

Саратовский государственный университет
им. Н.Г.Чернышевского

Кафедра общей физики

«Физические основы твердотельной электроники»

Руководство к лабораторной работе

«Исследование полевого транзистора»

Составители:

доцент

вед. инженер

В.А.Костяков

Т.Н.Сиротинина

Саратов – 2005г.

1 Теоретические замечания

1.1 Общая характеристика полевых транзисторов

Полевой транзистор (ПТ) – полупроводниковый прибор, обладающий усилительными свойствами. ПТ содержит входную и выходную цепи, которые существенно отличаются от соответствующих цепей *биполярного транзистора* (БТ). Выходная цепь представляет собой проводящий канал, по которому движутся носители заряда только одного знака – основные носители. Управляющая цепь изолирована от канала диэлектриком или обратным смещенным *p-n* переходом. Напряжение, прикладываемое к управляющей цепи, позволяет создавать в канале поперечное электрическое поле, которое изменяет проводимость канала и тем самым обеспечивает возможность усиления сигналов. То есть управление выходным сигналом в приборах данного типа производится посредством электрического поля, вследствие чего они и называются *полевыми*. У ПТ есть еще два равноценных названия – *канальный транзистор* и *униполярный транзистор*, которые отражают указанные выше особенности рассматриваемых приборов [1-3].

ПТ, как и биполярный, имеет три электрода. Два из них расположены на концах проводящего канала и называются «*сток*» и «*исток*». *Исток* – электрод, через который в проводящий канал входят носители заряда, *сток* – электрод, через который из канала выходят носители заряда. Третий электрод, называемый «*затвором*», является управляющим электродом. Напряжение, прикладываемое между затвором и истоком, управляет проводимостью канала и, следовательно, выходным сигналом.

По принципу действия ПТ во многом аналогичен вакуумному триоду. Исток в ПТ подобен катоду вакуумного триода, затвор – сетке, сток – аноду [1].

ПТ имеет ряд существенных отличий от биполярного. Во-первых, в канале ПТ происходит дрейфовое движение неосновных носителей. Во-вторых, в БТ управление выходным сигналом производится входным током, а в ПТ – входным напряжением или электрическим полем. В-третьих, ПТ имеет гораздо более высокое входное сопротивление, так как в его входной цепи находится обратно смещенный $p - n$ переход или диэлектрик, а во входной цепи БТ – прямо смещенный $p - n$ переход.

Указанные отличия обуславливают ряд преимуществ ПТ перед биполярными, главными из которых являются высокое быстродействие, экономичность, высокое входное сопротивление, низкий уровень шумов. К этому следует добавить сравнительно простую технологию изготовления и малые габариты, что позволяет получить высокую степень интеграции ПТ на одном кристалле.

В настоящее время ПТ играют важную роль в микроэлектронике как элементы *интегральных схем (ИС)*. Один кристалл *ИС* может содержать тысячи, и даже сотни тысяч полупроводниковых приборов. На базе таких *ИС* создают компьютеры, микропроцессорные системы, устройства обработки сигналов и т.п. ПТ широко применяются также в устройствах промышленной электроники: в источниках питания и стабилизаторах, в преобразователях постоянного и переменного тока, в мощных усилителях и других устройствах [2,3].

Существует два основных типа ПТ: *с управляющим $p - n$ переходом* (ПТУП) и *с изолированным затвором*. В транзисторах первого типа поверхность канала граничит со слоем полупроводника противоположного типа проводимости, на который нанесен металлический электрод (*затвор*). Разновидностью ПТУП можно считать ПТ с управляющим переходом Шотки (ПТШ). В ПТШ металлический слой затвора наносится непосредственно на поверхность канала. Металл выбирается таким, чтобы образовался выпрямляющий переход Шотки.

В полевых транзисторах с изолированным затвором между металлическим затвором и полупроводниковым каналом находится тонкий ($\sim 0,1\text{мкм}$) слой диэлектрика, то есть транзистор представляет собой структуру металл – диэлектрик – полупроводник. Поэтому ПТ с изолированным затвором называют также МДП – транзистором. В качестве диэлектрика часто используется оксидный слой полупроводника. В этом случае транзистор имеет структуру металл – оксид – полупроводник и называется МОП – транзистором. Хотя и для этого транзистора может использоваться общий термин – МДП–транзистор.

ПТ с изолированным затвором (МДП – транзисторы), в свою очередь бывают двух разновидностей: *с индуцированным каналом и со встроенным каналом.*

Важнейшими характеристиками ПТ являются семейства выходных статических характеристик:

$$I_c = f(U_{cu}) \text{ при } U_{zu} = const \quad (1)$$

и семейство статических характеристик передачи (проходных характеристик):

$$I_c = f(U_{zu}) \text{ при } U_{cu} = const. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) I_c – ток стока (выходной ток), U_{cu} – напряжение между стоком и истоком (выходное напряжение), U_{zu} – напряжение между затвором и истоком (входное напряжение).

По вольт – амперным характеристикам (ВАХ) определяются следующие основные параметры ПТ, характеризующие его усилительные свойства:

– крутизна характеристики

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{zu}} \right|_{U_{cu}=const} \quad (3)$$

– внутреннее (выходное) сопротивление

$$r_c = \left. \frac{dU_{cu}}{dI_c} \right|_{U_{zu}=\text{const}} \quad (4)$$

– коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \left. \frac{dU_{cu}}{dU_{zu}} \right|_{I_c=\text{const}} \quad (5)$$

Перечисленные параметры называются *малосигнальными*. Между ними существует очевидная связь:

$$K_U = S \cdot r_c \quad (6)$$

Поэтому для характеристики ПТ достаточно двух параметров. Обычно используют крутизну и внутреннее сопротивление.

