

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)

Кафедра телевидения и управления (ТУ)

В.А. Шалимов, А.М. Заболоцкий

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

Руководство к лабораторной работе

Томск 2023

Шалимов В.А., Заболоцкий А.М. Исследование вольт-амперных характеристик полевых транзисторов: руководство к лабораторной работе. Учебно-методическое пособие. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2023. – 18 с.

Одобрено на заседании каф. ТУ протокол 3 от 15.02.2023

© Шалимов В.А., Заболоцкий А.М., 2023

© Кафедра Телевидения и управления, ТУСУР, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Общее положение.....	4
2. Описание лабораторного макета.....	13
3. Порядок выполнения работы.....	14
Список литературы.....	18

## Введение

Цель работы – изучение принципа работы полевых транзисторов, исследование статических вольт-амперных характеристик, оценка статических параметров транзисторов.

### 1. Общие положения

#### 1.1 Основы теории полевых транзисторов

Полевыми (униполярными) транзисторами называют такие полупроводниковые приборы, работа которых основана на использовании носителей заряда одного знака: только дырок или только электронов. С этой точки зрения обычные транзисторы, рассмотренные ранее, можно назвать биполярными, так как в них важную роль играют оба типа носителей: инжекция носителей одного знака сопровождается компенсацией образующегося заряда носителями другого знака.

Термин «полевой транзистор» характеризует механизм управления током с помощью электрического поля, а не с помощью тока, как в биполярных транзисторах. В этом отношении униполярные транзисторы имеют много общего с электронными лампами.

Полевые транзисторы имеют несколько разновидностей. Простейшую из них, предложенную в 1952 г. Уильямом Шокли называют полевым транзистором с управляющим  $p-n$  переходом.

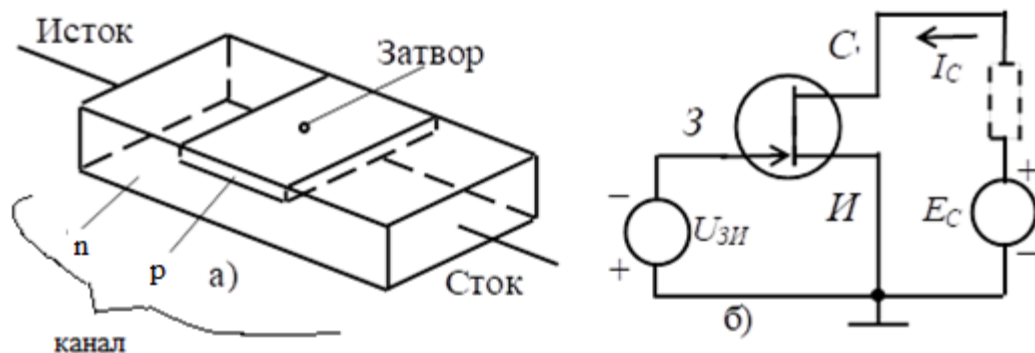


Рис. 1.1 – Конструкция полевого транзистора с управляющим  $p-n$  переходом – а) и схема его включения – б)

#### 1.2 Полевой транзистор с управляющим $p-n$ переходом (унитрон)

На рис. 1.1а показана упрощенная структура полевого транзистора с управляющим  $p-n$  переходом, представляющая собой пластинку полупроводника  $n$  типа, у которой на торцах имеются омические контакты, а на обеих боковых гранях - слои типа  $p$ . Последние образуют с пластинкой  $p-n$  переходы. Слой  $p$  называется затвором. Два

других электрода представляют омические контакты. При этом контакт, от которого движутся основные носители заряда, называется истоком, а тот, к которому они движутся, - стоком. К «*n*» - стоку присоединяют положительный потенциал источника питания  $E_c$  относительно истока, а *p-n* переход затвор-исток работает в обратном направлении. Для этого на затвор подается отрицательное смещение относительно истока, как показано на рис. 1.1б (далее под  $U_{зи}$  будем понимать модуль напряжения).

Принцип действия прост и заключается в том, что при изменении потенциала затвора меняется ширина *p-n* переходов, а значит, и рабочее сечение пластинки. В результате меняется ее сопротивление и соответственно ток в выходной цепи. Поскольку управляющие *p-n* переходы работают в обратном включении, их сопротивление для входного сигнала велико  $R_{вх} \rightarrow \infty$ , входная мощность мала.

Полезная мощность, определяемая величиной питающего напряжения и соотношением сопротивлений пластинки канала и нагрузки, может значительно превышать входную мощность. Таким образом, унитрон является усилительным прибором типа управляемого активного сопротивления, причем он имеет много общего с электронной лампой. Это сходство выражается не только в большом входном сопротивлении, но и в том, что при достаточном отрицательном смещении затвора расширившиеся переходы могут перекрыть все сечение пластинки; это вызывает отсечку тока в рабочей цепи.

