

Доклад на тему

Полевые транзисторы

Журкин Д.В.
Спирин О.В.
гр. 21301

Устройство МДП транзисторов

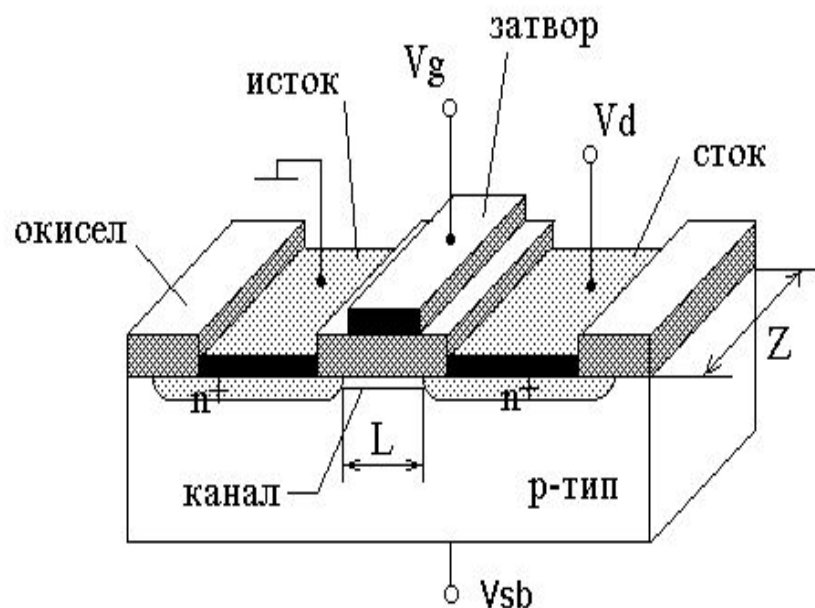
Термин «МДП-транзистор» используется для обозначения полевых транзисторов, в которых управляющий электрод (затвор) отделен от активной области

диэлектрической прослойкой (изолятором).

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

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

Две сильнолигированные 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.



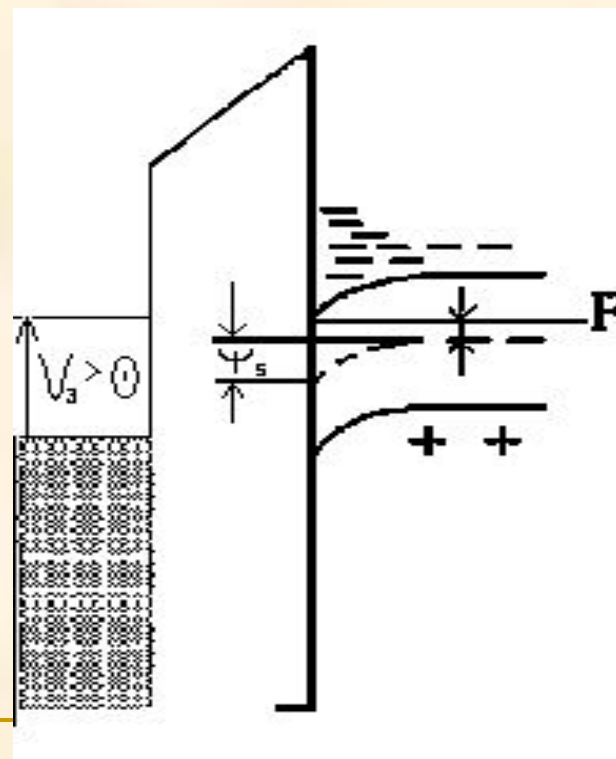
МДП-транзистор

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

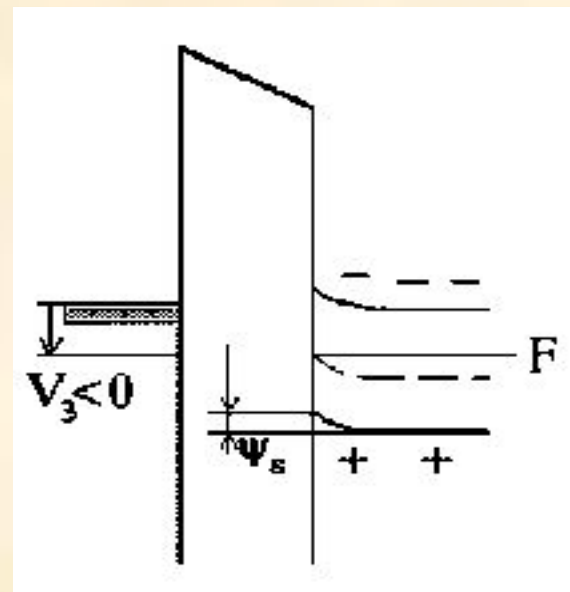
Физической основой работы МДП транзистора является эффект поля. В структурах МДП внешнее поле обусловлено приложенным напряжением на металлический электрод (затвор) относительно полупроводниковой подложки.