1.2 ПТ с управляющим $p - n$ переходом

На рис. 1 показана структура ПТУП, схематически иллюстрирующая принцип действия прибора.

Проводящий канал между истоком I и стоком C образован двумя переходами $p - n$ и $n - p^+$. Канал имеет электропроводность n – типа (рис. 1а). Концентрация носителей в канале сделана меньше, чем в областях p и p^+ . Поэтому при подаче на затвор обратного напряжения U_{zu} обедненный слой (ОПЗ) расширяется в основном в сторону канала и сужает его. Если напряжение между стоком и истоком отсутствует ($U_{cu} = 0$), то увеличение обратного напряжения на затворе до некоторого значения $U_{zu} = U_{zu \text{ отс}}$ (*напряжение отсечки*) приводит к смыканию ОПЗ двух переходов по всей длине канала и полному его перекрытию. При этом протекание тока по каналу становится невозможным.

Если $U_{зи} < U_{зи\text{отс}}$, а $U_{си} \neq 0$, то по каналу течет ток основных носителей I_c (ток стока). С ростом $U_{си}$ ток I_c растет. Однако при достижении некоторого значения $U_{си} = U_{си\text{нас}}$ (напряжение насыщения) ток I_c практически перестает расти. Это объясняется следующим образом. Обратное напряжение на $p-n$ переходе зависит не только от $U_{зи}$, но и от потенциала данной точки канала $U(x)$, создаваемого напряжением $U_{си}$, поскольку этот потенциал увеличивает обратную разность потенциалов между p и n областями. Потенциал $U(x)$ определяется выражением:

$$U(x) = U_{си} \frac{x}{L}, \quad (7)$$

где L – длина канала, x – расстояние от истока до данной точки канала.

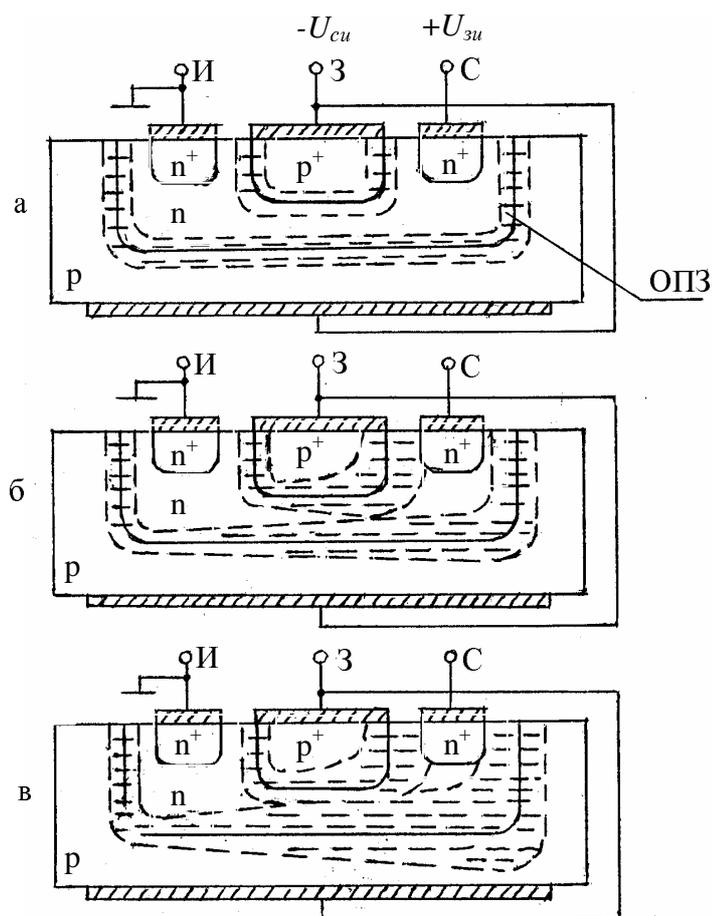


Рис. 1 Структура ПТУП:

- а) режим равновесия ($U_{зи}=0$, $U_{си}=0$)
- б) момент перекрытия канала ($0 < |U_{зи}| < |U_{зи\text{отс}}|$; $|U_{си}| = |U_{си\text{нас}}|$)
- в) режим глубокого насыщения ($0 < |U_{зи}| < |U_{зи\text{отс}}|$; $|U_{си}| > |U_{си\text{нас}}|$)

Ширина ОПЗ δ в точке x определяется формулой:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{eN} [U_{зи} + U(x)]} , \quad (8)$$

где ε – относительная диэлектрическая постоянная материала транзистора, ε_0 – электрическая постоянная вакуума, e – заряд электрона, N – концентрация примеси в канале.

Наибольшее значение δ будет в области стока при $x = L$. Там же будет наименьшая ширина канала. При условии

$$U_{зи} + U(L) = U_{зи\text{отс}} \quad (9)$$

ширина ОПЗ в точке $x = L$ составит $\delta = \frac{a}{2}$ (a – ширина канала при $U_{зи} = U_{си} = 0$) и канал в этой точке полностью перекроется (рис.1б). Соответствующее напряжение $U(L) = U_{си\text{нас}}$ и называется *напряжением насыщения*:

$$U_{си\text{нас}} = U_{зи\text{отс}} - U_{зи}. \quad (10)$$

Понятие «перекрытие» канала при увеличении $U_{си}$ и неизменном напряжении $U_{зи}$ является условным, так как перекрытие канала при указанных условиях является следствием увеличения тока I_c . Ток I_c при этом не уменьшается, а прекращает расти. Поэтому можно считать, что при $U_{си} = U_{си\text{нас}}$ автоматически устанавливается некоторое малое сечение канала со стороны стокового электрода. При дальнейшем увеличении напряжения $U_{си}$ увеличивается длина перекрытой части канала (по оси x в сторону истока) и растет статическое сопротивление канала (рис.1в). В результате ток почти не увеличивается. При больших напряжениях на стоке может возникнуть пробой $p - n$ перехода затвора. Поэтому существует ограничение допустимого напряжения $U_{си}$.

