Откуда получаем

$$I_C = \frac{W\rho}{L} \left( U_{СИ} + \frac{2}{3} \frac{U_{3И}^{2/3} - (U_{СИ} + U_{3И})^{2/3}}{U_{3И\ отс}^{1/3}} \right). \quad (8)$$

Величина  $\left(\frac{W\rho}{L}\right)^{-1} = R_{СИ\ отк}$  является сопротивлением открытого канала, тогда выражение можно переписать следующим образом:

$$I_C = \frac{1}{R_{СИ\ отк}} \left( U_{СИ} + \frac{2}{3} \frac{U_{3И}^{2/3} - (U_{СИ} + U_{3И})^{2/3}}{U_{3И\ отс}^{1/3}} \right). \quad (9)$$

При малых значениях напряжения исток–сток ( $U_{СИ} \ll U_{3И}$ ), ток в канале равен

$$I_C = \frac{U_{СИ}}{R_{СИ\ отк}}. \quad (10)$$



Из (5) следует, что при напряжениях  $U_{СИ} < U_{ЗИотс}$  всегда можно найти такое напряжение на стоке  $U_{СИ}$ , когда вблизи стока произойдет смыкание канала:  $w(x=L, U_{ЗИ}, U_{СИ}) = 0$ .

Тогда напряжение отсечки  $U_{СИотс}$ :

$$U_{СИотс} = U_3 - U_{ЗИотс}. \quad (11)$$

По мере роста напряжения сток–исток  $U_{СИ}$  точка отсечки перемещается от истока к стоку. При этом наблюдаются независимость тока стока от напряжения на стоке и эффект модуляции длины канала. Подставляя (11) в (10), получаем зависимость тока стока  $I_C$  в области отсечки для полевого транзистора с затвором в виде  $p$ - $n$ -перехода:

$$I_C = \frac{1}{R_{СИотк}} \left( \frac{1}{3} U_{СИотс} - U_{ЗИ} \left( 1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИотс}}} \right) \right). \quad (12)$$

В области отсечки это выражение хорошо аппроксимируется квадратичной зависимостью вида

$$I_C = \frac{1}{R_{СИотк}} \frac{(U_{ЗИ} - U_{ЗИотс})^2}{3 \cdot U_{ЗИотс}}. \quad (13)$$

На втором участке ВАХ, согласно (12), основной параметр полевого транзистора крутизна  $S = \left| \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = const}$  определяется выражением

$$S = \frac{1}{R_{СИотк}} \left( 1 - \sqrt{\frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИотс}}} \right). \quad (14)$$

Отсюда видно, что крутизна имеет максимальное значение при  $U_{ЗИ} = 0$ , т. е. обратно пропорционально сопротивлению открытого канала  $R_{СИотк}$ .

## 1.2. Полевые транзисторы с изолированным затвором

Полевым транзистором с изолированным затвором называют полупроводниковый прибор, имеющий один или несколько затворов электрически изолированных от проводящего канала.

Изоляция затвора от проводящего канала осуществляется с помощью диэлектрика (Д), поэтому такие приборы называют МДП–транзисторы.

МДП–транзисторы делятся на два вида: со встроенным каналом и индуцированным каналом. Они могут быть как  $n$ - так и  $p$ -типа проводимости.

### МДП–транзисторы с индуцированным каналом

Структура МДП–транзистора с индуцированным каналом представлена на рис.3.

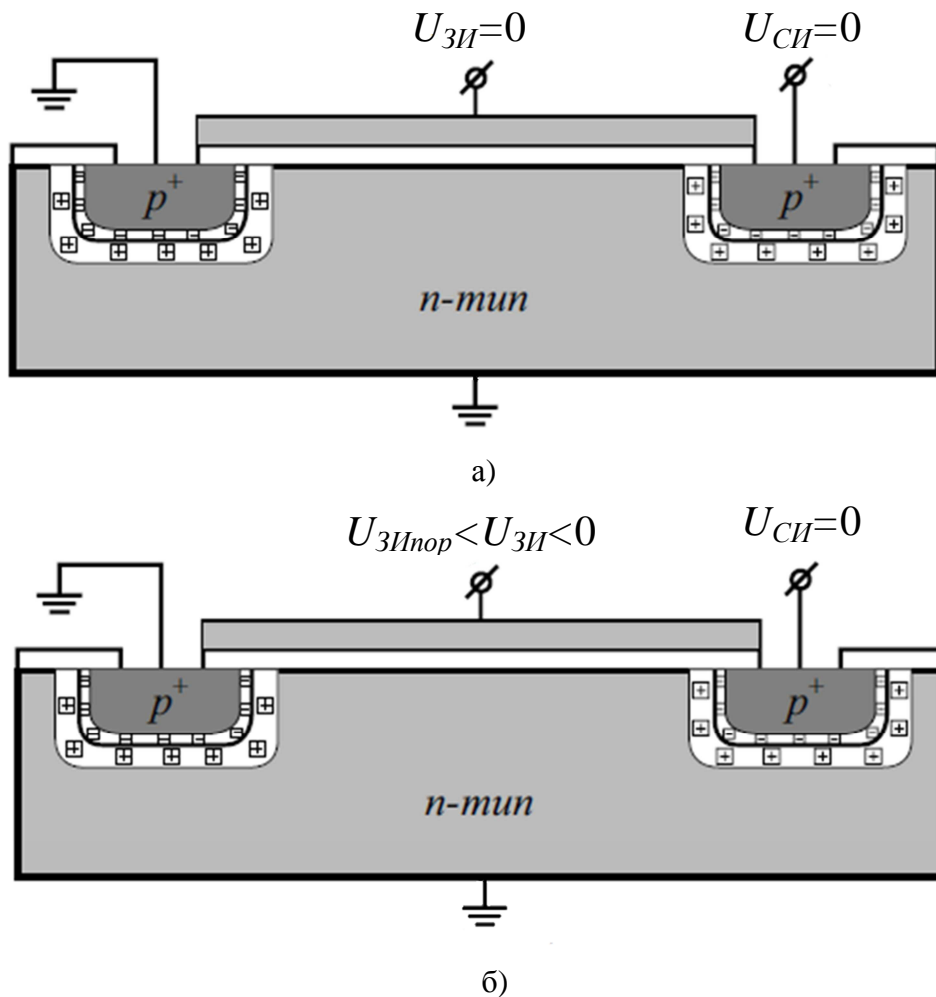


Рис.3. Структура МДП–транзистора с индуцированным каналом  $p$ -типа проводимости. а) напряжение на затворе отсутствует  $U_{ЗИ} = 0$ ;  
б) напряжение на затворе больше порогового напряжения  $U_{ЗИпор} < U_{ЗИ} < 0$

При напряжении на затворе  $U_{ЗИ} = 0$  и при наличии  $U_{СИ}$  ток стока очень мал. Он определяется обратным током  $p$ - $n$ -перехода между областью стока и подложки. Индуцированный канал образуется только при подаче на затвор напряжения определённой полярности относительно истока (для структуры на рис.3  $U_{ЗИ} = 0$ ).

