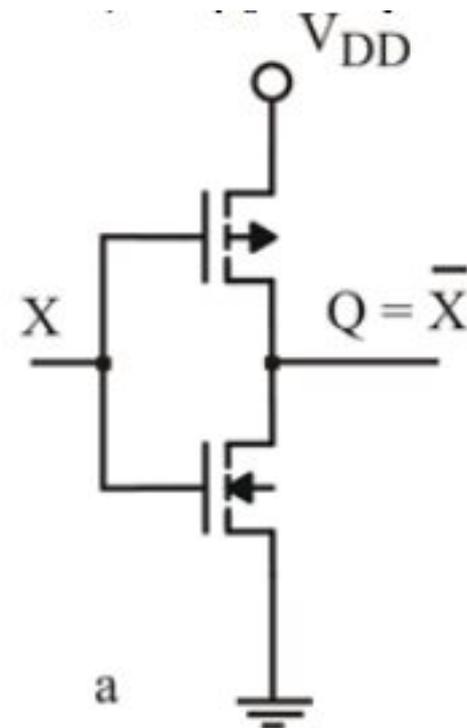
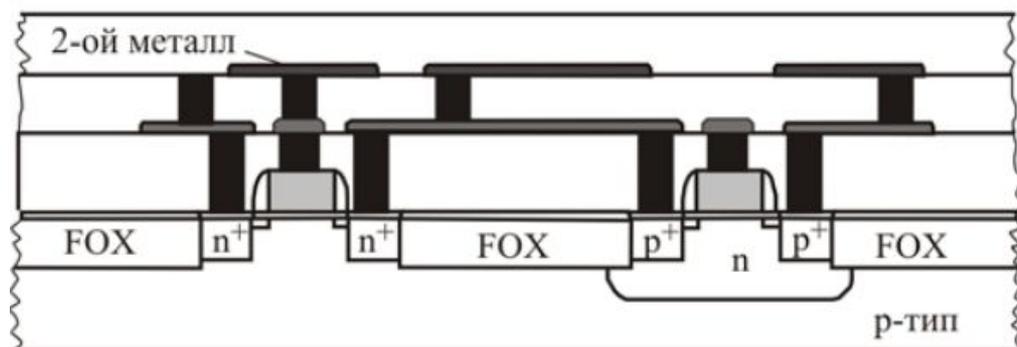


Лекция 2

- КМДП- инверторы. Структура. Принцип работы, реализация логических функций.
- Передаточная характеристика в КМДП-схеме. Напряжение и ток переключения, зависимость от размеров транзисторов и от числа входов.
- Эффект защелки в КМДП- схемах.

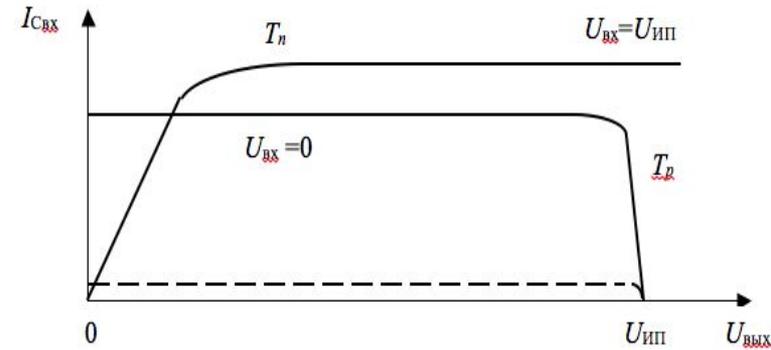
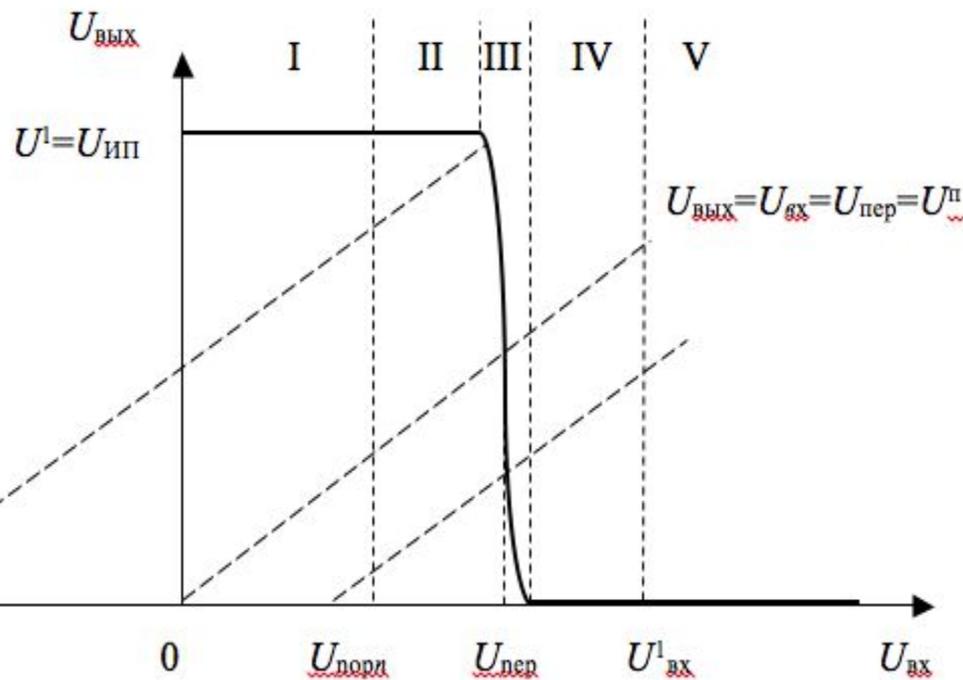
КМДП- инверторы. Структура. Принцип работы.



ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА КМДП-СХЕМ

- Потребление мощности в статическом состоянии пренебрежимо мало
- Высокая помехоустойчивость
(т.к. $U^0 = 0$, $U^1 = V_{dd}$)

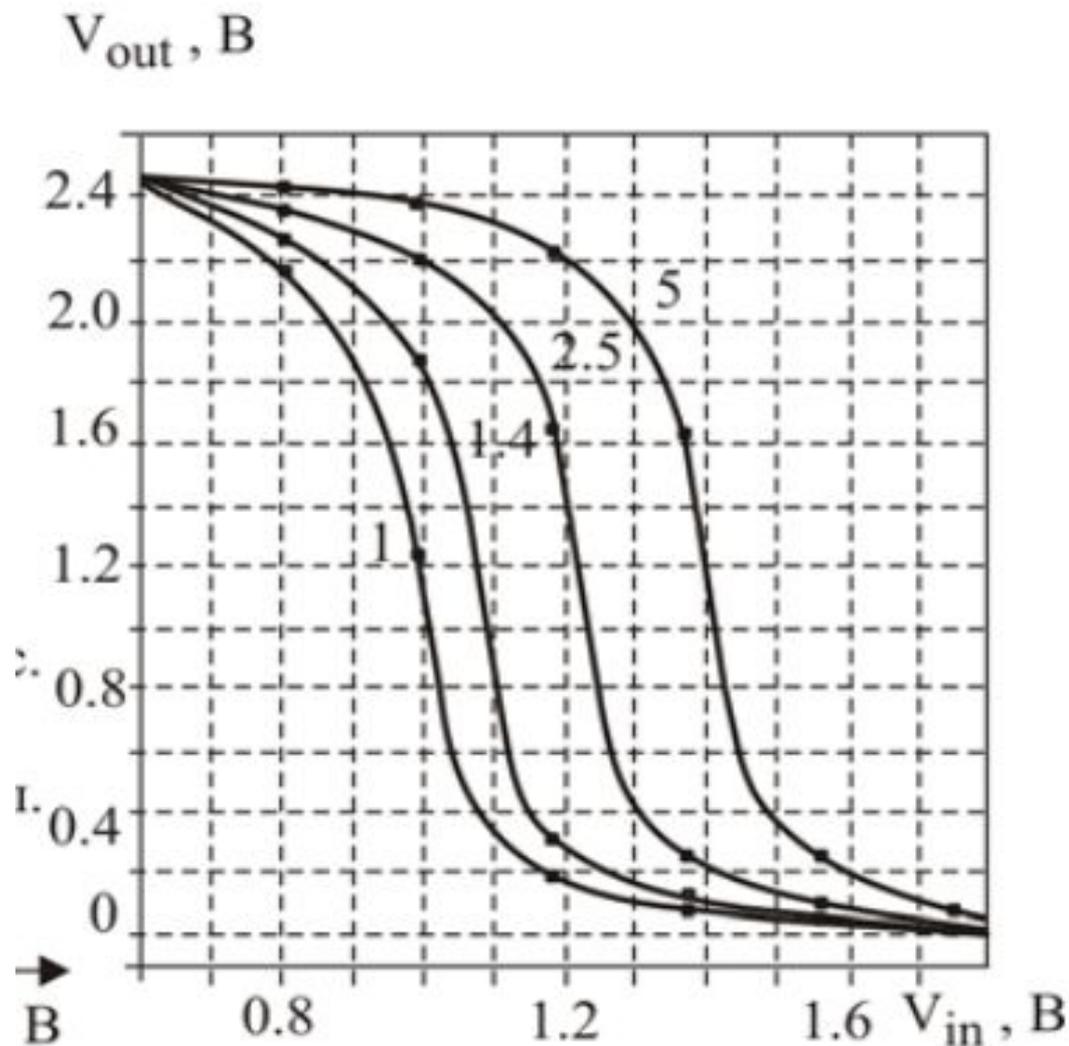
Передаточная характеристика в КМДП-схеме



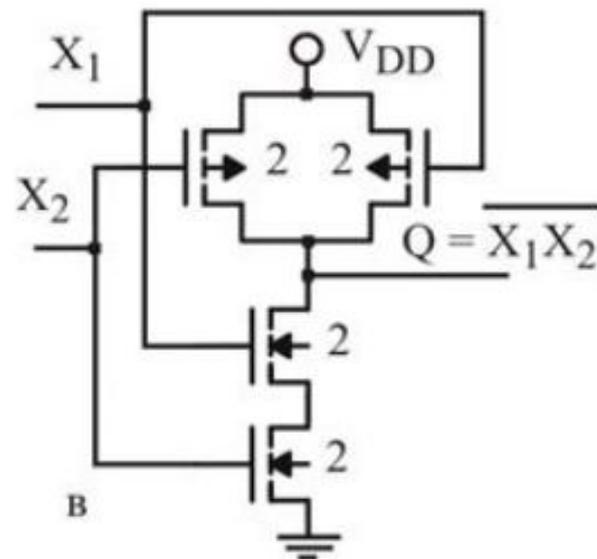
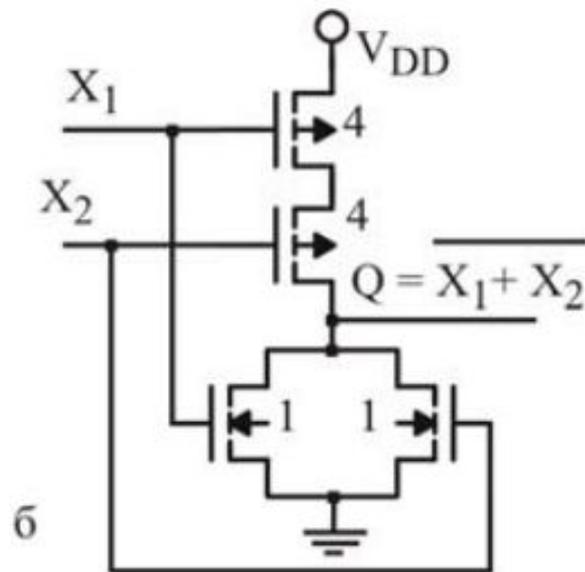
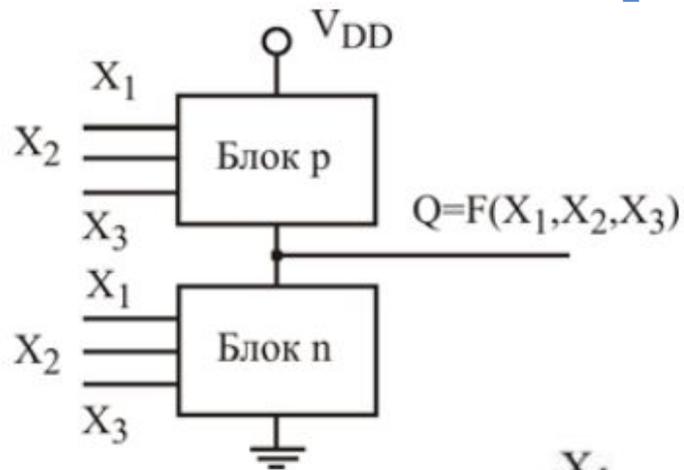
Задачи