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

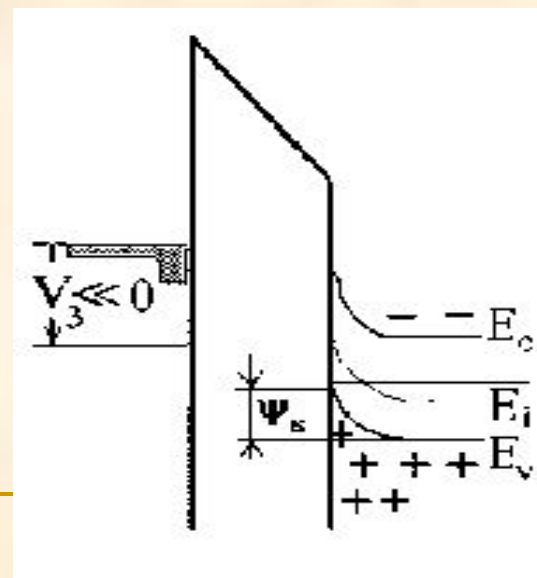
- Обогащение: Этому состоянию соответствует знак напряжения на металлическом электроде (затворе), притягивающий основные носители (для n-типа, $V_G > 0$, $\psi_s > 0$).



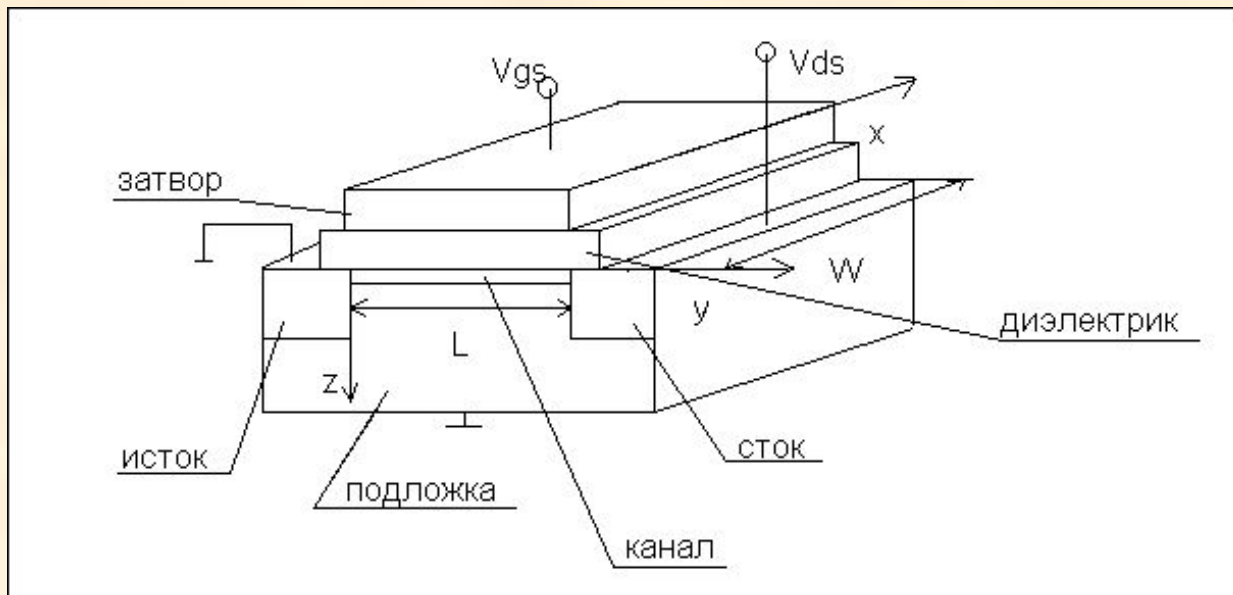
- Обеднение: Этому состоянию соответствует небольшое по величине напряжение, отталкивающее основные носители (для n-типа, $V_G < 0$, $\psi_s < 0$).



- 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 μ_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.

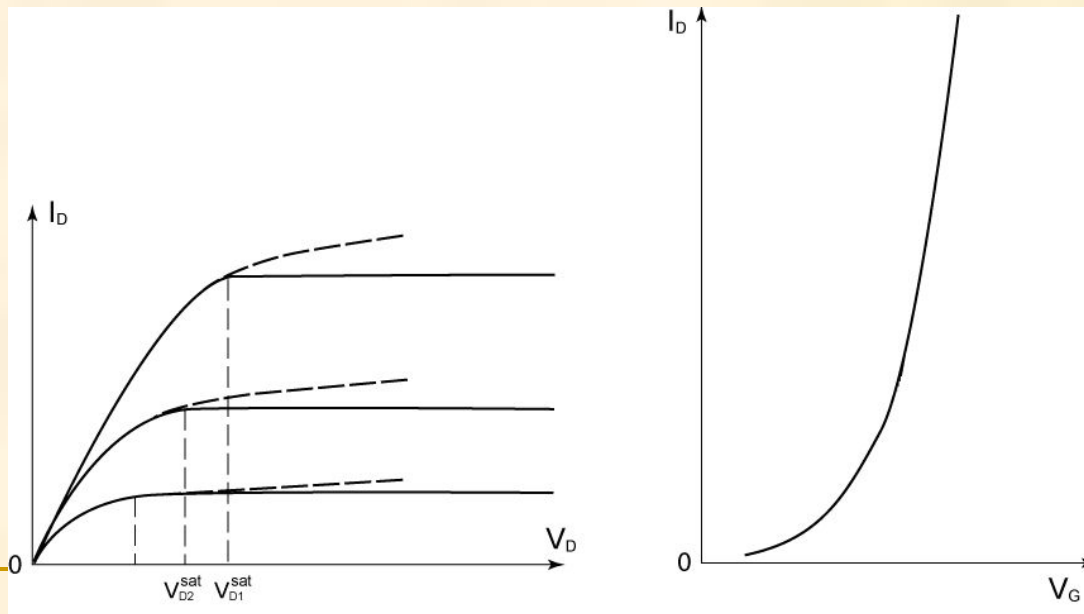
В первом приближении при этом на участке плавного канала от истока до точки отсечки падает одинаковое напряжение, не зависящее от напряжения исток-сток.