Напряжение между затвором и истоком транзистора с изолированным затвором, работающего в режиме обогащения, при котором  $I_c$  достигает заданного низкого значения называется пороговым  $U_{ЗИпор}$ .

В реальных МДП–структурах  $U_{ЗИпор}$  зависит от заряда диэлектрической плёнки и заряда поверхностных состояний,

$$U_{ЗИ\ пор} = 2\varphi_F + \frac{Q_{пов}}{C_0} + \frac{Q_D}{C_0} + \varphi_{МДП}, \quad (15)$$

где  $\varphi_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$  – потенциал Ферми, определяющий положение уровня Ферми относительно середины ширины запрещённой зоны в полупроводнике ( $n$ -тип проводимости),  $\varphi_{МДП}$  – контактная разность потенциалов в МДП-структуре,  $Q_{нов}$  – плотность поверхностного заряда на границе раздела диэлектрик–полупроводник,  $Q_D = qN_D\delta$  – плотность заряда в ОПЗ полупроводника,  $C_0$  – удельная ёмкость диэлектрика.

Выходные ВАХ МДП-транзистора с индуцированным каналом не аналогичны зависимостям для полевого транзистора с управляющим переходом (рис. 4).

В режиме отсечки  $|U_{ЗИ}| < |U_{ЗИпор}|$  ток стока отсутствует. В ненасыщенном режиме  $|U_{СИ}| < |U_{СИнас}| = |U_{ЗИ}| - |U_{ЗИпор}|$  при образуется канал и ток стока резко увеличивается с ростом  $|U_{СИ}|$ . При  $|U_{СИ}| > |U_{СИнас}|$  ток стока не зависит от напряжения на стоке (режим насыщения). При  $|U_{СИ}| > |U_{СИпроб}|$  происходит пробой транзистора.

При выводе уравнений вольт-амперных характеристик используют ряд допущений: ток в канале обусловлен дрейфом основных носителей заряда под действием поля исток–сток, подвижность носителей заряда не зависит от величины поля, ток в цепи затвора и через подложку отсутствует.

На участке крутого нарастания тока

$$I_c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_p z}{dL} \left( (U_{ЗИ} - U_{ЗИпор}) U_{СИ} - \frac{U_{СИ}^2}{2} \right), \quad (16)$$

где  $d$  – толщина пленки диэлектрика,  $L$  – расстояние между истоком и стоком.

После перекрытия канала ток стока в области насыщения с учётом условия перекрытия канала равен:

$$I_c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_p z}{dL} (U_{ЗИ} - U_{ЗИпор})^2. \quad (17)$$

Крутизна передаточной характеристики, соответствующая пологой части ВАХ определяется в виде

$$S = \left| \frac{dI_c}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} > U_{СИнас}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_p z}{dL} (U_{ЗИ} - U_{ЗИпор}). \quad (18)$$

Таким образом, крутизна характеристики зависит от геометрических размеров затвора и подвижности носителей заряда в канале.

### МДП–транзисторы со встроенным каналом

Проводящий встроенный канал под затвором МДП –транзистора может быть сформирован в процессе изготовления структуры путём локальной диффузии или ионной имплантации (рис.4).

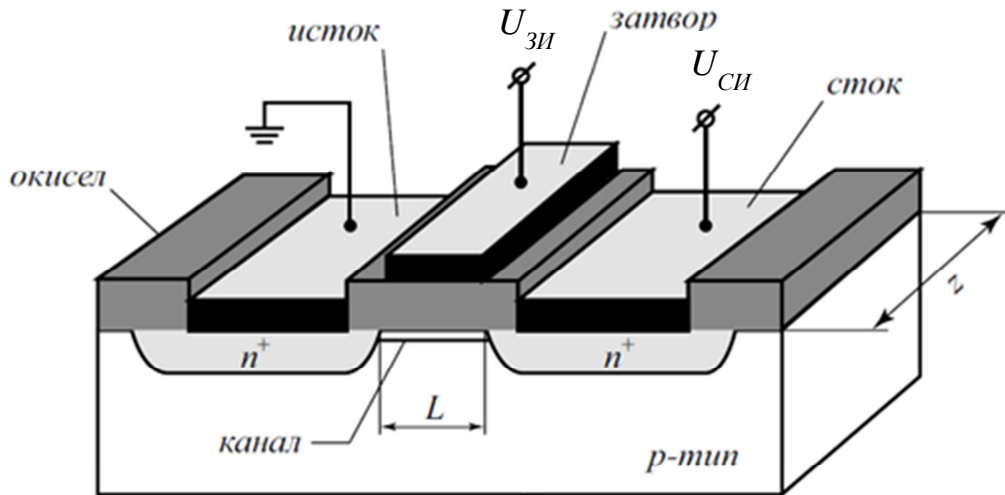


Рис.4. Структура МДП–транзистора со встроенным каналом *n*-типа

В такой структуре напряжение, подаваемое на затвор ( $U_{зи}$ ), может быть любой полярности. При  $U_{зи} > 0$  электрическое поле затвора обедняет канал основными носителями, в результате проводимость канала и ток стока уменьшаются. При  $U_{зи} < 0$  канал обогащается основными носителями и  $I_C$  возрастает. Таким образом МДП –транзистор со встроенным каналом может работать в режиме обогащения и в режиме обеднения.

Статические вольт–амперные характеристики представлены на рис. 5.