1. Дано: KP , W , L , $U_{\text{ип}}$
 Определить выходной ток МДП-транзистора в любой точке передаточной характеристики.
2. Известно: KP , W , L (или β_n),
 $U_{\text{порп}}$, $U_{\text{порр}}$, $U_{\text{ип}}$
 Определить максимальный сквозной ток в МДП-транзист.

Передаточная характеристика Зависимость от отношения W_p/W_n

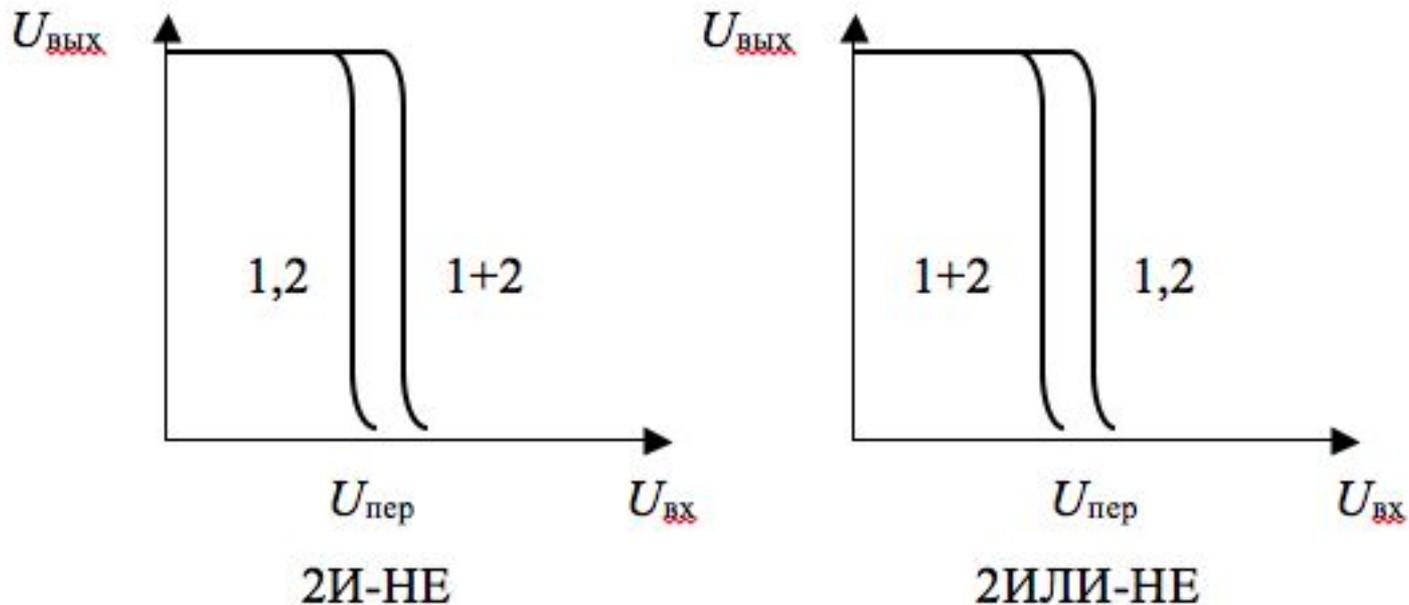


Реализация логических функций



Передаточная характеристика

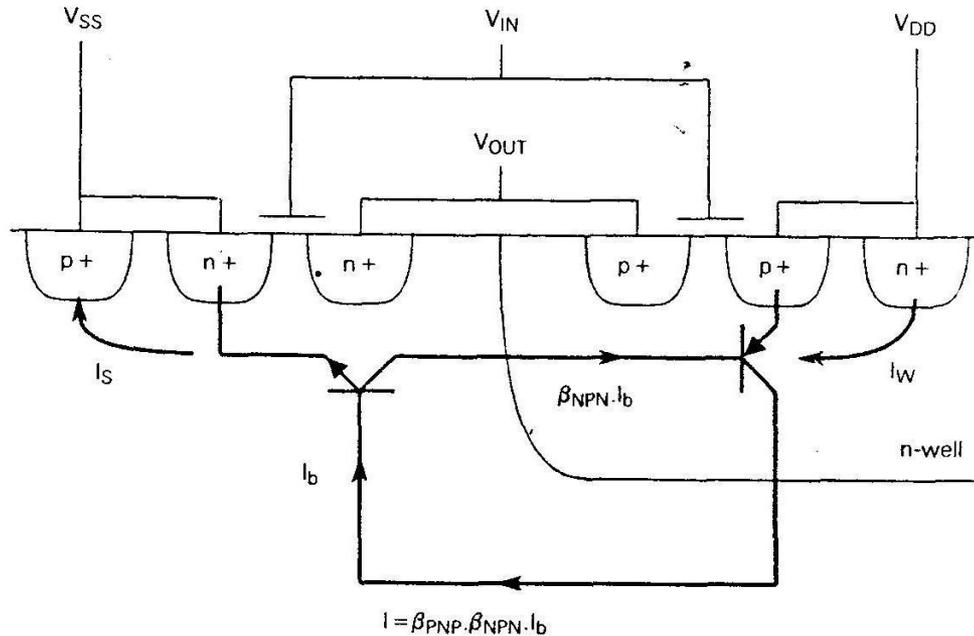
Зависимость от число входов



Смещение точки переключения КМДП в схемах 2-И-НЕ и 2-ИЛИ-НЕ для случаев, когда открыты все транзисторы (1+2) и по одной паре транзисторов (1, 2 - нижняя или верхняя)