Если при неизменном напряжении $U_{си}$ увеличивается напряжение $U_{зи}$, то, как уже говорилось, канал будет сужаться и ток I_c уменьшаться. При некотором напряжении $U_{зи} = U_{зи\text{отс}}$ канал полностью перекроется ОПЗ по всей длине. При этом перекрытие канала будет не условным, а действительным и ток I_c обратится в нуль.

Рис.1 поясняет принцип действия ПТУП на примере прибора с каналом n – типа. Показанные на этом рисунке полярности напряжений также соответствуют n – каналному транзистору. Однако ПТУП может иметь канал p – типа. В этом случае полярности всех напряжений должны быть изменены на противоположные. Условное графическое изображение ПТУП на схемах приведено на рис. 2.

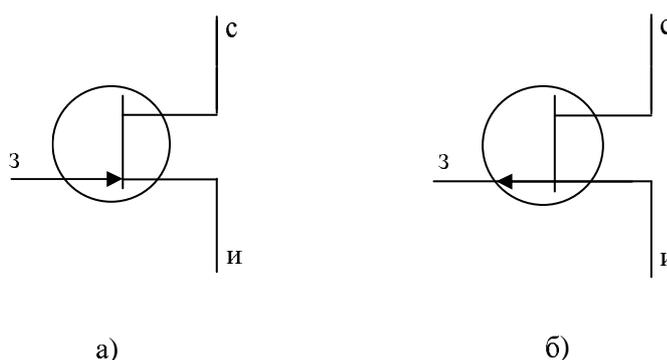


Рис.2 Условное графическое изображение ПТУП
 а) с каналом n – типа
 б) с каналом p – типа

В соответствии с описанными процессами выходные статические характеристики ПТУП имеют вид, показанный на рис. 3а. На выходных характеристиках можно выделить две части. Первая часть характеристики – *крутая часть*. Крутая часть – *сублинейна*. Вторая часть характеристики – *пологая часть*, которая начинается от напряжения насыщения $U_{си\text{нас}}$. Штриховая линия на рис. 3а разделяет сублинейную область и область насыщения. В [1] получены

приближенные аналитические выражения для *крутой части* ($U_{си} < U_{си\text{ нас.}}$):

$$I_c = \frac{1}{R_{си\text{ отк}}} \left[U_{си} + \frac{2}{3} \frac{U_{зи}^{3/2} - (U_{си} + U_{зи})^{3/2}}{U_{зи\text{ отс}}^{1/2}} \right], \quad (11)$$

и для тока насыщения ($U_{си} \geq U_{си\text{ нас.}}$):

$$I_{c\text{ нас}} = \frac{1}{R_{си\text{ отк}}} \left[U_{си\text{ нас}} + \frac{2}{3} (U_{зи\text{ отс}} - U_{си\text{ нас}}) \cdot \sqrt{\frac{U_{зи\text{ отс}} - U_{си\text{ нас}}}{U_{зи\text{ отс}}} - \frac{2}{3} U_{зи\text{ отс}}} \right], \quad (12)$$

где $R_{си\text{ отк}} = \frac{L}{\gamma \cdot S}$ – сопротивление *сток – исток* в открытом состоянии (при $U_{зи} = 0$ и $U_{си} < U_{си\text{ нас.}}$), γ – удельная проводимость канала, S – полное сечение канала. При получении формул (11) и (12) использованы закон Ома в дифференциальной форме и выражения (8) и (10).

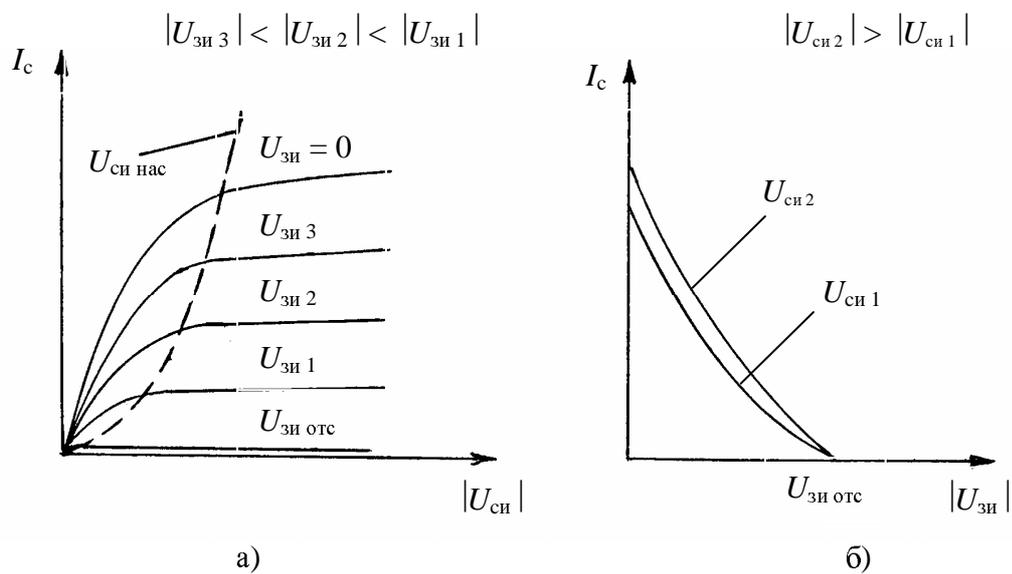


Рис. 3 Статические характеристики ПТУП:
 а) выходные характеристики;
 б) характеристики передачи