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

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 μ :

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

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 μ , равный их произведению, всегда меньше единицы:

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

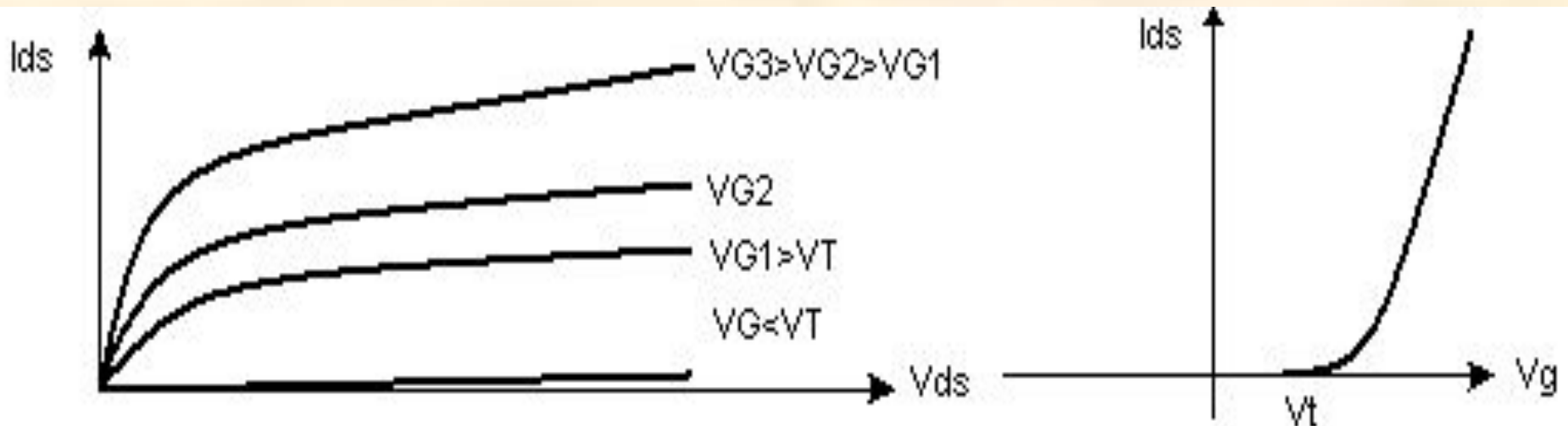
Таким образом полевой МОП-транзистор как усилитель не может быть использован в области плавного канала.

Влияние типа канала на ВАХ-и МДП-транзисторов

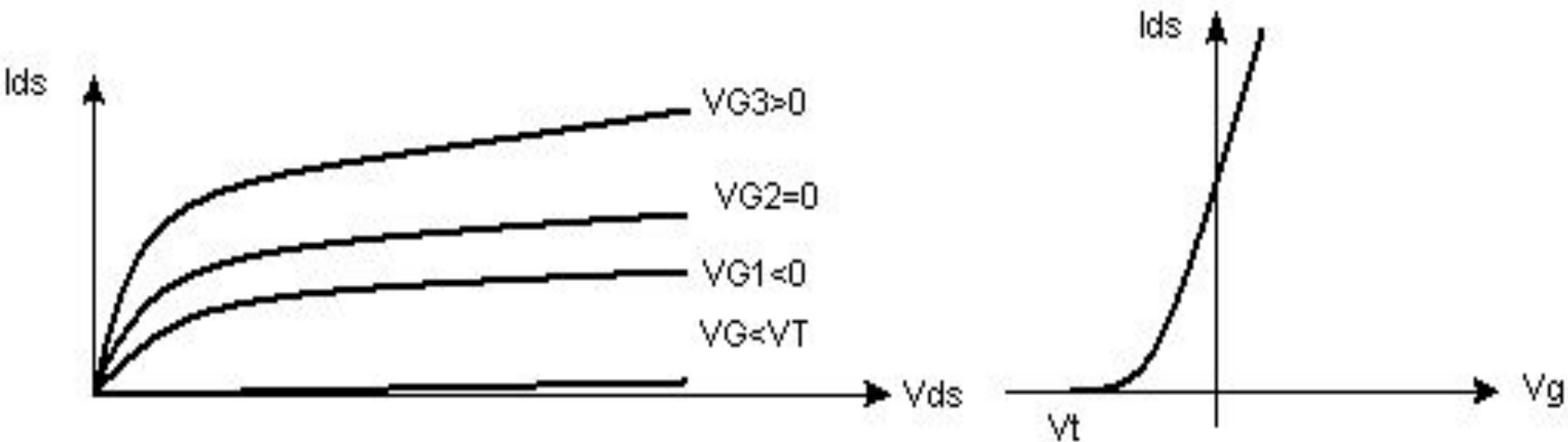
Вид ВАХ МДП-транзистора в значительной мере зависит от типа п/п-ой подложки и типа инверсионного канала. Канал, который отсутствует при нулевом напряжении на затворе $V_G=0$, а при увеличении V_G появляется - называется индуцированным. Канал, который при нулевом напряжении на затворе $V_G=0$ уже сформировался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