Эффект защелки в КМДП- схемах

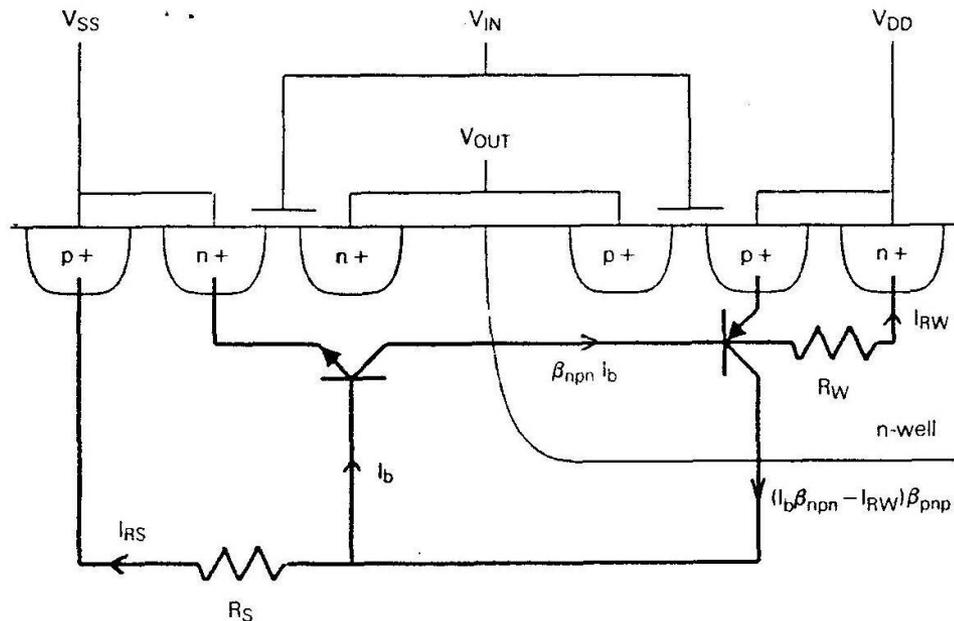
Паразитные биполярные транзисторы в КМДП-структуре



Паразитная тиристорная структура в интегральном КМДП–элементе

Условие защелкивания $\beta_{npn} \beta_{pnp} > 1$

Тиристорная структура с учетом сопротивлений кармана и подложки



Условие защелкивания с учетом паразитных сопротивлений

$$\beta_{npn} \beta_{pnp} > 1 + \frac{(\beta_{npn} + 1)(I_{RS} + I_{RW} \beta_{pnp})}{(I_T - I_{RS})}$$

$$I_{RS} \approx 0.7 / R_S,$$

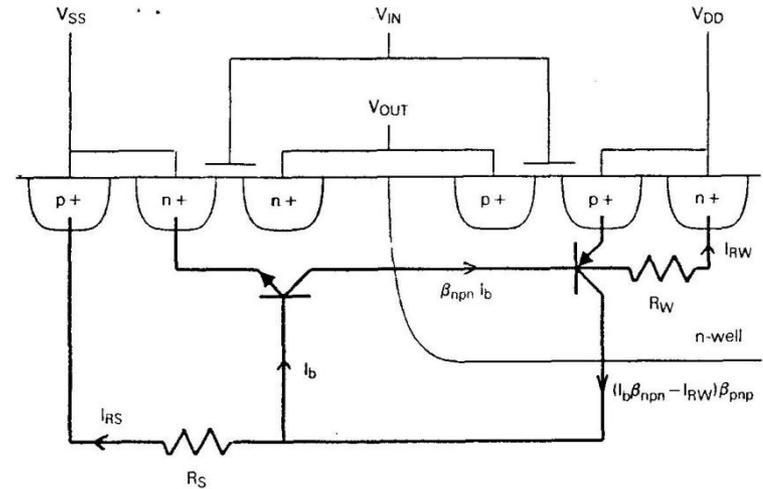
$$I_{RW} \approx 0.7 / R_W,$$

$$I_T = I_{RS} + I_b (\beta_{npn} + 1)$$

Характеристики паразитных элементов, участвующих в защелкивании

β_{npn} вертикального биполярного транзистора, зависит от:

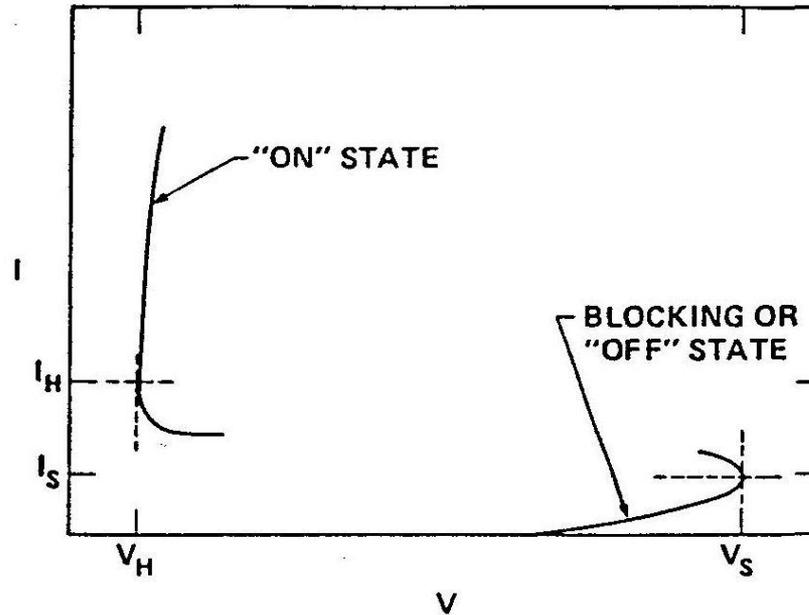
- глубины кармана,
- концентрации в кармане,
- встроенного поля в кармане.



