Доклад на тему

“Полевые транзисторы”

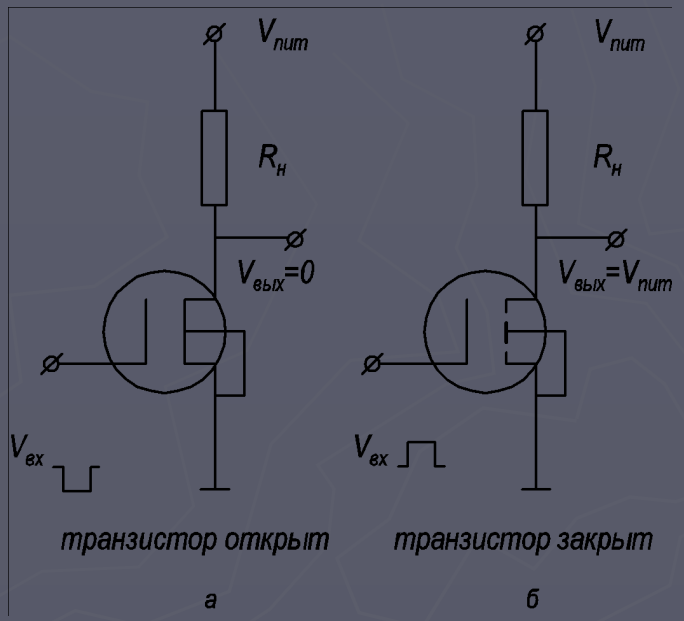
часть 2

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 *Rн* ≈ **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*Н и выходное напряжение *U*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*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.

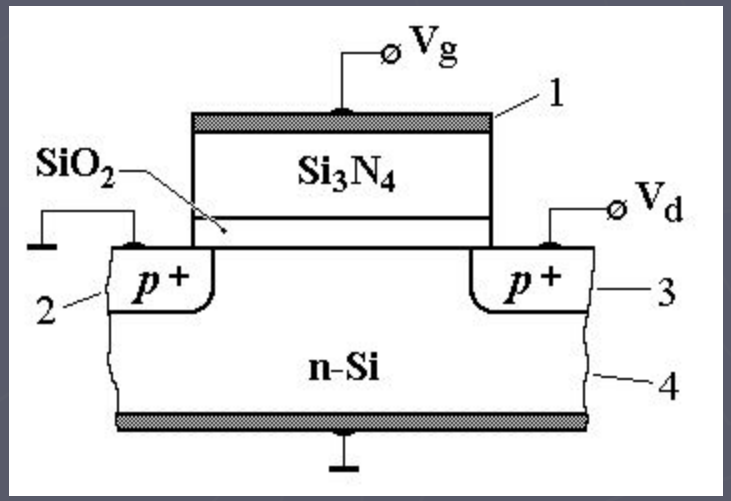


МДП-транзистор в качестве элемента запоминающего устройства
а) открытое состояние;
б) закрытое состояние

Мноп – транзистор (структура)

1. В структурах типа металл-нитрит-оксид-полупроводник (МНОП) диэлектрик под затвором - двухслойный: в качестве первого диэлектрика используется туннельно-прозрачный слой (dox < 50 A) SiO_2 , в качестве второго диэлектрика используется толстый (d ≈ 1000 A) слой Si_3N_4 .

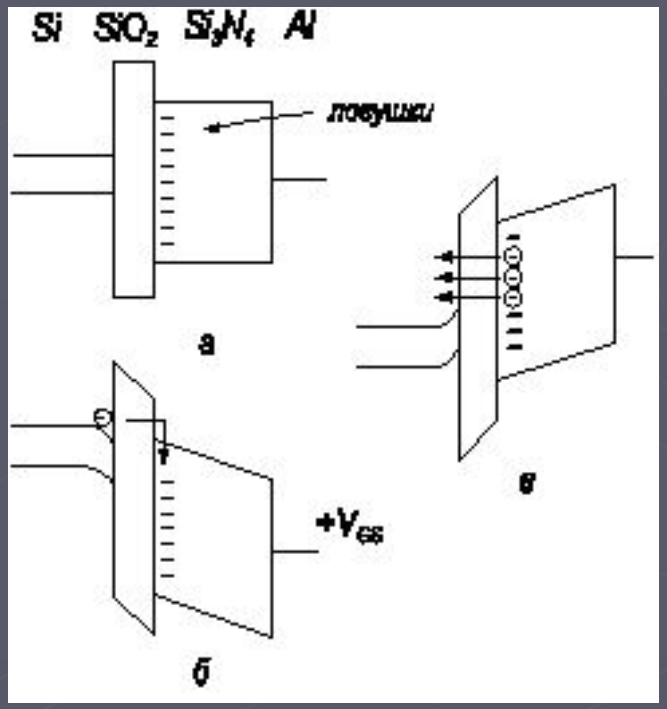
2. Нитрид кремния Si_3N_4 имеет глубокие ловушки в запрещенной зоне и значение диэлектрической постоянной ε Si_3N_4 в два раза более высокое, чем диэлектрическая постоянная двуокиси кремния SiO_2. Ширина запрещенной зоны нитрида Si_3N_4 меньше, чем ширина запрещенной зоны окисла SiO_2.