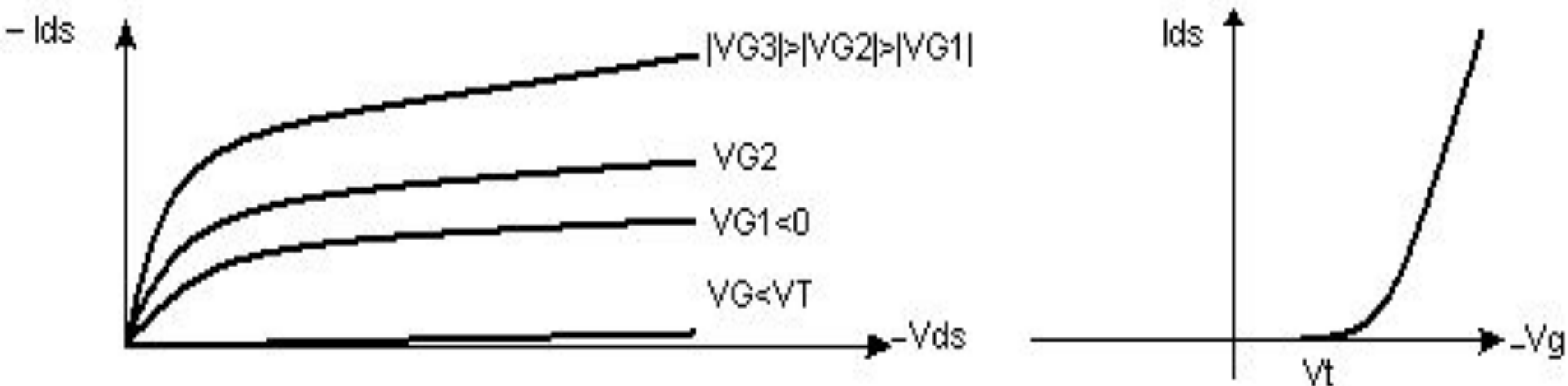
- ВАХ n-канального МДП-транзистора с индуцированным каналом:



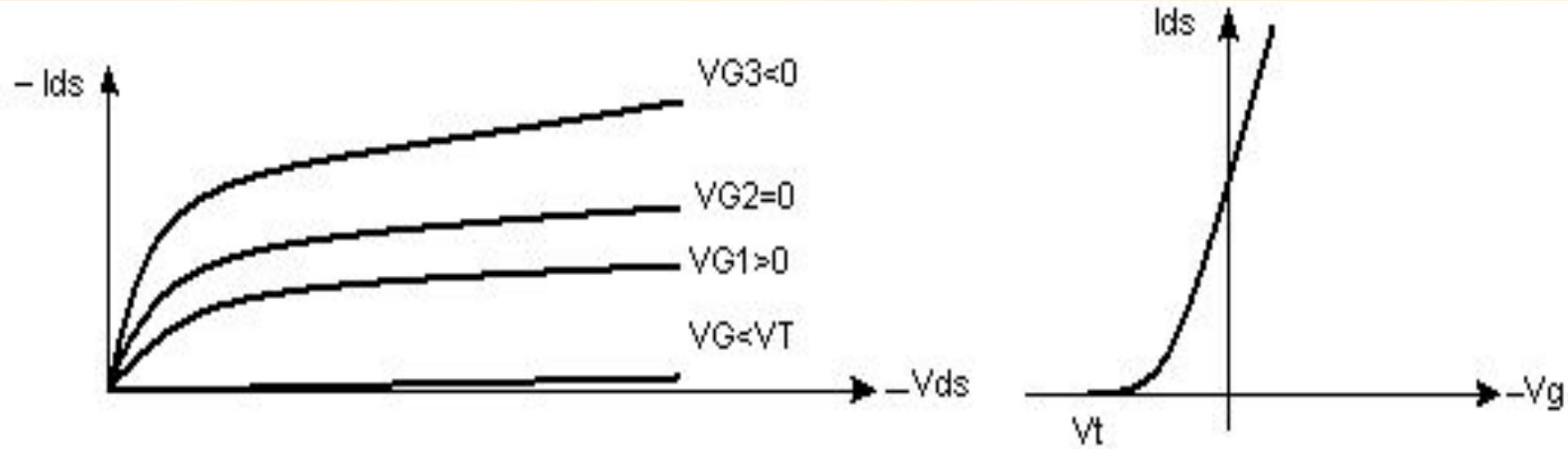
- ВАХ n-канального МДП-транзистора со встроенным каналом:



- 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:

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

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

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

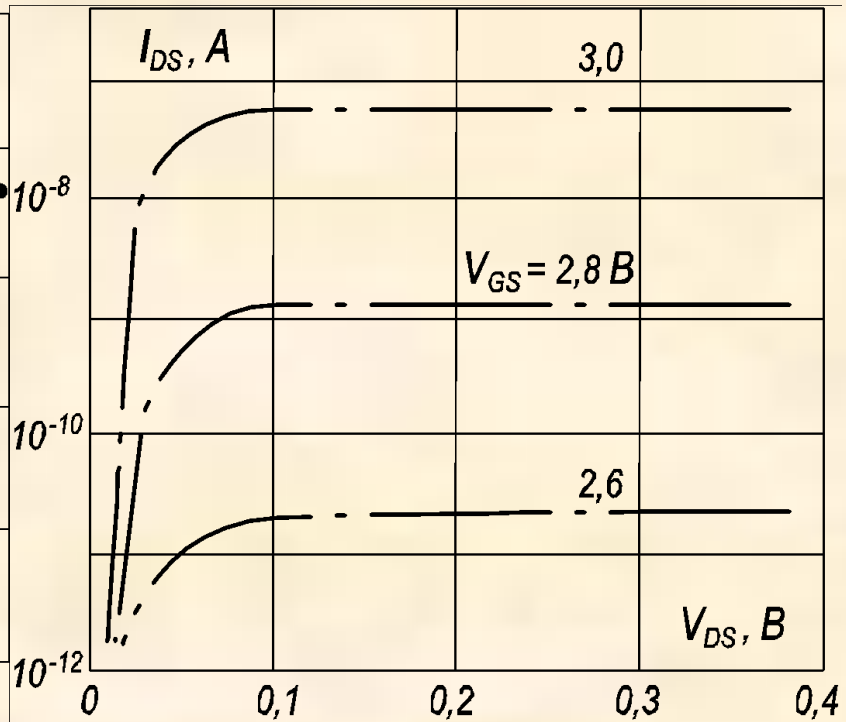
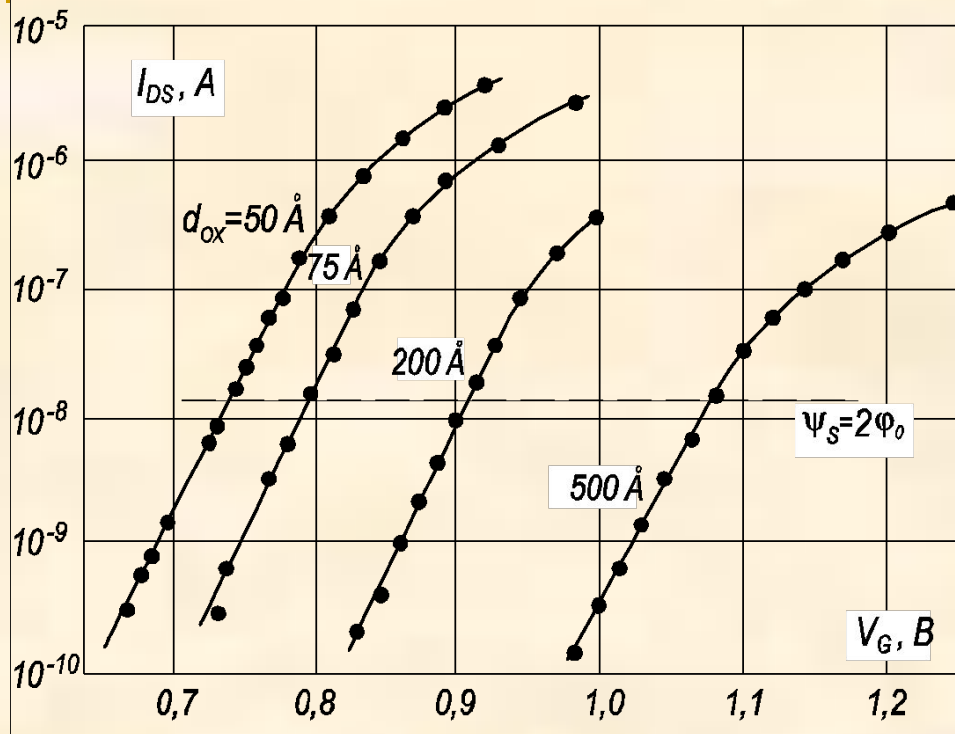
C_{sx} и емкости обедненной области C_B к емкости подзатворного диэлектрика C_{ox} .

