

Доклад на тему

# Полевые транзисторы

Журкин Д.В.  
Спирин О.В.  
гр. 21301

# Устройство МДП транзисторов

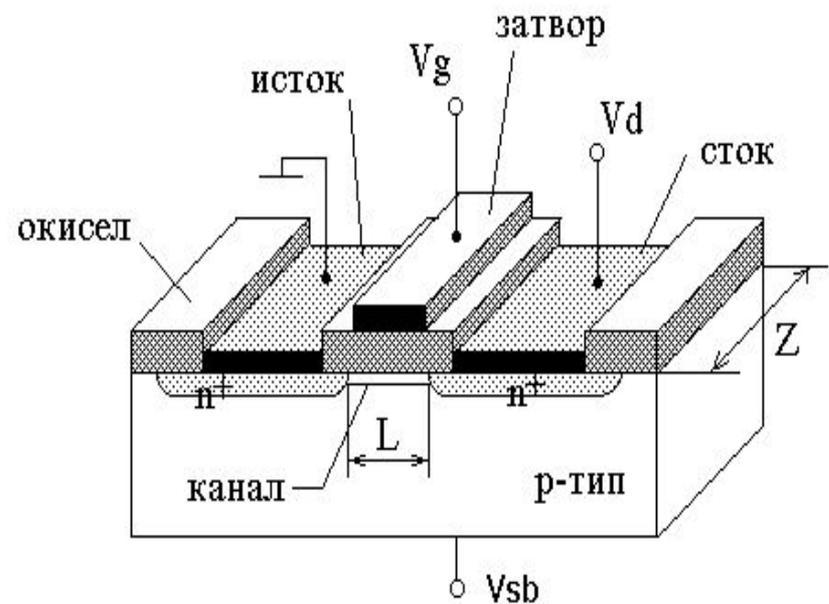
Термин «МДП-транзистор» используется для обозначения полевых транзисторов, в которых управляющий электрод (затвор) отделен от активной области

диэлектрической прослойкой (изолятором).

Основным элементом для этих транзисторов является структура металл-диэлектрик-полупроводник.

МДП-транзистор изготавливается на монокристаллическом п/п (подложке).

Две сильнолегированные области противоположного с подложкой типа проводимости: исток и сток. Область, находящаяся под затвором между истоком и стоком: канал. Диэлектрический слой, расположенный между затвором и каналом: подзатворный диэлектрик.



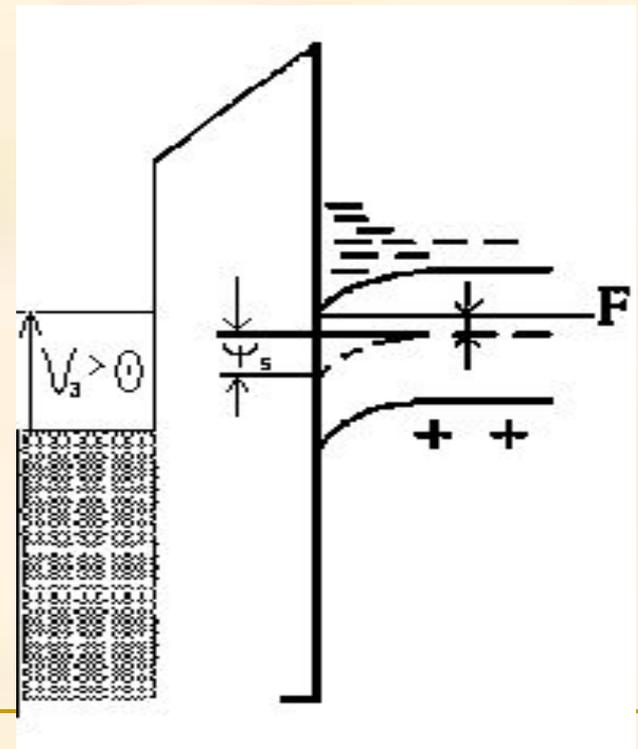
# МДП-транзистор

В полевых транзисторах для реализации транзисторного эффекта применяется только один тип носителей. По этой причине полевые транзисторы называются униполярными.

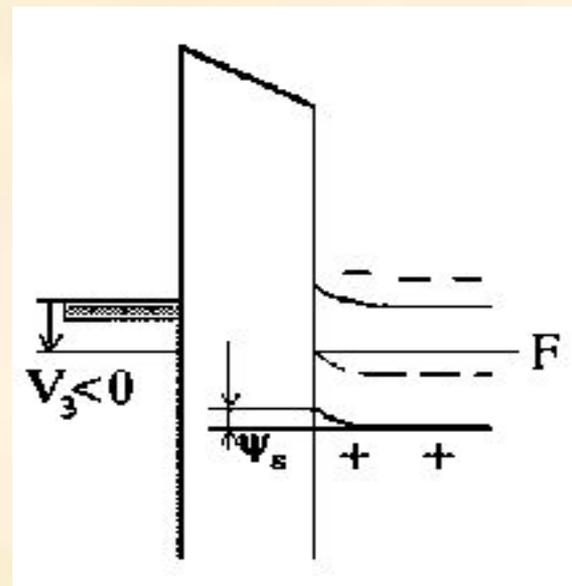
Физической основой работы МДП транзистора является эффект поля. В структурах МДП внешнее поле обусловлено приложенным напряжением на металлический электрод (затвор) относительно полупроводниковой подложки.

В зависимости от знака и величины приложенного напряжения различают три состояния приповерхностной области полупроводника: обогащение, обеднение и инверсия.

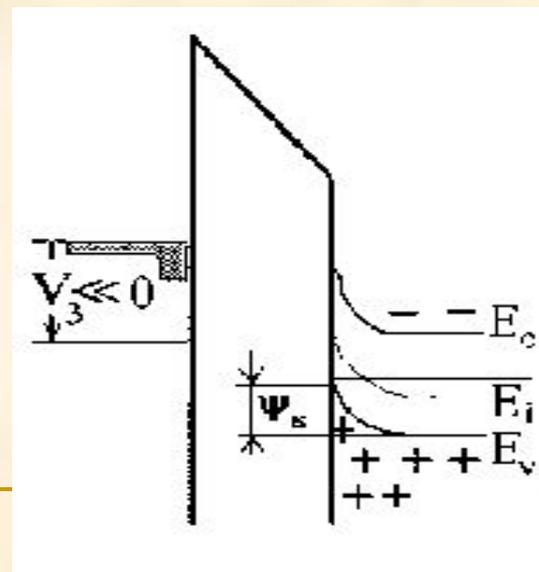
- Обогащение: Этому состоянию соответствует знак напряжения на металлическом электроде (затворе), притягивающий основные носители (для n-типа,  $V_G > 0$ ,  $\psi_s > 0$ ).