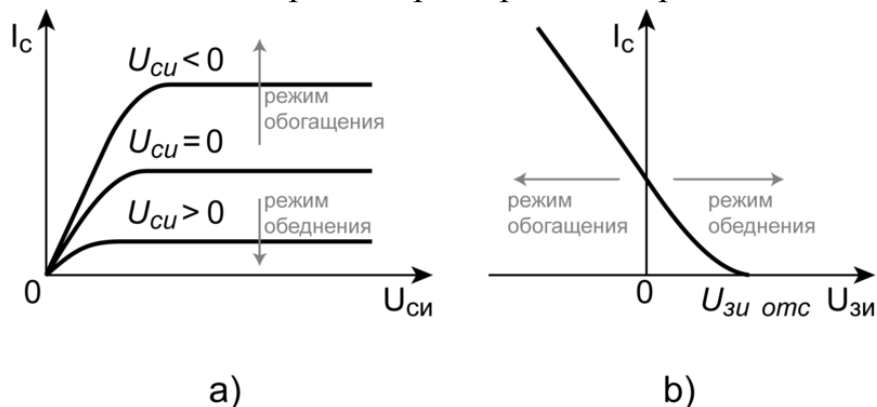


Рис.5. Выходные и переходные вольт–амперные характеристики МДП–транзистора со встроенным каналом *p*-типа проводимости

Характеристики передачи выходят из точки на оси абсцисс, соответствующей напряжению отсечки  $U_{3Иотс}$ .  $U_{3Иотс}$  – напряжение между затвором и истоком МДП–транзистора, работающего в режиме обеднения, при котором ток стока  $I_C$  достигает заданного низкого значения.

### 1.3. Эквивалентные схемы полевых транзисторов

Эквивалентная физическая схема полевого транзистора для области низких частот представлена на рис.6.

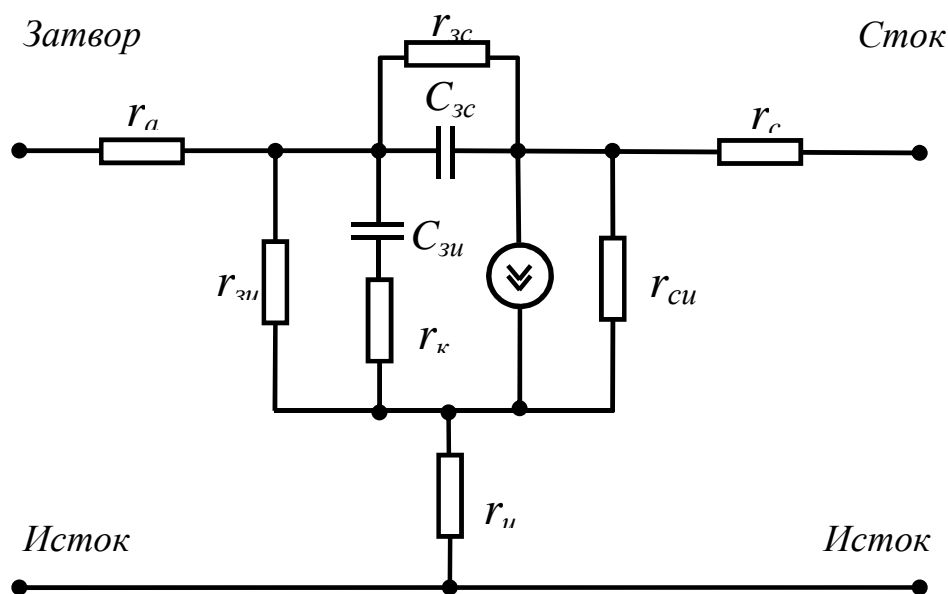


Рис.6. Физическая эквивалентная схема полевого транзистора

Здесь  $r_a$ ,  $r_c$  – объёмные сопротивления между концами канала и контактами истока и стока соответственно. На низких частотах влиянием  $r_c$  можно пренебречь по сравнению с большим дифференциальным сопротивлением канала  $r_i$ . Сопротивление  $r_u$  общее для входной и выходной цепи, является сопротивлением внутренней обратной связи в полевом транзисторе, включённом по схеме с общим истоком. Генератор тока отражает усилительные свойства транзистора. Приведённая эквивалентная схема является универсальной. Для полевого транзистора с управляющим переходом ёмкости  $C_{zu}$ ,  $C_{zc}$  и сопротивления  $r_{zu}$ ,  $r_{zc}$  замещают  $p$ - $n$ -переход. А в МДП–транзисторе, в связи с тем, что затвор изолирован от проводника диэлектриком, активные дифференциальные сопротивления  $r_{zu}$ ,  $r_{zc}$  оказываются очень большими. Поэтому ими пренебрегают по сравнению с параллельно включёнными сопротивлениями. Можно пренебречь также очень малыми сопротивлениями  $r_u$ , и  $r_c$  сильно легированных областей истока и стока.

Так как входные и выходные сопротивления полевых транзисторов велики, то удобнее пренебречь и задавать комплексные параметры проводимостей его формальной эквивалентной схеме (рис.7). В режиме малого сигнала для схемы с общим истоком токи и напряжения на выходах полевого транзистора соответствует характеристическим уравнениям четырёхполюсника.

$$\begin{cases} \dot{I}_3 = Y_{11И} \dot{U}_{3И} + Y_{12И} \dot{U}_{СИ} \\ \dot{I}_C = Y_{21C} \dot{U}_{3И} + Y_{22C} \dot{U}_{СИ} \end{cases} \quad (19)$$

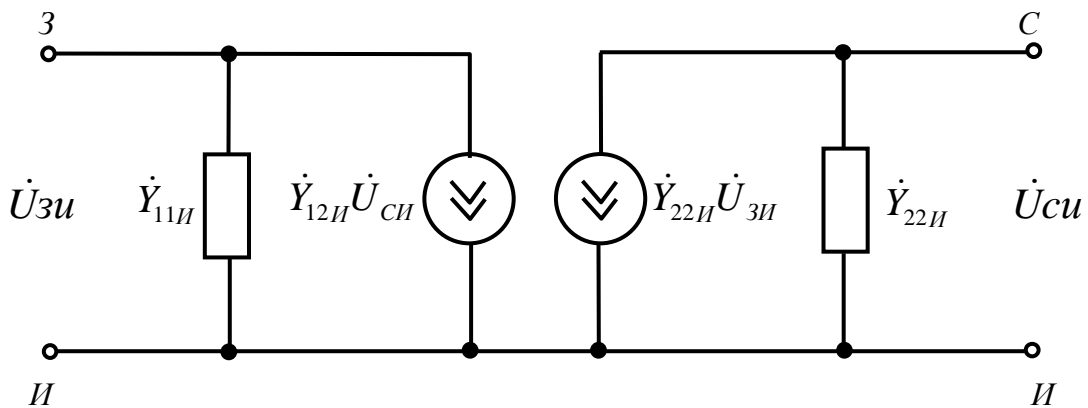


Рис.7. Формальная эквивалентная схема полевого транзистора (Y–параметры)

Y–параметры определяются при режимах короткого замыкания по переменному току на выходе и входе транзистора.

