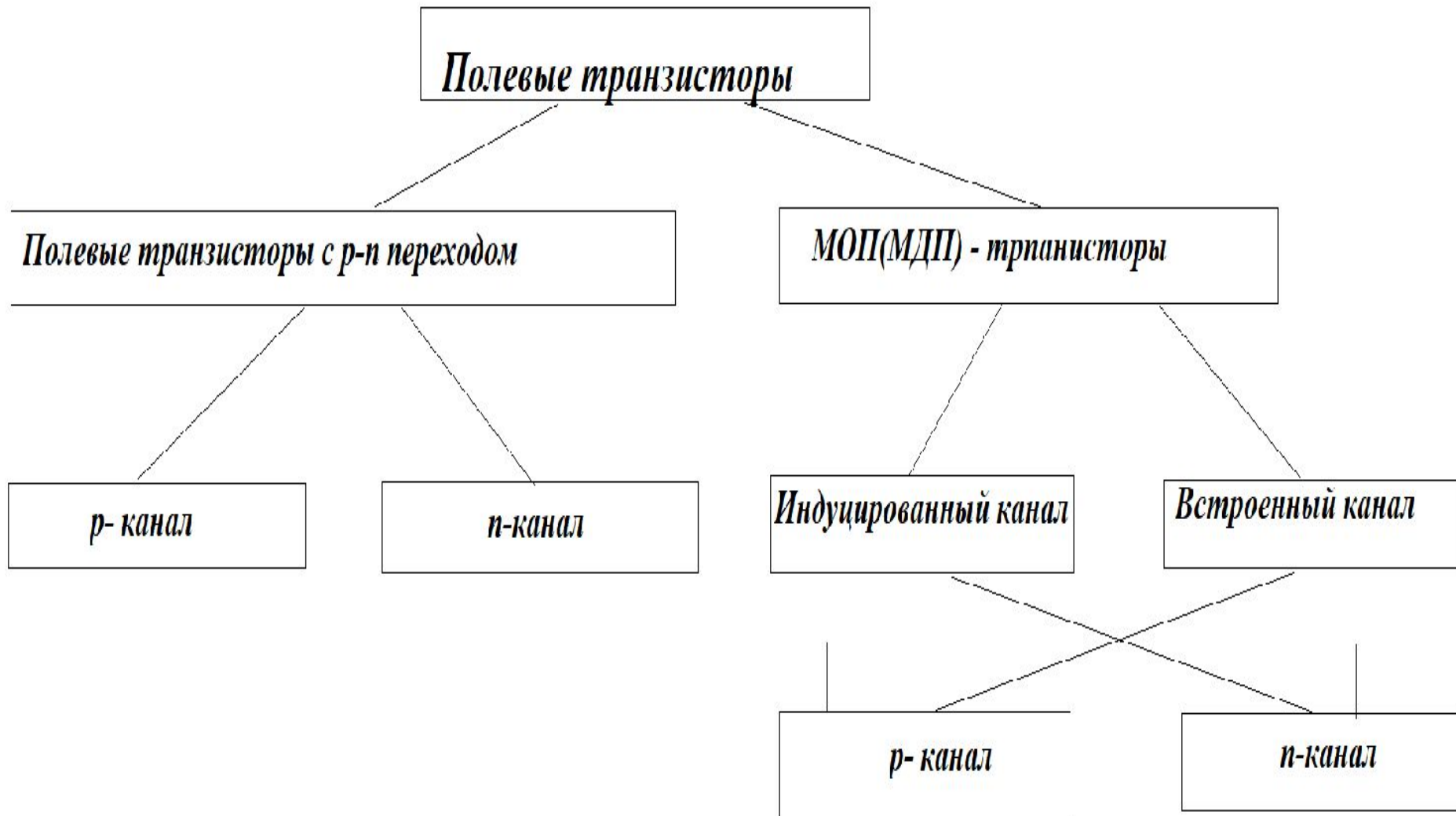
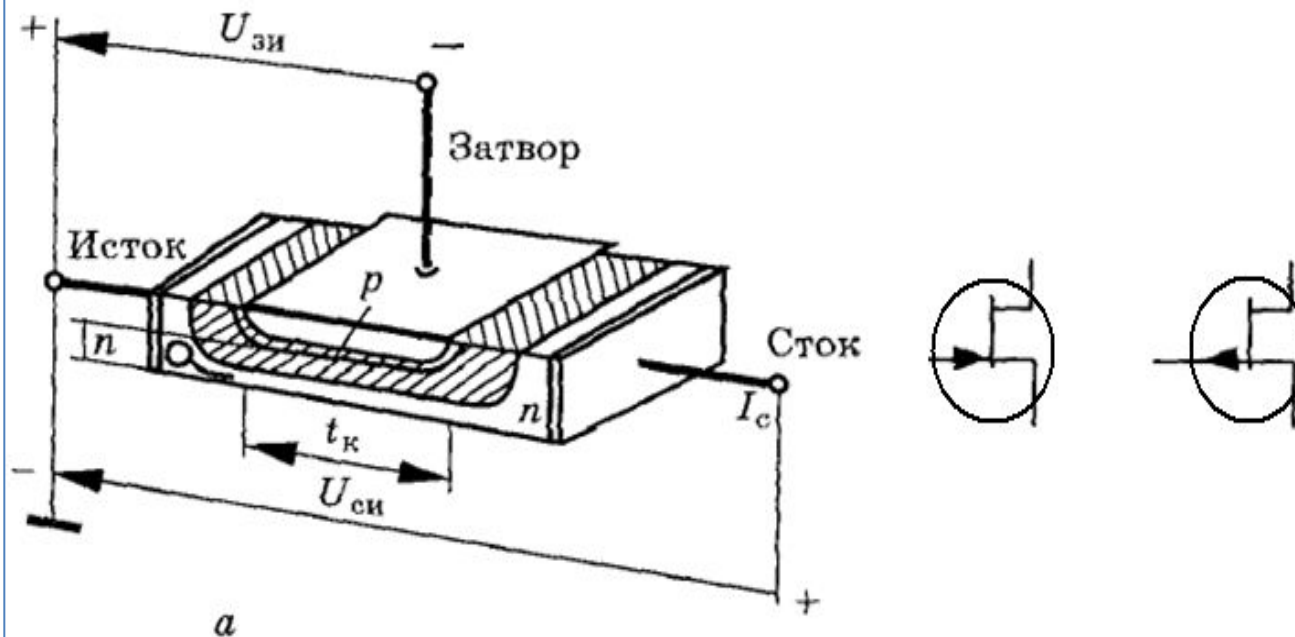


Лекция №9

Тема: «Полевые транзисторы»



Структура полевого транзистора с p-n переходом



Упрощенные структурные схемы и условные обозначения полевого транзистора с управляющим p-n переходом