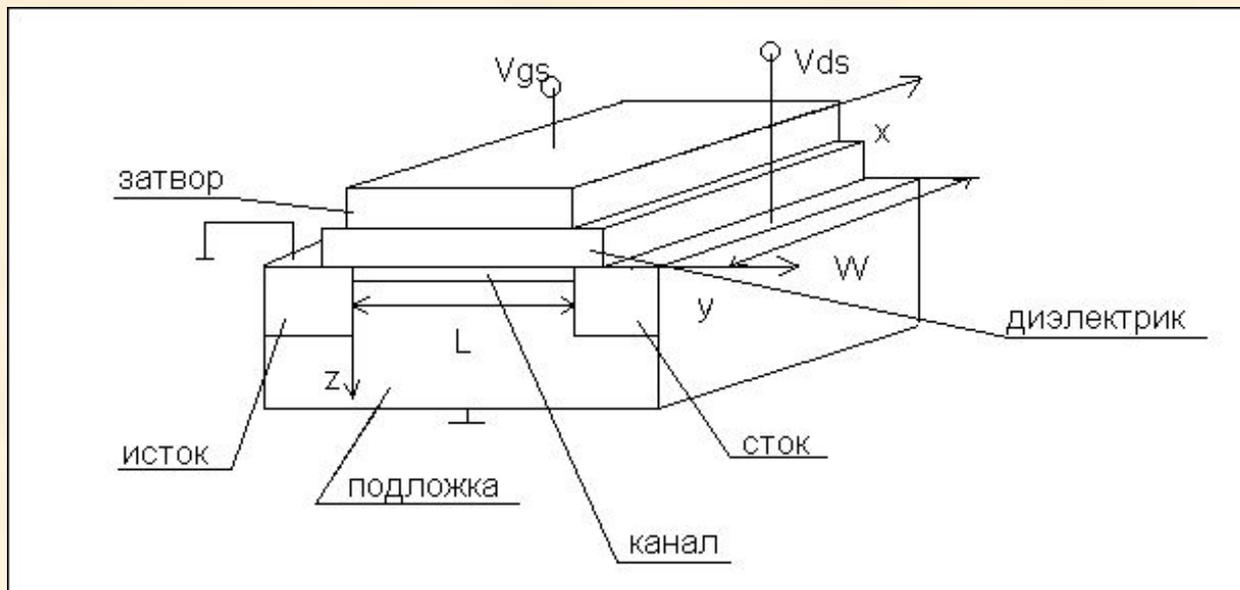
- Обеднение: Этому состоянию соответствует небольшое по величине напряжение, отталкивающее основные носители (для n-типа,  $V_G < 0$ ,  $\psi_s < 0$ ).



- Инверсия: Такому состоянию соответствует большое по величине напряжение на затворе, соответствующее значительным изгибам зон и вызывающее обогащение поверхности неосновными носителями заряда (для n-типа,  $V_G \ll 0$ ,  $\psi_s < 0$ ).



# Характеристики МОП ПТ в области плавного канала



Рассмотрим п/п представленный на рисунке со следующими условиями:

1. Токи через  $p-n$  переходы истока, стока и подзатворного диэлектрика равны нулю.
2. Подвижность электронов  $\mu_n$  постоянна по глубине и длине  $L$  инверсионного канала и не зависит от напряжения на затворе  $V_{GS}$  и на стоке  $V_{DS}$ .
3. Канал плавный, то есть в области канала нормальная составляющая электрического поля  $E_z$  существенно больше тангенциальной  $E_y$ .

Ток в канале МДП-транзистора, изготовленного на подложке  $p$ -типа, обусловлен свободными электронами, концентрация которых  $n(z)$ . Электрическое поле  $E_y$  обусловлено напряжением между истоком и стоком  $V_{DS}$ . Согласно закону Ома, плотность тока:

$$j(x, y, z) = q\mu_n n(z) \frac{dV}{dy}$$

где  $V$  – падение напряжения от истока до точки канала с координатами  $(x, y, z)$ .

Полный ток канала  $I_D$  будет равен:

$$I_{DS} = W\mu_n Q_n \frac{dV}{dy}$$

Уравнение электронейтральности для зарядов в МДП-транзисторе на единицу площади:

$$Q_m = Q_{ox} + Q_n + Q_B$$

Полный заряд на металлической обкладке МДП-конденсатора  $Q_m$  равен:

$$Q_m = C_{ox} \cdot V_{ox}$$

где  $V_{ox}$  – падение напряжения на окисном слое,  $C_{ox}$  – удельная емкость подзатворного диэлектрика.

Описание порогового напряжения  $V_T$  как напряжения на затворе  $V_{GS}$ , соответствующего открытию канала в равновесных условиях:

$$V_T \equiv V_{GS} (\psi_s = 2\phi_0, V_{DS} = 0)$$

Уравнение, описывающее вольт-амперную характеристику полевого транзистора в области плавного канала:

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

# Характеристики МОП ПТ в области отсечки

По мере роста напряжения исток-сток  $V_{DS}$  в канале может наступить такой момент, когда произойдет смыкание канала, т.е. заряд электронов в канале в некоторой точке станет равным нулю. Это соответствует условию:

$$V(y) = V_{GS} - V_T \equiv V_{DS}^*$$

Поскольку максимальная величина напряжения  $V(y)$  реализуется на стоке, то смыкание канала или отсечка произойдет у стока. Напряжение стока  $V_{DS}$ , необходимое для смыкания канала, называется напряжением отсечки  $V_{DS}^*$ . С ростом напряжения стока  $V_{DS}$  точка канала, соответствующая условию отсечки, сдвигается от стока к истоку.

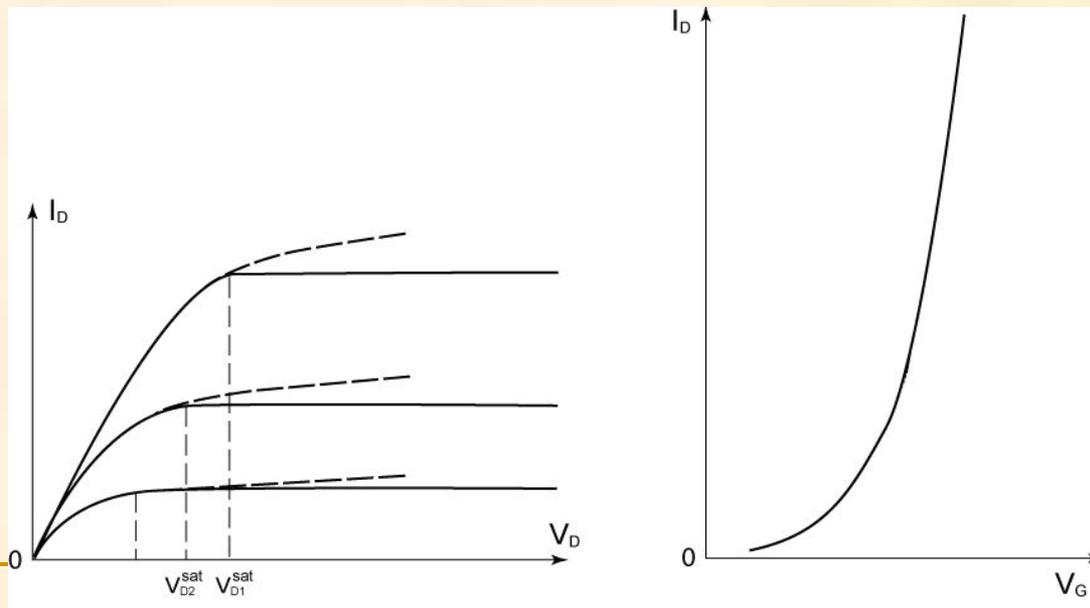
В первом приближении при этом на участке плавного канала от истока до точки отсечки падает одинаковое напряжение, не зависящее от напряжения исток-сток.

$$V_{DS}^* = V_{GS} - V_T$$

Выражение для тока стока:

$$I_{DS} = \frac{W}{2L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_T)^2$$

Соотношение представляет собой запись вольт-амперной характеристики МДП-транзистора в области отсечки. Зависимости тока стока  $I_{DS}$  от напряжения на затворе  $V_{GS}$  называются обычно переходными характеристиками, а зависимости тока стока  $I_{DS}$  от напряжения на стоке  $V_{DS}$  – проходными характеристиками транзистора.



При значительных величинах напряжения исток-сток и относительно коротких каналах ( $L = 10 \div 20$  мкм) в области отсечки наблюдается эффект модуляции длины канала. При этом точка отсечки смещается к истоку и напряжение отсечки  $V_{DS}^*$  падает на меньшую длину канала. Это вызовет увеличение тока  $I_{DS}$  канала.