$$Y_{11И} = \left. \frac{\dot{I}_C}{\dot{U}_{3И}} \right|_{\dot{U}_{СИ}=0} \quad Y_{12И} = \left. \frac{\dot{I}_3}{\dot{U}_{3И}} \right|_{\dot{U}_{3И}=0} \quad (20)$$

$$Y_{21C} = \left. \frac{\dot{I}_C}{\dot{U}_{3И}} \right|_{\dot{U}_{СИ}=0} \quad Y_{22C} = \left. \frac{\dot{I}_C}{\dot{U}_{СИ}} \right|_{\dot{U}_{3И}=0} \quad (21)$$

Можно определить связь элементов эквивалентной схемы с Y–параметрами. Пренебрегая,  $r_u, r_c$ , имеем:

$$Y_{11И} = j\omega(C_{3C} + C_{3И}), \quad Y_{12И} = -j\omega C_{3C}, \quad (22)$$

$$Y_{21C} = S - j\omega C_{3И}, \quad Y_{22И} = \frac{1}{r_i} + j\omega C_{3C}. \quad (23)$$

Все эти параметры зависят от значений постоянных смещений на электродах полевого транзистора.

В усилительной технике используются пологие участки ВАХ. Этой области соответствуют наименьшие нелинейные искажения сигналов и оптимальные значения малосигнальных параметров. Наиболее важные из них – крутизна управления по току  $S$ , внутреннее сопротивление  $r_i = \left. \frac{d\dot{U}_{СИ}}{d\dot{I}_C} \right|_{U_{3И}=const}$  и

собственный коэффициент усиления транзистора  $k = \left. \frac{dU_{СИ}}{dU_{ЗИ}} \right|_{I_c = const}$ . Они связаны соотношением:

$$k = S r_i. \quad (24)$$

Частотный предел и быстродействие полевых транзисторов ограничиваются постоянной времени  $\tau = C_{зк} r_k$ , где  $C_{зк}$  – распределённая ёмкость затвора относительно канала,  $r_k$  – сопротивление канала. Предельная рабочая частота транзистора

$$f_{max} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi C_{зк} r_k}. \quad (25)$$

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Описание лабораторного стенда

Перед началом работы выполните следующие подготовительные операции:

1. Установите на компьютере LabVIEW 8.5 или более новую версию.

2. Подключите к компьютеру лабораторную станцию NI ELIS с DAQ-платой типа PCI-6251 (или аналогичной) и установите драйверы и утилиты, входящие в комплект поставки. С помощью конфигурационной утилиты MAX (Measurement & Automation Explorer) убедитесь, что DAQ-плата имеет логическое имя «Dev1». Если логическое имя иное, переименуйте его на «Dev1».

3. На макетной плате лабораторной станции NI ELVIS выполните монтажные соединения в соответствии с рис.8 и рис.9.

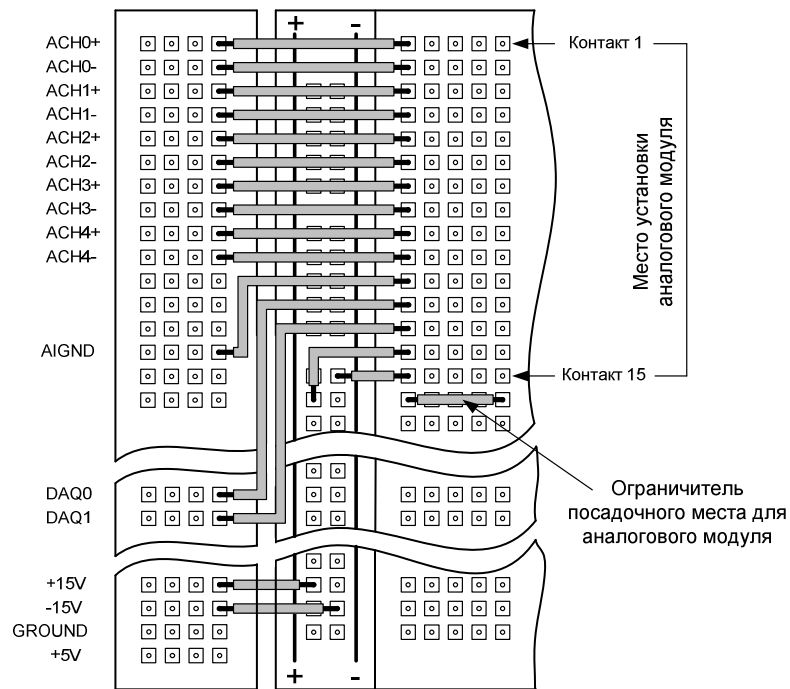


Рис.8. Схема соединений на макетной плате NI ELVIS для подключения аналоговых лабораторных модулей

4. Извлеките из упаковки печатную плату и **аккуратно, не повредив контакты разъемов**, разломите ее на отдельные модули. Устанавливайте лабораторные модули на макетную плату в соответствии с рис.10 и рис.11.

5. Убедитесь, что на используемом компьютере установлен текстовый редактор MS Word, необходимый для подготовки отчета о выполнении лабораторной работы.



6. Скопируйте папку «Lab\_for\_NI\_ELVIS» с компакт-диска на жесткий диск вашего компьютера (например, на диск C:\). Программа выбранной для выполнения лабораторной работы загружается из папки «Lab\_for\_NI\_ELVIS» двойным щелчком левой кнопки мыши на имени файла «Lab-n.vi», где n – номер работы.

