

Доклад на тему

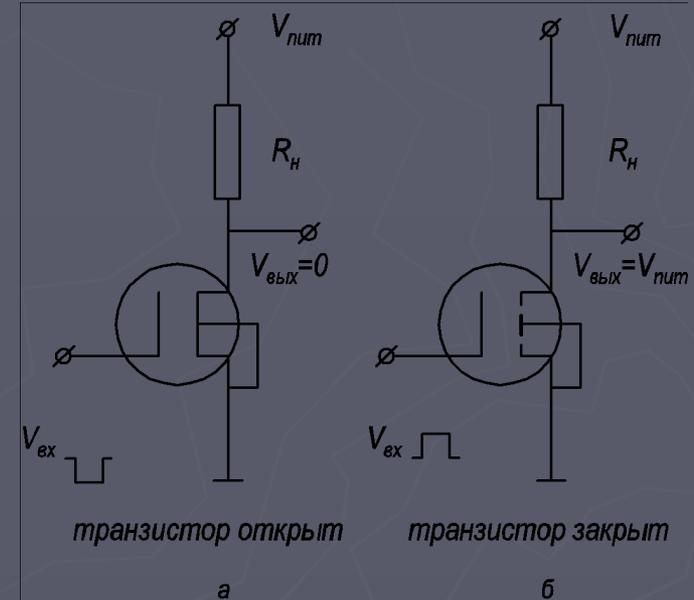
“Полевые транзисторы”

часть 2

Выполнил: студент 3-го курса ФТФ гр. **21305**
Ковригин Артём Владимирович

МДП – транзистор как элемент памяти

1. 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.
2. 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.
3. 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 $U_{\text{пит}}$.



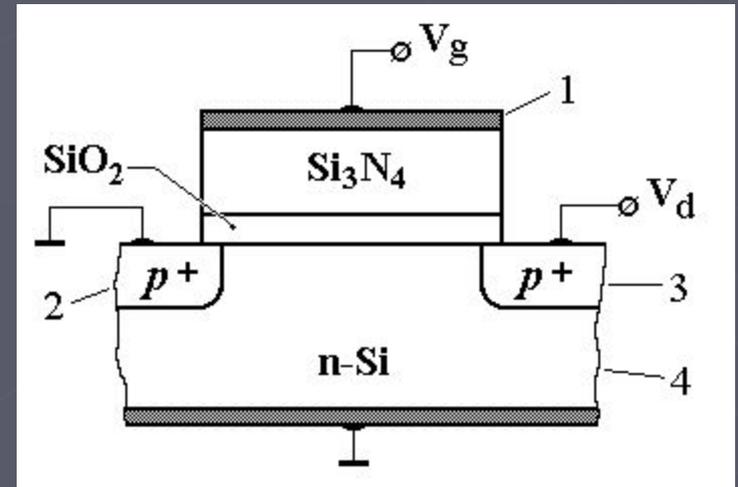
Как видно из приведенного примера, на основе системы резистор – МДП-транзистор легко реализуется элементарная логическая ячейка с двумя значениями: ноль и единица.

МДП-транзистор в качестве элемента запоминающего устройства

- а) открытое состояние;
- б) закрытое состояние

Мноп – транзистор (структура)

1. В структурах типа металл-нитрид-оксид-полупроводник (МНОП) диэлектрик под затвором - двухслойный: в качестве первого диэлектрика используется туннельно-прозрачный слой ($d_{ox} < 50 \text{ \AA}$) SiO_2 , в качестве второго диэлектрика используется толстый ($d \approx 1000 \text{ \AA}$) слой Si_3N_4 .
2. Нитрид кремния Si_3N_4 имеет глубокие ловушки в запрещенной зоне и значение диэлектрической постоянной ϵ Si_3N_4 в два раза более высокое, чем диэлектрическая постоянная двуокиси кремния SiO_2 . Ширина запрещенной зоны нитрида Si_3N_4 меньше, чем ширина запрещенной зоны окисла SiO_2 .