ВАХ МДП-транзистора с учетом модуляции длины канала имеет следующий вид:

$$I_{DS} = \frac{W}{2L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_T)^2 \frac{1}{1 - \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 (V_{DS} + V_T - V_{GS})}{qN_A}}}$$

# Эффект смещения подложки

Приложенное напряжение между истоком и подложкой  $V_{SS}$  при условии наличия инверсионного канала падает на обедненную область индуцированного  $p-n$  перехода.

В этом случае при прямом его смещении будут наблюдаться значительные токи, соответствующие прямым токам  $p-n$  перехода. Эти токи попадут в стоковую цепь и транзистор работать не будет. Поэтому используется только напряжение подложки,  $V_{SS}$  соответствующее обратному смещению индуцированного и истокового  $p-n$  перехода. По полярности это будет напряжение подложки противоположного знака по сравнению с напряжением стока. При приложении напряжения канал-подложка происходит расширение ОПЗ и увеличение заряда ионизованных акцепторов:

$$Q_B = \sqrt{2q\epsilon_s\epsilon_0 N_A (\psi_{s0} + V_{SS})}$$

Поскольку напряжение на затворе  $V_{GS}$  постоянно, то постоянен и заряд на затворе МДП-транзистора  $Q_m$ . Следовательно, из уравнения электронейтральности вытекает, что если заряд акцепторов в слое обеднения  $Q_B$  вырос, заряд электронов в канале  $Q_n$  должен уменьшиться.

$$Q_m = Q_{ox} + Q_n + Q_B$$

С этой точки зрения подложка выступает как второй затвор МДП-транзистора, поскольку регулирует также сопротивление инверсионного канала между истоком и стоком.

При возрастании заряда акцепторов в слое обеднения возрастет и пороговое напряжение транзистора  $V_T$ . Изменение порогового напряжения будет равно:

$$\Delta V_T = \frac{\Delta Q_B}{C_{ox}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 N_A}{C_{ox}^2}} \left[ \sqrt{\psi_{s0} + V_{SS}} - \sqrt{\psi_{s0}} \right]$$

# Малосигнальные параметры МДП-транзистора

- Крутизна переходной характеристики  $S$ :

$$S = \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}}, \quad V_{DS} = const$$

Эта величина характеризуется изменением тока стока при единичном увеличении напряжения на затворе при постоянном напряжении на стоке.

- Внутреннее сопротивление  $R_i$ :

$$R_i = \frac{dV_{DS}}{dI_{DS}}, \quad V_{GS} = const$$

Оно характеризует изменение напряжения в выходной цепи, необходимое для единичного увеличения тока стока при неизменном напряжении на затворе.

- Коэффициент усиления  $\mu$ :

$$\mu = \frac{dV_{DS}}{dV_{GS}}, \quad I_{DS} = const$$

Этот коэффициент характеризуется изменением напряжения в выходной цепи при единичном изменении напряжения во входной и неизменном токе стока.

Очевидно, что в области плавного канала крутизна  $S$  и дифференциальное сопротивление  $R_i$  будут иметь значения:

$$S = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} V_{DS}; \quad R_i = \left[ \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_G - V_T - V_{DS}) \right]^{-1}$$

При этом коэффициент усиления  $\mu$ , равный их произведению, всегда меньше единицы:

$$\mu = S_i R_i = \frac{V_{DS}}{V_G - V_T - V_{DS}} < 1$$

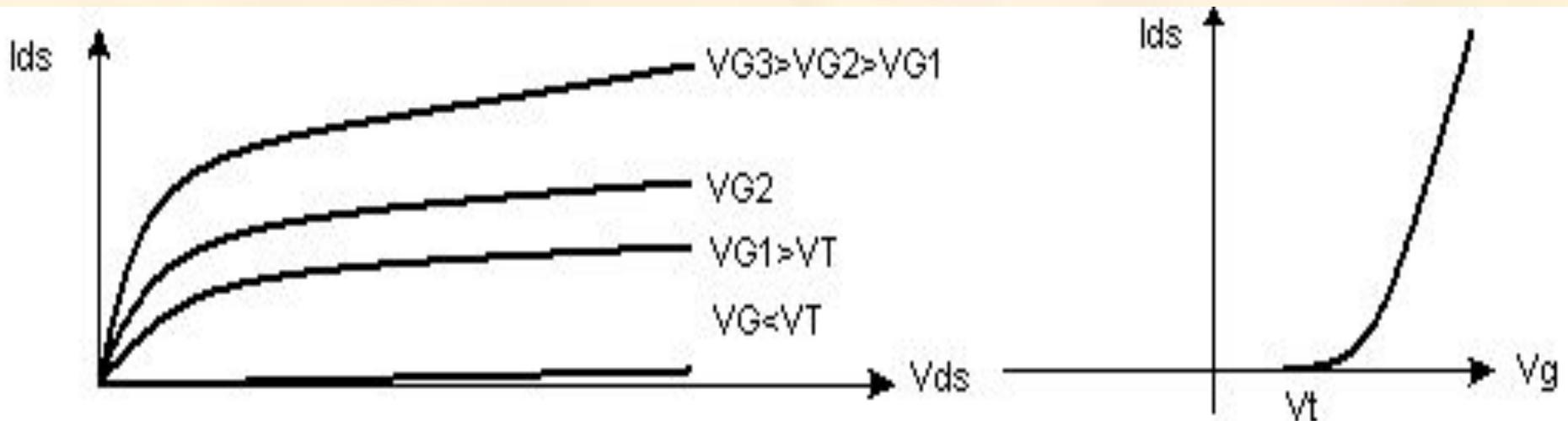
Таким образом полевой МОП-транзистор как усилитель не может быть использован в области плавного канала.

# Влияние типа канала на ВАХ-и МДП-транзисторов

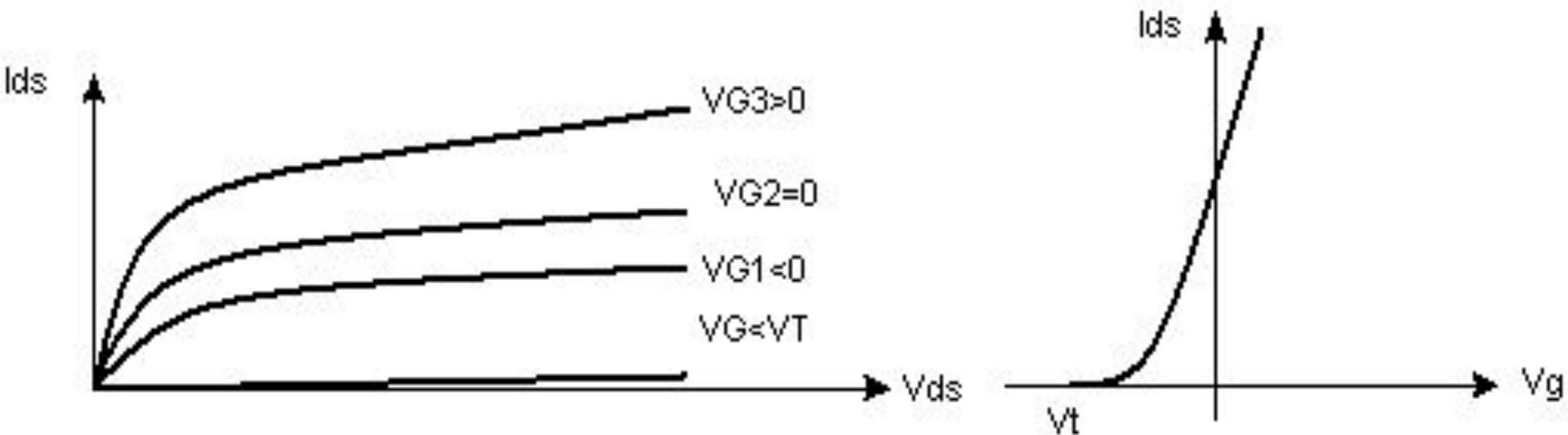
Вид ВАХ МДП-транзистора в значительной мере зависит от типа п/п-ой подложки и типа инверсионного канала. Канал, который отсутствует при нулевом напряжении на затворе  $V_G=0$ , а при увеличении  $V_G$  появляется - называется индуцированным. Канал, который при нулевом напряжении на затворе  $V_G=0$  уже сформировался - называется встроенным.