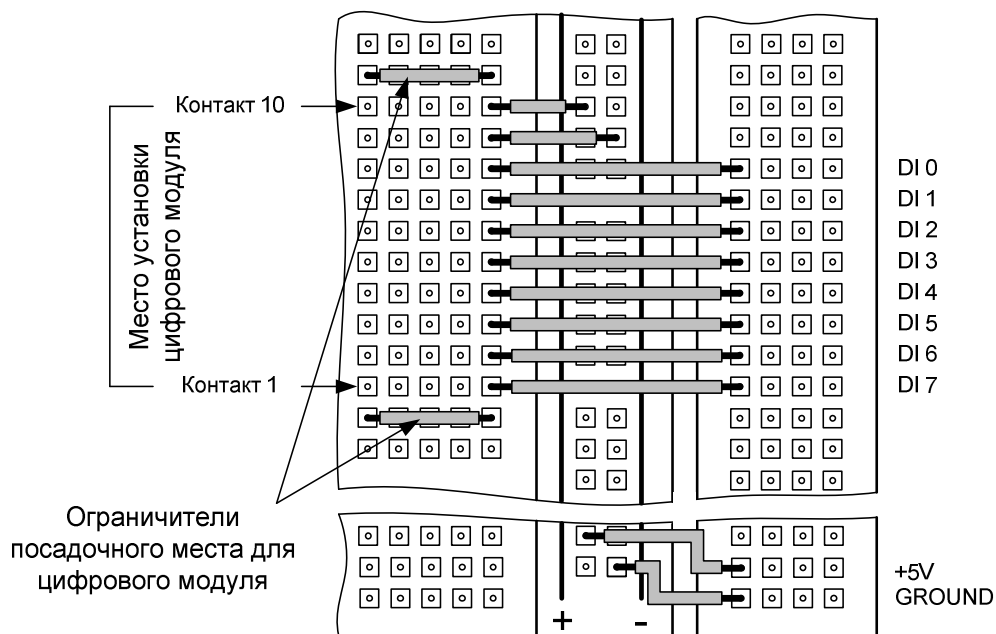
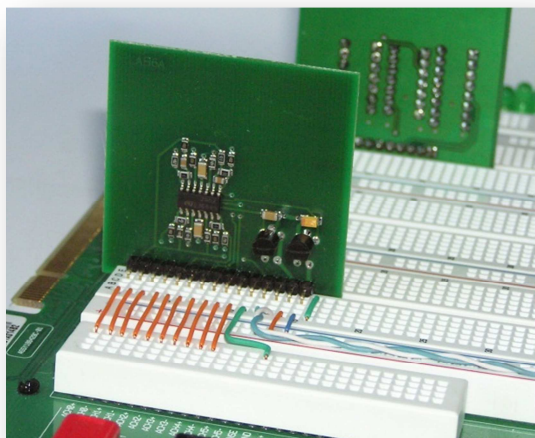


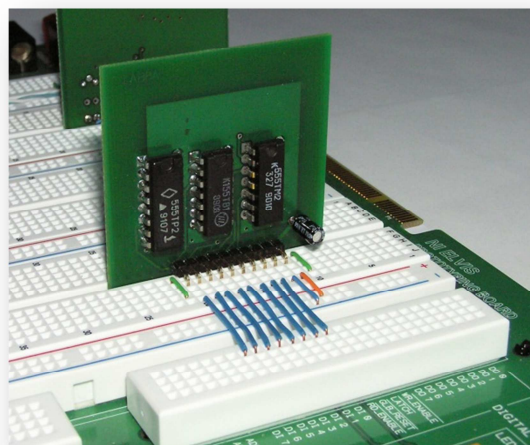
Рис.9. Схема соединений на макетной плате NI ELVIS для подключения цифровых лабораторных модулей



Рис.10. Внешний вид лабораторной станции NI ELVIS с установленными аналоговым и цифровым модулями



а)



б)

Рис.11. Расположение аналогового (а) и цифрового (б) модулей на макетной плате

7. При выполнении лабораторных работ практикума органы управления, расположенные на лицевой панели лабораторной станции NI ELVIS должны быть установлены следующим образом:

- переключатель «COMMUNICATION» – в положение «BYPASS»;
- органы управления функциональным генератором «FUNCTION GENERATOR»:
- переключатель "MANUAL" – в верхнее положение;
- переключатель "COARSE FREQUENCY" – в положение "50 Hz";
- регуляторы "AMPLITUDE" и "FINE FREQUENCY" – в левое крайнее положение.

## 2.2. Рабочее задание и порядок выполнения работы

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд.
- лабораторный модуль **Lab5A** для исследования характеристик полевого транзистора типа КП303В.

Установите лабораторный модуль **Lab5A** на макетную плату лабораторной станции NI ELVIS на место аналогового модуля (см. рис. 11, а). Внешний вид станции с блоками персонального компьютера показан на рис. 12.



Рис. 12. Внешний вид станции NI ELVIS с блоками компьютера

Внешний вид модуля с полевым транзистором показан на рис. 13.

При исследовании характеристик полевого транзистора используется схема, изображенная на рис.14.

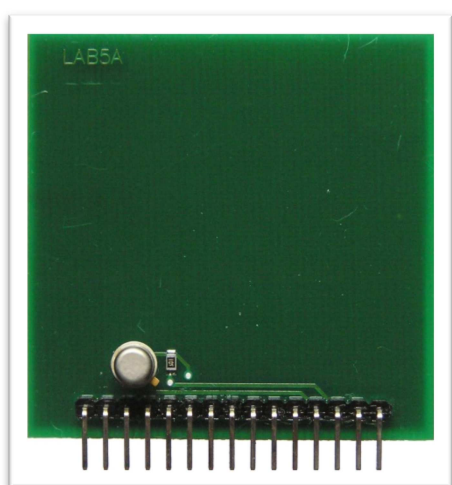


Рис. 13. Внешний вид модуля Lab5A для исследования характеристик полевого транзистора

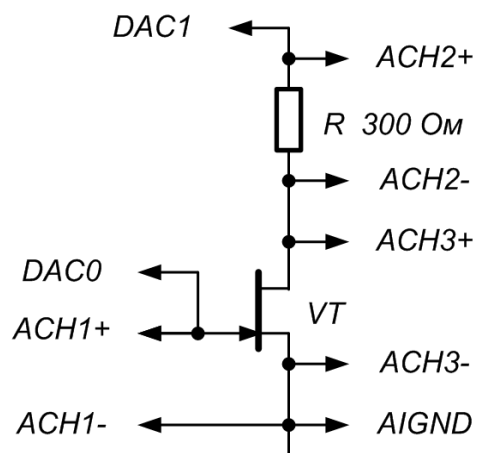


Рис. 14. Принципиальная электрическая схема для исследования характеристик полевого транзистора

Загрузите и запустите программу **Lab-5.vi**.

После ознакомления с целью работы нажмите кнопку «**Начать работу**». На экране появится изображение ВП, необходимого для выполнения задания 1 (рис. 15).



Рис. 15. Лицевая панель ВП при выполнении задания 1

### 2.2.1. Получение передаточной характеристики полевого транзистора в схеме с общим истоком

1.1. С помощью цифрового элемента управления, находящегося на передней панели ВП, установите значение напряжения питания стока  $E_C$ , равным **5 В**. Нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появится график зависимости выходного тока  $I_C$  транзистора от входного напряжения  $U_{ЗИ}$ .

Скопируйте изображение, полученное на графическом индикаторе, на страницу отчета.