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

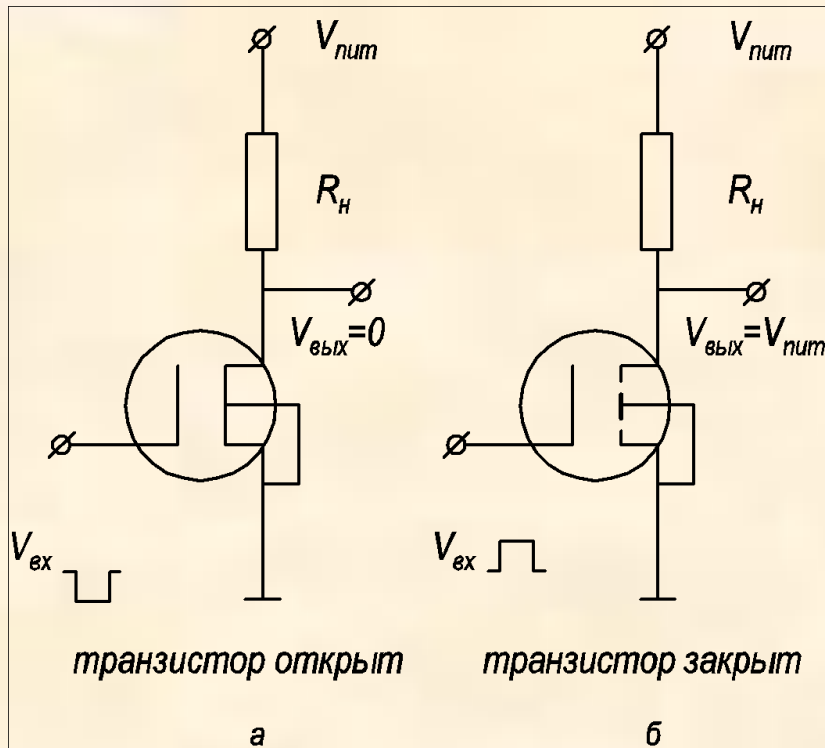
Величина m равна:

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

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



МДП-Транзистор как элемент памяти



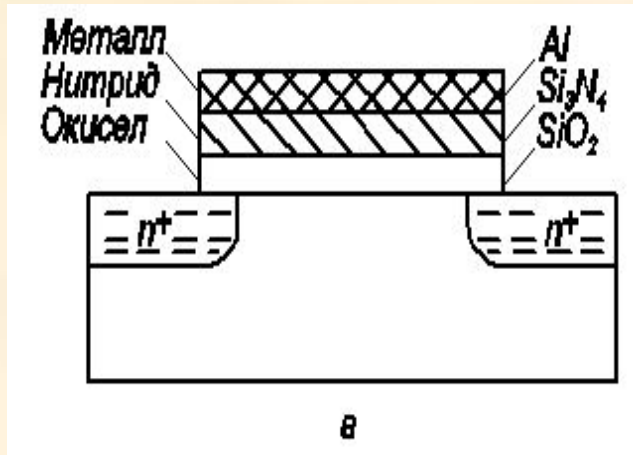
- Рассмотрим RC -цепочку, состоящую из последовательно соединенных нагрузочного сопротивления $R_H \approx 1$ МОм и полевого транзистора с изолированным затвором, приведенную на рисунках а, б.
- Если в такой схеме МДП-транзистор открыт, сопротивление его канала составляет десятки или сотни Ом, все напряжение питания падает на нагрузочном сопротивлении R_H и выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ 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 $U_{\text{вых}}$ близко к напряжению питания $U_{\text{пит}}$. 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

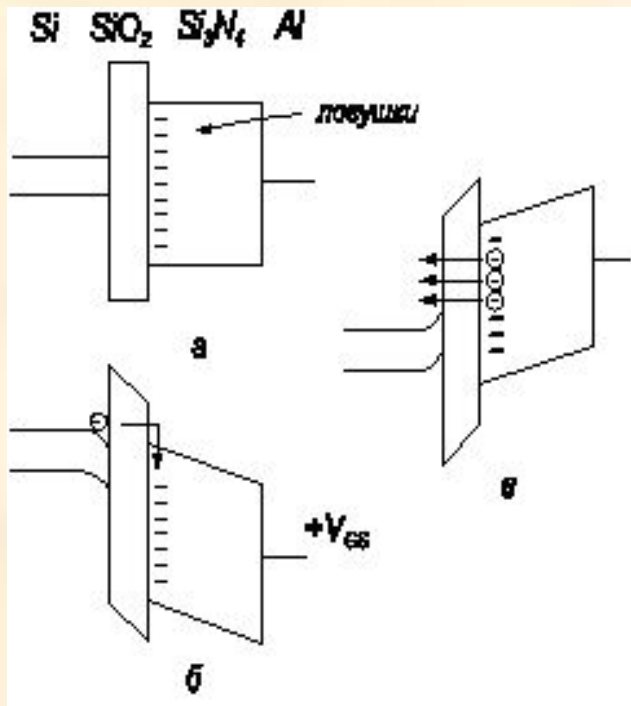


- На рисунке приведена схема, показывающая основные конструктивные элементы МНОП-транзистора.

- 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 Si₃N₄ имеет глубокие ловушки в запрещенной зоне и значение диэлектрической постоянной в два раза более высокое, чем диэлектрическая постоянная двуокиси кремния SiO₂. Ширина запрещенной зоны нитрида Si₃N₄ меньше, чем ширина запрещенной зоны окисла SiO₂.