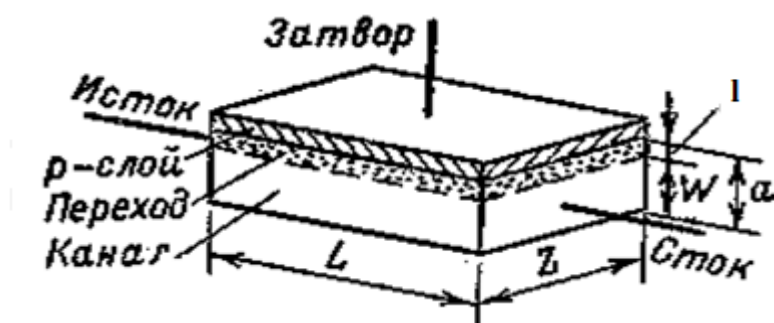


Рис. 1.2 – Структура унитрона

Каналом называют рабочий (переменный) объем пластинки, расположенный между *p-n* переходами. Пренебрегая «холостыми» участками пластинки, прилегающими к истоку и стоку, можно представить структуру унитрона в упрощенном виде (рис. 1.2). Обозначим максимальную толщину канала  $a$ , его ширину  $Z$ , длину  $L$ . Пусть  $U_{си} = 0$ , тогда канал будет эквипотенциальным слоем и напряжение на *p-n* переходах будет равно  $U_{зи}$  на протяжении всего канала. Соответственно в любой точке ширина перехода равна  $\ell$ , а толщина канала  $w = a - 2\ell$ .

Подставляя « $w$ » выражение для ширины перехода  $\ell$  и полагая  $qN_d = qn = 1/\rho \cdot \mu_n$ , получаем:

$$w = a - \sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0\rho\mu_n U_{3И}}.$$

Из условия  $w = 0$  легко найти напряжение отсечки:

$$U_{3И0} = a^2 / 2\varepsilon\varepsilon_0\rho\mu_n.$$

Запишем толщину канала в более компактной форме:

$$w = a \left( 1 - \sqrt{U_{3И} / U_{3И0}} \right).$$

В рабочем режиме, когда  $U_{СИ} \neq 0$  канал не является эквипотенциальным слоем; в разных точках  $X$  потенциал различен: он меняется от  $U_X = 0$  около истока до  $U_X = +U_{СИ}$  около стока. Поэтому обратное напряжение на  $p-n$  переходах, увеличивается в направлении от истока к стоку. Соответственно ширина перехода в этом направлении растет, а канал сужается (рис. 1.3а).

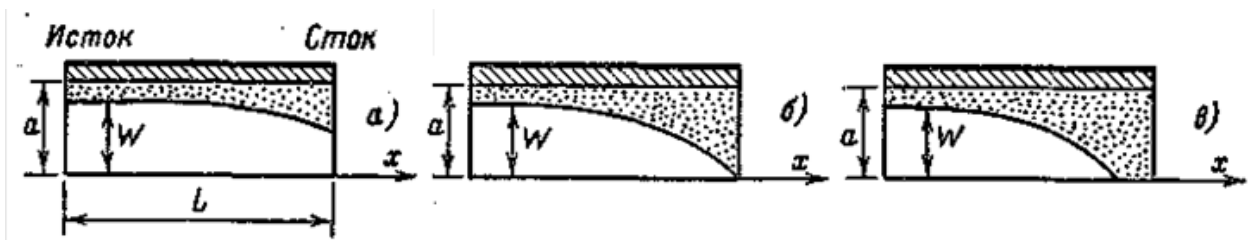


Рис. 1.3 – Сечение канала: а) ненасыщенного, б) на границе насыщения, в) при насыщенном режиме.

Около стока, в наиболее узком месте напряжение на переходе равно  $U_{3И} + U_{СИ}$ . С ростом  $U_{СИ}$  это напряжение, в конце концов, делается настолько большим, что канал почти смыкается (рис. 1.3б), но это не приводит к отсечке тока, так как само «смыкание» является следствием увеличения тока. Вместо отсечки тока происходит отсечка его приращений, т. е. резкое возрастание дифференциального сопротивления канала. Такой режим можно назвать насыщенным, а напряжение  $U_{СН}$ , при котором он наступает, - напряжением насыщения  $U_{СН} = U_{3И0} - U_{3И}$ .

Таким образом, в режиме насыщения происходит модуляция длины канала.

При расчете характеристик ПТ с управляющим  $p-n$  переходом следует учесть, что сопротивление канала меняется вдоль оси  $X$ , поскольку меняется толщина  $w$ . Падение напряжения на элементарном участке  $dx$  составляет

$$dU_x = I_C \cdot dR_x = I_C \frac{\rho \cdot dx}{L \cdot a} \left( 1 - \sqrt{\frac{U_{3И} + U_x}{U_{3И0}}} \right)^{-1}$$

Ток  $I_C$  остается неизменным в любом сечении. Поэтому, разделяя переменные и интегрируя обе части в пределах  $0 \div U_C$  и  $0 \div L$  соответственно, можно представить искомую функцию  $I_C(U_{СИ})$  в следующем виде:

$$I_C = \frac{1}{R_{K0}} \left[ U_{СИ} + \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{ЗИ}^{3/2} - (U_{ЗИ} + U_{СИ})^{3/2}}{U_{ЗИ0}^{1/2}} \right], \quad (1.1)$$

где  $R_{K0} = \frac{\rho \cdot L}{a \cdot Z}$  – минимальное дифференциальное сопротивление канала или  $\partial U_{СИ} / \partial I_C$  при  $U_{ЗИ} = 0$  и  $U_{СИ} = 0$ .