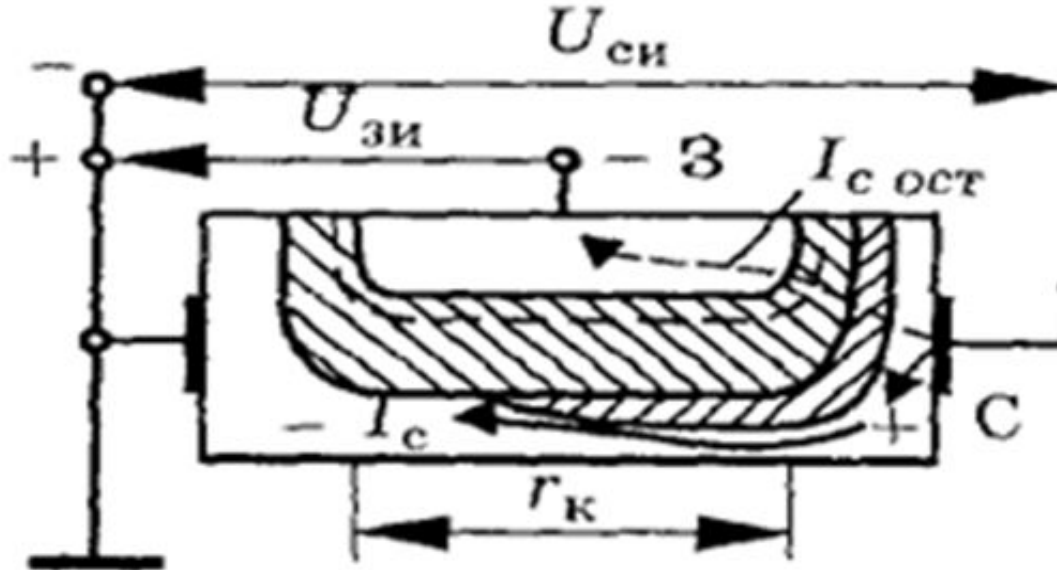
Определение

Полевым транзистором называют трехэлектродный полупроводниковый прибор, в котором электрический ток создается основными носителями заряда под действием продольного электрического поля, а модуляция тока осуществляется поперечным электрическим полем, создаваемым напряжением на управляющем электроде. Полевые транзисторы бывают двух разновидностей: с управляющим *p-n* переходом и с изолированным затвором (МДП- или МОП-транзисторы).

Отличие полевого транзистора от биполярного заключается:

- 1) в принципе действия — биполярный транзистор управляется током, а полевой — напряжением или электрическим полем;
- 2) в большом входном сопротивлении (более $10^9 \dots 10^{10}$ Ом), что связано с малым током затвора;
- 3) в низком уровне шумов.

Принцип действия ПТ с p-n переходом

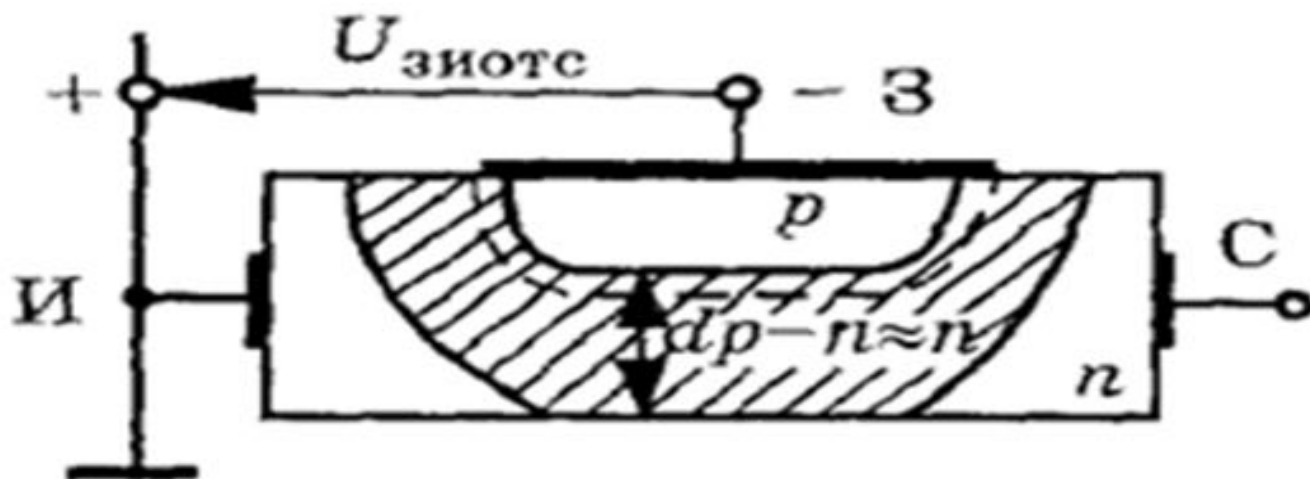


Управление толщиной канала осуществляется напряжением $U_{зи}$, т.е. электрическим полем, возникающим в запирающем слое, без осуществления инжекции носителей.

При увеличении обратного напряжения на затворе запирающий слой $p-n$ перехода расширяется, уменьшая сечение канала. При некотором напряжении на затворе может произойти перекрытие канала и в цепях истока и стока начнут протекать небольшие обратные токи

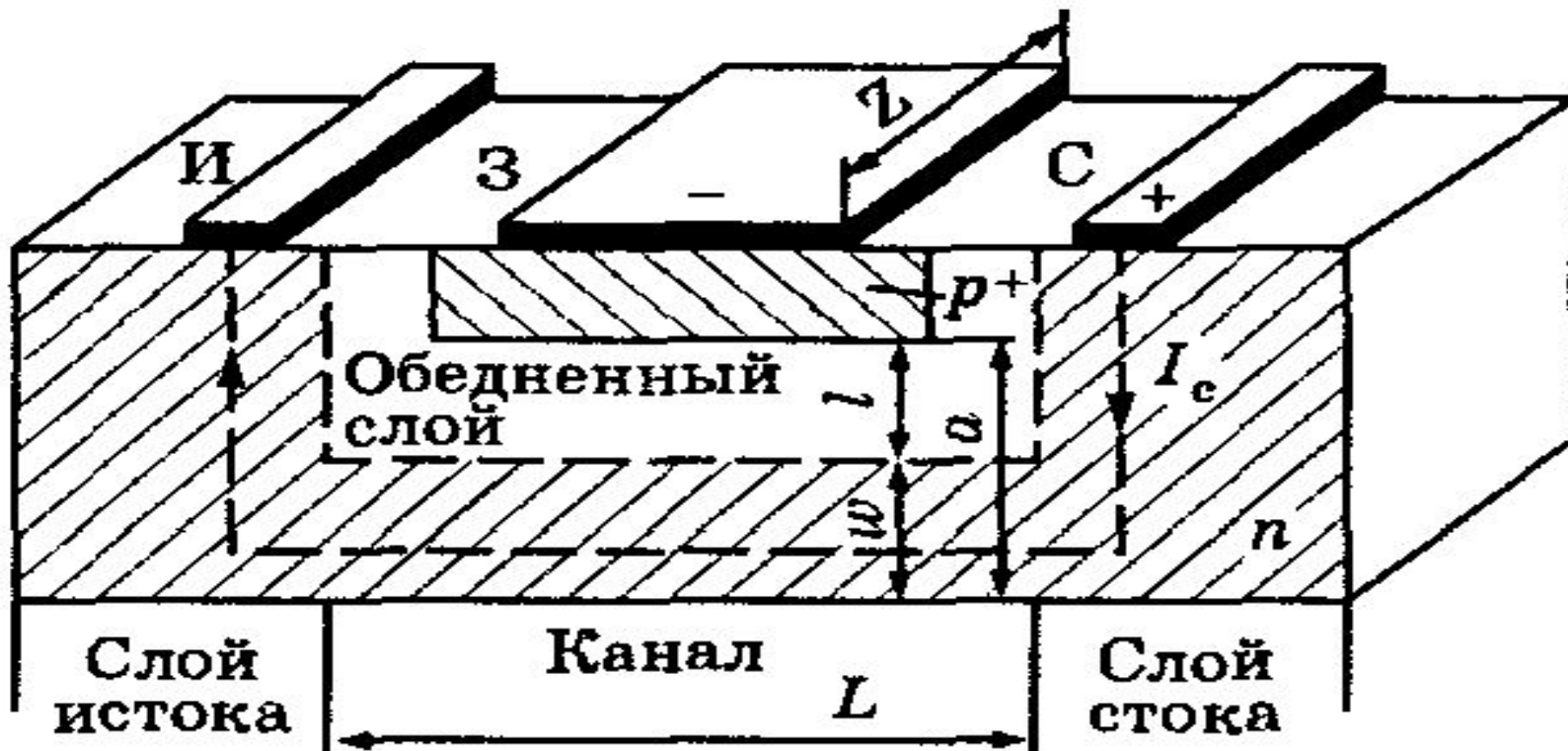
При прямом включении управляющего $p-n$ перехода возникает относительно большой прямой ток затвора и сопротивление участка затвор — исток резко уменьшается, поэтому нецелесообразно применять на практике такое включение

