

Dispositivi e Tecnologie Elettroniche

Esercitazione

Transistore MOS

Esercizio 1: testo

- *Si consideri un sistema MOS costituito da un substrato di Si con drogaggio $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, uno strato di ossido di silicio SiO_2 e il gate di silicio policristallino drogato n^+ .*
- *Determinare*
 - ◆ lo spessore di ossido necessario ad ottenere una tensione di soglia di 1.3 V.
 - ◆ la tensione di substrato necessaria per innalzare la tensione di soglia del 30%.

Esercizio 1: soluzione

- *Si tratta di un sistema MOS a canale n.*

$$V_{th} = V_{FB} + 2\phi_p + \gamma_B \sqrt{2\phi_p} = V_{FB} + 2\phi_p - \frac{Q_d}{C_{ox}}$$

- *Si ha*

$$\phi_p = V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.35V$$

- *Poichè il gate è di polisilicio: $\Phi_M = \chi_S = 4.05 V$*

- *La tensione di banda piatta risulta*

$$V_{FB} = \Phi_M - \Phi_{Sp} = \chi_S - \left(\chi_S + E_g/q - V_T \ln \frac{N_v}{N_A} \right)$$

Esercizio 1: soluzione

■ **Per il Si** $E_g = 1.12 \text{ eV}$ e $N_v = 1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$:

$$V_{\text{FB}} = -0.94 \text{ V}$$

■ **La carica nella regione svuotata** ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ dove $\epsilon_r = 11.7$ nel Si)

$$Q_d = -\sqrt{2q\epsilon N_A} \sqrt{2\phi_p} = -4.817 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$$

■ **Infine perchè sia** $V_{\text{th}} = 1.3 \text{ V}$:

$$C_{\text{ox}} = \frac{-Q_d}{V_{\text{th}} - V_{\text{FB}} - 2\phi_p} = 3.12 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$$

Esercizio 1: soluzione

■ **Poiché:**

$$C_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_{\text{ox}}}{t_{\text{ox}}}$$

con $\epsilon_{\text{ox}} = \epsilon_0 \epsilon_{\text{r,ox}}$ ($\epsilon_{\text{r,ox}} = 3.9$ nel SiO_2), **si ottiene lo spessore di ossido richiesto:**

$$t_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_{\text{ox}}}{C_{\text{ox}}} = 110.6 \text{ nm}$$

■ **La variazione della tensione di soglia del sistema MOS a canale n per effetto della tensione di substrato è:**

$$\Delta V_{\text{th}} = \gamma_{\text{B}} \left[\sqrt{(2\phi_p - V_{\text{B}})} - \sqrt{2\phi_p} \right]$$

Esercizio 1: soluzione

■ *Il coefficiente di effetto body vale:*

$$\gamma_B = \frac{\sqrt{2q\epsilon N_A}}{C_{ox}} = 1.845 \text{ V}^{1/2}$$

■ *Per ottenere $\Delta V_{th} = 0.3V_{th} = 0.39 \text{ V}$:*

$$V_B = - \left(\frac{\Delta V_{th}}{\gamma_B} + \sqrt{2\phi_p} \right)^2 + 2\phi_p = -0.398 \text{ V}$$

Esercizio 2: testo

- ***Su un dispositivo MOSFET a canale n sono eseguite alcune misure riassunte nella seguente tabella***

$$I_{DS1} = 1 \text{ mA} \quad V_{GS1} = 2.0 \text{ V} \quad V_{DS1} = 4.5 \text{ V}$$

$$I_{DS2} = 1 \text{ mA} \quad V_{GS2} = 2.0 \text{ V} \quad V_{DS2} = 3.0 \text{ V}$$

$$I_{DS3} = 15 \text{ mA} \quad V_{GS3} = 5.0 \text{ V} \quad V_{DS3} = 2.0 \text{ V}$$

- ***Sapendo che la mobilità degli elettroni nel canale è $\mu_n = 1400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ e che $W/L = 1$, calcolare***

- ◆ la tensione di soglia
- ◆ lo spessore dell'ossido del dispositivo
- ◆ il tempo di crescita in ambiente O_2 con $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Esercizio 2: soluzione