Ток стока насыщения получается равным:

$$I_{СН} = \frac{1}{R_{K0}} \left[ \frac{1}{3} U_{ЗИ0} - U_{ЗИ} \cdot \left( 1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ0}}} \right) \right], \quad (1.2)$$

при  $U_{СИ} = U_{ЗИ0} - U_{ЗИ}$ .

Поскольку участок насыщения является основным рабочим участком, определим крутизну  $S$  именно в этой области. Дифференцируя выражение для тока стока по  $U_{ЗИ}$  получаем:

$$S = - \frac{\partial I_{СН}}{\partial U_{ЗИ}} = \frac{1}{R_{K0}} \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ0}}} \right)$$

Семейство выходных статических вольтамперных характеристик транзистора  $I_C = f(U_{СИ})$  показано на рис. 1.4а.

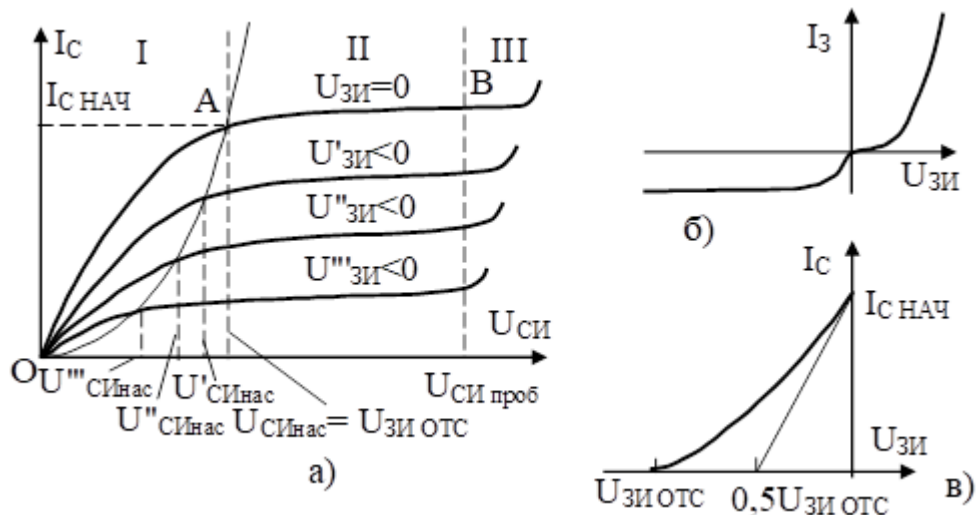


Рис. 1.4 – Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом (а); его входная характеристика (б) и характеристика передачи (сток-затворная) (в)

I - круглая область; II - пологая область или область насыщения; III - область пробоя.

При значительном увеличении напряжения  $U_{СИ}$  у стокового конца наблюдается пробой  $p$ - $n$ -перехода.

В выходных характеристиках полевого транзистора можно выделить две рабочие области: ОА и АВ. Область ОА называют крутой областью характеристики; область АВ – пологой или областью насыщения. В крутой области транзистор может быть использован как омическое управляемое напряжением сопротивление. В усилительных каскадах транзистор работает на пологом участке характеристики.

Входная характеристика полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом (рис. 1.4б) представляет собой обратную ветвь вольтамперной характеристики *p-n*-перехода. Хотя ток затвора несколько меняется при изменении напряжения  $U_{СИ}$  и достигает наибольшего значения при условии короткого замыкания выводов истока и стока (ток утечки затвора  $I_{зут}$ ), им в большинстве случаев можно пренебречь. Изменение напряжения  $U_{ЗИ}$  не вызывает существенных изменений тока затвора, что характерно для обратного тока *p-n*-перехода, выполненного из кремния (арсенид галлия).

Выражение (1.2) хорошо аппроксимируется квадратичной зависимостью

$$I_C = I_{Снач} \left(1 - U_{ЗИ} / U_{ЗИотс}\right)^2, \quad (1.3)$$

где  $I_{Снач}$  – начальный ток стока, под которым понимают ток при  $U_{ЗИ} = 0$  и напряжении на стоке, превышающем напряжение насыщения:  $|U_{СИ}| > |U_{СИнас}|$ .

Так как управление полевым транзистором осуществляется напряжением, то для количественной оценки управляющего действия затвора используют крутизну характеристики:

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = const}$$

Крутизна характеристики достигает максимального значения  $S_{нач}$  при  $U_{ЗИ} = 0$ . Для определения значения крутизны  $S$  транзистора при любом напряжении  $U_{ЗИ}$  продифференцируем выражение (1.3):

$$\frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} = \frac{2I_{Снач}}{U_{ЗИотс}} \left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИотс}}\right), \quad (1.4)$$

При напряжении  $U_{ЗИ} = 0$  выражение (1.4) примет вид

$$\frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} = S_{нач} = \frac{2I_{Снач}}{U_{ЗИотс}}, \quad (1.5)$$

Подставив (1.5) в выражение (1.4), получим

$$S = S_{нач} \left(1 - U_{ЗИ} / U_{ЗИотс}\right).$$

Таким образом, крутизна характеристики полевого транзистора уменьшается при увеличении напряжения, приложенного к его затвору.