1.2. Изменяя напряжение источника ЭДС затвора  $E_3$  с помощью ползункового регулятора, расположенного на панели ВП, установите значение тока стока  $I_C$  примерно равным **0,01 мА**. Запишите в отчет значение напряжения отсечки затвор–исток  $U_{зи.отс}$ .

1.3. Изменяя напряжение источника ЭДС затвора  $E_3$  с помощью ползункового регулятора, расположенного на панели ВП, установите значение напряжения затвор–исток  $U_{ЗИ}$  равным **0 В**. Запишите в отчет начальное значение тока стока  $I_{C.нач}$ .

1.4. Вычислите значение коэффициента  $k$ , учитывающего конструктивные и технологические параметры транзистора, по формуле  $k = I_{C.нач} / (U_{зи.отс})^2$ .

1.5. Изменяя напряжение источника ЭДС затвора  $E_3$  с помощью ползункового регулятора, расположенного на панели ВП, установите значение

напряжения затвор–исток  $U_{ЗИ}$  сначала равным  $U_{ЗИ.1} = -0,1 \text{ В}$ , а затем равным  $U_{ЗИ.2} = +0,1 \text{ В}$ . Запишите в отчет значения тока стока  $I_{C.1}$  и  $I_{C.2}$  для этих точек передаточной характеристики.

1.6. Вычислите и запишите в отчет значение крутизны передаточной характеристики полевого транзистора в окрестности точки  $U_{ЗИ}=0$  по формуле  $S=(I_{C.2} - I_{C.1})/(U_{ЗИ.2} - U_{ЗИ.1})$ .

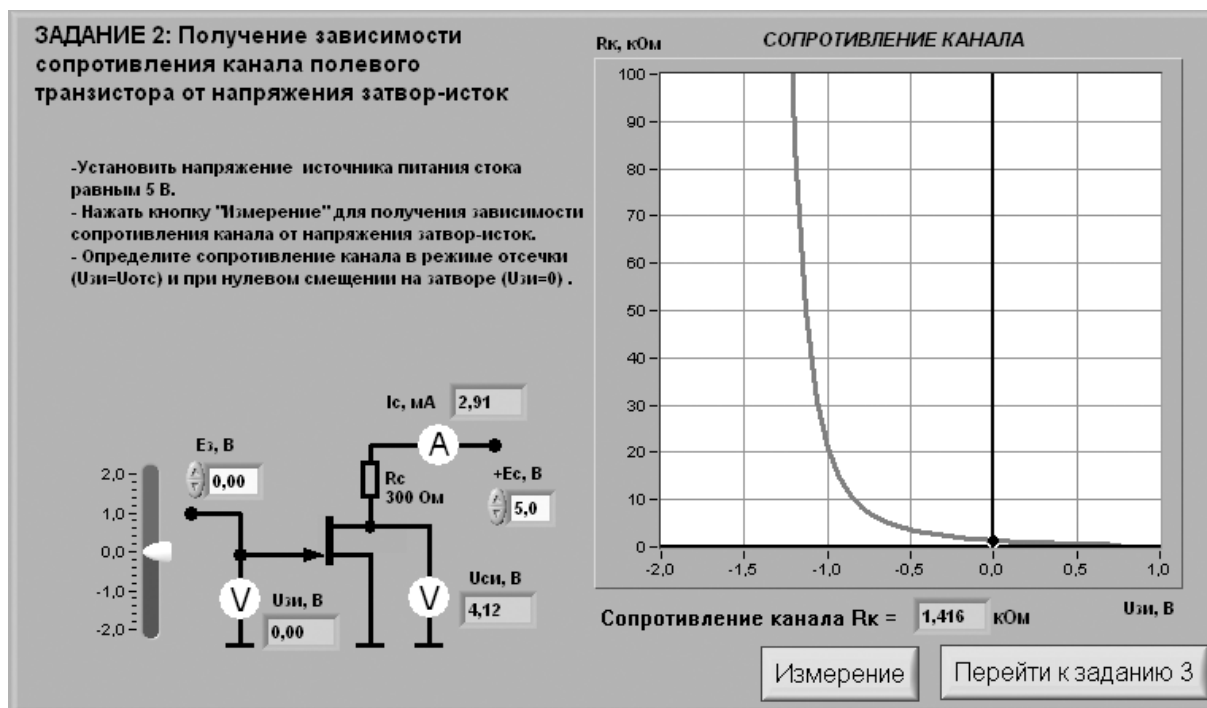


Рис. 16. Лицевая панель ВП при выполнении задания 2

1.7. Нажмите на передней панели ВП кнопку «Перейти к заданию 2», на экране появится лицевая панель ВП, необходимая для выполнения задания 2 (рис.16).

### 2.2.2. Получение зависимости сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор–исток

2.1. С помощью цифрового элемента управления, находящегося на передней панели ВП, установите значение напряжения питания стока  $E_C$ , равным **5 В**. Нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появится график зависимости сопротивления канала  $R_K$  полевого транзистора от напряжения затвор–исток  $U_{ЗИ}$ .

Скопируйте изображение зависимости сопротивления канала полевого транзистора от напряжения затвор–исток в отчет.

2.2. Изменяя напряжение источника ЭДС затвора  $E_3$  с помощью

ползункового регулятора, расположенного на панели ВП, установите значение тока стока  $I_C$  примерно равным **0,01 мА**. Запишите в отчет значение сопротивления  $R_{K.макс}$ , соответствующее напряжению  $U_{ЗИотс}$  (закрытое состояние транзистора).

2.3. Изменяя напряжение источника ЭДС затвора  $E_3$  с помощью ползункового регулятора, расположенного на панели ВП, установите значение напряжения затвор–исток равным **0 В**. Запишите в отчет значение сопротивления  $R_{K.мин}$ , соответствующее напряжению  $U_{ЗИ}=0 В$  (открытое состояние транзистора).

2.4. Нажмите на передней панели ВП кнопку «Перейти к заданию 3», на экране появится лицевая панель ВП, необходимая для выполнения задания 3 (рис.17).