■ Per un MOSFET a canale n :

$$I_{DS} = \begin{cases} \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[(V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] & V_{DS} < V_{GS} - V_{th} \\ \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_{th})^2 & V_{DS} > V_{GS} - V_{th} \end{cases}$$

- ◆ Le prime due misure sono in regione di saturazione poichè I_{DS} è costante.
- ◆ La terza misura non può essere in saturazione poichè

$$V_{DS3} > V_{GS3} - V_{th} \Rightarrow V_{th} > 3 \text{ V}$$

in contrasto con le prime due misure (per $V_{GS1} = 2 \text{ V}$ il transistorore è sopra soglia $\Rightarrow V_{th} < 2 \text{ V}$).

Esercizio 2: soluzione

■ **Dal sistema:**

$$\begin{cases} I_{DS1} = \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_{GS1} - V_{th})^2 \\ I_{DS3} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[(V_{GS3} - V_{th}) V_{DS3} - \frac{1}{2} V_{DS3}^2 \right] \end{cases}$$

■ **posto** $\alpha = I_{DS1}/I_{DS3}$, **si ottiene una equazione di secondo grado in** V_{th} :

$$V_{th}^2 - 2(V_{GS1} - \alpha V_{DS3}) V_{th} + [V_{GS1}^2 + \alpha (V_{DS3}^2 - 2V_{DS3} V_{GS3})]$$

■ **Delle due soluzioni**

$$V_{th1} = 1.12 \text{ V} \quad \text{e} \quad V_{th2} = 2.61 \text{ V}$$

solo $V_{th1} < 2 \text{ V}$ **è accettabile.**

■ **Si verifica che le misure n. 1 e 2 sono effettivamente prese in saturazione al contrario della misura n. 3.**

Esercizio 2: soluzione

■ *Si ha anche*

$$C_{\text{ox}} = \frac{2 I_{\text{DS1}}}{\mu_n \frac{W}{L} (V_{\text{GS1}} - V_{\text{th}})^2} = 0.0186 \text{ F/m}^2$$

da cui

$$t_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_{\text{ox}}}{C_{\text{ox}}} = 185.5 \text{ nm}$$

■ *in ambiente secco (O_2) a 800°C per l'orientazione $\langle 111 \rangle$ si ottiene un tempo di crescita $t \simeq 3\text{h}$.*

Esercizio 3: testo

■ *Si consideri un transistoro MOS a canale n con gate in poly, caratterizzato da:*

◆ $N_A = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $L = 6 \mu\text{m}$, $W = 4 \mu\text{m}$,
 $t_{\text{ox}} = 50 \text{ nm}$, $\mu_n = 1417 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

◆ $V_{\text{GS}} = V_{\text{DS}} = V_{\text{DD}} = 5 \text{ V}$.

■ *Si riscala il dispositivo del fattore $K = 2$:*

◆ $L' = L/K$, $W' = W/K$, $t'_{\text{ox}} = t_{\text{ox}}/K$

◆ $N'_A = K \times N_A$

◆ $V'_{\text{DD}} = V_{\text{DD}}/K$

■ *Discutere la potenza dissipata per unità di area*

Esercizio 3: soluzione

■ **Prima del riscaldamento si ha:**

◆ $V_{\text{FB}} = -0.982 \text{ V}$, $\phi_p = 0.389 \text{ V}$,
 $C_{\text{ox}} = 6.9 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$, $Q_d = -1.136 \times 10^{-7} \text{ C/cm}^2$,
 $\Rightarrow V_{\text{th}} = 1.44 \text{ V}$.