Физические процессы в МНОП ПТ

1. При подаче импульса положительного напряжения +Vgs (+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.



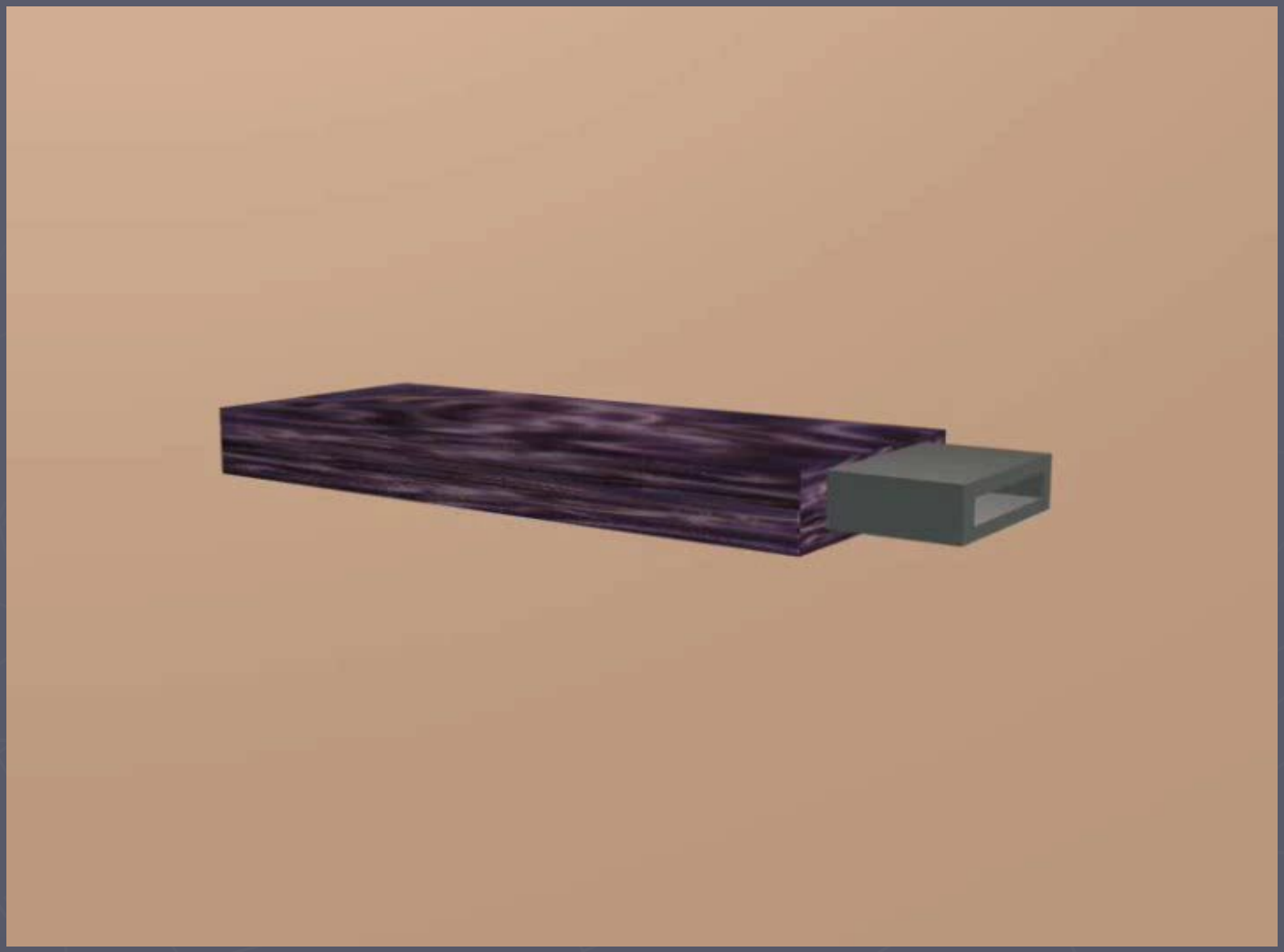
а) напряжение на затворе равно нулю, ловушки не заполнены