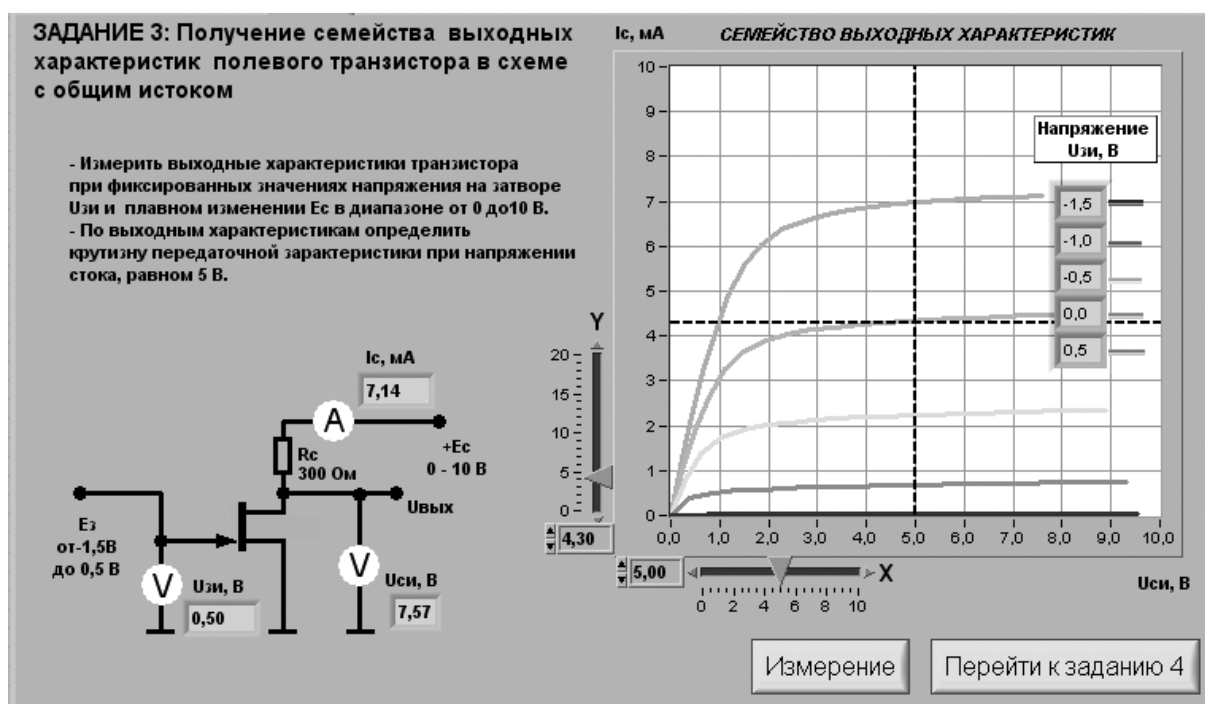


Рис. 17. Лицевая панель ВП при выполнении задания 3

### 2.2.3. Получение семейства выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком

3.1. Нажмите на панели ВП кнопку «Измерение». На графическом индикаторе ВП появятся графики зависимостей тока стока  $I_C$  от напряжения сток–исток  $U_{СИ}$ , полученные при плавном изменении напряжения на стоке транзистора от **0 до 10 В** и фиксированных значениях напряжения источника ЭДС затвора  $U_{ЗИ} = -1,5 В; -1,0 В; -0,5 В; 0 В; +0,5 В$ . Установившиеся при этом значения напряжения  $U_{ЗИ}$  отображаются на поле графика.

3.2. Скопируйте изображение выходных характеристик транзистора в

отчет. Средствами **MS Word** для каждой кривой отметьте соответствующие значения напряжения затвор–исток.

3.3. При фиксированном напряжении сток–исток, равном  $U_{СИ} = 5 \text{ В}$ , определите ток стока  $I_C$ , соответствующий значениям напряжения на затворе, при которых снимались выходные характеристики.

Для этого с помощью расположенного на панели ВП ползункового регулятора «X» установите вертикальную визирную линию напротив деления «5 В» горизонтальной оси графика выходных характеристик. Затем с помощью горизонтальной визирной линии, перемещаемой ползунковым регулятором «Y», получите значения тока стока в точках пересечения выходных характеристик с вертикальным визиром. Полученные результаты запишите в отчет.

3.4. Определите крутизну передаточной характеристики транзистора  $S$  при изменении напряжения затвор–исток в диапазоне от  $-1,0 \text{ В}$  до  $0 \text{ В}$  по формуле  $S = \Delta I_C / \Delta U_{ЗИ}$ . Полученное значение запишите в отчет.

3.5. Выберите сопротивление в цепи стока равным  $R_C = 300 \text{ Ом}$ , а величину напряжения источника ЭДС стока  $E_C = 5 \text{ В}$ , и средствами **MS Word** постройте в отчете на графике выходных характеристик транзистора линию нагрузки по двум точкам: точка  $E_C = 5 \text{ В}$  на оси абсцисс и точка  $I_C = E_C / R_C$  на оси ординат.

3.6. Оцените границы активного режима транзисторного каскада, которые определяются координатами ( $I_{C.макс}$ ,  $U_{СИ.мин}$  и  $I_{C.мин}$ ,  $U_{СИ.макс}$ ) точек пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками, полученными, соответственно, при значениях напряжения затвор–исток  $-1,0 \text{ В}$  и  $+0,5 \text{ В}$ . Полученные значения запишите в отчет.

3.7. Вычислите ток стока  $I_C^* = I_{C.макс} - I_{C.мин}$  для средней точки активного режима, и определите по передаточной характеристике соответствующее значение напряжения затвор–исток  $U_{ЗИ}^*$ .

3.8. Нажмите на передней панели ВП кнопку «Перейти к заданию 4», на экране появится лицевая панель ВП, необходимая для выполнения задания 4 (рис. 19).