Начальное значение крутизны характеристики можно определить графоаналитическим способом. Для этого проведем касательную из точки  $U_{3И} = 0$  к стокозатворной характеристике (рис. 1.4б). Она отсечет на оси напряжений отрезок  $0,5 U_{3Иотс}$ .

$$S_{нач} = \frac{I_{Снач}}{0,5U_{3Иотс}}.$$

Усилительные свойства полевых транзисторов характеризуются коэффициентом усиления:

$$\mu = - \frac{dU_{СИ}}{dU_{3И}} \Big|_{I_C = const},$$

который связан с крутизной характеристики и внутренним сопротивлением уравнением

$$\mu = SR_{СИ\text{диф}},$$

где  $R_{СИ\text{диф}} = \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \Big|_{U_{3И} = const}$  – дифференциальное внутреннее сопротивление транзистора.

Так же, как и у биполярных транзисторов, у полевых транзисторов различают режимы большого и малого сигнала. Режим большого сигнала чаще всего рассчитывают с помощью входных и выходных характеристик транзистора. Для анализа режима малого сигнала часто применяют малосигнальные эквивалентные схемы (рис. 1.5). Так как сопротивления закрытых переходов  $R_{3С}$ ,  $R_{3И}$  у кремниевых полевых транзисторов велики (десятки – сотни МОм), их в большинстве случаев можно не учитывать.

Типовые значения параметров кремниевых транзисторов, входящих в эквивалентную схему:  $S = 0,3 \div 3$  мА/В;  $R_3 = 10^{10}$  Ом;  $R_{СИ\text{диф}} = 0,1 \div 1$  МОм;  $R_K = 50 \div 800$  Ом;  $C_3 = 0,2 \div 10$  пФ.

Наличие емкостей у полевого транзистора, а также конечная скорость движения носителей заряда в канале определяют инерционные свойства полевых транзисторов. Инерционность транзистора в первом приближении учитывают путем введения операторной крутизны характеристики

$$S(p) = S / (1 + p\tau_3),$$

где  $\tau_3 \approx R_K C_3$ ;  $\tau_3 = 1/\omega_3$  – предельная частота, определенная на уровне 0,707 статического значения крутизны характеристики.

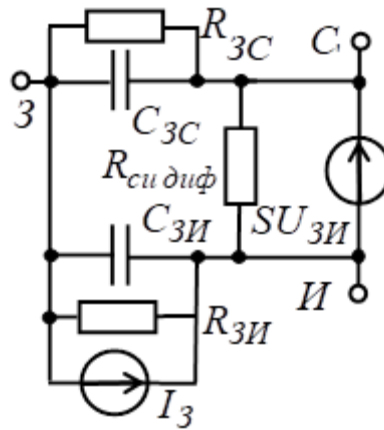


Рис. 1.5 – Полная эквивалентная схема полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

$R_{си\ диф}$  – дифференциальное сопротивление канала;  $I_3$  – ток затвора, когда *p-n*-переход заперт;  $C_{3C}$ ,  $C_{3И}$  – емкости между соответствующими электродами;  $R_{3C}$ ,  $R_{3И}$  сопротивления перехода между затвором и соответственно стоком и истоком; эквивалентная емкость затвора  $C_3 \approx C_{3C} + C_{3И}$ .

## 2.2. Полевые транзисторы с изолированным затвором

Спецификой унитаров является максимальная проводимость канала при нулевом смещении на затворе. С ростом смещения по модулю, проводимость канала уменьшается вплоть до полной отсечки. Смещение может иметь только одну полярность, соответствующую отсутствию инжекции через переход, затвор-исток.

У полевых транзисторов с изолированным затвором последний представляет собой металлический слой, изолированный от полупроводника тонкой диэлектрической пленкой. Наличие диэлектрика снимает ограничение на полярность смещения: она может быть, как положительной, так и отрицательной, причем в обоих случаях ток затвора отсутствует.

Транзисторы с изолированным затвором имеют классическую структуру металл—диэлектрик—полупроводник. Их называют МДП-транзисторами. В частном случае, если диэлектриком является окисел (диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ ), используется название МОП - транзисторы. Две основные структуры МДП-транзисторов показаны на рис. 1.6а, б.

Первая из них (рис. 1.6а) характеризуется наличием специально созданного (собственного или встроенного) канала, проводимость которого модулируется смещением на затворе. В случае канала *p*-типа, в режиме обогащения, положительный потенциал  $U_{3И}$  «отталкивает» электроны из канала, а в режиме обеднения – отрицательный «притягивает» их. Соответственно проводимость канала либо уменьшается, либо увеличивается по сравнению с ее значением при нулевом смещении.

Вторая структура (рис. 1.6 б) характеризуется отсутствием структурно выраженного канала. Поэтому при нулевом смещении на затворе проводимость между истоком и стоком отсутствует: исток и сток образуют с подложкой встречно включенные  $p$ - $n$  переходы. Тем более не может быть проводимости между истоком и стоком при положительной полярности смещения, когда к поверхности полупроводника притягиваются дополнительные электроны.

