Dispositivi Elettronici

Esercitazione

Transistore MOS

Esercizio 1: testo

- ***Si consideri un sistema MOS costituito da un substrato di Si con drogaggio*** $N_\mathrm{A} = 10^{16}\ \mathrm{cm}^{-3}$***, 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.**

$$V_{\text{th}} = V_{\text{FB}} + 2\phi_p + \gamma_{\text{B}}\sqrt{2\phi_p} = V_{\text{FB}} + 2\phi_p - \frac{Q_{\text{d}}}{C_{\text{ox}}}$$

- ***Si ha***

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

- ***Poichè il gate è di polisilicio:*** $\Phi_{\text{M}} = \chi_{\text{S}} = 4.05$ ***V***
- ***La tensione di banda piatta risulta***

$$V_{\text{FB}} = \Phi_{\text{M}} - \Phi_{\text{S}p} = \chi_{\text{S}} - \left(\chi_{\text{S}} + E_{\text{g}}/q - V_T \ln\frac{N_{\text{v}}}{N_{\text{A}}}\right)$$

Esercizio 1: soluzione

- ***Per il Si*** $E_{\mathrm{g}} = 1.12\ \mathrm{eV}$ ***e*** $N_{\mathrm{v}} = 1.04 \times 10^{19}\ \mathrm{cm}^{-3}$***:***

$$V_{\mathrm{FB}} = -0.94\,\mathrm{V}$$

- ***La carica nella regione svuotata (***$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_{\mathrm{r}}$ ***dove*** $\epsilon_{\mathrm{r}} = 11.7$ ***nel Si)***

$$Q_{\mathrm{d}} = -\sqrt{2\mathrm{q}\epsilon N_A}\sqrt{2\phi_p} = -4.817 \times 10^{-8}\,\mathrm{C/cm^2}$$

- ***Infine perchè sia*** $V_{\mathrm{th}} = 1.3\mathrm{V}$***:***

$$C_{\mathrm{ox}} = \frac{-Q_{\mathrm{d}}}{V_{\mathrm{th}} - V_{\mathrm{FB}} - 2\phi_p} = 3.12 \times 10^{-8}\,\mathrm{F/cm^2}$$

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:***

$$\gamma_{\mathrm{B}} = \frac{\sqrt{2\mathrm{q}\epsilon N_A}}{C_{\mathrm{ox}}} = 1.845\ \mathrm{V}^{1/2}$$

- ***Per ottenere*** $\Delta V_{\mathrm{th}} = 0.3 V_{\mathrm{th}} = 0.39\ \mathrm{V}$***:***

$$V_{\mathrm{B}} = -\left(\frac{\Delta V_{\mathrm{th}}}{\gamma_{\mathrm{B}}} + \sqrt{2\phi_p}\right)^2 + 2\phi_p = -0.398\ \mathrm{V}$$

Esercizio 2: testo

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

$$
\begin{array}{lll}
I_{DS1} = 1\ \mathrm{mA} & V_{GS1} = 2.0\,\mathrm{V} & V_{DS1} = 4.5\,\mathrm{V} \\
I_{DS2} = 1\ \mathrm{mA} & V_{GS2} = 2.0\,\mathrm{V} & V_{DS2} = 3.0\,\mathrm{V} \\
I_{DS3} = 15\,\mathrm{mA} & V_{GS3} = 5.0\,\mathrm{V} & V_{DS3} = 2.0\,\mathrm{V}
\end{array}
$$

- ***Sapendo che la mobilità degli elettroni nel canale è*** $\mu_n = 1400\,\mathrm{cm}^2/\mathrm{Vs}$ ***e che*** $W/L = 1$***, calcolare***
  - la tensione di soglia
  - lo spessore dell'ossido del dispositivo

Esercizio 2: soluzione

- ***Per un MOSFET a canale n:***

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

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

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

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

Esercizio 2: soluzione

- ***Dal sistema:***

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

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

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

- ***Delle due soluzioni***

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

solo $V_{\mathrm{th1}} < 2\,\mathrm{V}$ ***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***