МДП-транзистор с индуцированным каналом при нулевом напряжении на затворе всегда закрыт. Если же канал встроенный, то при  $V_G=0$  такой транзистор всегда открыт.

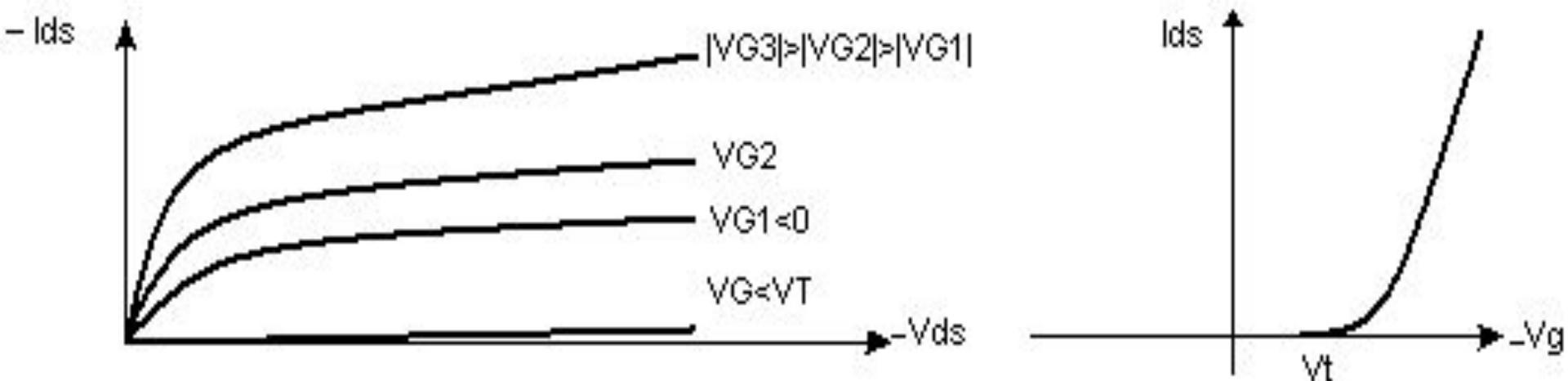
- ВАХ n-канального МДП-транзистора с индуцированным каналом:



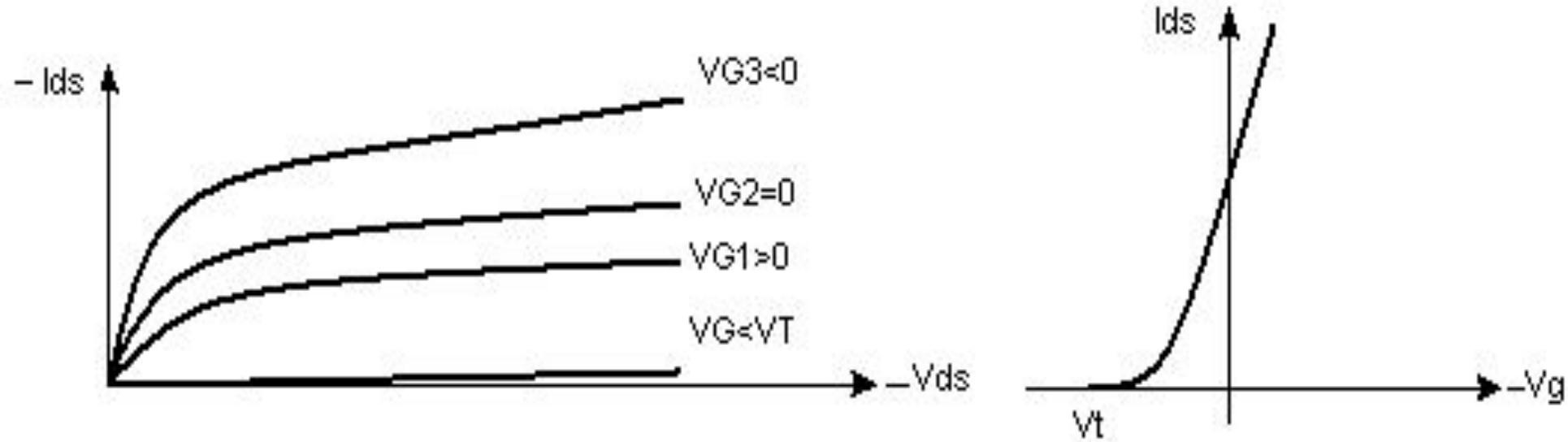
- ВАХ n-канального МДП-транзистора со встроенным каналом:



- ВАХ p-канального МДП-транзистора с индуцированным каналом:



- ВАХ р-канального МДП-транзистора со встроенным каналом:



# ВАХ МДП-транзистора в области сильной и слабой инверсии

Для области сильной инверсии, т.е. в приближении плавного канала, ВАХ МДП-транзистора выглядит следующим образом:

Ее вид совпадает с ВАХ для полевого транзистора в области плавного канала:

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

ВАХ МДП-транзистора для области слабой инверсии:

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_n C_B \frac{n}{m} \left( \frac{kT}{q} \right)^2 \exp\left( \frac{\beta (V_{GS} - V_T)}{n} \right) \cdot \left( 1 - \exp\left( \beta \frac{m}{n} V_{DS} \right) \right)$$

Множитель  $n$  – число, характеризующее отношение емкости поверхностных состояний