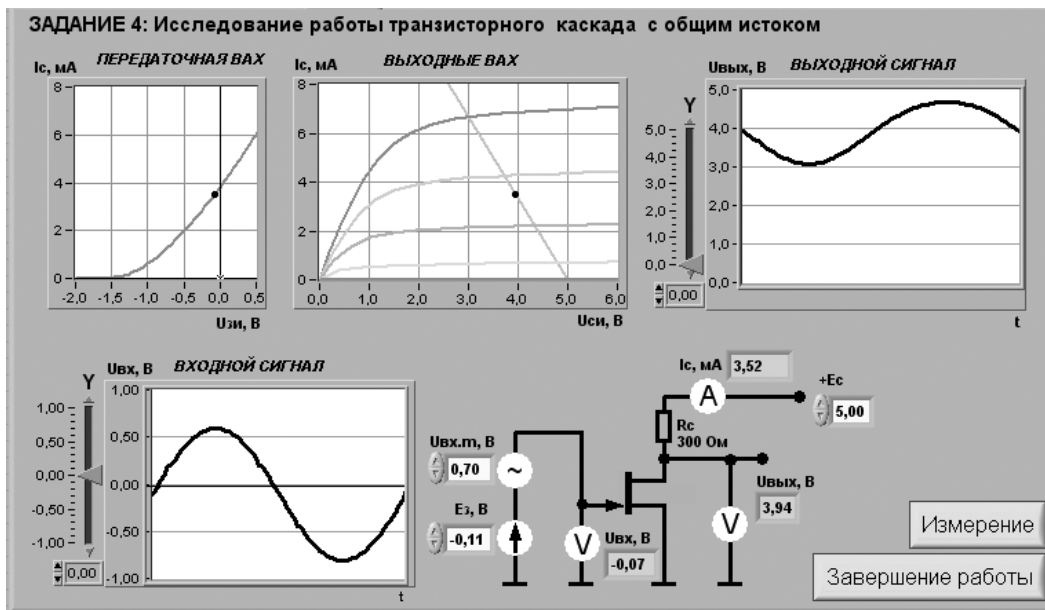


Рис. 18. Лицевая панель ВП при выполнении задания 4

#### 2.2.4. Исследование работы транзисторного каскада с общим истоком

4.1. Установите с помощью органов управления ВП амплитуду напряжения источника входного гармонического напряжения  $u_{BX.m} = 0 \text{ В}$ , и величину напряжения источника ЭДС стока  $E_C = 5 \text{ В}$ . Нажмите кнопку «Измерение».

На графике выходных характеристик транзистора появится изображение линии нагрузки. Сравните его с изображением, полученным при выполнении п.4.3.5.

4.2. Установите напряжение источника ЭДС затвора  $E_3$ , равное значению  $U_{3I}^*$ , полученному в п.4.3.7. Измерьте и запишите в табл. 1 параметры статического режима транзисторного усилителя с общим истоком.

Таблица 1

$U_{3I}$ , В	$I_C$ , мА	$U_{СИ}$ , В

4.3. Плавно увеличивая амплитуду входного сигнала  $u_{BX.m}$ , получите на графическом индикаторе ВП максимальный неискаженный выходной сигнал. Скопируйте изображение выходного сигнала в отчет. Сопоставьте осциллограммы и сделайте вывод о соотношении фаз входного и выходного сигналов транзисторного каскада с общим истоком.

4.4. С помощью ВП измерьте значения амплитуд входного  $U_{BX}$  и выходного  $U_{ВЫХ}$  сигналов. Для этого, используя визирные линии графических индикаторов, определите по осциллограммам входного и выходного сигналов



максимальные и минимальные мгновенные значения указанных напряжений. При отсчете значений напряжения используйте цифровые индикаторы, совмещенные с ползунковыми регуляторами ВП. Для определения амплитуды сигналов используйте формулу  $U_m = (u_{max} - u_{min})/2$ . Полученные результаты запишите в отчет.

4.5. Используя полученные значения амплитуды входного и выходного сигналов, определите коэффициент усиления транзисторного каскада по формуле  $K_V = U_{вых.м} / U_{вх.м}$ . Результат запишите в отчет.

4.6. Вычислите коэффициент усиления транзисторного каскада по формуле  $K_V = S * R_C$ , где  $S$  – значение крутизны, полученное в п.4.3.4. Результат запишите в отчет. Сравните измеренное (п.4.4.5) и рассчитанное значения коэффициента усиления. Объясните полученный результат.

4.7. Исследуйте, как влияет положение рабочей точки на работу транзисторного каскада с общим истоком. Для этого, регулируя напряжение источника ЭДС затвора  $E_3$ , измените значение напряжения затвор–исток примерно на 30% от величины  $U_{зи}^*$ , полученной в разделе 4.3.7, сначала в сторону увеличения, а затем в сторону уменьшения. Пронаблюдайте характер искажения выходного сигнала. Скопируйте в отчет изображение, полученное на графическом индикаторе ВП в обоих случаях. Объясните причину наблюдаемых искажений выходного сигнала.

4.8. Выключите ВП, для чего нажмите на панели ВП кнопку «Завершение работы».

### 2.3. Контрольные вопросы

- 1) Какие транзисторы называются полевыми или униполярными? Объясните происхождение таких названий.
- 2) Как устроен полевой транзистор с изолированным затвором? Почему его называют МОП–транзистором?
- 3) Как устроен полевой транзистор с управляющим  $p-n$ –переходом?
- 4) Чем отличается принцип действия полевых транзисторов с  $p-n$ –переходом и с изолированным затвором?
- 5) Чем отличаются МОП–транзисторы со встроенным и индуцированным каналом?
- 6) Как выглядят передаточные характеристики полевых транзисторов известных Вам типов?
- 7) Имеются ли существенные различия в выходных характеристиках полевых транзисторов разного типа?
- 8) Какие характерные области выделяют на выходных ВАХ полевого транзистора?
- 9) Каковы особенности применения полевых транзисторов в зависимости от положения его рабочей точки на выходных характеристиках?

## 2.4. Вопросы для сдачи допуска к лабораторной работе

- 1) Конструкции и принцип действия полевых транзисторов.
- 2) Особенности конструкции и эксплуатации полевых транзисторов управляемых  $p-n$ -переходом, транзисторов Шоттки и транзисторов с изолированным затвором.
- 3) Почему полевые транзисторы являются усилителями тока, напряжения и мощности.
- 4) Отличие полевых транзисторов от биполярных. Почему полевые транзисторы используются в высокоомных электрических цепях?
- 5) Входные, переходные и выходные статические вольтамперные характеристики полевых транзисторов.
- 6) Крутизна управления транзистора по току и ее связь с геометрией и электрофизическими параметрами применяемых материалов.
- 7) Понятие о маленьком и большом сигнале (напряжении) на транзисторе.
- 8) Малосигнальная эквивалентная схема транзистора и ее дифференциальные параметры.
- 9) Связь крутизны управления и усиления транзистора. Определение коэффициента усиления для одного транзистора.
- 10) Частотные свойства транзисторов. Зависимость крутизны управления от частоты.
- 11) Методика измерения статических вольтамперных характеристик полевого транзистора. Определение выходной проводимости, крутизны управления и коэффициента усиления.

## Литература

1. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. М., Высшая школа, 1987.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М., Мир, 1984.
3. Гуртов В.А. Твердотельная электроника. М.: Техносфера, 2008.
4. ГОСТ 19095–73 (СТ СЭВ 2771–80). Транзисторы полевые. Электрические свойства.
5. Пейч Л.И., Точилин Д.А., Поллак Б.П. LabVIEW для новичков и специалистов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2004.
6. Батоврин В.К., Бессонов А.С., Мошкин В.В.: LabVIEW. Практикум по аналоговой и цифровой электронике: Лабораторный практикум / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)». – М., 2007.