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

da cui

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

Esercizio 3: testo

- ***Si consideri un transistore MOS a canale n con gate in poly, caratterizzato da:***
  - $N_A = 5 \times 10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$, $L = 6\,\mu\mathrm{m}$, $W = 4\,\mu\mathrm{m}$, $t_{ox} = 50\,\mathrm{nm}$, $\mu_n = 1417\,\mathrm{cm}^2/\mathrm{Vs}$
  - $V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} = 5\,\mathrm{V}$.
- ***Si riscala il dispositivo del fattore $K = 2$:***
  - $L' = L/K$, $W' = W/K$, $t'_{ox} = t_{ox}/K$
  - $N'_A = K \times N_A$
  - $V'_{DD} = V_{DD}/K$
- ***Discutere la potenza dissipata per unità di area***

Esercizio 3: soluzione

- ***Prima del riscalamento si ha:***
  - $V_{\mathrm{FB}} = -0.982\,\mathrm{V}$, $\phi_p = 0.389\,\mathrm{V}$, $C_{\mathrm{ox}} = 6.9 \times 10^{-8}\,\mathrm{F/cm^2}$, $Q_{\mathrm{d}} = -1.136 \times 10^{-7}\,\mathrm{C/cm^2}$, $\Rightarrow V_{\mathrm{th}} = 1.44\,\mathrm{V}$.
- ***Poiché*** $V_{\mathrm{DS}} = V_{\mathrm{GS}} > V_{\mathrm{GS}} - V_{\mathrm{th}}$ ***il MOS è in saturazione***

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

- ***La potenza dissipata è:***

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

Esercizio 3: soluzione

- ***Il dispositivo riscalato ha:***
  - $V'_{\mathrm{FB}} = -0.999\,\mathrm{V}$, $\phi'_p = 0.4\,\mathrm{V}$, $C'_{\mathrm{ox}} = 13.8 \times 10^{-8}\,\mathrm{F/cm^2}$, $Q'_{\mathrm{d}} = -1.64 \times 10^{-7}\,\mathrm{C/cm^2}$, $\Rightarrow V'_{\mathrm{th}} = 1.003\,\mathrm{V}$.
  - La tensione di soglia non scala con il fattore K.
- ***Poichè*** $V'_{\mathrm{DS}} = V'_{\mathrm{GS}} > V'_{\mathrm{GS}} - V'_{\mathrm{th}}$ ***il MOS è in saturazione***

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

con $V'_{\mathrm{DD}} = 2.5\,\mathrm{V}$

- ***La potenza dissipata è:***

$$P'_{\mathrm{D}} = I'_{\mathrm{DS}} \times V'_{\mathrm{DD}} = 0.36\,\mathrm{mW}$$

Esercizio 3: soluzione

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

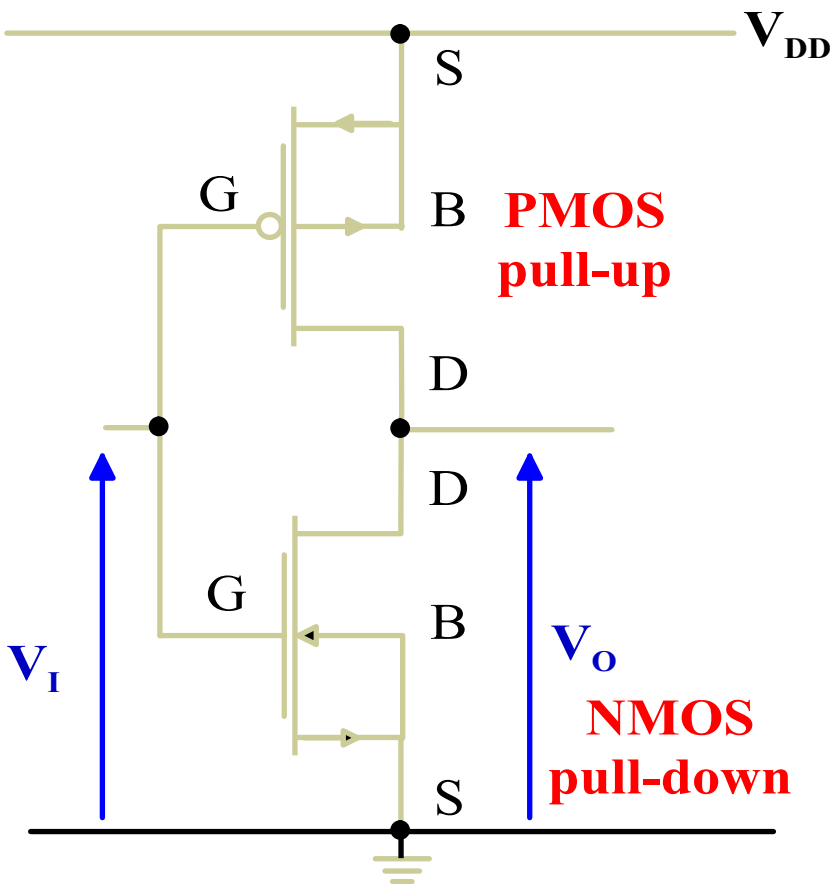
$$P'_{\mathrm{D}} < \frac{P_{\mathrm{D}}}{K^2}$$