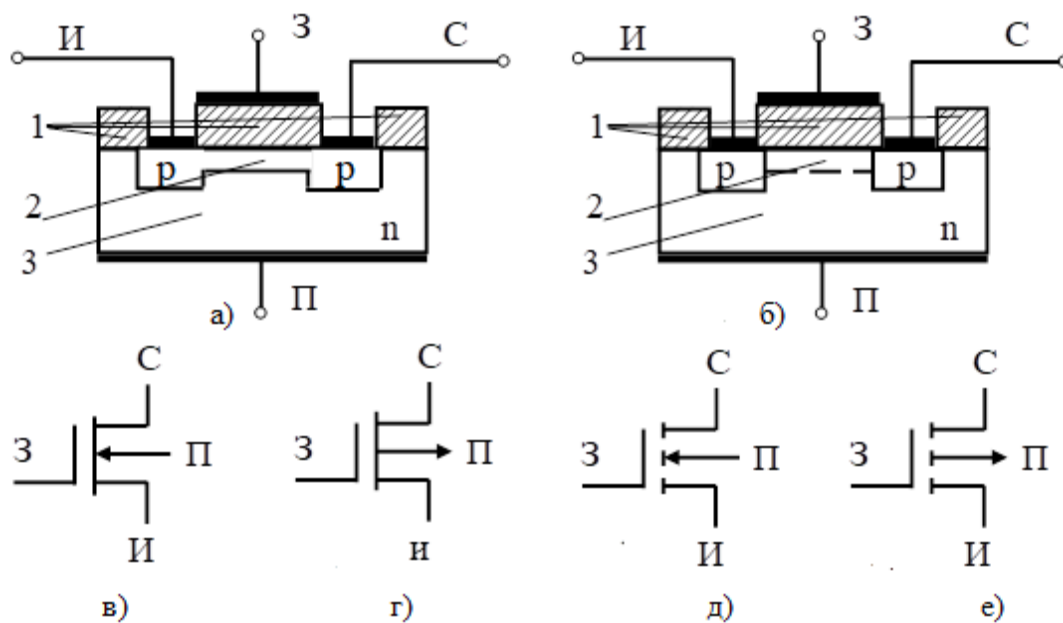


Рис. 1.6 – Структуры МДП-транзисторов:

а) транзистор с индуцированным каналом  $p$ -типа; б) транзистор со встроенным каналом  $p$ -типа (1 – диэлектрик; 2 – канал; 3 – подложка  $n$ -типа); их обозначения: в) с индуцированным каналом  $n$ -типа; г) с индуцированным каналом  $p$ -типа; д) с встроенным каналом  $n$ -типа; е) с встроенным каналом  $p$ -типа.

Однако при достаточно большом отрицательном смещении, когда приповерхностный слой сильно обогащается притянутыми дырками, между истоком и стоком образуется своего рода индуцированный (наведенный полем) канал, по которому может протекать ток. В настоящее время транзисторы с индуцированным каналом имеют наибольшее распространение, главным образом из-за простоты их изготовления.

Оба типа МДП-транзисторов могут изготавливаться как с  $p$ , так и с  $n$ -каналом, что сильно расширяет возможности их схемного применения.

На рис. 1.6 в, г, д, е приведены графические изображения полевых транзисторов с изолированным затвором.

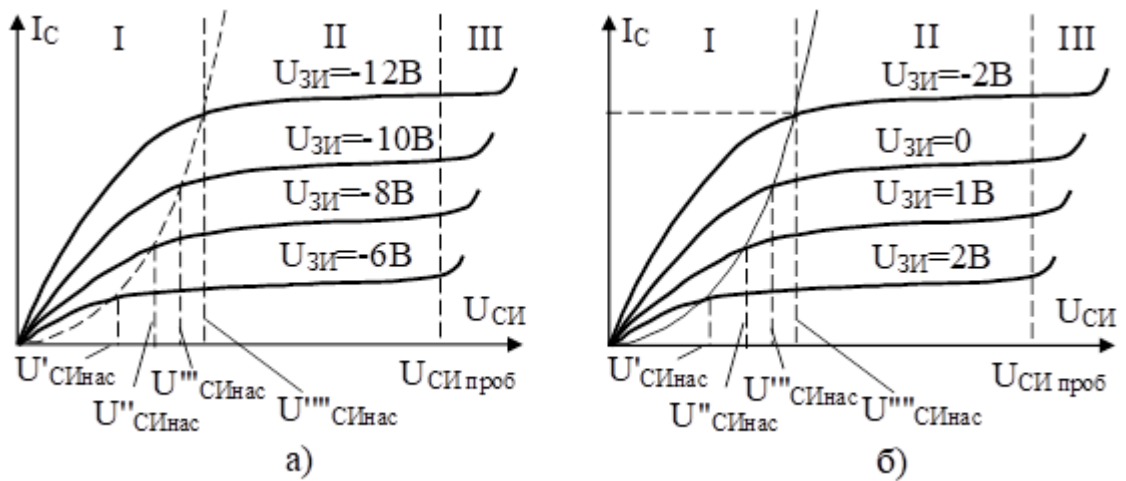


Рис. 1.7 – Выходные характеристики МДП-транзисторов с индуцированным (б) и встроенным (а) каналами

Выходные характеристики МДП-транзисторов аналогичны характеристикам полевых транзисторов с управляющим  $p$ - $n$ -переходом (рис. 1.7а, б). В них можно выделить крутую и пологую области, а также область пробоя. В крутой области I МДП-транзистор может работать как электрически управляемое сопротивление. Пологая область II обычно используется при построении усилительных каскадов.

Передаточные характеристики МДП-транзисторов с встроенным каналом и индуцированным каналом приведены на рис. 1.8.