β_{npn} латерального биполярного транзистора, зависит от:

- топологических размеров, определяющих ширину базы,
- концентрации примеси в области полевого окисла,
- глубины кармана.

Вольтамперная характеристика тиристора



I_S, V_S – ток и напряжение включения, I_H, V_H – ток и напряжение удержания

Испытания на устойчивость к защелкиванию в статическом режиме

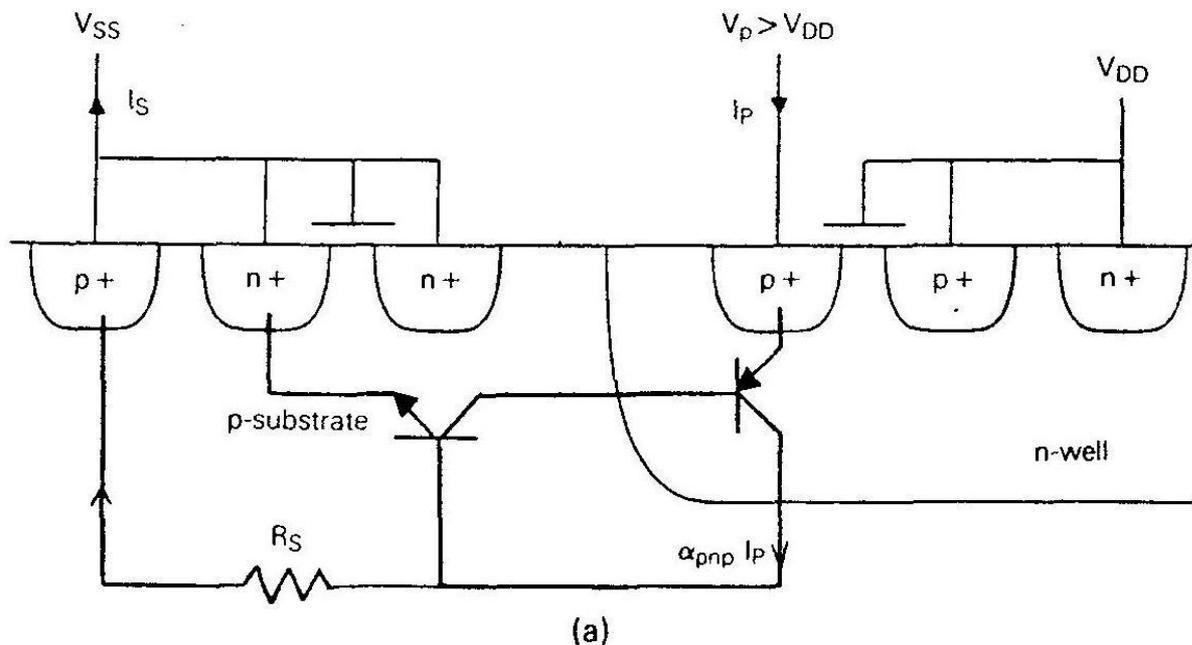


Схема включения тиристора открыванием $p^+ - n$ перехода

Условие включения тиристора

$$I_{RS} \approx 0.7 / R_S,$$

Испытания на устойчивость к защелкиванию в статическом режиме (2)

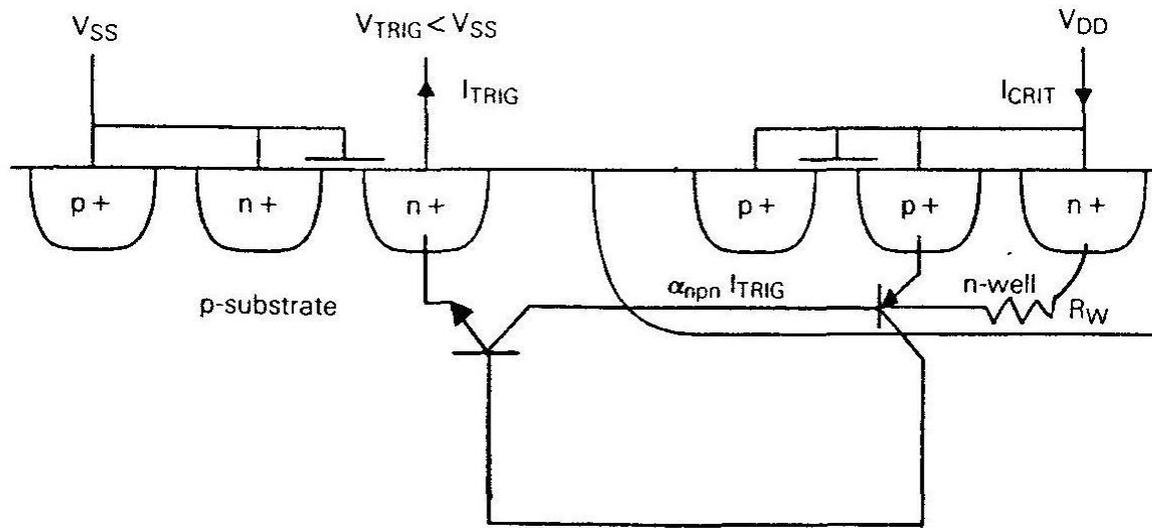


Схема включения тиристора открыванием n^+ -p перехода

Условие включения тиристора

$$I_{RW} \approx 0.7 / R_W$$

Методы подавления защелкивания

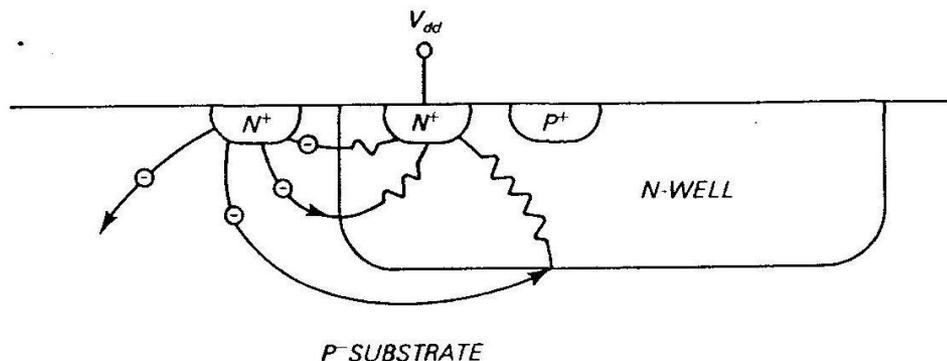
Технологические :