Принцип действия ПТ с р-п переходом



Напряжение между затвором и истоком, при котором канал перекрывается, а его сопротивление стремится к бесконечности и ток стока достигает заданного низкого значения $I_{с\text{обр}}$, называют напряжением отсечки $U_{зи\text{отс}}$. При приложении $U_{зи\text{отс}}$ транзистор должен закрываться полностью, но из-за наличия малых токов утечки и трудности их измерения $U_{зи\text{отс}}$ определяется при заданном малом значении $I_{с\text{обр}}$. В справочнике на каждый транзистор указывается ток стока, при котором измерено $U_{зи\text{отс}}$.

Зависимость ширины и сопротивления канала от напряжения затвор-исток



Структура полевого транзистора

$$w = a - l,$$

$$w = a - \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon U_{зи}}{qN}}.$$

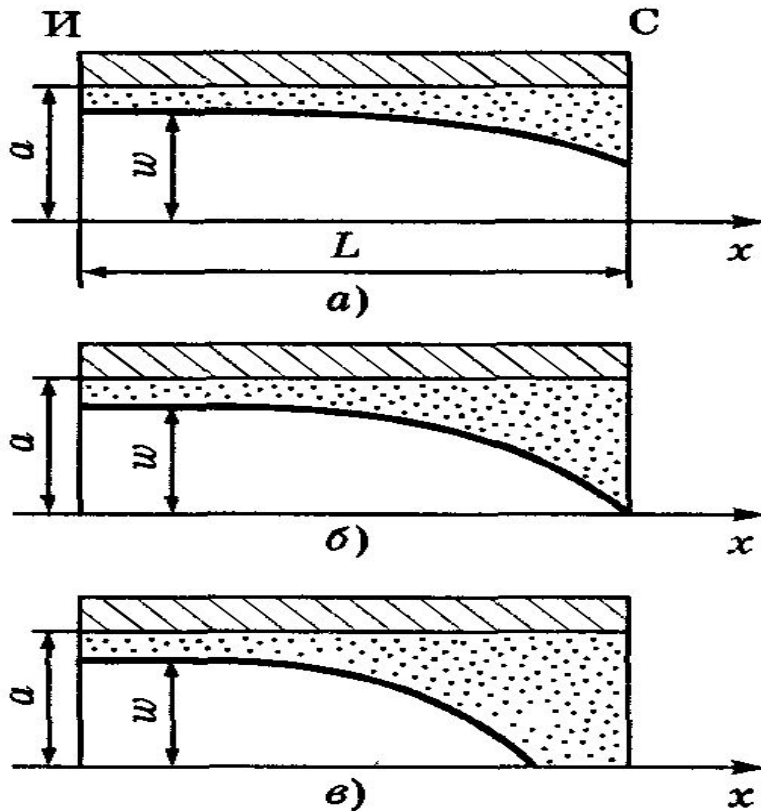
$$U_{зо} = (qN/2\varepsilon_0\varepsilon) a^2.$$

$$w = a \left(1 - \sqrt{\frac{U_{зи}}{U_{зо}}} \right)$$

$$R_0 = \frac{\rho L}{aZ} \left(1 - \sqrt{\frac{U_{зи}}{U_{зо}}} \right)^{-1},$$

где Z — ширина канала ; ρ — удельное сопротивление n -слоя.
При $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $a = 2 \text{ мкм}$ и $U_{зи} = 0$ получается
минимальное значение $R_{0\text{мин}} = 0,5 \text{ кОм}$. При $U_{зи}/U_{зо} = 0,5$ со-
противление R_0 возрастает до $1,8 \text{ кОм}$.

Образование перекрытия канала («горловины») при увеличении напряжения сток-исток и переход ПТ в режим насыщения



Сечение канала полевого транзистора в ненасыщенном режиме (а), на границе насыщения (б) и в режиме насыщения (в)

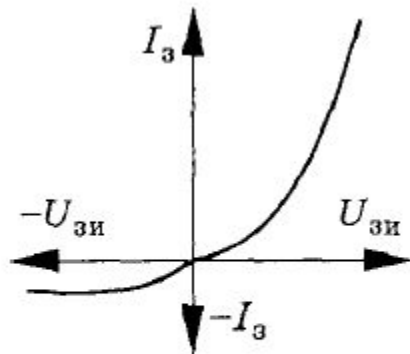
$$U_{сз} = U_{си} - (-U_{зи})$$

$$U_{сз} = U_{си} + U_{зи}$$

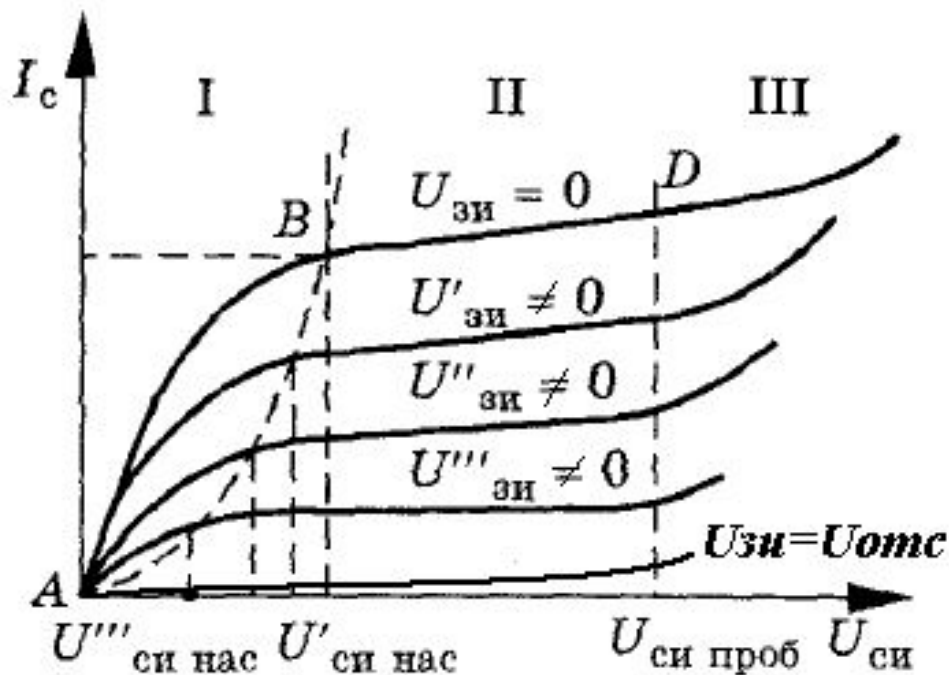
$$U_{сз} = U_{си} + U_{зи} = U_{зо}$$

$$U_{син} = U_{зо} - U_{зи}$$

Входные и выходные ВАХ полевого транзистора с р-п переходом



Входная
(затворная)
характеристика



Выходные (стоковые)
статические характеристики
полевого транзистора
с управляющим р-п переходом