б) запись информационного заряда;

в) стирание информационного заряда

3. При подаче импульса отрицательного напряжения -Vgs (–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

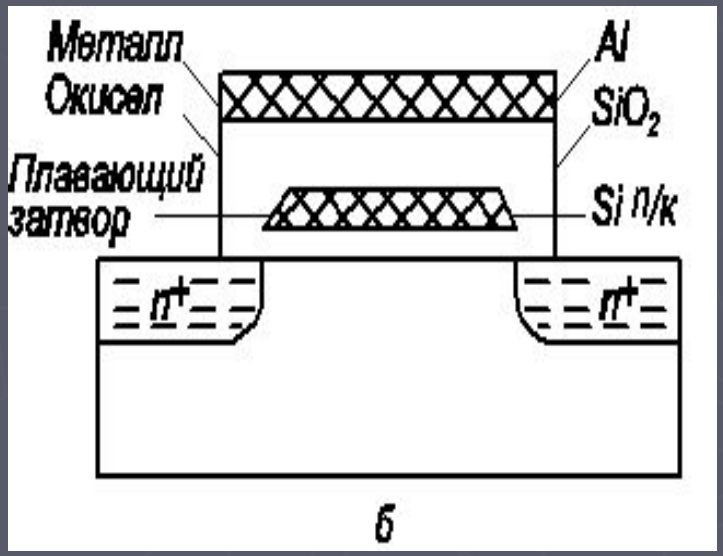
Анимация работы МНОП транзистора



- 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 105.
- 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 записывающему.

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.

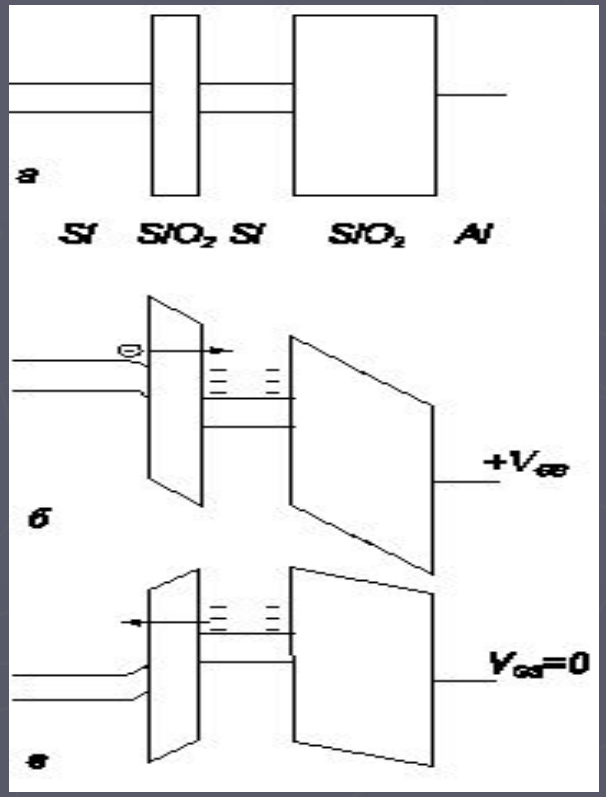


Схема, поясняющая устройство МОП ПТ с плавающим затвором, приведена на рисунке

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 накоплениянжектированного заряда на плавающем затворе полевого транзистора. Величина заряда $Q_{ox}(\tau)$ равна:

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

где $I(t)$ – величала 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:

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

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

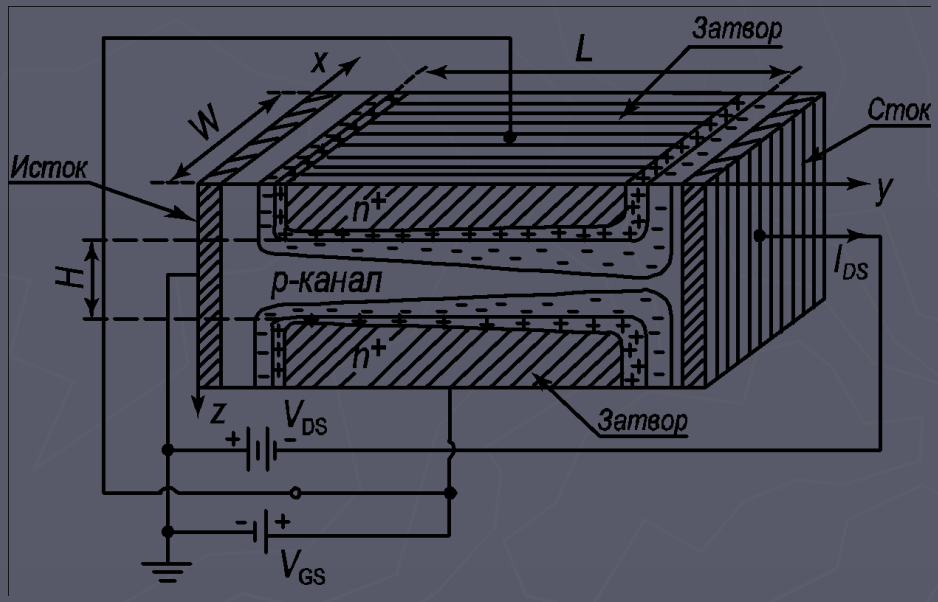
Накапливаемый на плавающем затворе инжектированный заряд $Q(\tau)$ будет вызывать уменьшение напряженности электрического поля E_{ox} в первом диэлектрике. Величина электрического поля E_{ox}, обуславливающая туннелирование, равна:

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

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* >> *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*

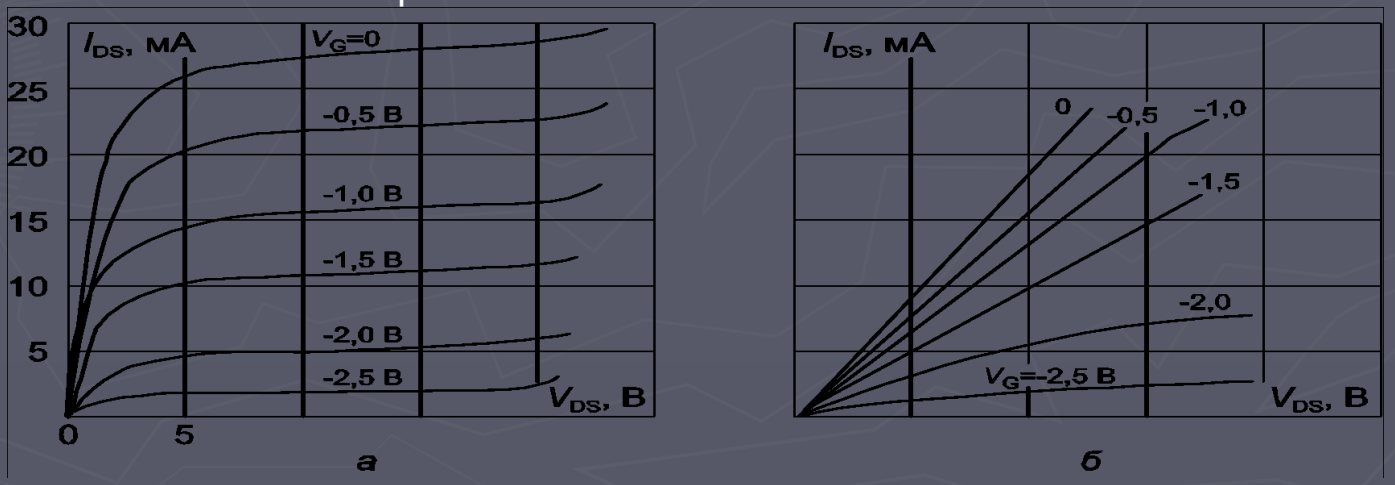
По мере роста напряжения исток-сток *V*ds точка отсечки перемещается от истока к стоку. При этом аналогично МДП ПТ наблюдаются независимость тока стока от напряжения на стоке и эффект модуляции длины канала. Зависимость тока стока *I*ds в области отсечки для полевого транзистора с затвором в виде *p-n* 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 $T = C_G * R_K$. Емкость затвора C_G и сопротивление канала R_K равны:

$$C_{\text{G}} = \frac{2\varepsilon_{\text{s}}\varepsilon_0 LW}{\Delta l_{\text{об}}}; \quad R_{\text{K}} = \frac{\rho L}{W(H - 2\Delta l_{\text{об}})}$$

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

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

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

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 *p-n* 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 *p-n* 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