- уменьшение коэффициентов β паразитных биполярных транзисторов,
- использование ретроградного кармана,
- использование эпитаксиальных структур.

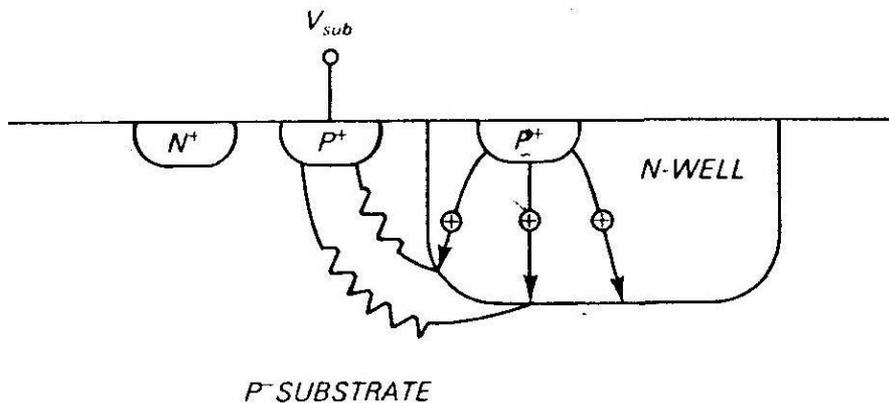
Топологические :

- размещение контактов к карману и подложке.
- охранные области, собирающие и блокирующие носителей заряда