Аналитические выражения для выходных ВАХ полевого транзистора с р-п переходом

Аналитические выражения для ВАХ полевого транзистора:
на крутом участке

$$I_c = \frac{1}{R_{0\text{мин}}} \left[U_{\text{си}} + \frac{2}{3} \frac{U_{\text{зи}}^{3/2} - (U_{\text{зи}} + U_{\text{си}})^{3/2}}{U_{\text{зо}}^{1/2}} \right];$$

на пологом участке

$$I_c = \frac{1}{R_{0\text{мин}}} \left[\frac{1}{3} U_{\text{зо}} - U_{\text{зи}} \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{зо}}}} \right) \right],$$

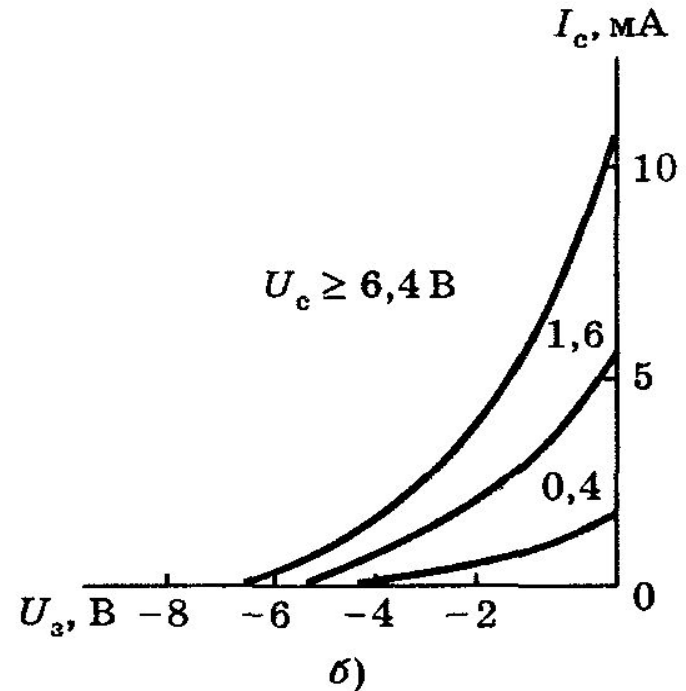
где $R_{0\text{мин}}$ — сопротивление канала при $U_{\text{зи}} = 0$

Статические проходные ВАХ

При работе в пологой области вольтамперной характеристики ток стока представляется выражением

$$I_c = I_{c \text{ нач}} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи \text{ отс}}} \right)^2,$$

где $I_{c \text{ нач}}$ — начальный ток стока при $U_{зи} = 0$ и рабочем напряжении на стоке, превышающем напряжение насыщения.



Эквивалентная схема полевого транзистора

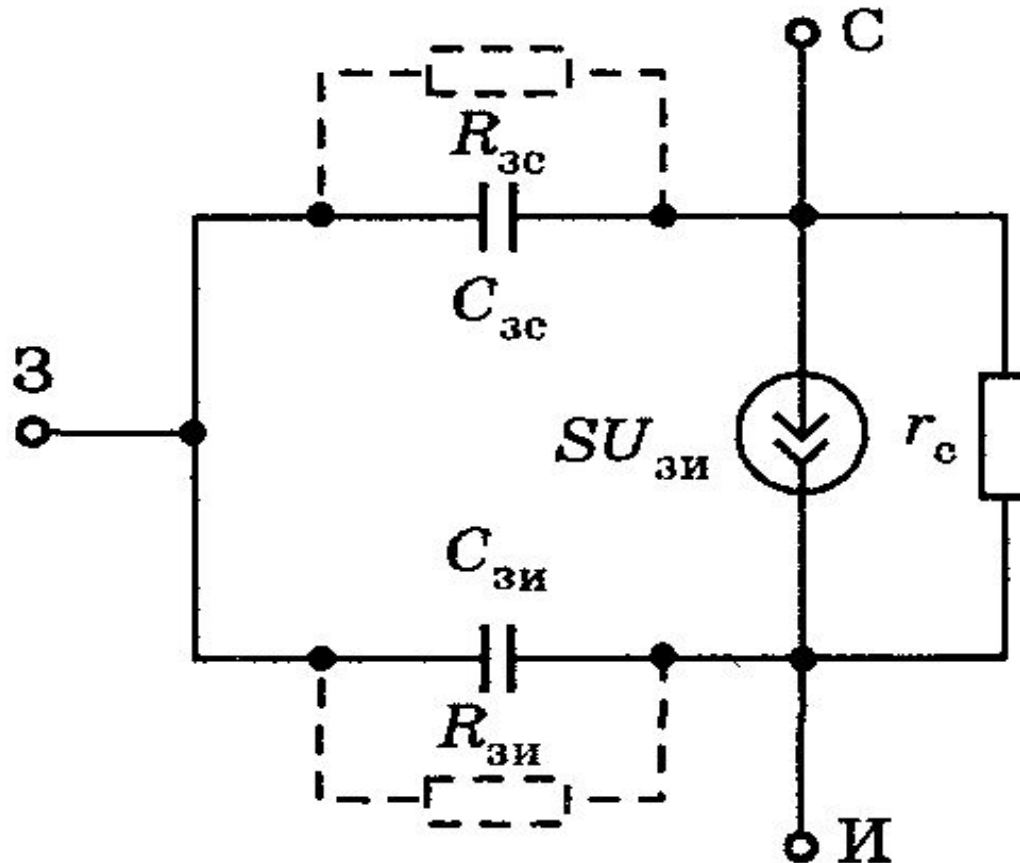
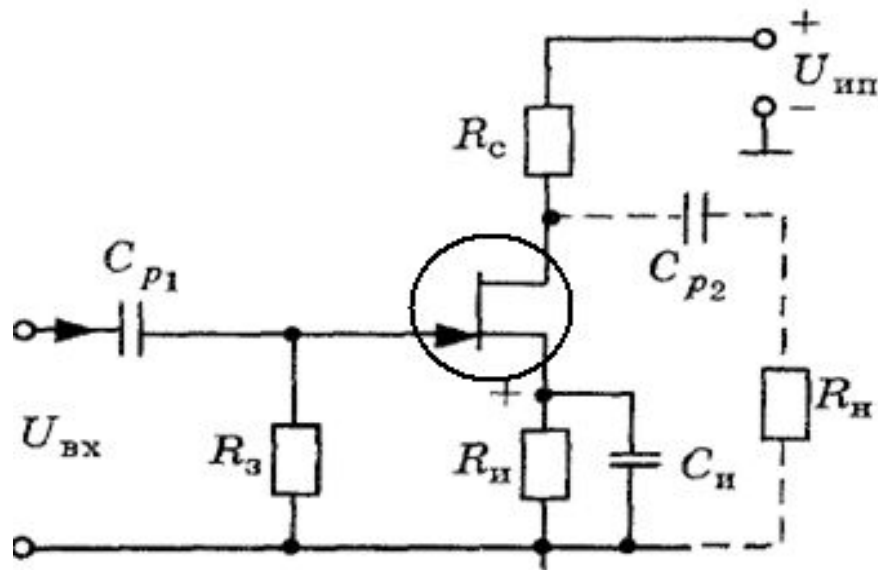
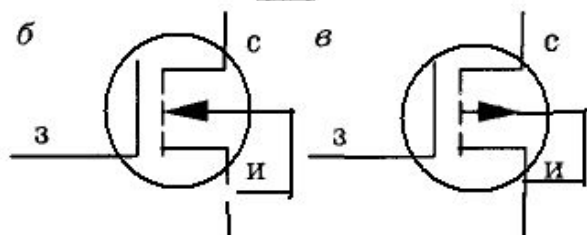
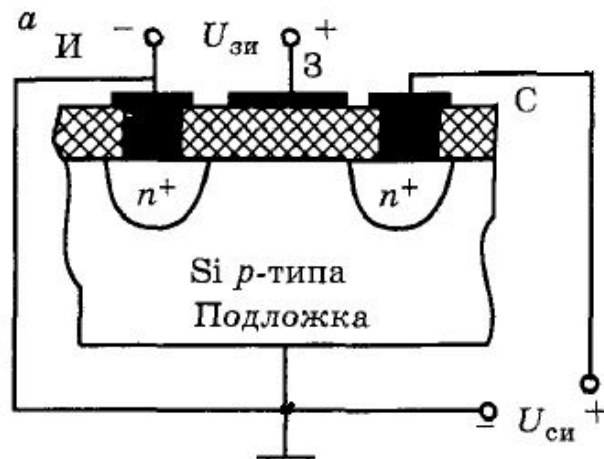