■ **Poiché $V_{\text{DS}} = V_{\text{GS}} > V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}$ il MOS è in saturazione**

$$I_{\text{DS}} = \frac{1W}{2L} \mu_n C_{\text{ox}} (V_{\text{DD}} - V_{\text{th}})^2 = 408 \mu\text{A}$$

■ **La potenza dissipata è:**

$$P_{\text{D}} = I_{\text{DS}} \times V_{\text{DD}} = 2.04 \text{ mW}$$

Esercizio 3: soluzione

■ *Il dispositivo riscaldato ha:*

◆ $V'_{FB} = -0.999 \text{ V}$, $\phi'_p = 0.4 \text{ V}$, $C'_{ox} = 13.8 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$,
 $Q'_d = -1.64 \times 10^{-7} \text{ C/cm}^2$, $\Rightarrow V'_{th} = 1.003 \text{ V}$.

◆ La tensione di soglia non scala con il fattore K .

■ *Poichè $V'_{DS} = V'_{GS} > V'_{GS} - V'_{th}$ il MOS è in saturazione*

$$I'_{DS} = \frac{1W'}{2L'} \mu_n C'_{ox} (V'_{DD} - V'_{th})^2 = 144 \mu\text{A}$$

con $V'_{DD} = 2.5 \text{ V}$

■ *La potenza dissipata è:*

$$P'_D = I'_{DS} \times V'_{DD} = 0.36 \text{ mW}$$

Esercizio 3: soluzione

- *Nella stessa area dopo il riscaldamento si possono integrare **4 dispositivi al posto di uno.***
- *Per il dispositivo scalato*

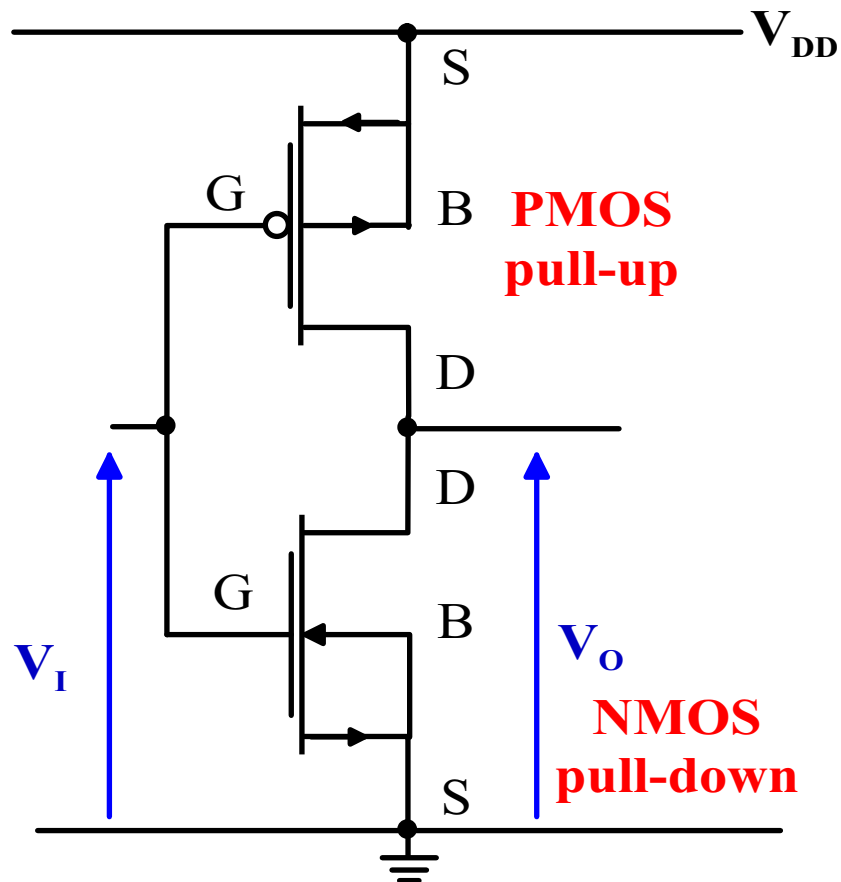
$$P'_D < \frac{P_D}{K^2}$$

- *La potenza dissipata per unità di area non è cresciuta, anzi è di poco diminuita*
- *Il riscaldamento può quindi essere utilizzato nella fabbricazione di circuiti integrati*