Для характеристик передачи в [1] получено выражение (при условии $U_{си} > U_{си\text{ нас.}}$):

$$I_{c\text{нас}} = \frac{1}{R_{\text{си\text{отк}}}} \left[\frac{1}{3} U_{\text{зи\text{отс}}} - U_{\text{зи}} \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{зи\text{отс}}}}} \right) \right] \quad (13)$$

Типичный вид характеристик передачи ПТУП показан на рис. 3б.

Из формулы (13) можно получить аналитическое выражение для крутизны характеристики S :

$$S = \left| \frac{dI_{c\text{нас}}}{dU_{\text{зи}}} \right| = \frac{1}{R_{\text{си\text{отк}}}} \left(1 - \sqrt{\frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{зи\text{отс}}}}} \right) \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что для получения больших значений S необходимо уменьшать сопротивление *сток – исток* в открытом состоянии транзистора, то есть иметь большую удельную проводимость исходного материала. В то же время концентрация примеси в канале должна быть небольшой, чтобы при увеличении напряжения на $p - n$ переходе он расширялся в сторону канала. Поэтому желательно для изготовления ПТУП выбирать материал с большей подвижностью носителей.

В заключение отметим, что в ПТУП проводящий канал существует при нулевом напряжении на затворе, то есть ПТУП является нормально открытым прибором. На управляющий электрод этого прибора можно подавать только обратное напряжение, уменьшающее проводимость канала. Поэтому ПТУП работает в режиме обеднения канала носителями заряда.

1.3 МДП – транзистор с индуцированным каналом

Структура МДП – транзистора с индуцированным каналом показана на рис. 4. В кристалле полупроводника с относительно высоким удельным сопротивлением, который называют подложкой, созданы две

сильно легированные области – *сток* и *исток*, тип электропроводимости которых противоположен типу электропроводимости подложки. Затвор нанесен на поверхность кристалла между стоком и истоком через тонкий слой диэлектрика. С обратной стороны подложка металлизирована. Вывод металлизации соединяется с истоком. На рис. 4 показана полярность подаваемых напряжений для случая подложки *n* – типа. Для подложки *p* – типа полярности напряжений должны быть противоположными.

Условное графическое изображение ПТ данного типа приведено на рис. 5.

Рассмотрим сначала случай отсутствия напряжения между стоком и истоком $U_{ci} = 0$ (рис. 4а,б). В этом случае МДП – структура представляет собой конденсатор, отличающийся от обычного конденсатора тем, что одна из его обкладок выполнена из полупроводника. Заряд полупроводниковой обкладки под действием приложенного напряжения U_{zi} меняется количественно и качественно. При изменении U_{zi} можно выделить два основных режима. При малых $|U_{zi}|$ подвижные носители (на рис. 4а – электроны) отталкиваются электрическим полем вглубь полупроводника и у поверхности полупроводника возникает слой неподвижных ионов примеси – ОПЗ. Это – режим обеднения, при котором приповерхностный слой не обладает проводимостью.

Если напряжение на затворе превышает по модулю некоторое пороговое значение ($|U_{zi}| \geq (|U_{zi\text{ пор.}}|)$), то возникает режим инверсии проводимости, при котором у поверхности полупроводника индуцируется заряд подвижных носителей противоположного знака (для рис. 4б – дырок). То есть у поверхности полупроводника возникает проводящий канал, проводимость которого тем выше, чем больше $|U_{zi}|$.

Предположим теперь, что между стоком и истоком приложено некоторое напряжение U_{ci} , но $U_{zi} = 0$. При этом между стоком и подложкой существует обратный включенный *p* – *n* переход и ток стока I_c пренебрежимо мал. С увеличением $|U_{zi}|$ электроны отталкиваются затво-

ром и сначала у поверхности полупроводника под затвором, как уже говорилось, возникает ОПЗ и ток I_c по-прежнему мал. При достижении $U_{зи} = U_{зи\ пор}$ у поверхности полупроводника возникает инверсный слой (канал), состоящий из дырок. Этот слой не имеет потенциальных барьеров с областями стока и истока и поэтому появляется ток стока.