Охранные области

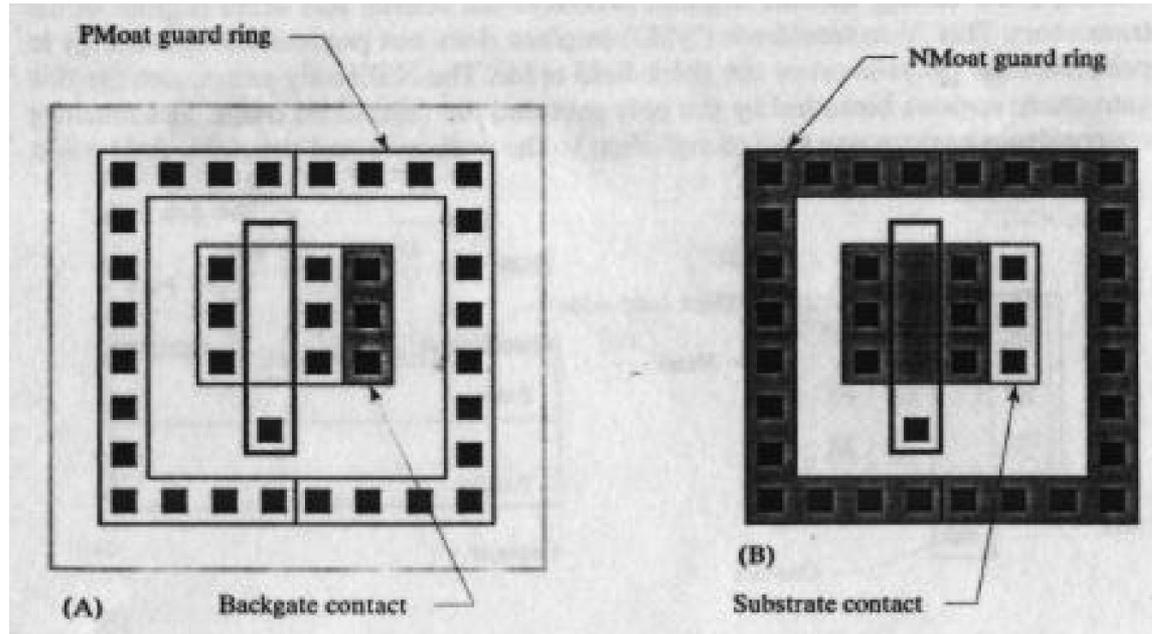


Охранная n^+ область для улавливания основных носителей в N - кармане



Охранная p^+ область для улавливания основных носителей в p – подложке

Топология МДП транзисторов с охранными кольцами

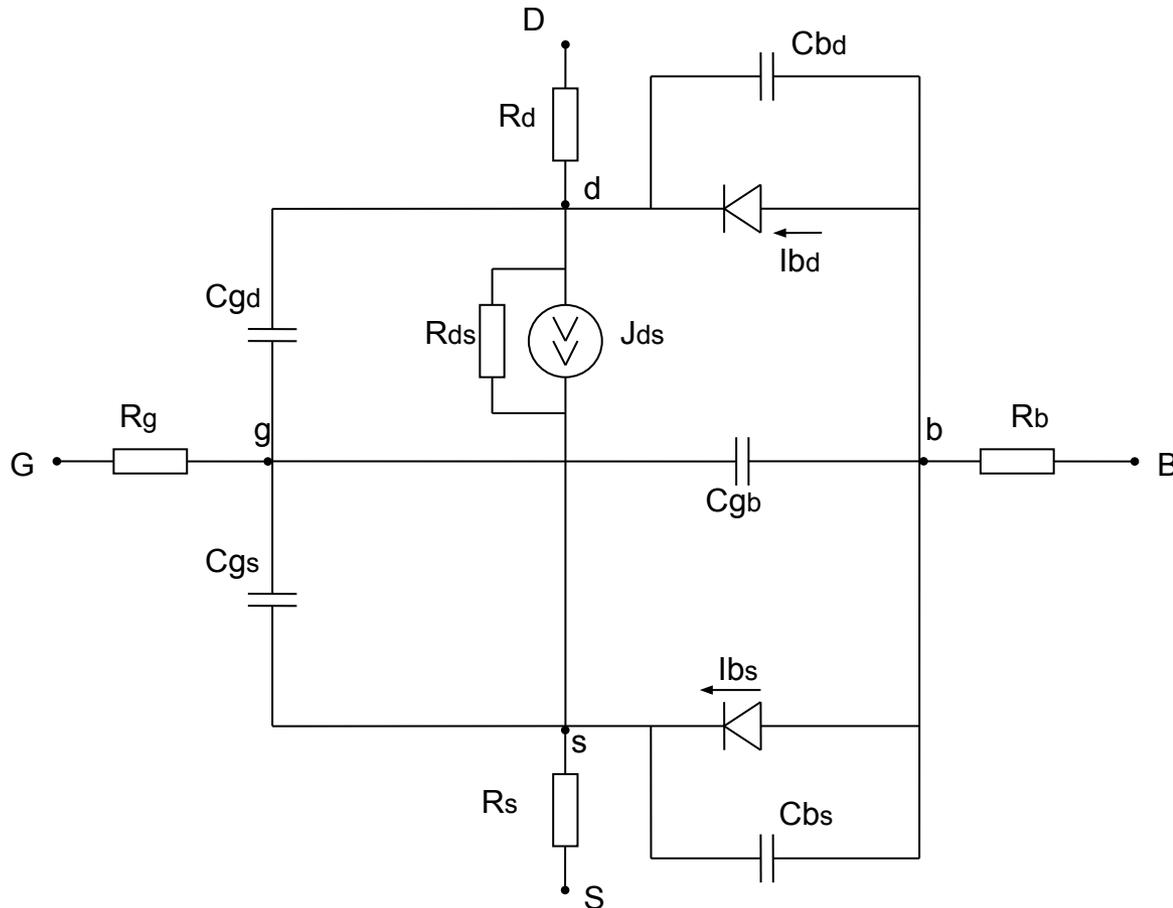


а) - р-МДП транзистор с р+ охранным кольцом, собирающим неосновные носители (дырки) в N-кармане

б) - n-МДП транзистор с n+ охранным кольцом, собирающим неосновные носители (электроны) в р-подложке

**Схемотехнические
модели
МДП-транзисторов**

Эквивалентная схема PSPICE модели МДП транзистора



$$I_{bs} = I_{ds} \left(e^{U_{bs}/\phi_T} - 1 \right)$$

$$I_{bd} = I_{ds} \left(e^{U_{bd}/\phi_T} - 1 \right)$$

$$I_b = I_{bs} + I_{bd}$$

LEVEL=1, 2, 3...

Модель level 1. Уравнения для токов

Отсечка: $I_c=0$

Крутая область $I_c = KP \frac{W}{L} (1 + LAMBDA * U_{cu}) * \left\{ (U_{zu} - U_{nop}) U_{cu} - \frac{U_{cu}^2}{2} \right\}$

Пологая область $I_c = KP \frac{W}{L} (1 + LAMBDA * U_{cu}) * \frac{(U_{zu} - U_{nop})^2}{2}$

$$U_{nop} = VTO + GAMMA \left[\sqrt{PHI - U} - \sqrt{PHI} \right]$$

$$VTO = V_{FB} + PHI + GAMMA \sqrt{PHI}$$

$$GAMMA = \frac{\sqrt{2\varepsilon_0 \varepsilon_{Si} q N_{\Pi}}}{C_{OK}}$$

Константы для расчета параметров модели

$q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$	$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
$n_i = 1.1 \times 10^{16} \text{ carriers/m}^3 \text{ at } T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$	$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
$K_{ox} \cong 3.9$	$K_s \cong 11.8$
$\mu_n = 0.05 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$\mu_p = 0.02 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$

$$\text{PHI} = (kT/q) \ln(N_A/n_i)$$

$$K_P = \mu C_{OK}$$

$$C_{OK} = \epsilon_0 \epsilon_{OK} / T_{OX}$$

Выходная проводимость и выходное сопротивление в полой области

$$g_{\text{вых}} = \frac{\partial I_{\text{снас}}}{\partial U_{\text{эфф}}} = \frac{I}{2L_{\text{П}}} \sqrt{\frac{S_i 2\varepsilon_0 \varepsilon}{qN (U_{\text{снас}} - U)}}$$

$$r_{\text{вых}} = \frac{1}{g_{\text{вых}}}$$

Модель level 2. Уравнения для токов

Используются уравнения модели Мейера (приближение плавного канала).

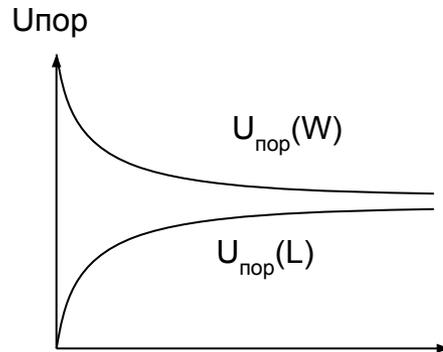
$$I_{vi} = \frac{W}{L^{nz} 2L_D} \frac{KP}{1 - LAMBDA * U_{cu}} * \left\{ (U - U_{cu} - PHI)U - \frac{U_{cu}^2}{2} - \right.$$

$$\left. - \frac{2}{3} GAMMA \left[(U_{cu} - U_{nu} - PHI)^{3/2} - (-U_{nu} + PHI)^{3/2} \right] \right\}$$

Учтены:

- эффект модуляции длины канала в пологой области,
- зависимость заряда в ОПЗ от U_{pi} и U_{cu} .