Esercizio 3: soluzione

- *Questo tipo di riscaldamento è detto **a campo costante***
- *Problematiche*
 - ◆ Il drogaggio del substrato deve venire aumentato
 - ◆ Lo spessore dell'ossido deve essere diminuito
 - ◆ La tensione di alimentazione del circuito deve essere scalata, mantenendo bassa la dissipazione di potenza ma diminuendo i margini di rumore delle porte logiche.
- *Occorrono strategie di scalamento più raffinate*

Esercizio 4: testo



- È un circuito per applicazioni digitali
 $V = V_{DD} \Rightarrow 1$ logico
 $V = 0 \Rightarrow 0$ logico

- Si tratta di un inverter CMOS:
realizza l'inversione del segnale digitale

$$V_I = \text{"1"} \Rightarrow V_O = \text{"0"}$$

$$V_I = \text{"0"} \Rightarrow V_O = \text{"1"}$$

Esercizio 4: testo

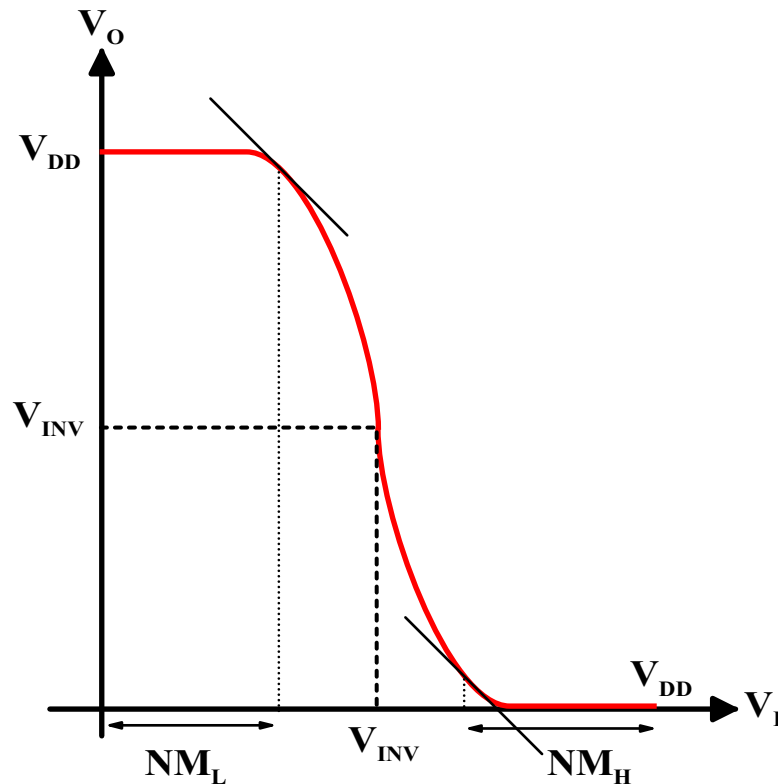
■ *Supponendo*

$$V_{th,p} = -V_{th,n}$$

$$\mu_n = 1294 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$t_{ox} = 50 \text{ nm}$$

$$\mu_p = 435 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$



■ *dimensionare i MOS in modo che la tensione di inversione*

$$V_{inv} = \frac{1}{2} V_{DD}$$

Esercizio 4: soluzione

- *Il comportamento qualitativo del circuito si ricava osservando*

$$\begin{array}{ll} V_{GS,n} = V_I & V_{GS,p} = V_I - V_{DD} \\ V_{DS,n} = V_O & V_{DS,p} = V_O - V_{DD} \end{array}$$