Зонные диаграммы МНОП-транзистора

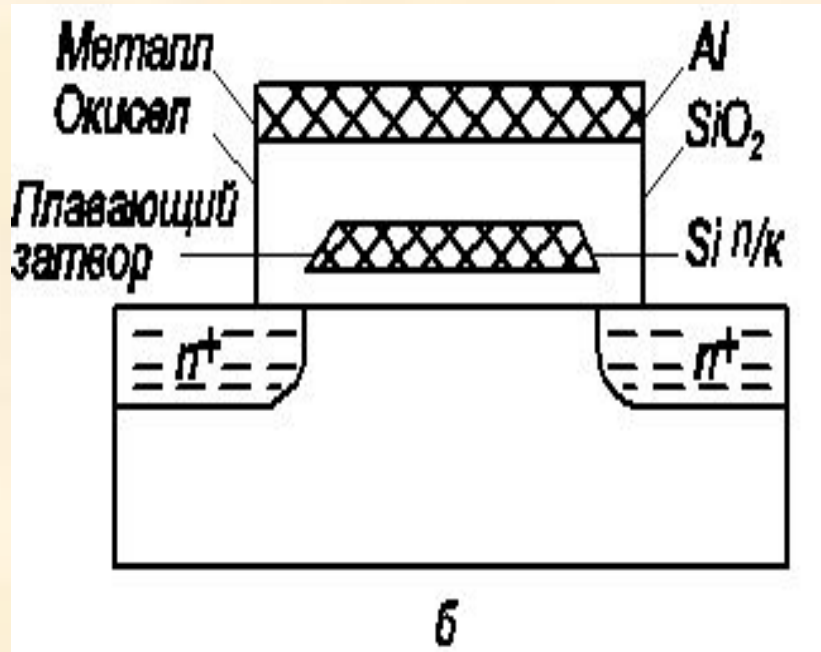
в различных режимах работы



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

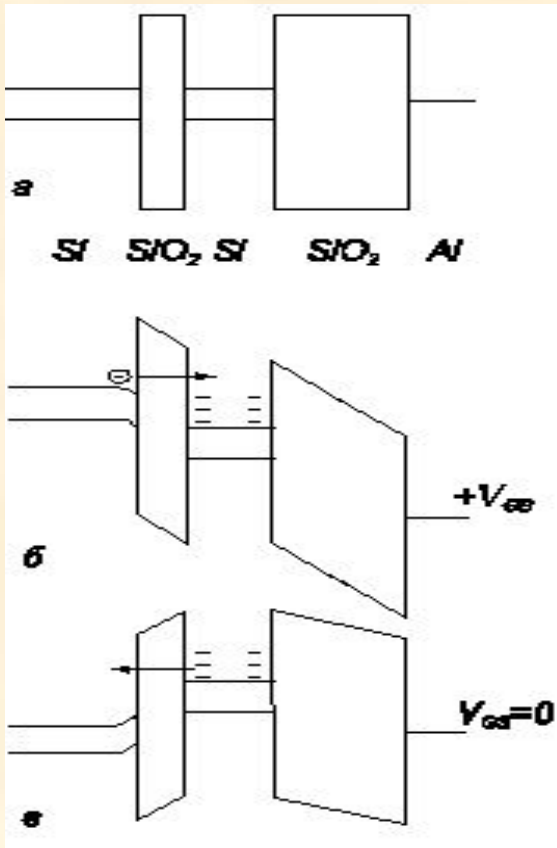


Полевой транзистор с плавающим затвором по принципу работы и устройству похож на МНОП-транзистор. Только в транзисторах с плавающим затвором инжектированный заряд хранится на плавающем затворе, находящемся между первым и вторым подзатворными

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.

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

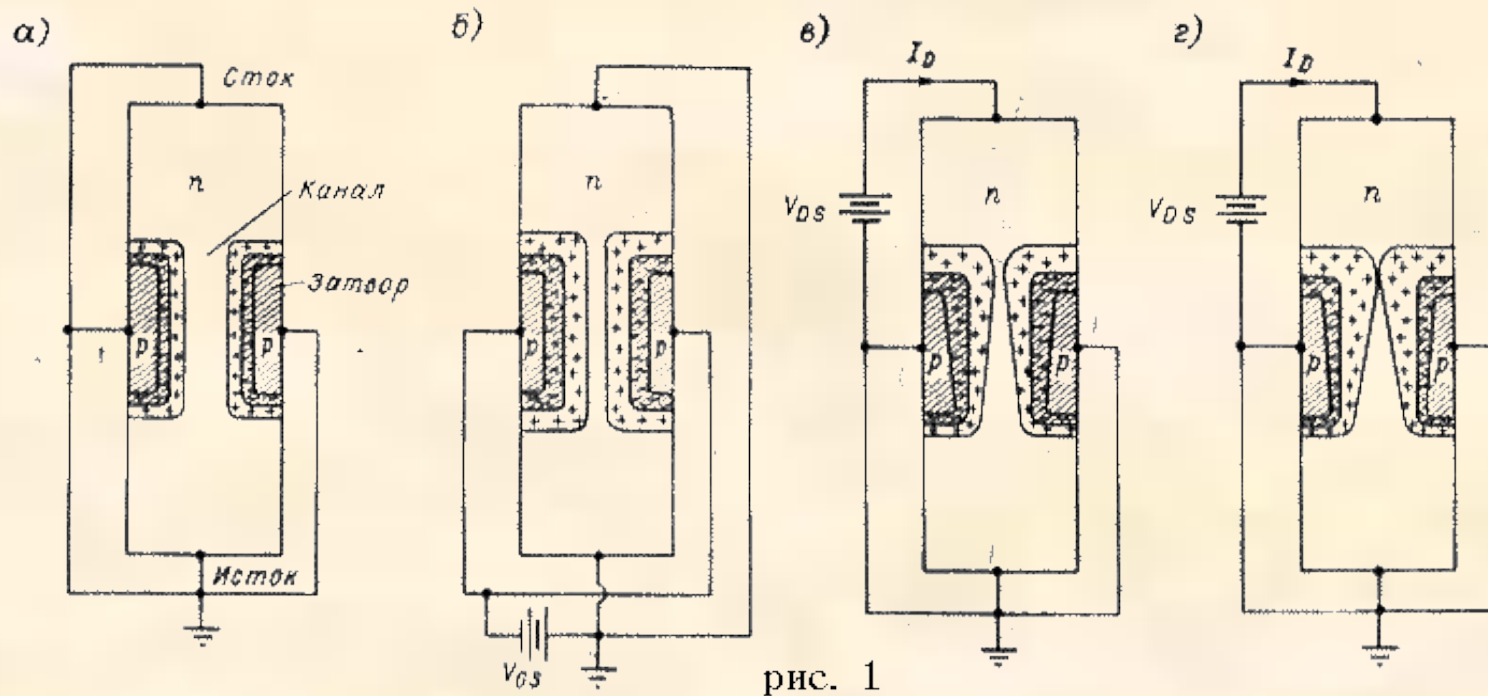
Основные соотношения для МОП ПТ с плавающим затвором