Схема включения ПТ с р-п переходом



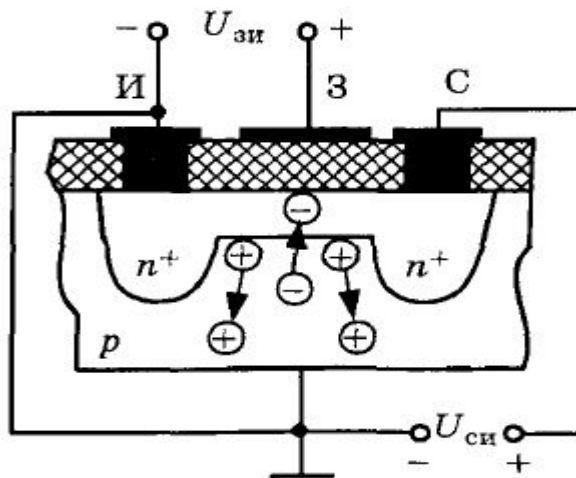
**Схема включения
с ОИ транзистора с управляющим
р-п переходом и каналом л-типа**

МОП -транзисторы с индуцированным каналом

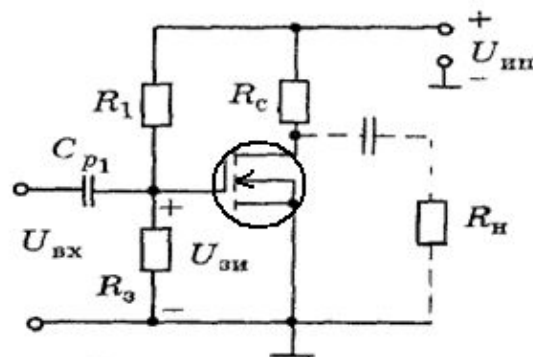


Канал *n*-типа Канал *p*-типа

**Упрощенная структурная
схема и условное обозначение
МДП-транзистора
с индуцированным каналом**



**Структурная схема
МДП-транзистора при $U_{зи}$,
превышающем пороговое
напряжение**



**Схема включения
с ОИ МДП-транзистора
с индуцированным каналом *n*-типа**

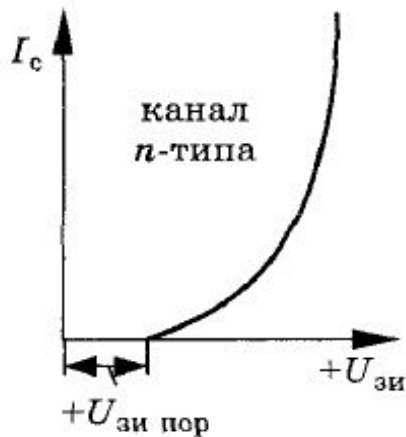
Принцип действия

При подаче на затвор положительного относительно истока напряжения электрическое поле затвора через диэлектрик проникает на некоторую глубину в приконтактный слой полупроводника, выталкивая из него в глубь полупроводника основные носители заряда (дырки) и притягивая электроны к поверхности. При малых напряжениях $U_{зи}$ у поверхности полупроводника под затвором возникает обедненный основными носителями заряда слой и область объемного заряда, состоящего из ионизированных примесных атомов. При увеличении положительного напряжения на затворе в приконтактном поверхностном слое полупроводника происходит смена (инверсия) электропроводности.

Образуется тонкий инверсный слой (канал), соединяющий сток с истоком. Напряжение на затворе, при котором индуцируется канал, называется пороговым напряжением. При его изменении изменяются толщина и электропроводность канала, а соответственно изменяется и ток стока. С удалением от поверхности полупроводника концентрация электронов уменьшается, а на глубине, равной толщине канала, электропроводность становится собственной. Затем идет участок, обедненный основными носителями заряда (*p-n* переход). Он изолирует сток, исток и канал от подложки.

Режим работы полевого транзистора, при котором канал обогащается носителями при увеличении абсолютного значения напряжения на затворе, называется режимом обогащения, а транзисторы с индуцированным каналом называются транзисторами обогащенного типа.

Статические ВАХ МОП-транзистора с индуцированным каналом



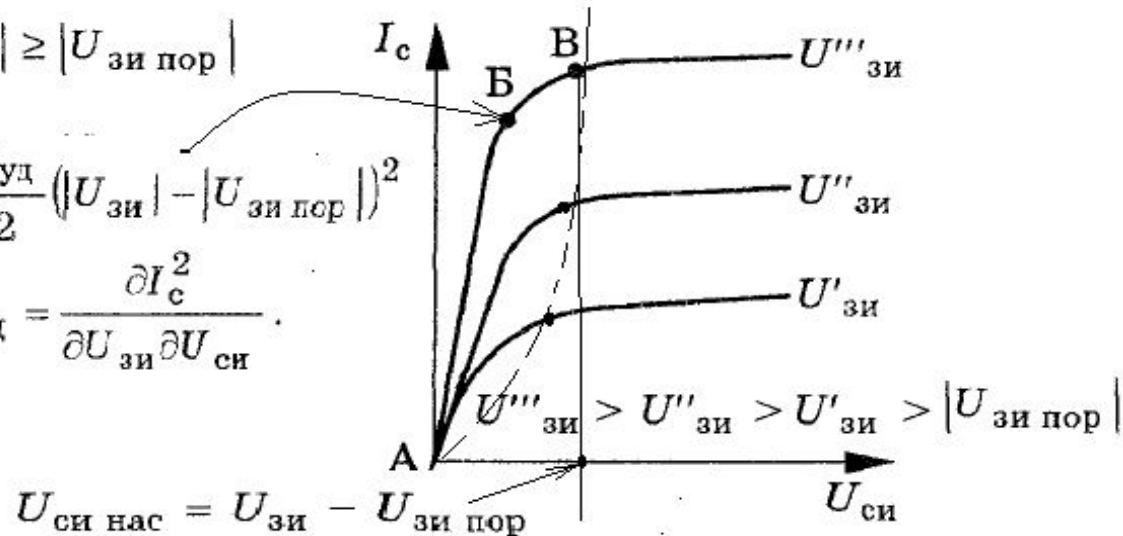
Статическая характеристика передачи (сток-затворная) МДП-транзистора с индуцированным каналом n-типа