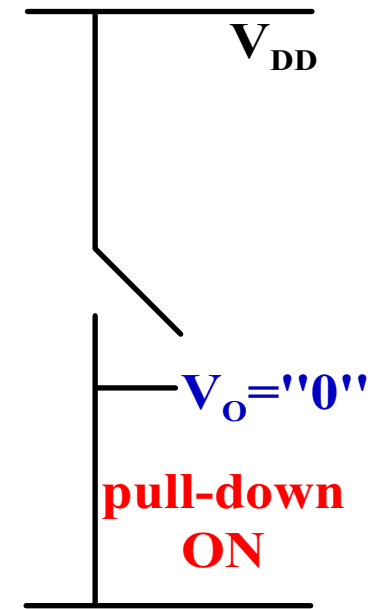
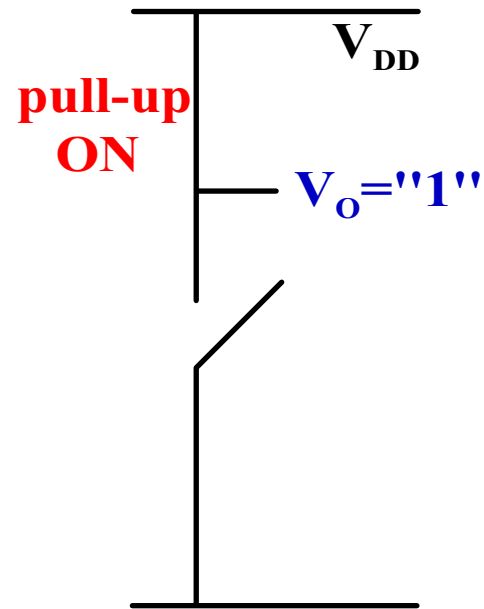
- **Se** $V_I = 0 = \text{“0”}$

il pMOS (pull-up) conduce
il nMOS (pull-down) è interdetto } $\Rightarrow V_O = \text{“1”}$

- **Se** $V_I = V_{DD} = \text{“1”}$

il pMOS (pull-up) è interdetto
il nMOS (pull-down) conduce } $\Rightarrow V_O = \text{“0”}$

Esercizio 4: soluzione



■ *Per valori della tensione di ingresso crescenti tra 0 e V_{DD} si può osservare come varia la tensione di uscita:*