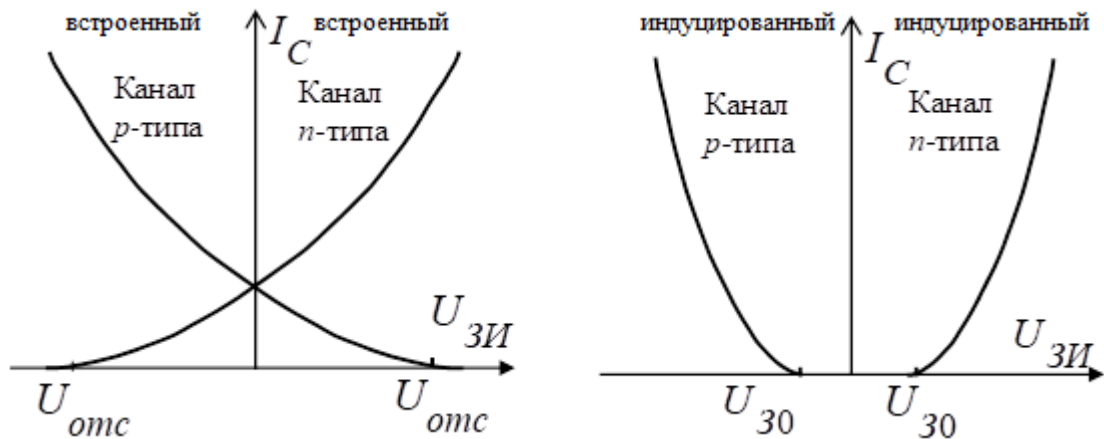


Рис. 1.8 – Передаточные характеристики МДП-транзисторов с встроенным каналом (а) и индуцированным каналом (б)

Для улучшения переходных и частотных свойств МДП-транзистора нужно в первую очередь уменьшать длину канала, а также увеличивать подвижность носителей заряда. При обычной длине канала  $5 \div 10$  мкм граничная частота крутизны лежит в пределах  $100 \div 300$  МГц. Однако при ультракоротких (доли микрона) каналах удается обеспечить граничные частоты до  $30 \div 80$  ГГц и выше.

## 2. Описание лабораторного макета

Для исследования статических вольтамперных характеристик полевых транзисторов в схеме общим истоком используется схема, изображенная в правой части лабораторного макета (рис. 2.1).

С помощью переключателя П7 выбирается исследуемый транзистор Т1,Т2,Т3.

Управляющее напряжение на затворе транзистора задается делителем  $R_{д1}$ ,  $R_{д2}$ ,  $R_{д3}$  и его можно установить с помощью переключателя П8 (грубо) и переменного резистора  $R_{д2}$  (плавно).

Изменять величину стокового напряжения можно переключателем П6, меняя величину резистора ( $R_{с1} \div R_{с10}$ ) в цепи стока. Напряжение на стоке транзистора измеряется осциллографом, а ток, протекающий через транзистор, стрелочным миллиамперметром, включаемым в цепь стока транзистора переключателем П5. Чувствительность прибора устанавливается переключателем П4.

Перечень типов транзисторов, исследуемых при проведении лабораторной работы, приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Наименование	Т1	Т2	Т3
Тип	КП303Д	КП305	BS170