$$|U_{зи}| \geq |U_{зи\ пор}|$$

$$I_{c\ наc} = \frac{S_{уд}}{2} (|U_{зи}| - |U_{зи\ пор}|)^2$$

где

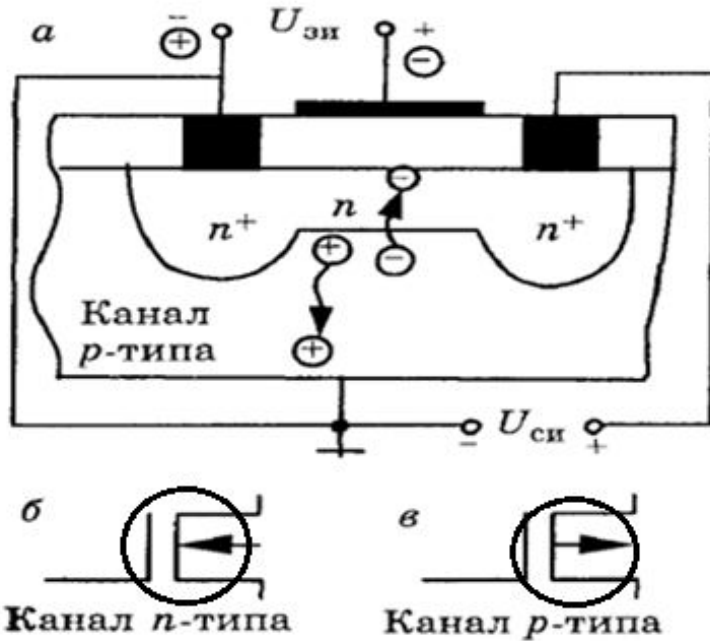
$$S_{уд} = \frac{\partial I_c^2}{\partial U_{зи} \partial U_{си}}$$



Семейство статических выходных (стоковых) характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом

Из-за заметного сужения стокового участка канала характеристика отклоняется от прямой на участке БВ. При напряжении $U_{си\ наc} = U_{зи} - U_{зи\ пор}$ напряжение на затворе относительно стокового участка канала становится равным пороговому значению, что приводит к уменьшению ширины канала возле стока, повышению его сопротивления и ограничению тока стока $I_c = I_{c\ наc}$. В транзисторе наступает режим насыщения и при дальнейшем увеличении напряжения $U_{си}$ ток стока меняется незначительно.

МОП -транзисторы с легированным (встроенным) каналом



Упрощенная
структурная схема и условные
обозначения МДП-транзистора
со встроенным каналом

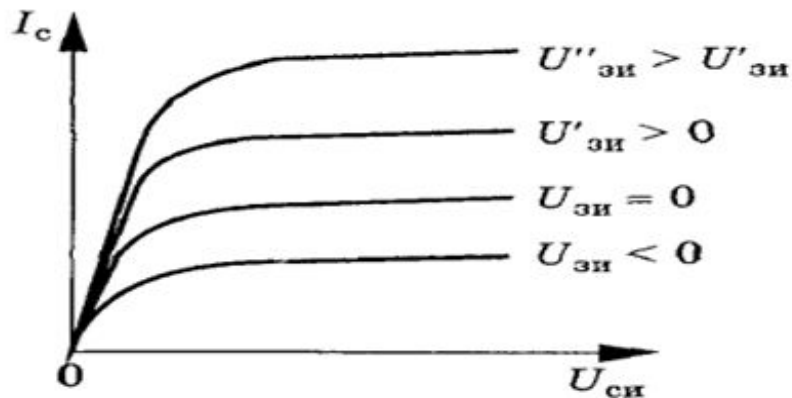
приводит к уменьшению тока стока. При некотором отрицательном напряжении на затворе, называемом напряжением отсечки $U_{зи\text{отс}}$, происходит инверсия типа электропроводности канала. Области истока и стока оказываются разделенными областью p -полупроводника.

На стадии изготовления транзисторов между областями стока и истока создается тонкий слаболегированный слой (канал) с таким же типом электропроводности, что и указанные области (рис. а), их условное обозначение на рис. б, в.

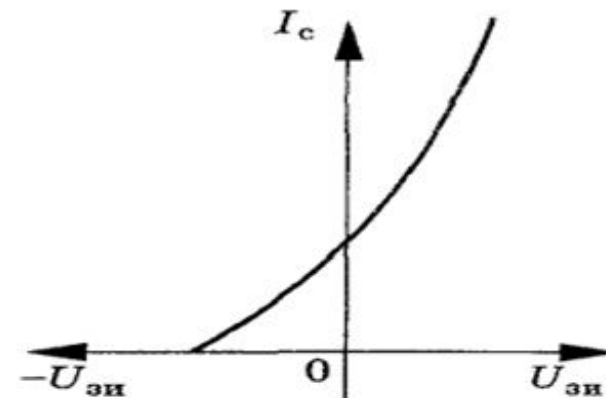
При нулевом напряжении на затворе и наличии внешнего напряжения между стоком и истоком протекает ток стока. Отрицательное напряжение, приложенное к затвору относительно истока и подложки, будет выталкивать электроны из канала, а в канал втягивать дырки из подложки; канал обедняется носителями. Толщина канала и его электропроводность уменьшается, что

Статические ВАХ МОП-транзистора с легированным каналом

Отличие стоковых (выходных) характеристик МДП-транзистора со встроенным каналом от аналогичных характеристик транзисторов обогащенного типа заключается в том, что ток стока I_c существует как при положительном, так и при отрицательном напряжении на затворе и описывается аналитическими зависимостями, как и транзисторы с управляющим $p-n$ переходом.



Семейство статических выходных (стоковых) характеристик МДП-транзистора со встроенным каналом



Статическая характеристика передачи (сток-затворная) МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа

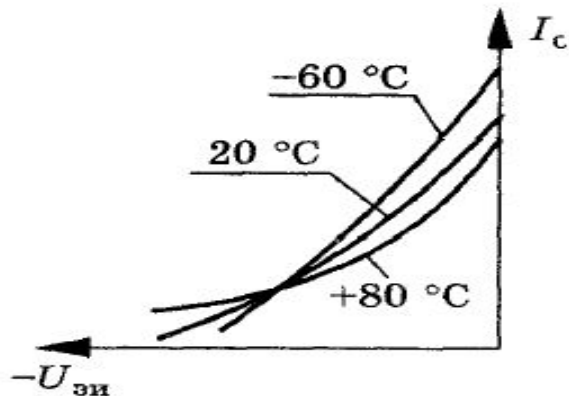
Сток-затворная характеристика МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа показана на рис. При напряжении $U_{зи} = 0$ в цепи стока протекает ток $I_{c\text{нас}}$. При подаче отрицательного напряжения на затвор канал сужается, обедняясь носителями, и уменьшается ток стока. При $U_{зи\text{отс}}$ канал исчезает, происходит инверсия его электропроводности. С увеличением положительного напряжения на затворе канал расширяется, обогащается носителями.