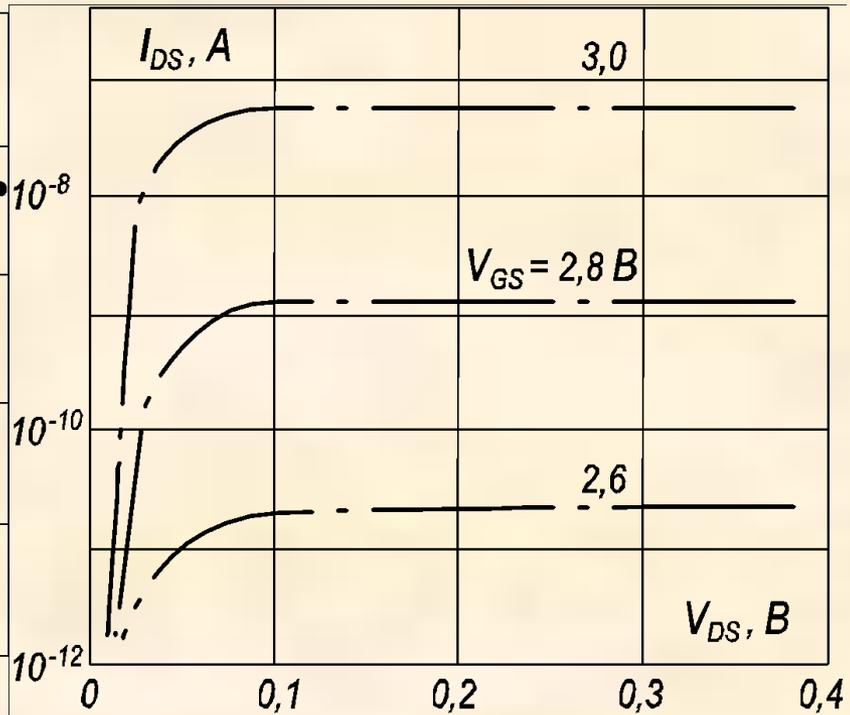
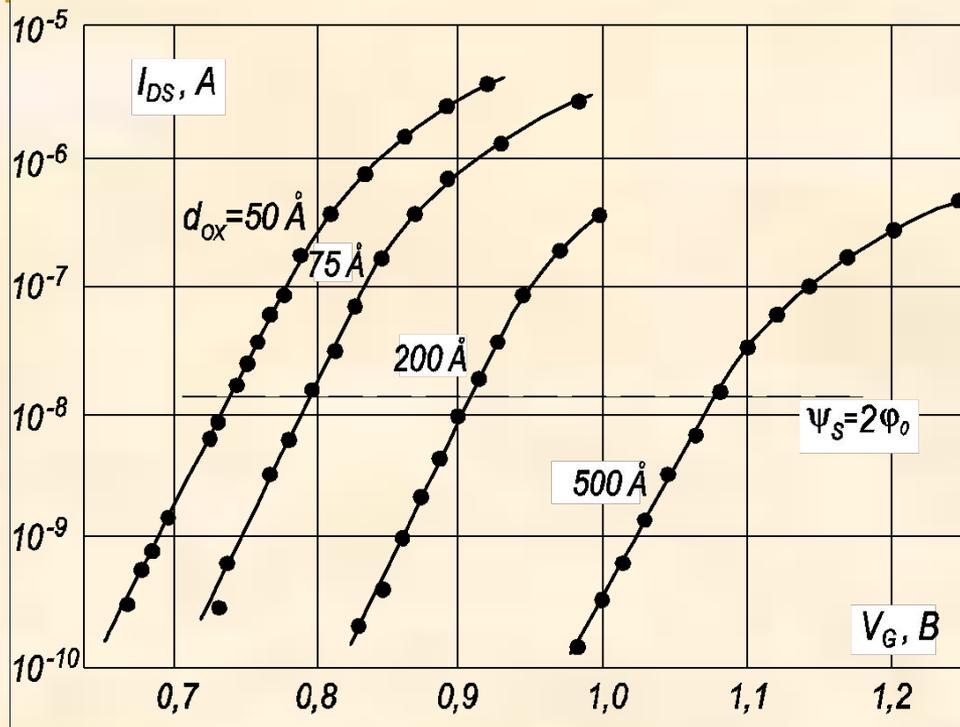
$C_{sx}$  и емкости обедненной области  $C_B$  к емкости подзатворного диэлектрика  $C_{ox}$ .

Значения  $n$  могут лежать для реальных МДП-структур в диапазоне 1÷5.

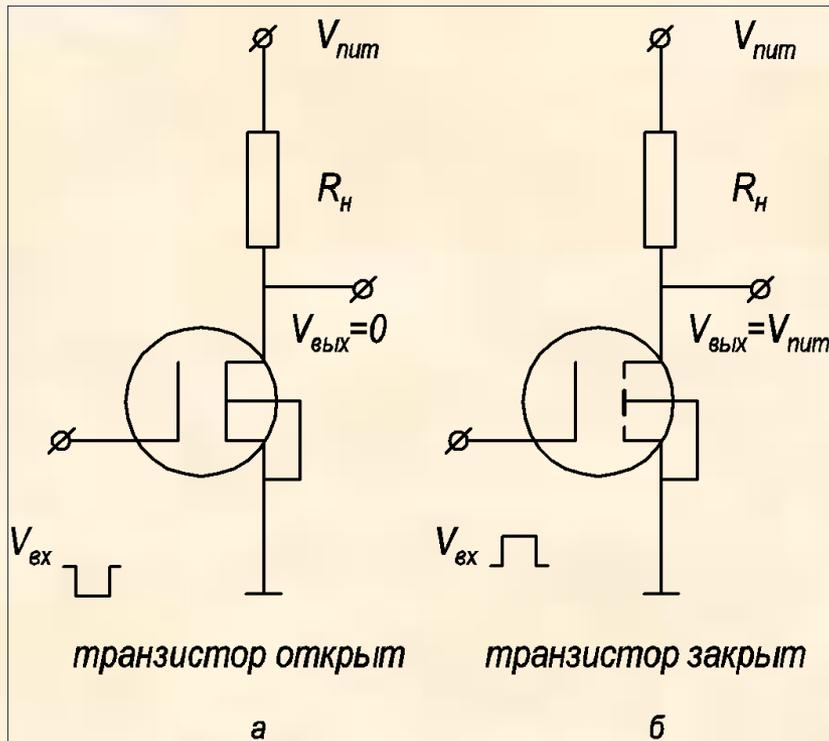
Величина  $m$  равна:

$$m = 1 + \frac{C_B^*}{C_{ox}}$$

$C_B^*$ —емкость обедненной области при пороговом значении поверхностного потенциала  $\psi_s, 2\phi_0$ .



# МДП-Транзистор как элемент памяти



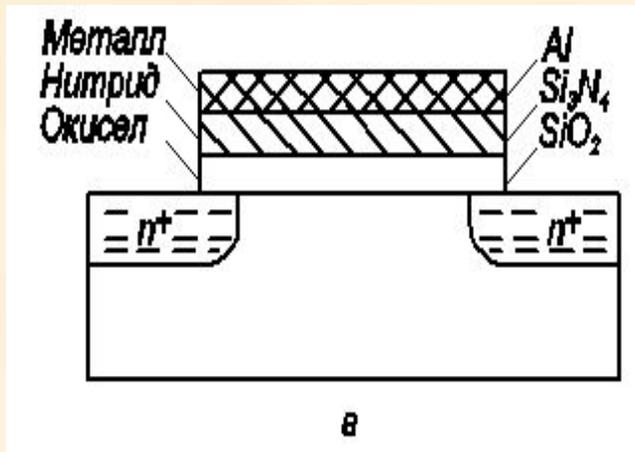
- Рассмотрим  $RC$ -цепочку, состоящую из последовательно соединенных нагрузочного сопротивления  $R_H \approx 1$  МОм и полевого транзистора с изолированным затвором, приведенную на рисунках а, б.
- Если в такой схеме МДП-транзистор открыт, сопротивление его канала составляет десятки или сотни Ом, все напряжение питания падает на нагрузочном сопротивлении  $R_H$  и выходное напряжение  $U_{вых}$  близко к нулю.
- Если МДП-транзистор при таком соединении закрыт, сопротивление между областями истока и стока велико (сопротивление  $p-n$  перехода при обратном включении), все напряжение питания падает на транзисторе и выходное напряжение  $U_{вых}$  близко к напряжению питания  $U_{пит}$ . Как видно из приведенного примера, на основе системы резистор – МДП-транзистор легко реализуется элементарная логическая ячейка с двумя значениями: ноль и единица.

**МДП-транзистор в качестве элемента запоминающего устройства а) открытое состояние; б) закрытое состояние**

## МДП-Транзистор как элемент энергозависимой памяти.

- Одним из недостатков приведенной элементарной ячейки информации является необходимость подведения на все время хранения информации напряжения к затворному электроду. При отключении напряжения питания записанная информация теряется. Этому недостатка можно было бы избежать, если в качестве МДП-транзистора использовать такой транзистор, у которого регулируемым образом можно было бы менять пороговое напряжение  $V_T$ .