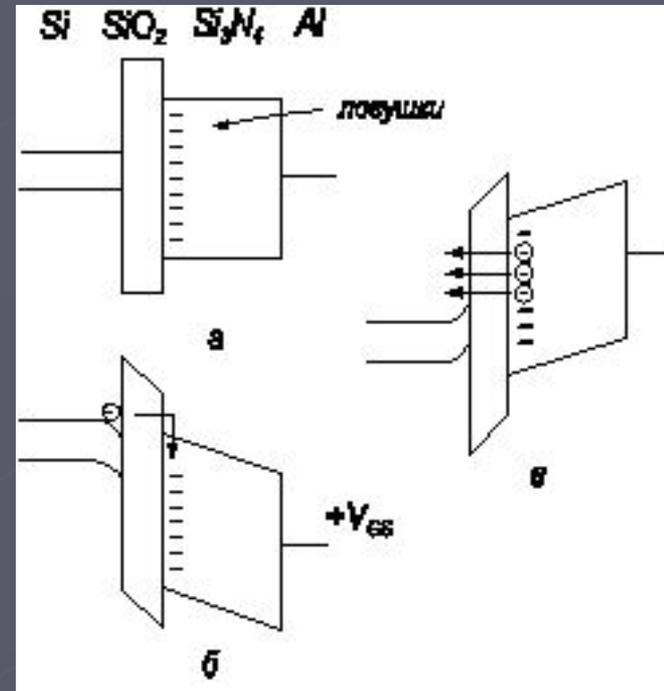


Физические процессы в МНОП ПТ

1. При подаче импульса положительного напряжения $+V_{gs}$ (+28 – 30В) на затвор вследствие разницы в величинах диэлектрических постоянных окисла и нитрида в окисле возникает сильное электрическое поле. Это поле вызывает туннельную инжекцию электронов из полупроводника через окисел в нитрид.

2. Инжектированные электроны захватываются на глубине уровня ловушек в запрещенной зоне нитрида кремния, обуславливая отрицательный по знаку встроенный в диэлектрик заряд. Высокая эффективность захвата электронов связана с большим сечением захвата на ловушки (порядка 10-13 кв.см.) и большой их концентрации (порядка 10-19 куб.см.). Этот заряд может несколько лет хранится на ловушечных центрах, что соответствует существованию встроенного инверсионного канала. По мере накопления заряда поле на контакте уменьшается, что приводит к уменьшению скорости записи. Эффективность записи зависит также и от тока сквозной проводимости в нитриде.

3. При подаче импульса отрицательного напряжения $-V_{gs}$ (-28 – 30В) на затвор происходит туннелирование электронов с ловушек в нитриде кремния в зону проводимости полупроводника. При снятии напряжения с затвора зонная диаграмма МНОП-структуры снова имеет первоначальный вид и инверсионный канал исчезает