Термостабильная точка полевых транзисторов

При изменении температуры происходит изменение параметров и статических характеристик транзисторов. У полевых транзисторов с управляющим $p-n$ переходом изменение температуры приводит к изменению контактной разности потенциалов, обратного тока через переход и подвижности носителей.

С увеличением температуры на $1\text{ }^\circ\text{C}$ уменьшается контактная разность потенциалов на 2 мВ , поэтому напряжение отсечки в зависимости от температуры равно:

$$|U_{\text{зи отс}}| = |U_{\text{зи отс}}(20\text{ }^\circ\text{C})| + 2 \cdot 10^{-3} (T_{\text{раб}} - 20\text{ }^\circ\text{C}). \quad (4.5)$$



Сток-затворные характеристики транзистора с управляющим $p-n$ переходом при различной температуре

Все это приводит к увеличению эффективного сечения канала и увеличению тока стока.

С ростом температуры подвижность носителей и удельная проводимость канала уменьшаются, что способствует уменьшению тока стока. При достижении определенного значения $U_{\text{зи}}$ происходит полная взаимная компенсация противоположно действующих факторов и ток стока в этом режиме оказывается практически не зависящим от температуры. Точка на сток-затворных характеристиках, в которой ток стока не зависит от температуры, называется термостабильной (см. рис.).

Полевой транзистор как линейный 4-х полюсник

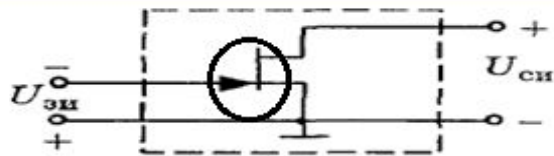


Схема полевого транзистора как линейного четырехполюсника

Полевой транзистор, работающий в режиме малого сигнала, так же как и биполярный транзистор, можно представить в виде линейного четырехполюсника. Наличие большого входного сопротивления у полевых транзисторов позволяет удобно их описывать с помощью Y -параметров. Для схемы с ОИ в качестве независимых переменных принимают $U_{зи}$ и $U_{си}$, а зависи-

мые величины — I_z , I_c ; тогда транзистор описывается следующей системой уравнений:

$$I_z = f(U_{зи}, U_{си}); \quad I_c = f(U_{зи}, U_{си}).$$

А в системе Y -параметров

$$dI_z = \frac{\partial I_z}{\partial U_{зи}} dU_{зи} + \frac{\partial I_z}{\partial U_{си}} dU_{си}; \quad dI_c = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} dU_{зи} + \frac{\partial I_c}{\partial U_{си}} dU_{си}.$$

Отсюда Y -параметры в режиме КЗ по переменному току на входе и выходе определяются выражениями

$$Y_{11} = \left. \frac{\Delta I_z}{\Delta U_{зи}} \right|_{dU_{си}=0} \quad \text{— входная проводимость;}$$

$$Y_{12} = \left. \frac{\Delta I_z}{\Delta U_{си}} \right|_{dU_{си}=0} \quad \text{— проводимость обратной передачи, при}$$

$U_{си} > U_{си \text{ нас}}$ Y_{12} стремится к нулю;

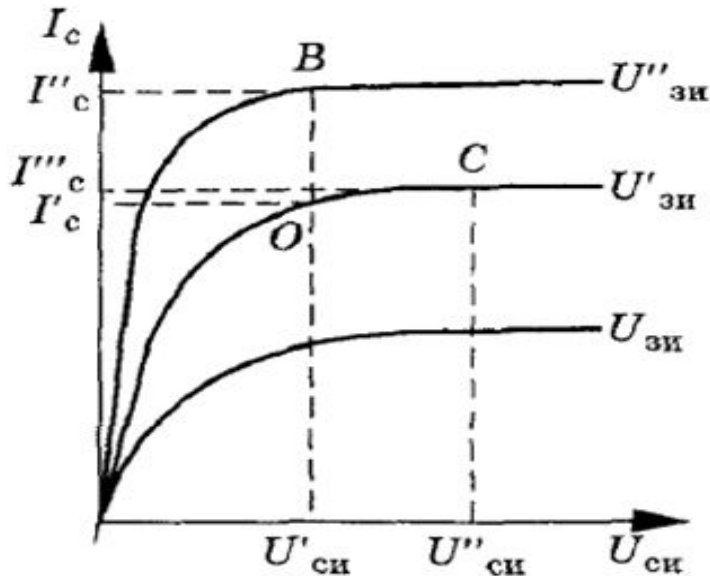
$$S = Y_{21} = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \right|_{dU_{си}=0} \quad \text{— проводимость прямой передачи}$$

(крутизна характеристики прямой передачи), определяет наклон данной характеристики в любой точке;

$$Y_{22} = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{си}} \right|_{dU_{зи}=0} \quad \text{— выходная проводимость, вместо кото-}$$

рой на практике часто используется обратная величина $R_i = 1/Y_{22}$, называемая внутренним (дифференциальным) сопротивлением транзистора.

Определение малосигнальных параметров ПТ по ВАХ



**Определение
статических параметров
по выходным характеристикам**

ную оси токов, до пересечения со следующей характеристикой в точке B , имеющей координаты I''_c , $U'_си$, $U''_зи$. Значение крутизны рассчитывается по формуле

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \frac{I''_c - I'_c}{U''_{зи} - U'_{зи}} \Big|_{U_{си} = \text{const}}$$

Параметры Y_{11} , Y_{21} , Y_{22} можно определить по статическим характеристикам. Крутизна передаточной характеристики S определяется на рабочем (пологом) участке стоковой характеристики и ее не трудно получить из выражений взяв первую производную от I_c по $U_{зи}$.

На практике для определения S используется графоаналитический метод. На выходных (стоковых) характеристиках через выбранную рабочую точку O , которой соответствуют значения I'_c , $U'_си$, $U'_зи$, проводят прямую, параллельную

Определение малосигнальных параметров ПТ по ВАХ

Дифференциальное сопротивление R_1 более полно отражает зависимость тока стока I_c от напряжения $U_{си}$ на пологом участке стоковой характеристики. Оно определяется в рабочей точке O по приращению тока стока, соответствующему приращению напряжения $U_{си}$:

$$R_1 = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} = \frac{U''_{си} - U'_{си}}{I'''_c - I'_c} \Big|_{U_{зи} = \text{const}} \quad (4.9)$$

Возрастание тока стока при увеличении $U_{си}$ в пологой части характеристики обусловлено эффектом модуляции длины канала. С увеличением $U_{си}$ стоковый p - n переход смещается в обратном направлении, что приводит к расширению перехода и уменьшению длины канала. А уменьшение длины канала приводит к уменьшению его сопротивления и возрастанию тока стока. Управляющее действие подложки учитывается коэффициентом влияния подложки, показывающим, на сколько необходимо изменить напряжение на затворе, чтобы ток стока I_c остался неизменным при изменении напряжения подложки $U_{пи}$:

$$\eta = - \frac{\partial U_{зи}}{\partial U_{пи}} \Big|_{I_c = \text{const}} = - \frac{\partial U_{зи}}{\partial I_c} \frac{\partial I_c}{\partial U_{пи}} = - \frac{S_{п}}{S}, \quad (4.10)$$

где $S_{п} = \partial I_c / \partial U_{пи} \Big|_{I_c = \text{const}}$ — крутизна характеристики по подложке.