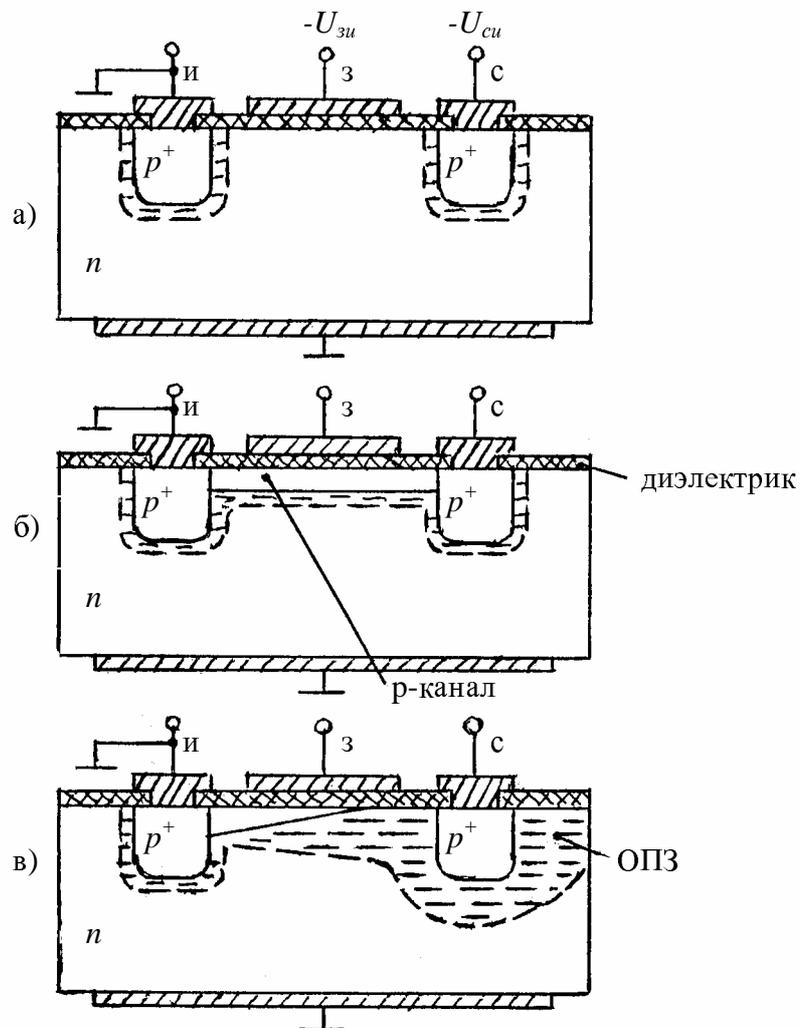


Рис. 4 Структура МДП – транзистора:

- а) режим равновесия ($U_{зи}=0, U_{си}=0$);
- б) режим инверсии типа проводимости
поверхностного слоя ($|U_{зи}| > |U_{зи\ пор}|, |U_{си}| < |U_{си\ нас}|$);
- в) режим насыщения ($|U_{зи}| > |U_{зи\ пор}|, |U_{си}| > |U_{си\ нас}|$).

С увеличением $U_{зи}$ будет увеличиваться концентрация носителей заряда в канале, уменьшаться сопротивление канала и соответственно расти ток.

Увеличение $U_{си}$ вызывает не только рост тока I_c , но и увеличение обратного напряжения на стоковом $p - n$ переходе. Это приводит к расширению ОПЗ на границе стока с подложкой. При некотором напряжении $U_{си} = U_{си\text{ нас}}$, называемом напряжением насыщения, ОПЗ перекрывает канал со стороны стока (рис. 4в). При дальнейшем росте $U_{си}$ стоковый $p - n$ переход расширяется в сторону истока, а рост тока I_c практически прекращается, то есть ток стока входит в область насыщения. Величина I_c в области насыщения зависит от величины напряжения на затворе $U_{зи}$. Так происходит управление током I_c .

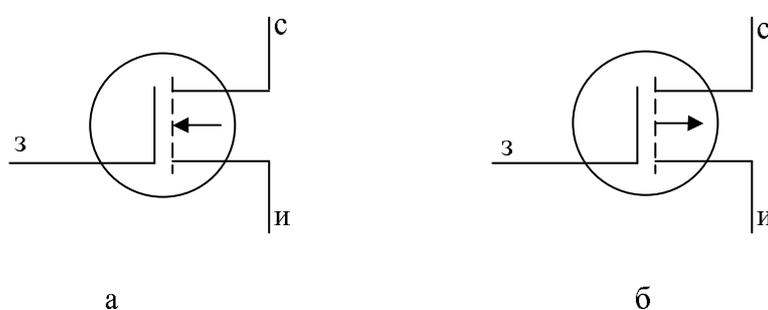


Рис. 5 Условное графическое изображение МДП – транзистора с индуцированным каналом:
 а) каналом n – типа;
 б) каналом p – типа

Поскольку затвор отделен от подложки слоем диэлектрика, ток в цепи затвора очень мал. Поэтому мала и мощность, потребляемая от источника сигнала. Тем не менее, эта мощность позволяет управлять достаточно большим выходным током I_c . Поэтому МДП – транзистор имеет усиление по мощности.

Выходные характеристики МДП – транзистора с индуцированным каналом показаны на рис. 6а. Их вид аналогичен виду выходных характеристик ПТУП. При небольших напряжениях имеет место почти линейная зависимость между I_c и $U_{си}$. После достижения $U_{си\text{ нас}}$ начинается пологая часть характеристики.

Характеристики передачи МДП – транзистора с индуцированным каналом показаны на рис. 6б. Характеристики начинаются в точке на оси $U_{зи}$, соответствующей пороговому напряжению затвора. Чем больше параметр $U_{си}$, тем выше проходит соответствующая характеристика передачи, однако изменение I_c с ростом $U_{си}$ незначительно.

Аналитические выражения для статических ВАХ МДП – транзистора приведены в литературе [1, 2].