# Конструкция МНОП-транзистор

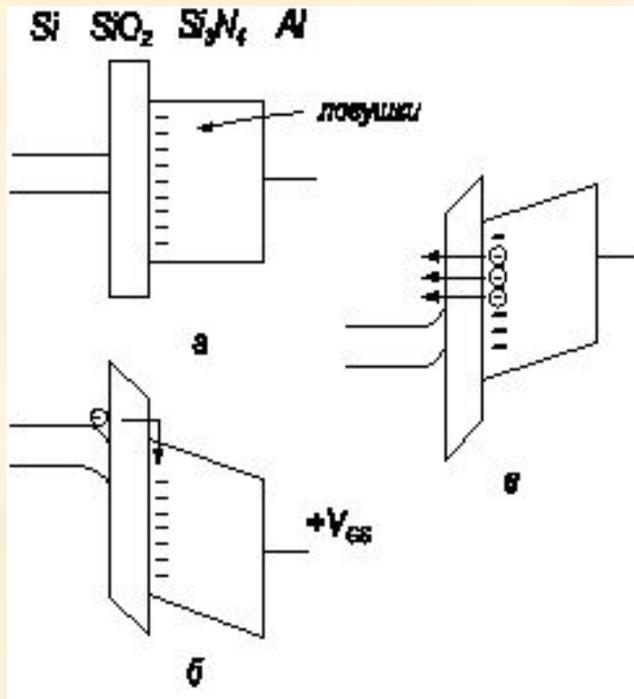


- На рисунке приведена схема, показывающая основные конструктивные элементы МНОП-транзистора.

- В МНОП ПТ в качестве подзатворного диэлектрика используется двухслойное покрытие. В качестве первого диэлектрика используется туннельно прозрачный слой ( $d_{ox} < 50 \text{ \AA}$ ) двуокиси кремния. В качестве второго диэлектрика используется толстый ( $d \approx 1000 \text{ \AA}$ ) слой нитрида кремния. Нитрид кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> имеет глубокие ловушки в запрещенной зоне и значение диэлектрической постоянной в два раза более высокое, чем диэлектрическая постоянная двуокиси кремния SiO<sub>2</sub>. Ширина запрещенной зоны нитрида Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> меньше, чем ширина запрещенной зоны окисла SiO<sub>2</sub>.

# Зонные диаграммы МНОП-транзистора

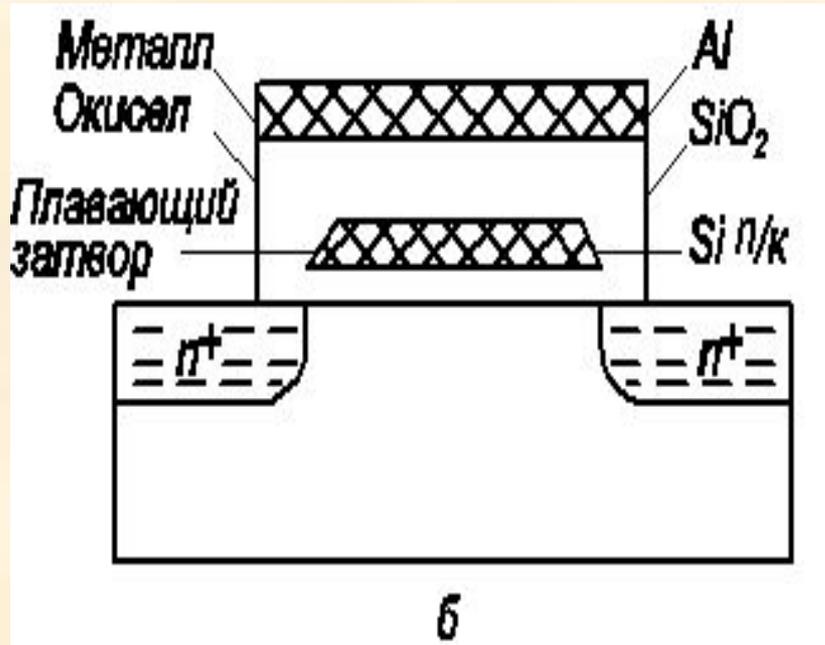
## в различных режимах работы



а) напряжение на затворе равно нулю, ловушки не заполнены б;) запись информационного заряда; в) стирание информационного заряда

- На рисунке а приведена зонная диаграмма МНОП-транзистора. Рассмотрим основные физические процессы, протекающие в МНОП-транзисторе при работе в режиме запоминающего устройства. При подаче импульса положительного напряжения  $+V_{GS}$  на затвор вследствие разницы в величинах диэлектрических постоянных окисла и нитрида в окисле возникает сильное электрическое поле. Это поле вызывает, как показано на рисунке б, туннельную инжекцию электронов из полупроводника через окисел в нитрид. Инжектированные электроны захватываются на глубине уровня ловушек в запрещенной зоне нитрида кремния, обуславливая отрицательный по знаку встроенный в диэлектрик заряд. После снятия напряжения с затвора инжектированный заряд длительное время хранится на ловушечных центрах, что соответствует существованию встроенного инверсионного канала. При подаче импульса отрицательного напряжения  $-V_{GS}$  на затвор происходит туннелирование электронов с ловушек в нитриде кремния в зону проводимости полупроводника, как показано на рисунке в. При снятии напряжения с затвора зонная диаграмма МНОП-структуры снова имеет вид, как на рисунке а, и инверсионный канал исчезает.

## МОП-Транзистор с плавающим затвором

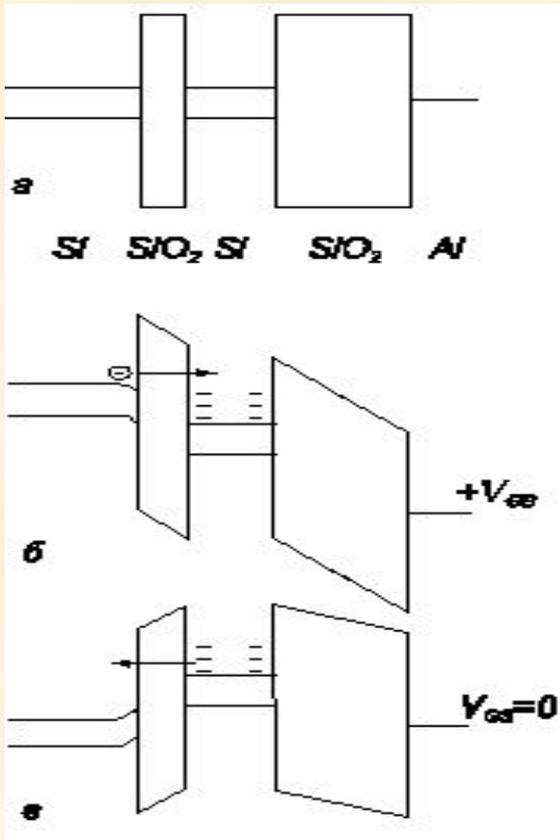


Полевой транзистор с плавающим затвором по принципу работы и устройству похож на МНОП-транзистор. Только в транзисторах с плавающим затвором инжектированный заряд хранится на плавающем затворе, находящемся между первым и вторым подзатворными

диэлектрическими слоями. Схема, поясняющая устройство МОП ПТ с плавающим затвором, приведена на рисунке б.

В качестве материала для плавающего затвора используется поликристаллический кремний, легированный фосфором.