Определение малосигнальных параметров ПТ по ВАХ

Для оценки потенциальных возможностей полевого транзистора как усилительного элемента вводят параметр, называемый статическим коэффициентом усиления по напряжению:

$$\mu = \left. \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \right|_{I_c = \text{const}},$$

который показывает, во сколько раз эффективнее изменение напряжения на затворе воздействует на ток стока, чем изменение напряжения на стоке.

Так как в диапазоне допустимых рабочих напряжений $U_{си}$ статические выходные характеристики не пересекаются и не выполняется условие $I_c = \text{const}$, то μ рассчитывается по найденным значениям R_i и S :

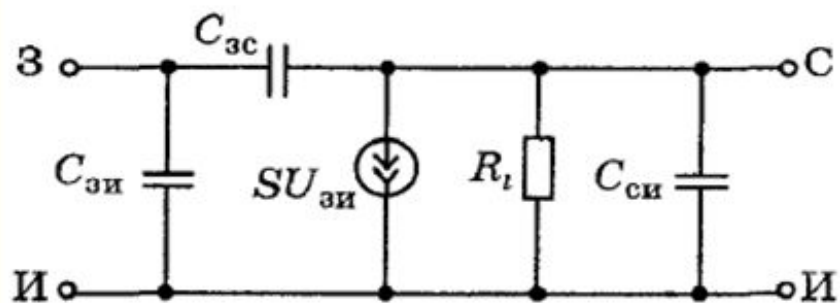
$$\mu = S \cdot R_i.$$

Поскольку характеристики полевых транзисторов нелинейны, значения дифференциальных параметров зависят от выбранного режима по постоянному току.

Входное сопротивление полевых транзисторов с управляющим p - n переходом определяется величиной обратного тока перехода, а у МДП-транзисторов — током утечки изолирующей пленки диэлектрика.

Эквивалентная схема ПТ по переменному току

При анализе электронных схем на полевых транзисторах удобно их представить в виде схемы замещения с сосредоточенными параметрами. Исходя из принципа действия транзистора, ясно, что электропроводность канала и напряжение на его участках зависят от продольной координаты в пространстве исток — сток. Поэтому полевой транзистор является устройством с распределенными параметрами. Однако для упрощения анализа его с некоторыми допущениями представляют в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами. На рис. представлена упрощенная физическая малосигнальная эквивалентная схема транзистора, включенного по



Упрощенная эквивалентная схема полевого транзистора

схеме с общим истоком, а подложка соединена с истоком.

В этой схеме резистор R_i характеризует внутреннее дифференциальное сопротивление транзистора, а конденсаторы характеризуют следующие емкости: $C_{зи}$ — емкость между затвором и истоком; $C_{зс}$ — емкость между затвором и стоком; $C_{си}$ — емкость между стоком и истоком (подложкой). Генератор тока $SU_{зи}$ отражает усилительные свойства транзистора. Ток этого генератора пропорционален входному напряжению $U_{зи}$.

Частотные свойства ПТ

Инерционные свойства полевых транзисторов зависят от скорости движения носителей заряда в канале и межэлектродных емкостей. В связи с этим, крутизна характеристики прямой передачи с ростом частоты f уменьшается по закону

$$|S| = S_0 / \sqrt{1 + (f/f_s)^2}.$$

Частоту f_s , на которой крутизна характеристики прямой передачи уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со своим значением S_0 на низкой частоте, называют предельной частотой крутизны.

С ростом частоты модуль крутизны уменьшается, что приводит к снижению коэффициента усиления. Частота, на которой модуль коэффициента усиления по напряжению равен единице, называют граничной частотой, и она определяется по формуле

$$f_{гр} = \frac{S}{2\pi C_{вых}},$$

где $C_{вых} = C_{си} + C_n$; C_n — входная емкость следующей схемы (нагрузки) и емкость соединительных проводников.

Частота, где коэффициент усиления по мощности равен единице, называют максимальной частотой $f_{макс}$.

Основные параметры ПТ

К этим параметрам относятся следующие показатели.

1. Входное сопротивление $R_{зи} = dU_{зи}/dI_з$; его величина лежит в пределах сотни кОм — единицы МОм.

2. Внутреннее сопротивление $R_i = dU_{си}/dI_c$ — представляет собой выходное дифференциальное сопротивление транзистора.

Наибольшее значение R_i достигается в пологой области характеристики и составляет десятки-сотни кОм. При использовании транзистора в цифровых схемах требуется обеспечить возможно меньшее R_i , что достигается увеличением крутизны.

3. Крутизна характеристики $S = dI_c/dU_{зи}$ определяет наклон (крутизну) сток-затворной характеристики в заданной рабочей точке и показывает скорость нарастания тока стока, т.е. насколько изменится ток стока при изменении $U_{зи}$ на 1 В. Для повышения крутизны необходимо уменьшать толщину подзатворного слоя диэлектрика и длину канала, увеличивать подвижность носителей в канале и его ширину. Так как $\mu_n > \mu_p$, то крутизна n -канальных транзисторов выше, чем p -канальных при одинаковых геометрических размерах и напряжениях на электродах.

4. Коэффициент усиления по напряжению $\mu = \left. \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} \right|_{I_c = \text{const}} = SR_i$ — определяет потенциальные возможности полевого транзистора как усилительного элемента и достигает значений в несколько сотен раз.

Основные параметры ПТ

5. Крутизна характеристики по подложке S_{Π}

$$= \frac{dI_c}{dU_{\Pi}} \left| \begin{array}{l} U_{\text{си}} = \text{const} \\ U_{\text{зи}} = \text{const} \end{array} \right. \quad \text{— показывает, на сколько следует изменить}$$

напряжение на затворе, чтобы при изменении напряжения на подложке U_{Π} ток стока I_c остался неизменным ($S_{\Pi} = 0,1 \dots 1$ мА/В).

6. Напряжение отсечки $U_{\text{зи отс}}$ — напряжение, при котором происходит перекрытие канала; его значение составляет $0,2 \dots 10$ В.

7. Пороговое напряжение $U_{\text{зи пор}}$ — напряжение, при котором происходит инверсия приповерхностного слоя и образование канала, его величина лежит в пределах $1 \dots 6$ В.

8. Начальный ток стока $I_{c \text{ нас}}$ — ток стока при нулевом напряжении $U_{\text{зи}}$ и при $U_{\text{си}}$, равном или превышающем напряжение насыщения.

9. Напряжение насыщения $U_{\text{си нас}}$ — напряжение на стоке, при котором происходит перекрытие канала.

10. Обратные токи истокового $I_{\text{ио}}$ и стокового $I_{\text{со}}$ переходов — токи, протекающие при перекрытии канала, т.е. при напряжении на затворе, равном $U_{\text{зи отс}}$.

11. Максимальная частота усиления $f_{\text{макс}}$ — частота, на которой коэффициент усиления по мощности равен единице; составляет десятки-сотни МГц.