◆ *transcaratteristica dell'inverter*

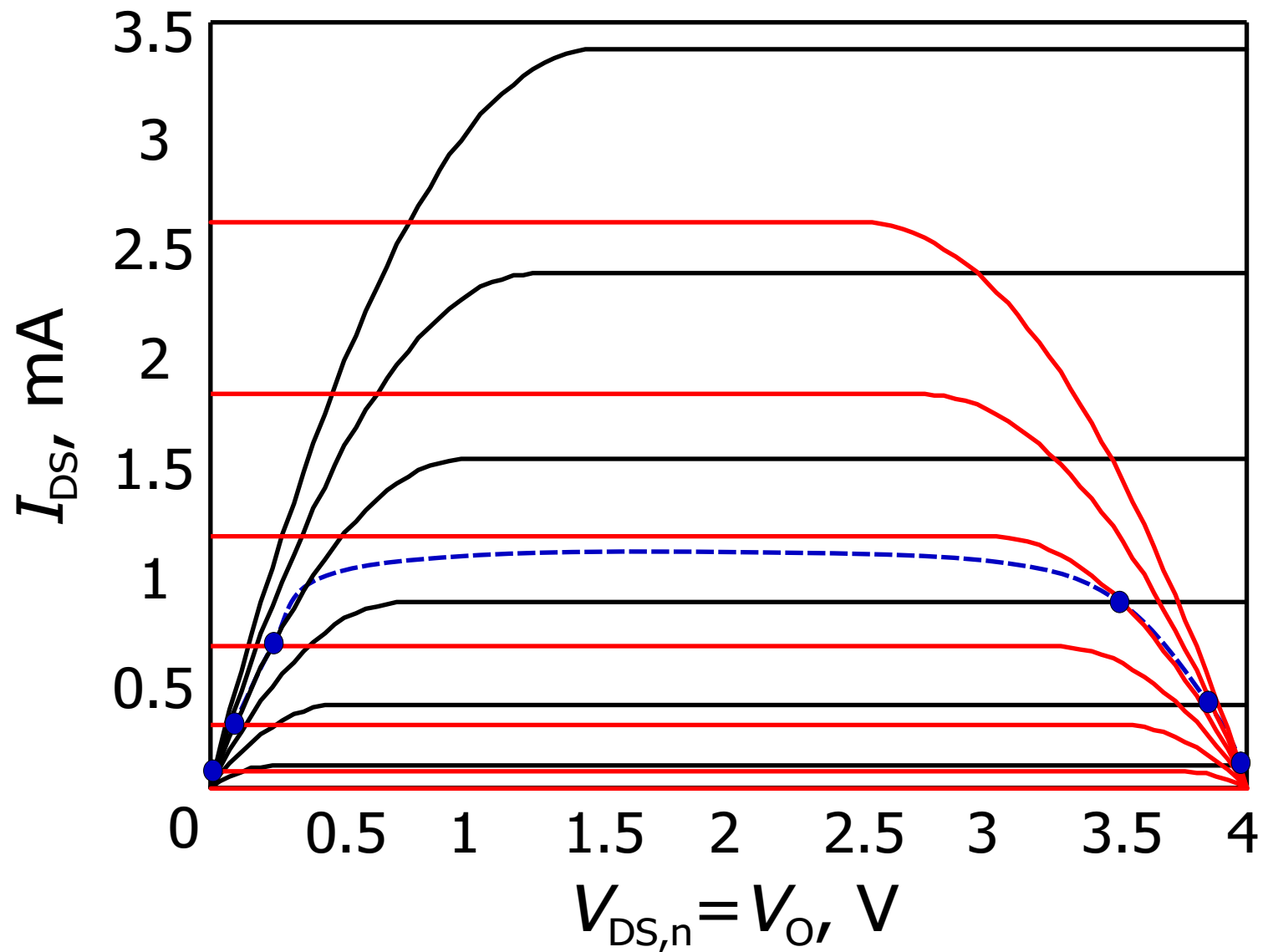
■ *Si determinano i margini di rumore*

Esercizio 4: soluzione

■ *Se V_I varia tra 0 e V_{DD} si osservano cinque regioni di funzionamento*

- 1 Il p MOS è in zona lineare, il n MOS in saturazione (con correnti molto basse)
- 2 Il p MOS è in zona triodo, il n MOS in saturazione (inizio della inversione)
- 3 Il p MOS e il n MOS sono entrambi in saturazione (inversione)
- 4 Il p MOS è in saturazione, il n MOS in zona triodo (fine della inversione)
- 5 Il p MOS è in saturazione (con correnti molto basse), il n MOS in zona lineare

Esercizio 4: soluzione



Esercizio 4: soluzione

- **All'inversione** ($V_I = V_O = V_{DD}/2$) **entrambi i MOS sono in saturazione**
- **La corrente del nMOS e quella del pMOS sono uguali**

- **Ponendo** $\beta_n = \frac{W_n \mu_n C_{ox}}{L_n}$ e $\beta_p = \frac{W_p \mu_p C_{ox}}{L_p}$:

$$\frac{1}{2}\beta_n (V_{GS,n} - V_{th,n})^2 = \frac{1}{2}\beta_p (V_{GS,p} - V_{th,p})^2$$

- **da cui**

$$\frac{1}{2}\beta_n (V_I - V_{th,n})^2 = \frac{1}{2}\beta_p (V_I - V_{DD} - V_{th,p})^2$$

Esercizio 4: soluzione

■ *Risolvendo rispetto a $V_I = V_{inv}$ si ottiene*

$$V_{inv} = \frac{V_{DD} + V_{th,p} + V_{th,n} \sqrt{\frac{\beta_n}{\beta_p}}}{1 + \sqrt{\frac{\beta_n}{\beta_p}}}$$

■ *perchè sia $V_{inv} = V_{DD}/2$ deve essere:*

$$\beta_n = \beta_p$$

Esercizio 4: soluzione

■ Poichè i due MOS hanno uguale spessore di ossido si ha C_{ox} uguale in entrambi

■ Per ipotesi è $V_{th,p} = -V_{th,n}$

■ Supponendo per entrambi i MOS una lunghezza di canale minima $L_n = L_p$, la condizione $\beta_n = \beta_p$ è verificata se

$$\frac{W_p}{W_n} = \frac{\mu_n}{\mu_p} = 2.97 \simeq 3$$

■ Il pull-up deve avere larghezza pari a 3 volte il pull-down