# Зонная диаграмма МОП ПТ с плавающим затвором



На рисунке а приведена зонная диаграмма такого транзистора. Рисунок б поясняет механизм записи информационного заряда путем туннельной инжекции из полупроводника на плавающий затвор. На рисунке в приведена зонная диаграмма МОП ПТ с плавающим затвором после записи заряда и снятия напряжения с затвора. Возможно частичное растекание наполненного информационного заряда из-за туннелирования электронов с плавающего затвора обратно в полупроводник.

**а) напряжение на затворе  $V_{GS}$  равно нулю, плавающий затвор не заряжен; б) процесс записи информационного заряда импульсом напряжения  $+V_{GS}$ ; в) МОП ПТ при нулевом напряжении на затворе в режиме хранения информационного заряда**

# Основные соотношения для МОП ПТ с плавающим затвором

- Рассмотрим основные соотношения, определяющие характер накопления инжектированного заряда на плавающем затворе полевого транзистора. Величина заряда  $Q_{ox}(\tau)$  равна:

$$Q_{ox}(\tau) = \int_0^{\tau} I(t) dt,$$

где  $I(t)$  – величина инжекционного тока в момент времени  $t$ .

Как видно из зонной диаграммы, инжекция носителей из полупроводника через первый слой окисла на плавающий затвор осуществляется путем прямого туннелирования через трапецеидальный барьер. Величина туннельного тока  $I(t)$  описывается соотношением:

Постоянные величины  $A$  и  $B$ , входящие в уравнение, зависят от типа полупроводника и высоты потенциальных барьеров на границе.

$$I(t) = AE_{ox}^2 \exp\left(-\frac{B}{E_{ox}}\right)$$

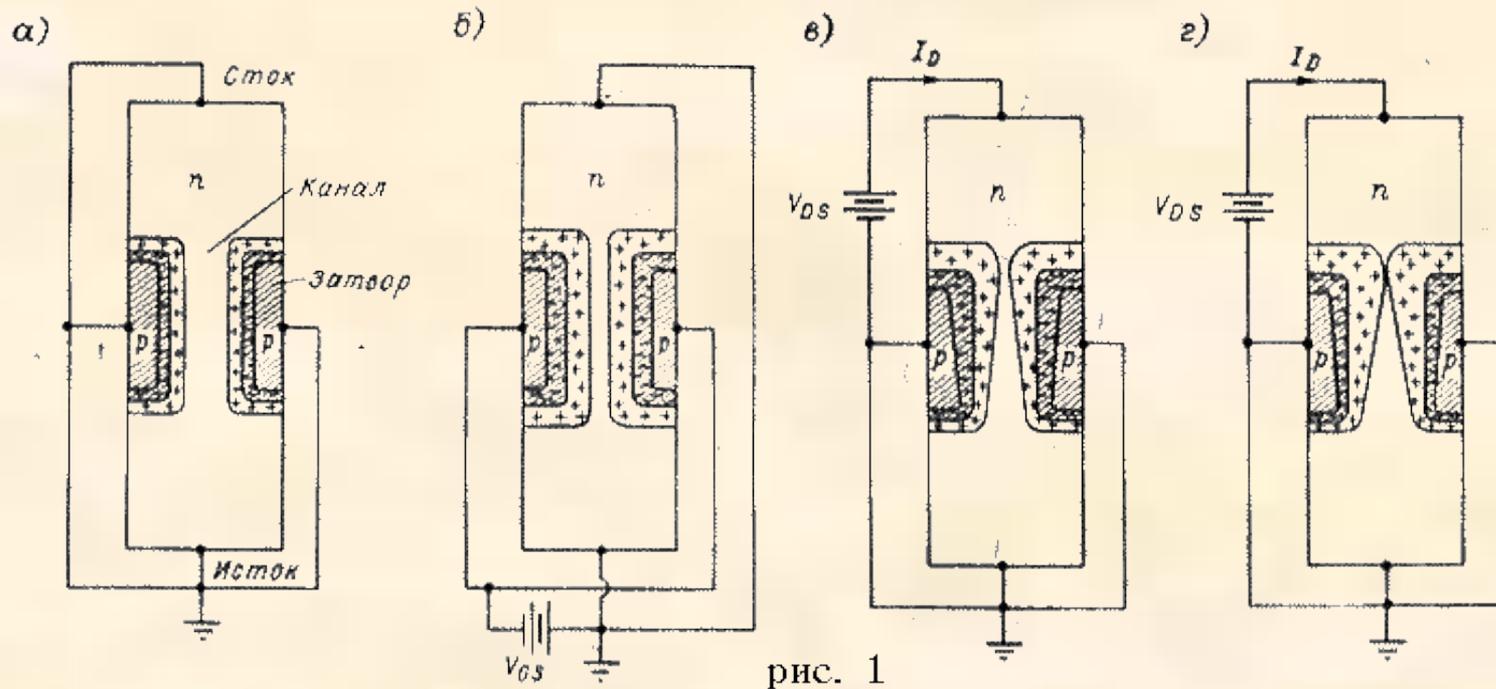
# Основные соотношения для МОП ПТ с плавающим затвором

- Накапливаемый на плавающем затворе инжектированный заряд  $Q(\tau)$  будет вызывать уменьшение напряженности электрического поля  $E_{ox}$  в первом диэлектрике. Величина электрического поля  $E_{ox}$ , обуславливающая туннелирование :

$$E_{ox} = \frac{V_G}{d_{SiO_2} + d_{Si_3N_4}} - \frac{Q(\tau)}{\epsilon_{SiO_2} + \epsilon_{Si_3N_4} \left( \frac{d_{SiO_2}}{d_{Si_3N_4}} \right)}$$

Из последних трёх уравнений следует, что при малых временах  $t$  наполненный заряд  $Q(\tau)$  мал и линейно возрастает со временем  $t$ , поскольку поле в окисле  $E_{ox}$  и туннельный ток  $I(t)$  постоянны. При больших временах наступает насыщение наполнения инжектированного заряда  $Q(\tau)$ . Последние три соотношения позволяют на основе расчета выбрать наиболее оптимальные режимы записи и стирания информационного заряда.

## Полевой транзистор с затвором в виде $p$ - $n$ перехода



Прибор состоит из области с проводимостью  $n$ - (или  $p$ -) типа, имеющей омические контакты, называемые истоком и стоком, и двух областей  $p$ - (или  $n$ -) типа, называемых затворами. На рис. 1, а показан случай нулевого напряжения на всех электродах. За счет наличия обедненных областей вблизи  $p$ -  $n$ -переходов толщина проводящего канала между истоком и стоком меньше геометрического сечения  $n$ -области. Если к затворам приложить обратное смещение, то размеры областей пространственного заряда (ОПЗ) увеличиваются и толщина проводящего канала еще более уменьшается (рис. 1, б). При приложении к стоку положительного по отношению к истоку напряжения по каналу течет ток основных носителей (электронов), а толщина ОПЗ у стокового конца затвора увеличивается вследствие возрастания обратного напряжения между затвором и каналом (рис. 1, в).