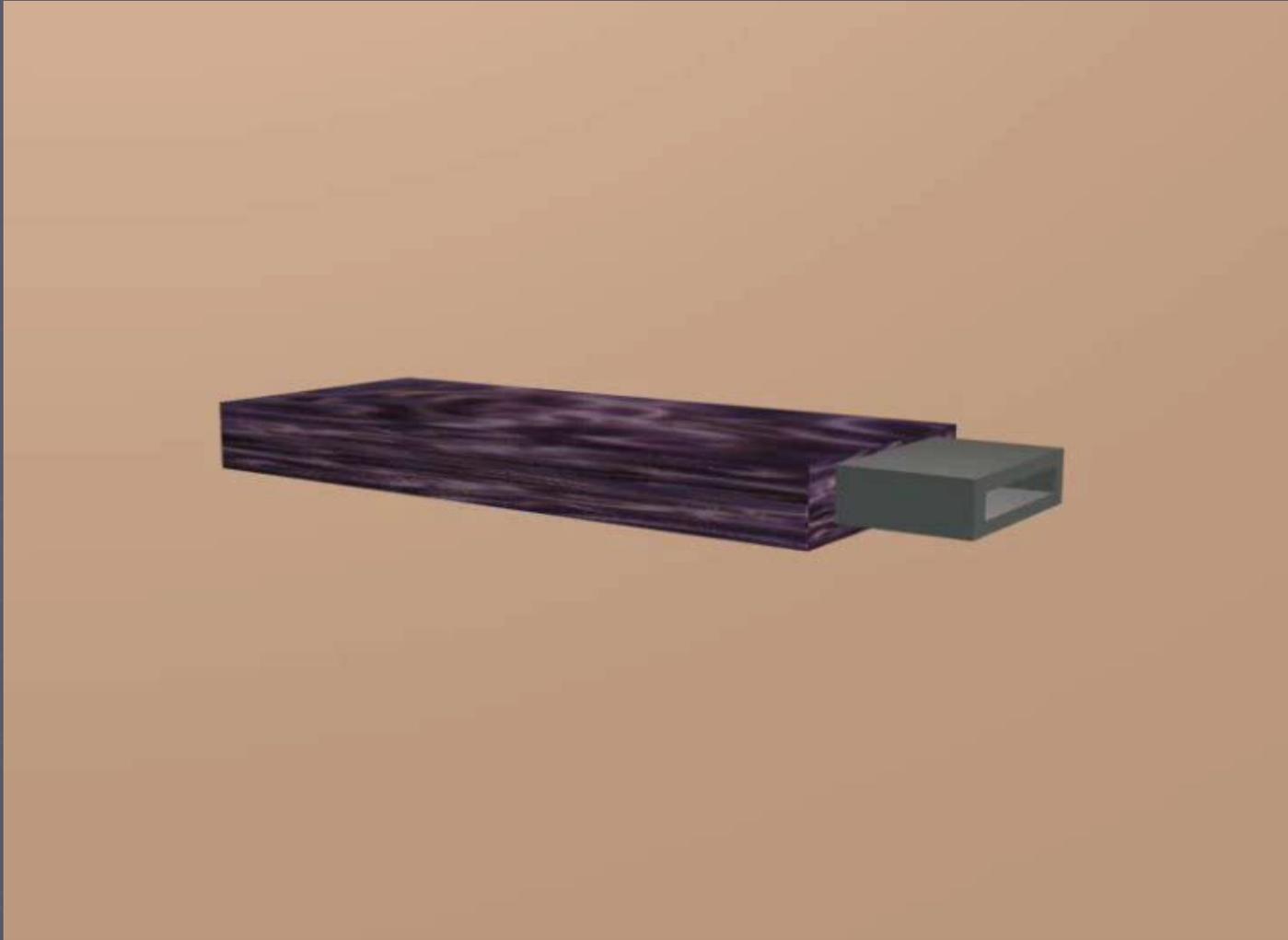


а) напряжение на затворе равно нулю, ловушки не заполнены

б) запись информационного заряда;

в) стирание информационного заряда

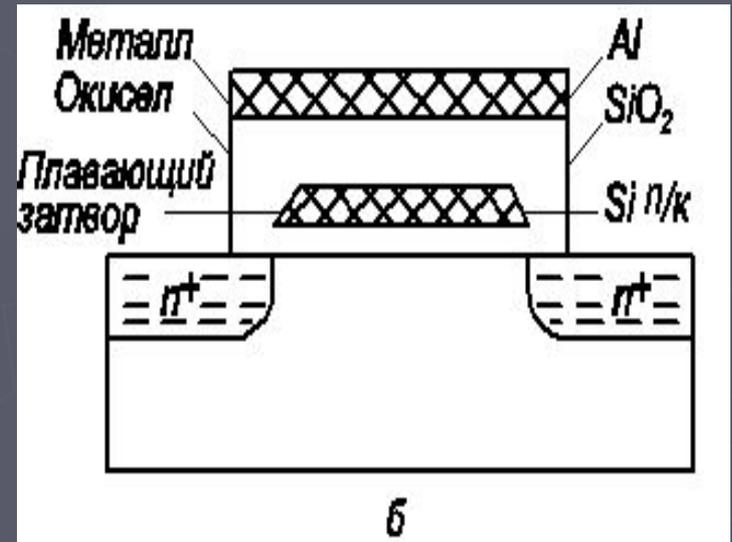
Анимация работы МНОП транзистора



- ▶ Время хранения информации в МНОП транзисторе обусловлено термической эмиссией с глубоких ловушек и составляет порядка 10 лет в нормальных условиях. Основными факторами, влияющими на запись и хранение заряда, являются электрическое поле, температура и радиация. Количество электрических циклов "запись-стирание" обычно не менее 10^5 .
- ▶ Стирание информации (возврат структуры в исходное состояние) может осуществляться:
 - ультрафиолетовым излучением с энергией квантов более 5.1 эВ (ширина запрещенной зоны нитрида кремния) через кварцевое окно;
 - подачей на структуру импульса напряжения, противоположного по знаку записываемому.