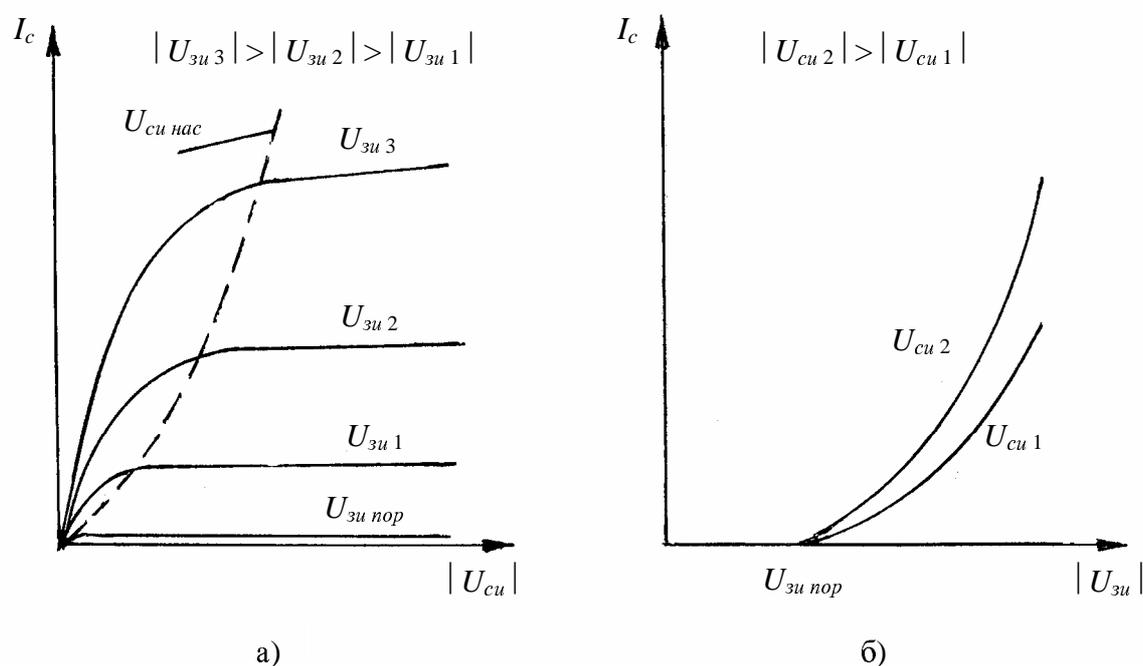


Рис. 6 Статические характеристики МДП – транзистора с индуцированным каналом:
 а) выходные характеристики,
 б) характеристики передачи

МДП – транзисторы с индуцированным каналом работают только в режиме обогащения канала носителями, так как при нулевом напряжении на затворе канал в них вообще отсутствует. Транзисторы этого класса являются нормально закрытыми приборами.

1.4 МДП-транзистор со встроенным каналом

На рис. 7 показана структура МДП – транзистора со встроенным каналом и полярности подаваемых напряжений для случая канала p – типа.

Условные графические изображения транзисторов этого типа приведены на рис. 8.

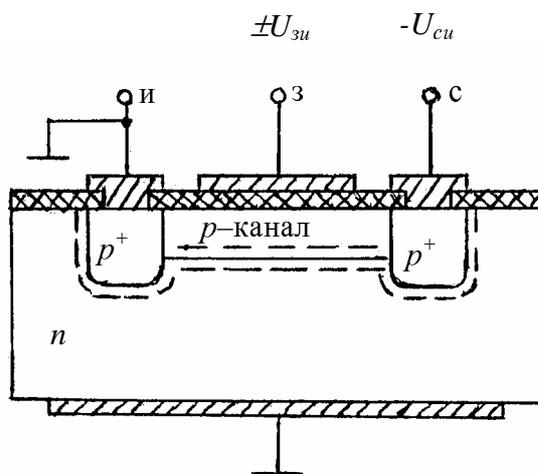


Рис. 7 Структура МДП – транзистора со встроенным каналом p -типа в режиме равновесия ($U_{зи} = 0$, $U_{си} = 0$)

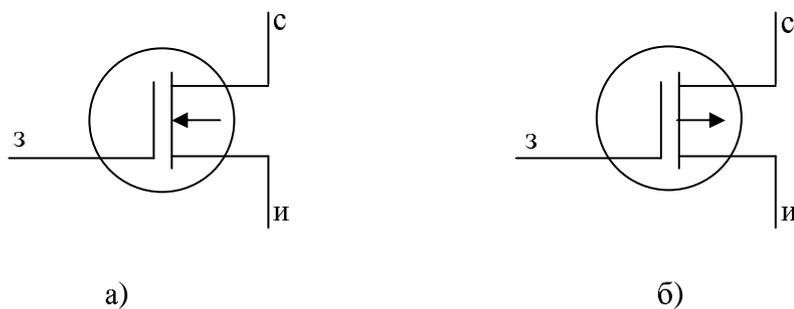


Рис. 8 Условное графическое изображение МДП – транзистора со встроенным каналом:
а) с каналом n -типа;
б) с каналом p -типа

Структура МДП – транзистора со встроенным каналом аналогична структуре транзистора, рассмотренного в предыдущем разделе, за исключением того, что в подложке между стоком и истоком методом диффузии сформирован проводящий канал. Сток, исток и канал имеют одинаковый тип проводимости и между ними нет потенциальных барьеров. Поэтому между стоком и истоком существует достаточно высокая проводимость при отсутствии напряжения на затворе.

Модуляция проводимости канала, как и прежде, производится изменением напряжения на затворе $U_{зи}$. Однако в данном случае напряжение $U_{зи}$ может быть как положительным, так и отрицательным. В случае p – канала (рис.7) отрицательное напряжения на затворе притягивает дырки, то есть обогащает канал основными носителями и повышает его проводимость. Положительное напряжение $U_{зи}$ выталкивает основные носители из канала, то есть обедняет канал и снижает его проводимость.

При некотором напряжении $U_{зи} = U_{зи\text{отс}}$ (напряжение отсечки) проводимость канала пропадает и ток через него невозможен.