- 
- Таким образом, возрастание приводит к увеличению сопротивления канала за счет уменьшения горловины вблизи стока. При достаточно больших значениях области пространственного заряда смыкаются (рис. 1,г) и дальнейшее увеличение практически не вызывает возрастания тока (режим насыщения). Напряжение между затвором и стоком, соответствующее смыканию ОПЗ, называется напряжением насыщения. Следует отметить, что канал может быть полностью перекрыт только при  $\phi = 0$ . При работе прибора в режиме насыщения вблизи стока существует очень узкая проводящая область, в которой плотность тока и электрическое поле велики. На стокowych характеристиках ПТУП (рис. 2,а) точки пересечения штриховой линии с кривыми (I) соответствуют началу режима насыщения.
-

## Вольт-амперные характеристики в ПТ с затвором в виде p-n

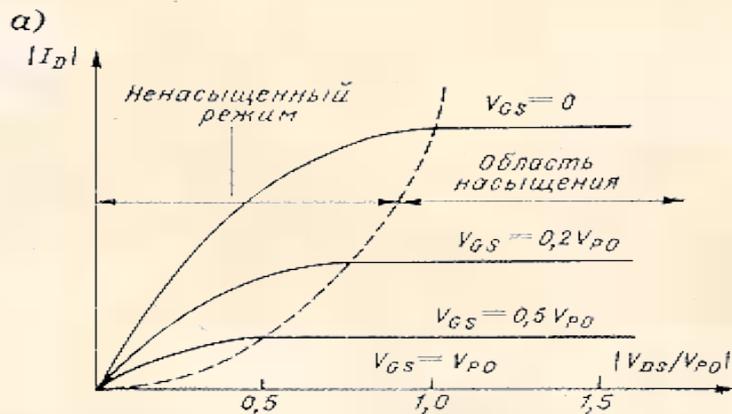
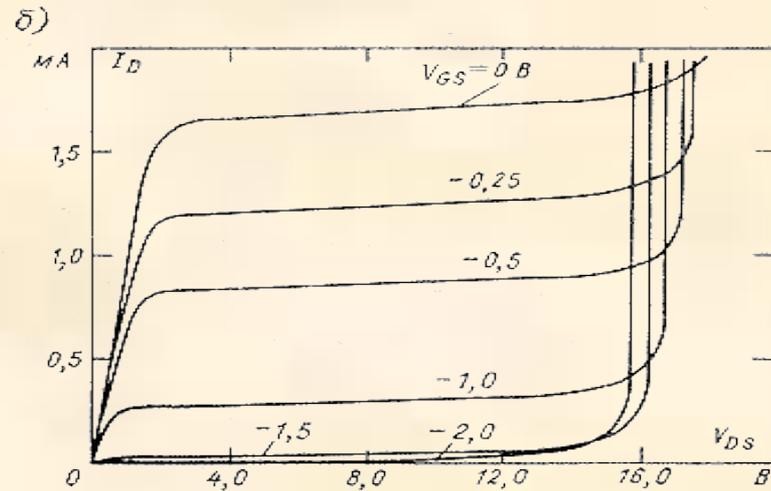


Рис. 2



На практике при насыщении все же наблюдается незначительное возрастание тока с ростом (рис. 2,б). Это возрастание связано с распространением ОПЗ по направлению к стоковому контакту и частично с увеличением электрического поля в канале. За счет расширения области смыкания в сторону истока стока возрастает так, как если бы длина затворов уменьшалась, а толщина канала оставалась постоянной. Это явление, называемое эффектом укорочения канала, определяет конечную величину сопротивления канала при увеличении .

## Микроминиатюризация МДП-приборов

Полевые приборы со структурой металл – диэлектрик – полупроводник в силу универсальности характеристик нашли широкое применение в интегральных схемах (ИС). Одна из основных задач микроэлектроники заключается в повышении степени интеграции и быстродействия интегральных схем. Для ИС на МДП-приборах благодаря чрезвычайно гибкой технологии их изготовления эта задача решается несколькими путями.

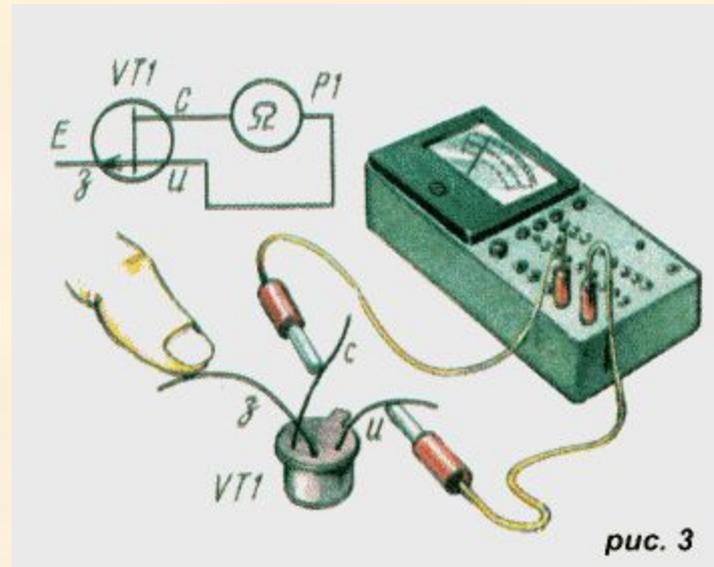
Параметры прибора (схемы)	n-МОП с обогащенной нагрузкой, 1972	МОП, 1980	1989	2000
Длина канала $L$ , мкм	6	2	1-0,6	0,13
Поперечная диффузия $L_D$ , мкм	1,4	0,4		
Глубина $p$ - $n$ переходов $x_B$ , мкм	2,0	0,8		0,07-0,13
Толщина затворного окисла $d_{ox}$ , нм	120	40	20	10
Напряжение питания $V_{пит}$ , В	4-15	2-4		
Минимальная задержка вентиля, нс	12-15	0,5		
Мощность на вентиль $P$ , мВт	1,5	0,4		
Количество транзисторов в процессоре Intel	2,5 тыс	80 тыс	1,2 млн	42 млн

*Таблица 4. Микроминиатюризация процессоров Intel*

Модель	Год выпуска	Транзисторы	Тех. процесс	Тактовая частота
4004	1971	2 250	10 мкм	108 КГц
8008	1972	2 500	10 мкм	200 КГц
8080	1974	5 000	6 мкм	2 МГц
8086	1978	29 000	3 мкм	5-10 МГц
286	1982	120 000	1,5 мкм	6-12,5 МГц
386	1985	275 000	1,5-1 мкм	16-33 МГц
486DX	1989	1 180 000	1-0,6 мкм	25-100 МГц
Pentium	1993	3 100 000	0,8-0,35 мкм	60-200 МГц
Pentium II	1997	7 500 000	0,35-0,25 мкм	233-450 МГц
Pentium III	1999	24 000 000	0,25-0,13 мкм	450-1300 МГц
Pentium 4	2000	42 000 000	0,18-0,13 мкм	>1400 МГц

P.S

## применение ПТ



- **Полевой транзистор - сенсорный датчик.** Слово "сенсор" означает чувство, ощущение, восприятие. Поэтому можем считать, что в нашем эксперименте полевой транзистор будет выступать в роли чувствительного элемента, реагирующего на прикосновение к одному из его выводов.
- Помимо транзистора (рис. 3), например, любого из серии КП103, понадобится омметр с любым диапазоном измерений. Подключите щупы омметра в любой полярности к выводам стока и истока - стрелка омметра покажет небольшое сопротивление этой цепи транзистора.
- Затем коснитесь пальцем вывода затвора. Стрелка омметра резко отклонится в сторону увеличения сопротивления. Произошло это потому, что наводки электрического тока изменили напряжение между затвором и истоком. Увеличилось сопротивление канала, которое и зафиксировал омметр.

- **Полевой транзистор - индикатор поля.** Немного измените предыдущий эксперимент - приблизьте транзистор выводом затвора (либо корпусом) возможно ближе к сетевой розетке или включенному в нее проводу работающего электроприбора. Эффект будет тот же, что и в предыдущем случае - стрелка омметра отклонится в сторону увеличения сопротивления. Оно и понятно - вблизи розетки или вокруг провода образуется электрическое поле, на которое и среагировал транзистор.
- В подобном качестве полевой транзистор используется как датчик устройств для обнаружения скрытой электропроводки или места обрыва провода в новогодней гирлянде - в этой точке напряженность поля возрастает.