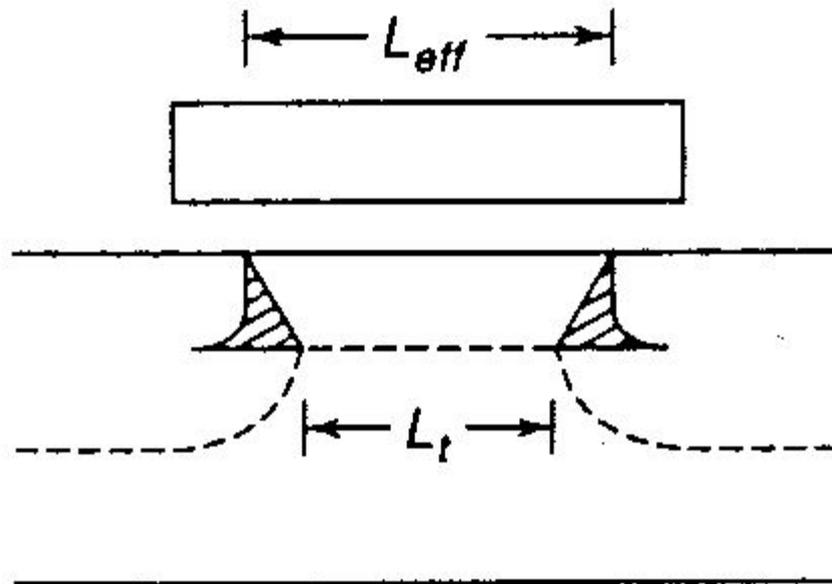
Модель level 2: три новых эффекта



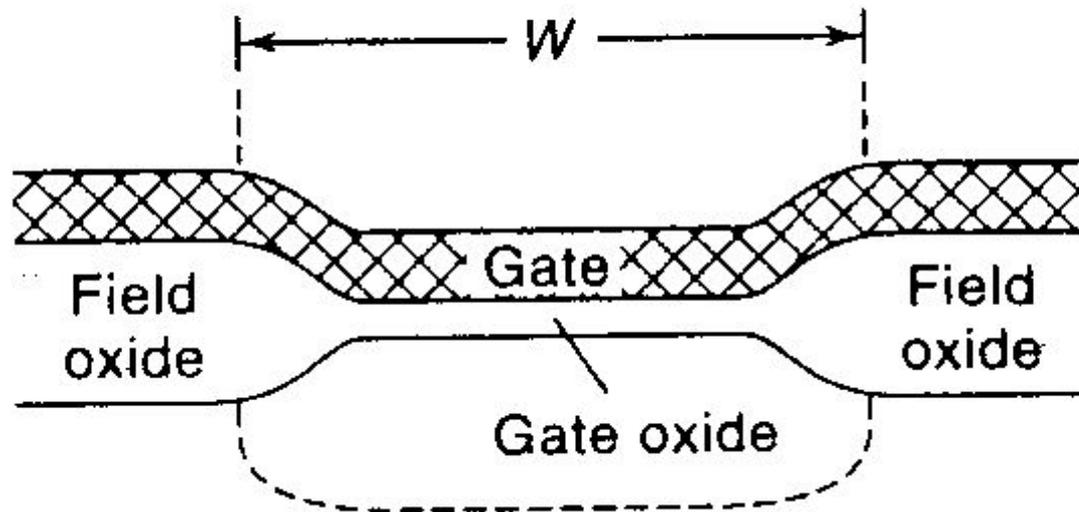
- **Эффект короткого канала (Зависимость порогового напряжения от длины канала)**
- **Эффект узкого канала (Зависимость порогового напряжения от ширины канала)**
- **Зависимость подвижности от поперечного электрического поля (поле затвора)**

Эффект короткого канала

Канал длинный, если $L_{\text{эфф}} \gg X_j$



Эффект узкого канала



Модель level 3. Использование полуэмпирических уравнений и параметров

$$\mu_{\text{эфф}} = U_0 * \frac{1}{1 + \text{THETA}(U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}})}$$

BSIM (Berkeley Short-channel IGFET model)

SPICE модели

$$P' = P + \frac{LP}{L - DL} + \frac{WP}{W - DW}$$

Представление
электрических параметров

Вычисление параметров для расчета порогового напряжения

$$VFB' = VFB + \frac{LVFB}{L - DL} + \frac{WVFB}{W - DW} = -0.97 + \frac{0.37}{2 - 0.64} + \frac{-0.047}{3 - 0.14} = -0.713 \text{ V}$$

$$PHI' = PHI + \frac{LPHI}{L - DL} + \frac{WPHI}{W - DW} = 0.75 + \frac{0}{2 - 0.64} + \frac{0}{3 - 0.14} = 0.75 \text{ V}$$

$$K1' = K1 + \frac{LK1}{L - DL} + \frac{WK1}{W - DW} = 1.49 + \frac{-0.5}{2 - 0.64} + \frac{0.28}{3 - 0.14} = 1.212 \text{ V}^{\frac{1}{2}}$$

$$K2' = K2 + \frac{LK2}{L - DL} + \frac{WK2}{W - DW} = 0.32 + \frac{-0.07}{2 - 0.64} + \frac{-0.14}{3 - 0.14} = 0.224$$

$$ETA' = ETA + \frac{LETA}{L - DL} + \frac{WETA}{W - DW} = -0.012 + \frac{0.054}{2 - 0.64} + \frac{-0.027}{3 - 0.14} = 0.02$$

$$X2E' = X2E + \frac{LX2E}{L - DL} + \frac{WX2E}{W - DW} = -0.003 + \frac{-0.0072}{2 - 0.64} + \frac{-0.0056}{3 - 0.14} = -0.01$$

$$X3E' = X3E + \frac{LX3E}{L - DL} + \frac{WX3E}{W - DW} = -0.0004 + \frac{-0.003}{2 - 0.64} + \frac{-0.004}{3 - 0.14} = -0.003$$

$$ETADB' = 0.02 + (-0.01)(-5) + (-0.003)(2 - 5) = 0.079$$