При фиксированном напряжении на затворе $U_{зи} < U_{зи\text{отс}}$ увеличение напряжения на стоке $U_{си}$ приводит к росту тока стока I_c , при малых $U_{си}$, как и прежде, наблюдается почти линейный рост тока. По мере увеличения $U_{си}$ происходит расширение ОПЗ у стокового электрода и при некотором значении $U_{си} = U_{си\text{нас}}$ (напряжение насыщения) проводящий канал у стокового электрода перекрывается ОПЗ (отсечка канала), после чего рост тока I_c почти прекращается.

Выходные характеристики МДП – транзистора со встроенным каналом показаны на рис. 9а. Их ход аналогичен ходу выходных характеристик ранее рассмотренных ПТ. На рис. 9б приведены характеристики передачи МДП – транзистора со встроенным каналом. Как и для ПТУП они исходят из некоторой точки на оси $U_{зи}$, соответствующей напряжению отсечки. В отличие от соответствующих характеристик ПТУП характеристики передачи в данном случае

переходят и в область напряжений противоположной полярности. МДП – транзисторы со встроенным каналом могут работать как в режиме обеднения канала носителями, так и в режиме обогащения. Транзисторы данного типа являются нормально открытыми приборами.

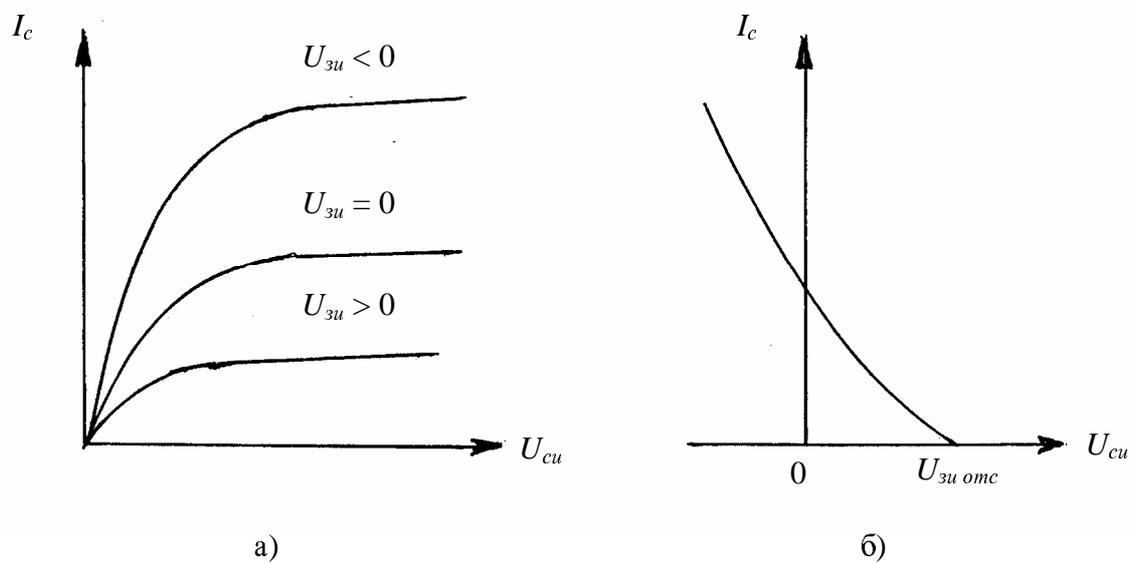


Рис. 9 Статические характеристики МДП – транзистора со встроенным p – каналом
а) – выходные характеристики;
б) – характеристики передачи

2 Экспериментальная часть

1.2 Экспериментальная установка

Для снятия статических ВАХ ПТ используется схема, показанная на рис. 10.

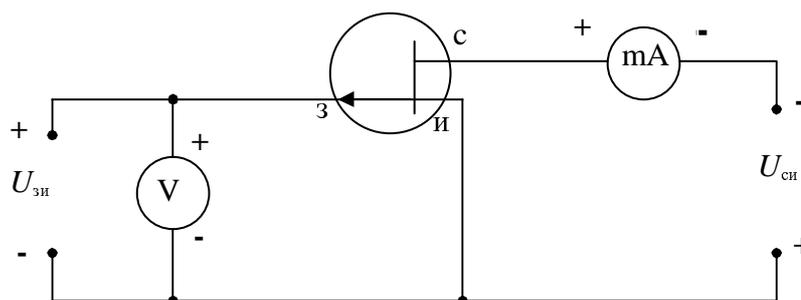


Рис. 10 Схема установки для измерения статических характеристик ПТ

1.3 Порядок выполнения работ

Приведенные ниже числовые значения параметров и режимов относятся к измерению ВАХ полевого транзистора типа 2П103А.

При исследовании других транзисторов режимы измерений должны выбираться в соответствии со справочными данными на конкретный прибор.

1. Снять переходные характеристики $I_c(U_{зи})$ при $U_{си} = 1\text{В}; 5\text{В}; 10\text{В}$, изменяя $U_{зи}$ через 0,2 В. Данные записать в табл. 1.

Таблица 1

$U_{зи}, \text{В}$	$I_c, \text{мА}$		
	$U_{си} = 1\text{В}$	$U_{си} = 5\text{В}$	$U_{си} = 10\text{В}$
0			
0,2			
0,4			
0,6			
0,8			

Построить графики зависимости $I_c(U_{зи})$. По этим графикам определить крутизну характеристики при $U_{зи} = 0,5 \text{ В}$; $U_{си} = 5 \text{ В}, 10 \text{ В}$.

- Снять семейство выходных характеристик транзистора $I_c(U_{си})$ при $U_{зи} = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 \text{ В}$, изменяя напряжение $U_{си}^*$ от 0 до 10 В через 1 В. Данные записать в табл. 2.