- 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 $p-n$

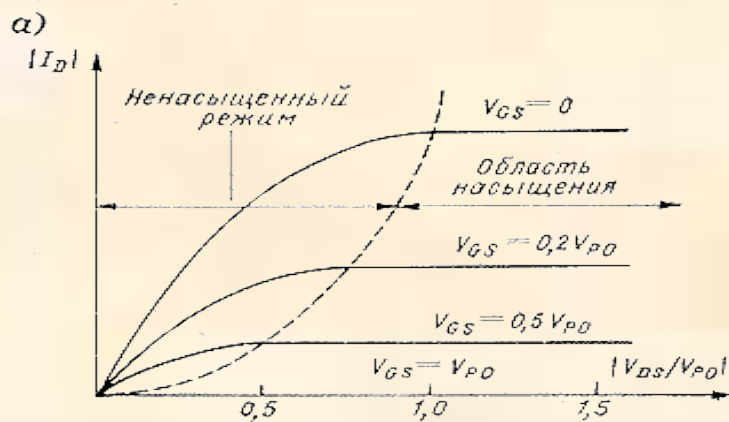
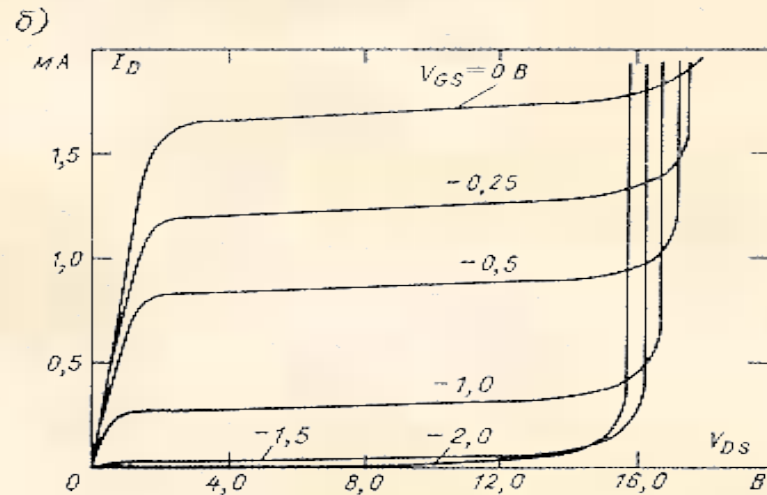


Рис. 2



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

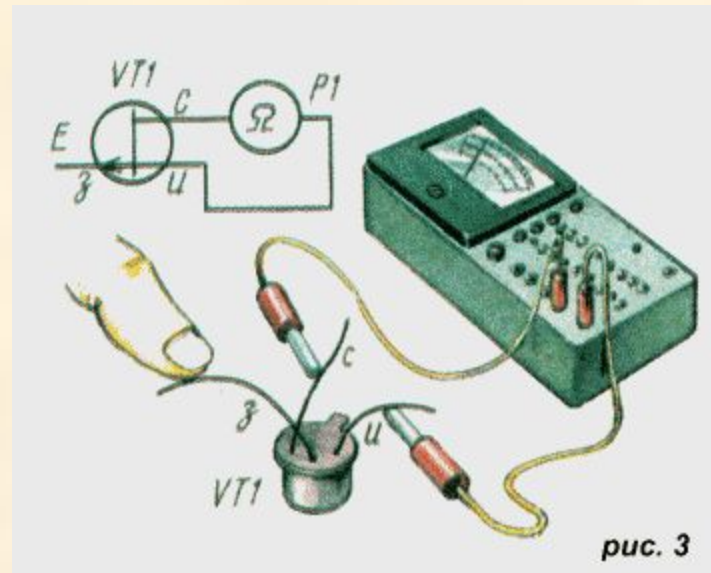


рис. 3

- **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.