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.

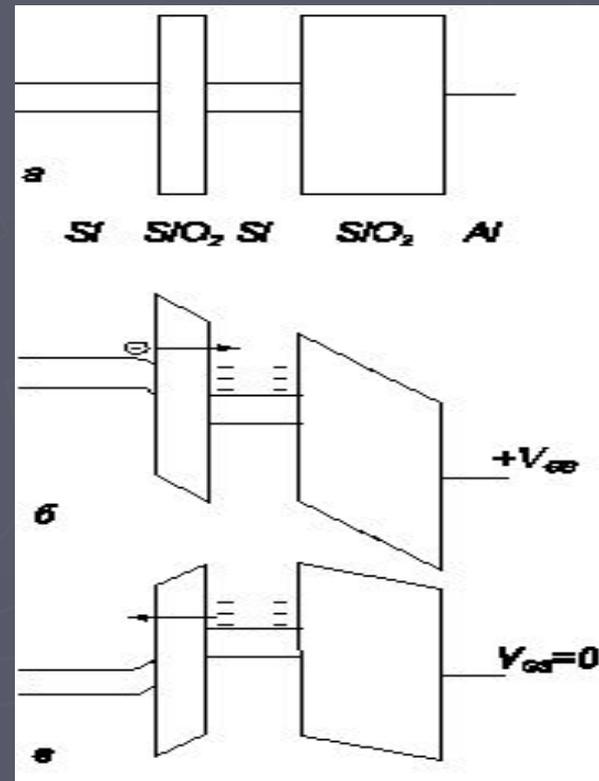


Схема, поясняющая устройство МОП ПТ с плавающим затвором, приведена на рисунке

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

Физические процессы в МОП ПТ с плавающим затвором

1. На рисунке *а* приведена зонная диаграмма такого транзистора.
2. Рисунок *б* поясняет механизм записи информационного заряда путем туннельной инжекции из полупроводника на плавающий затвор.
3. 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.



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

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

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:

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

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

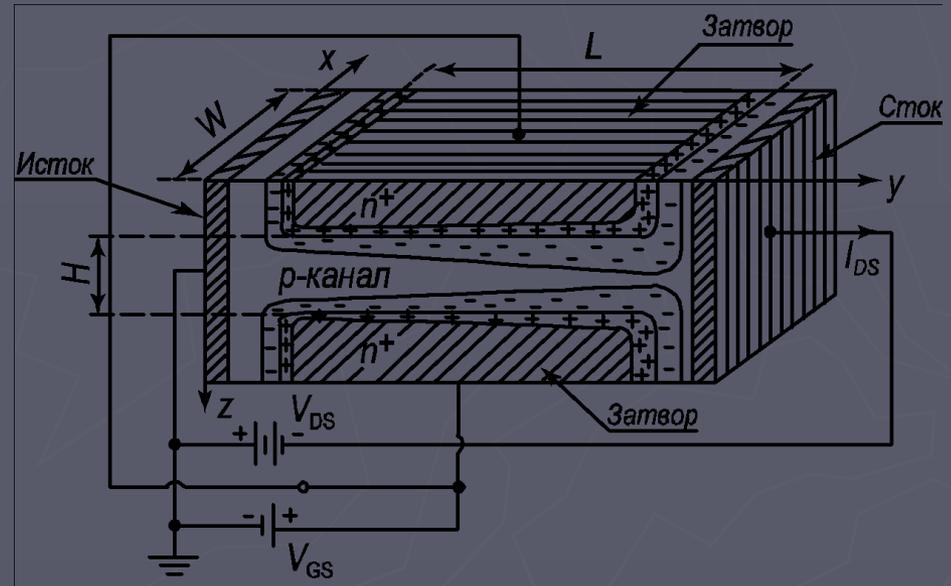
Накапливаемый на плавающем затворе инжектированный заряд $Q(\tau)$ будет вызывать уменьшение напряженности электрического поля E_{ox} в первом диэлектрике. Величина электрического поля E_{ox} , обуславливающая туннелирование, равна:

$$E_{\text{ox}} = \frac{V_G}{d_{\text{SiO}_2} + d_{\text{Si}_3\text{N}_4}} - \frac{Q(\tau)}{\epsilon_{\text{SiO}_2} + \epsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4} \left(\frac{d_{\text{SiO}_2}}{d_{\text{Si}_3\text{N}_4}} \right)}$$

Из последних трёх уравнений следует, что при малых временах τ наполненный заряд $Q(\tau)$ мал и линейно возрастает со временем τ , 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

- ▶ Рассмотрим характеристики полевого транзистора, затвор у которого выполнен в виде $p-n$ перехода. На рисунке показана одна из возможных топологий такого транзистора. Омические контакты к левой и правой граням полупроводниковой подложки будут являться истоком и стоком, область квазинейтрального объема, заключенная между обедненными областями $p-n$ переходов – каналом, а сильно легированные n^+ области сверху и снизу – затвором полевого транзистора.



- ▶ При приложении напряжения V_{gs} к затвору ПТ, обеспечивающего обратное смещение $p-n$ перехода ($V_{gs} > 0$), происходит расширение обедненной области $p-n$ перехода в полупроводниковую подложку, поскольку затвор легирован существенно сильнее, чем подложка ($N_d \gg N_a$). При этом уменьшается поперечное сечение канала, а следовательно, увеличивается его сопротивление. Приложенное напряжение исток-сток V_{ds} вызовет ток в цепи канала полевого транзистора. Знак напряжения V_{ds} необходимо выбирать таким образом, чтобы оно также вызывало обратное смещение затворного $p-n$ перехода, то есть было бы противоположно по знаку напряжению V_{gs} . Таким образом, полевой транзистор с затвором в виде $p-n$ перехода представляет собой сопротивление, величина которого регулируется внешним напряжением.

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

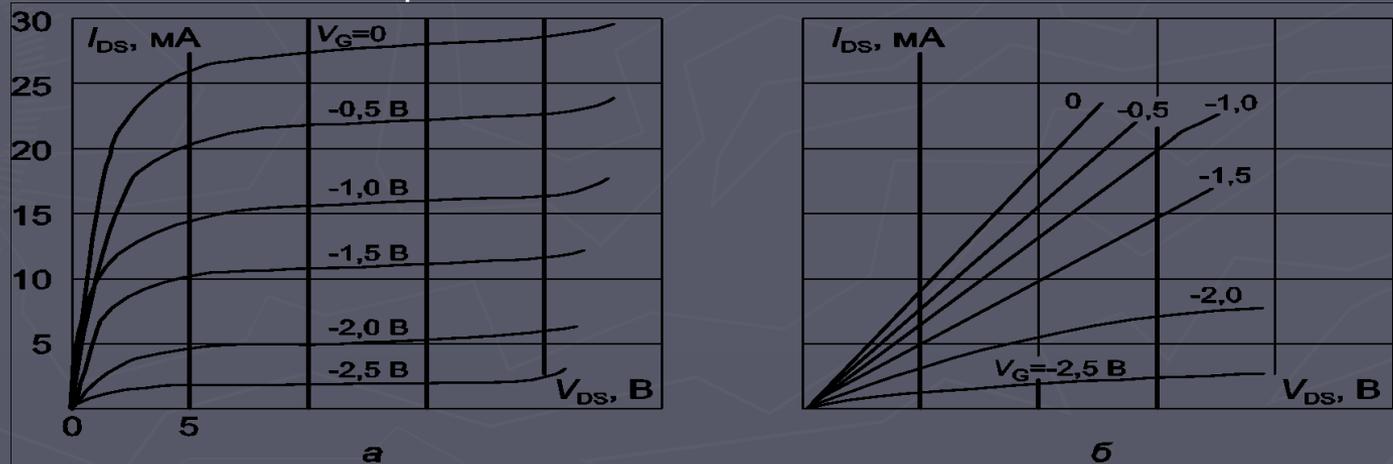
По мере роста напряжения исток-сток V_{ds} точка отсечки перемещается от истока к стоку. При этом аналогично МДП ПТ наблюдаются независимость тока стока от напряжения на стоке и эффект модуляции длины канала. Зависимость тока стока I_{ds} в области отсечки для полевого транзистора с затвором в виде $p-n$ перехода: выражается следующей формулой:

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_p Q_p (y = 0) \left[V_G \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_G}{V_{G0}}} \right) - \frac{1}{3} V_{G0} \right]$$

В области отсечки выражение хорошо аппроксимируется квадратичной зависимостью вида:

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_p Q_p (y = 0) \frac{(V_G - V_{G0})^2}{3V_{G0}}$$

На рисунках **а**, **б** показаны вольт-амперные характеристики в ПТ с затвором в виде $p-n$ перехода. Их отличительной особенностью является то, что при напряжении на затворе $V_g = 0$ канал транзистора открыт и величина тока через него максимальна.



Быстродействие ПТ с затвором в виде $p-n$ перехода

Быстродействие ПТ с затвором в виде $p-n$ переходов обусловлено зарядкой барьерных емкостей C_G затворных $p-n$ переходов через сопротивление канала R_K . Величина времени заряда $T = C_G \cdot R_K$. Емкость затвора C_G и сопротивление канала R_K равны:

$$C_G = \frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 L W}{\Delta l_{об}}; \quad R_K = \frac{\rho L}{W(H - 2\Delta l_{об})}$$

$$\tau = \frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 L^2 \rho}{\Delta l_{об} (H - 2\Delta l_{об})}$$

Выражение имеет минимальное значение при ширине обедненной области, при этом граничная частота

$$f_{гран} = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{16\varepsilon_s \varepsilon_0 \rho} \frac{H^2}{L^2}$$

При значениях $H = L$ для кремния ($\varepsilon_s = 11,8$) с удельным сопротивлением ρ , равным $\rho = 1$ Ом·см, граничная частота будет составлять величину несколько гигагерц.

Микроминиатюризация МДП-приборов

r

- 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	Коэффициент изменения
Длина канала L , мкм	6	2	1-0,6	0,13	N^{-1}
Поперечная диффузия L_D , мкм	1,4	0,4			N^{-1}
Глубина p-n переходов x_B , мкм	2,0	0,8		0,07-0,13	N^{-1}
Толщина затворного окисла d_{ox} , нм	120	40	20	10	N^{-1}
Напряжение питания $V_{пит}$, В	4-15	2-4			N^{-1}
, нс	12-15	0,5			N^{-1}
Мощность на вентиль P , мВт	1,5	0,4			N^{-2}
Количество транзисторов в процессоре Intel	2,5 тыс	80 тыс	1,2 млн	42 млн	N^{-2}

Физические ограничения микроминиатюризации

Величина параметра	Физическое ограничение
Минимальная величина одного элемента (100x100) нм	Статистические флуктуации легирования подложки, разрешение фоторезиста, космические лучи и радиоактивность, конечная ширина <i>p-n</i> перехода
Минимальная толщина подзатворного изолятора 50 Å	Туннельные токи через подзатворный диэлектрик из затвора в канал
Минимальное напряжение питания 0,025 В	Тепловой потенциал kT/q
Минимальная плотность тока 10^{-6} А/см ²	Дискретность заряда электрона, флуктуации встроенного заряда
Минимальная мощность 10^{-12} Вт/элемент при $f = 1$ кГц	Шумы, тепловая энергия, диэлектрическая постоянная
Предельное быстродействие 0,03 нс	Скорость света
Максимальное напряжение питания	Пробой подзатворного диэлектрика, смыкание областей истока и стока
Максимальное легирование подложки	Туннельный пробой <i>p-n</i> перехода стока
Максимальная плотность тока	Электромиграция, падение напряжения на паразитных сопротивлениях контактов
Максимальная мощность	Теплопроводность подложки и компонентов схемы
Количество элементов на кристалл 10^8	Совокупность всех ранее перечисленных ограничений