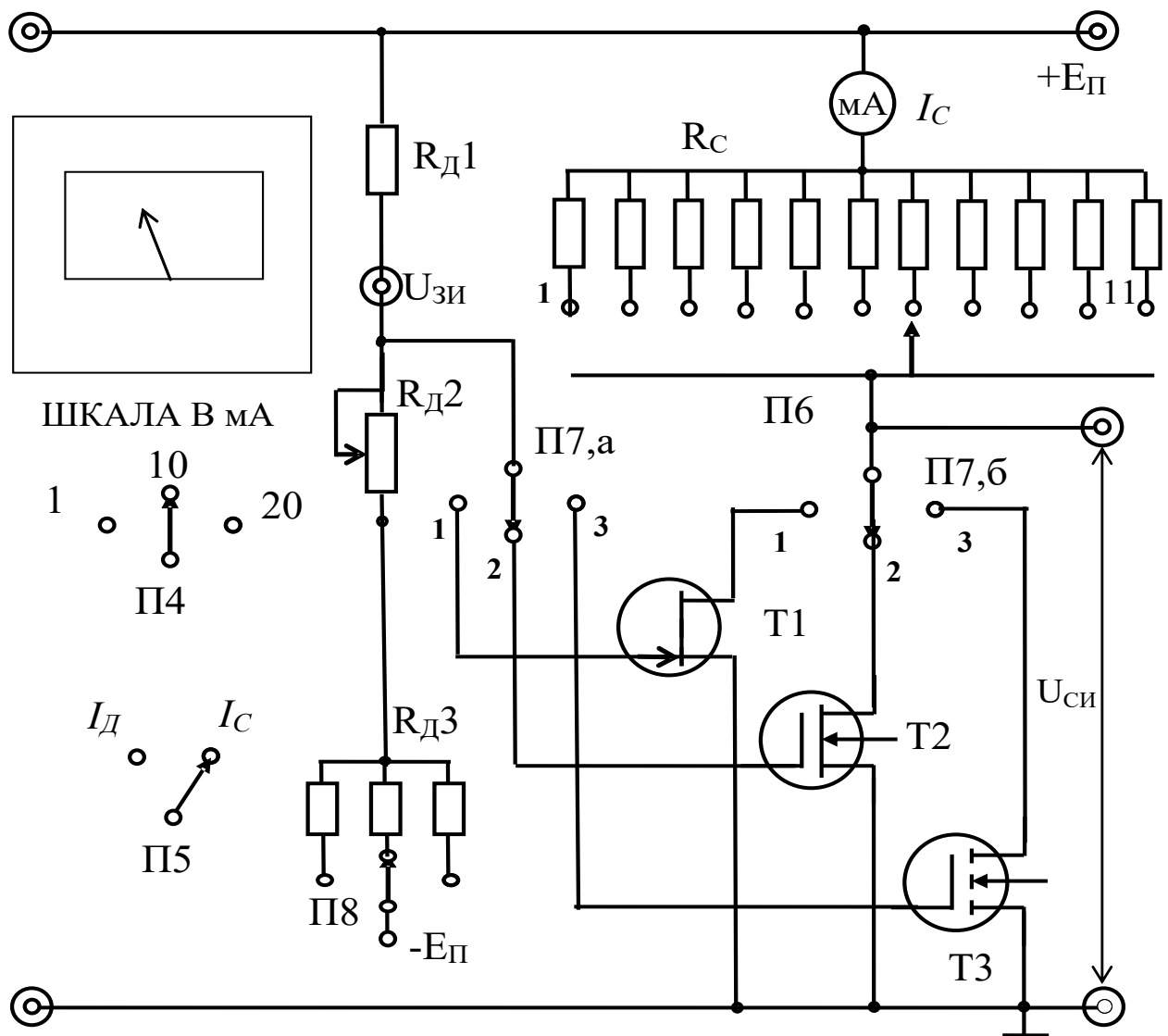


Рис. 2.1 – Лицевая панель макета для исследования полевых транзисторов.

### 3. Порядок выполнения работы

Для исследования передаточных и выходных вольтамперных характеристик полевых транзисторов в схеме с общим истоком необходимо:

- 1) Включить источник питания макета;
- 2) Переключатель П5 установить в положение для измерения тока стока  $I_C$ ;
- 3) Переключатель П7 установить в положение 1, подключив тем самым полевой транзистор Т1 с управляющим  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$ -типа.
- 4) Вход осциллографа присоединить к затвору исследуемого транзистора Т1 для измерения постоянного напряжения на затворе  $U_{зи}$ , а второй вход осциллографа присоединить к стоку транзистора Т1 для измерения постоянного напряжения  $U_{си}$ ;

5) С помощью переключателя П8 (грубо) и переменного резистора  $R_{Д2}$  (плавно) установить напряжение на затворе равное 0. Переключатель П6 установить в положение 10 (установив тем самым высокое напряжение  $U_{СИ}$ ) и измерить напряжение  $U_{СИ}$ .

6) Снять передаточную (сток-затворную) характеристику транзистора  $I_C = f(U_{ЗИ})$ , изменяя напряжение на затворе с интервалом 0,5 В и измеряя ток стока  $I_C$ , до тех пор, пока транзистор не закроется. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1. вида:

Таблица 3.1

$U_{ЗИ}, В$	0	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-3,5	-4
$I_C, мА$									

7) Построить передаточную вольтамперную характеристику полевого транзистора

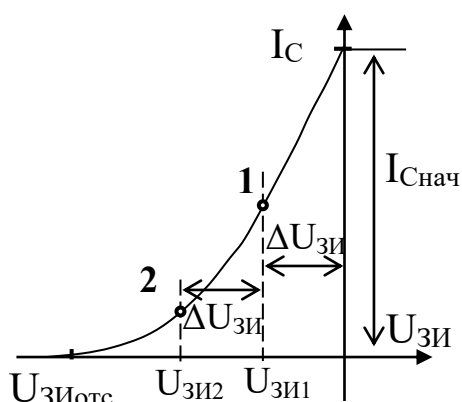


Рис. 4.1 – Передаточная характеристика полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$  – типа.

Т1. По построенному графику (см. рис. 4.1) выберите точки 1 и 2, которым соответствуют напряжения  $U_{ЗИ1}$  и  $U_{ЗИ2}$  при которых приращения  $\Delta U_{ЗИ}$  были бы одинаковыми и были равны примерно 1 В или 0,5 В.

8) Изменяя переключателем П6 резисторы  $R_{C1} \div R_{C10}$  и тем самым величину напряжения  $U_{СИ}$ , снять выходные характеристики транзистора  $I_C = f(U_{ЗИ})$  при напряжениях на затворе равных  $U_{ЗИ} = 0 В$ ,  $U_{ЗИ1}$  и  $U_{ЗИ2}$ . Результаты измерений занесите в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Положение переключателя П6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Примечание
$I_C, мА$											$U_{ЗИ} = 0 В$
$U_{СИ}, В$											
$I_C, мА$											$U_{ЗИ} = \_$
$U_{СИ}, В$											
$I_C, мА$											$U_{ЗИ} = \_$
$U_{СИ}, В$											

9. По построенным графикам определить при  $U_{СИ}=5 В$  и  $U_{ЗИ}$  крутизну характеристики и дифференциальное сопротивление транзистора:

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ}=const}$$

$$R_{СИдиф} = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \right|_{U_{ЗИ}=const}.$$

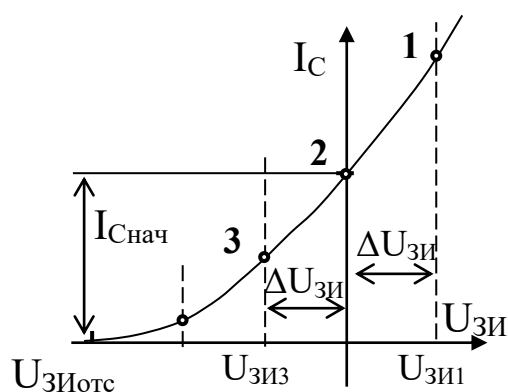


Рис. 4.2 – Передаточная характеристика МДП-транзистора с встроенным каналом  $n$  – типа.

10) Переключатель П7 установить в положение 2, подключив тем самым полевой МДП-транзистор Т2 с встроенным каналом  $n$  – типа.

11) Переключатель П6 установить в положение 10 (установив тем самым высокое напряжение  $U_{СИ}$ ) и измерить напряжение  $U_{СИ}$ .

Снять передаточную характеристику транзистора  $I_C = f(U_{ЗИ})$ , изменяя напряжение на затворе и измеряя ток стока  $I_C$  до тех пор, пока ток стока транзистора не достигнет значения

$15 \div 18$  мА, если это возможно. Результаты измерений занесите в таблицу 3.3

Таблица 3.3

$U_{ЗИ}, В$									
$I_C, мА$									

По построенному графику (см. рис. 4.2) выберите точки 1 и 3, которым соответствуют напряжения  $U_{ЗИ1}$  и  $U_{ЗИ3}$  при которых приращения  $\Delta U_{ЗИ}$  были бы одинаковыми и были равны примерно 1 В или 0,5 В.

12) Изменяя переключателем П4 резисторы  $R_{С1} \div R_{С10}$  и тем самым величину напряжения  $U_{СИ}$ , снять выходные характеристики транзистора  $I_C = f(U_{СИ})$  при напряжениях на затворе равных  $U_{ЗИ} = 0 В, U_{ЗИ1}$  и  $U_{ЗИ3}$ . Результаты измерений занесите в таблицу 3.2.

13) По построенным выходным характеристикам транзистора  $I_C = f(U_{СИ})$  определить крутизну для точки с координатами  $U_{ЗИ} = 0 В$  и  $U_{СИ} = 5 В$ . Построить зависимость

$$R_{СИдиф} = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \right|_{U_{ЗИ} = \_ В}.$$



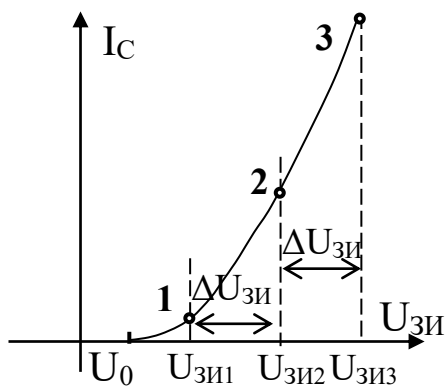


Рис. 4.3 – Передаточная характеристика МДП- транзистора с индуцированным каналом  $n$  – типа.

По построенному графику (см. рис. 4.3) выберите точки 1, 2 и 3, которым соответствуют напряжения  $U_{ЗИ1}$ ,  $U_{ЗИ2}$  и при которых приращения были одинаковыми.

16) Изменяя переключателем Пб резисторы и тем самым величину напряжения,  $U_{СИ}$ , снять выходные характеристики транзистора при напряжениях на затворе равных  $U_{ЗИ1}$ ,  $U_{ЗИ2}$  и  $U_{ЗИ3}$ . Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

17) По построенным выходным характеристикам транзистора ТЗ  $I_C = f(U_{СИ})$  определить крутизну и дифференциальное сопротивление транзистора для точки с координатами  $U_{ЗИ2}$  и  $U_{СИ} = 5$  В.

18) Выключить источник питания макета.

19) Оформить отчет и сделать выводы по работе.

14) Переключатель П7 установить в положение 3, подключив тем самым полевой МДП-транзистор ТЗ с индуцированным каналом  $n$ -типа.

15) Переключатель П6 установить в положение 10 (установив тем самым высокое напряжение  $U_{СИ}$ ) и измерить напряжение  $U_{СИ}$ .

Снять передаточную характеристику транзистора  $I_C = f(U_{ЗИ})$ , изменяя напряжение на затворе и измерять ток стока, пока он не достигнет значения  $15 \div 18$  мА. Результаты измерений занесите в таблицу 3.3.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
2. Электроника. Часть 1: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 209 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7278> (дата доступа:08.05.2023)
3. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
4. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
5. Электроника. Часть 2: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 120 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7279> (дата доступа:08.05.2023)
6. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.- 488 с.
7. Учебное пособие «Микроэлектроника» : Для направления подготовки 210100.62 «Электроника и наноэлектроника». Профиль: «Промышленная электроника» / Легостаев Н.С. - 2013. 172 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/4280> (дата доступа:08.05.2023)
8. Гусев В.Г. Электроника: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с. (73): Библиотека ТУСУР.