Таблица 2

$U_{зи}, \text{ В}$	$I_c, \text{ мА}$									
	$U_{си} = 1\text{В}$	2В	3В	4В	5В	6В	7В	8В	9В	10В
0										
0,2										
0,4										
0,6										
0,8										

Построить графики зависимости $I_c(U_{си})$. По этим графикам определить выходное сопротивление транзистора при $U_{си} = 5 \text{ В}$.

- Рассчитать коэффициент усиления транзистора по формуле (6).
- По виду полученных характеристик определить тип ПТ и изобразить его принципиальную схему.

Контрольные вопросы

- Изобразите схематически устройство ПТУП.
- Изобразите схематически устройство МДП – транзистора.
- Объясните принцип управления выходным током в ПТУП и в МДП – транзисторе.

* При снятии ВАХ напряжение $U_{си}$ измеряется вольтметром источника питания ТЭС-23, который задает напряжение на стоке ПТ.

4. Как определить необходимую полярность напряжений для ПТ различных типов?
5. Почему входное сопротивление ПТ велико?
6. Какое напряжение называется напряжением отсечки ПТУП?
7. Какое напряжение называется пороговым напряжением МДП – транзистора с индуцированным каналом?
8. Что такое режим обеднения, режим обогащения и режим инверсии в МДП – транзисторах?
9. Как объяснить насыщение тока стока в ПТ?
10. Нарисуйте вид выходных характеристик и характеристик передачи для ПТ различных типов.
11. Что такое крутизна характеристики ПТ?

Библиографический список

1. *Пасынков В.В., Чиркин Л.К.* Полупроводниковые приборы.-М.: Высшая школа, 1987г.
2. *Тугов Н.М., Глебов Б.А.* Полупроводниковые приборы.-М.: Энергоатомиздат, 1990г.
3. *Росадо Л.* Физическая электроника и микроэлектроника. Пер. с исп.- М.: Высшая школа, 1991г.

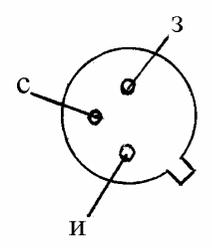
Приложение 1.

Таблица. Основные параметры некоторых типов ПТ малой мощности.

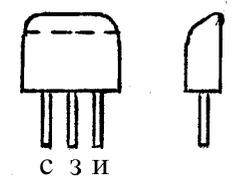
Обознач.	Тип Пт	Тип канала	$U_{си\ max}, В$	$U_{зи\ max}, В$	$U_{зи\ отс}, В$	$U_{зи\ пор}, В$	$I_{з\ ут}, нА$	$S, мА/В$	Цоколёвка
КП 101Д	ПТУП	р	10	10	6		50	0,4	а
КП 102Е	- « -	- « -	15	10	2,8		1,5	0,25...0,7	б, в
КП 103Е	- « -	- « -	10		0,4..1,5		20	0,4...2,4	б, в
КП 201Е	- « -	п	10	15	1,5		10	0,4	г
КП 303А	- « -	- « -	25	30	0,5..3		1	1...4	д
КП 307А	- « -	- « -	25	27	0,5...3		1	4...9	д
КП 308А	- « -	- « -	25	30	0,2..1,2		1	1...4	е
КП 312А	- « -	- « -	20	25	8		10	4	ж
2П 333Б	- « -	- « -	40	35	0,6..4		100	2...5	а
КП 305И	МДП	п	15	15	6		1	4...10,5	з
2П 310А	- « -	- « -	8	10			3	3...6	и
КП 313А	- « -	- « -	15	10	6		10	4,5...10,5	к
КП 301Б	- « -	р	20	30		2,7..5,4	0,3	1	и
КП 304А	- « -	- « -	25	30			20	4	з

Примечание. Ток утечки затвора $I_{з.ут.}$ измеряется при $U_{зи} = U_{зи\ max}$ и $U_{си} = 0$

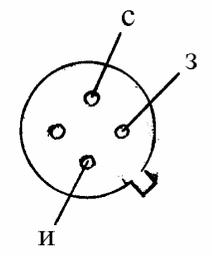
Поклевка некоторых типов ПТ



а



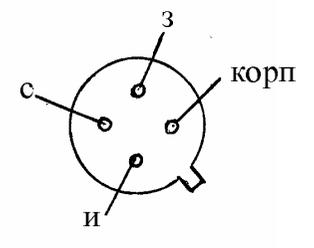
б



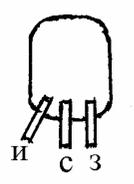
в



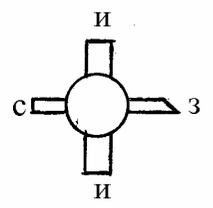
г



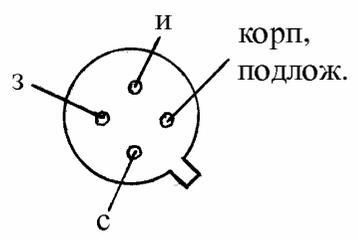
д



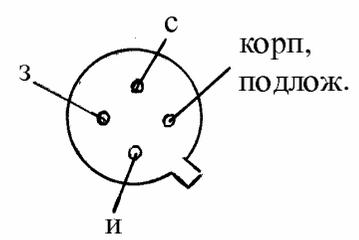
е



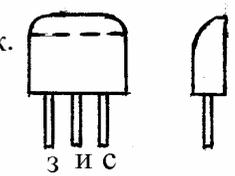
ж



з



и



к