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

Esercizio 3: soluzione

- ***Questo tipo di riscalamento 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***

  $V = V_{\mathrm{DD}} \Rightarrow 1$ ***logico***

  $V = 0 \Rightarrow 0$ ***logico***

- ***Si tratta di un inverter CMOS:***

  realizza l'inversione del segnale digitale

  $V_{\mathrm{I}} =$ ***"1"*** $\Rightarrow V_{\mathrm{O}} =$ ***"0"***

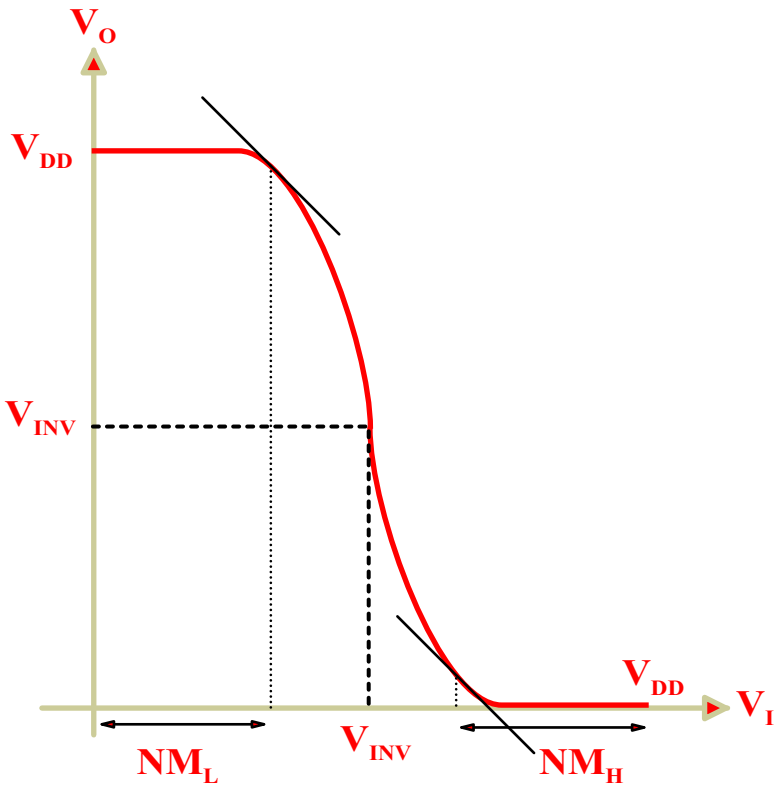
  $V_{\mathrm{I}} =$ ***"0"*** $\Rightarrow V_{\mathrm{O}} =$ ***"1"***

Esercizio 4: testo

- ***Supponendo***

$$V_{\text{th},p} = -V_{\text{th},n} \qquad t_{\text{ox}} = 50\,\text{nm}$$

$$\mu_n = 1294\,\text{cm}^2/\text{Vs} \qquad \mu_p = 435\,\text{cm}^2/\text{Vs}$$



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

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

Esercizio 4: soluzione

- ***Il comportamento qualitativo del circuito si ricava osservando***

$$V_{\mathrm{GS},n} = V_{\mathrm{I}} \qquad V_{\mathrm{GS},p} = V_{\mathrm{I}} - V_{\mathrm{DD}}$$
$$V_{\mathrm{DS},n} = V_{\mathrm{O}} \qquad V_{\mathrm{DS},p} = V_{\mathrm{O}} - V_{\mathrm{DD}}$$

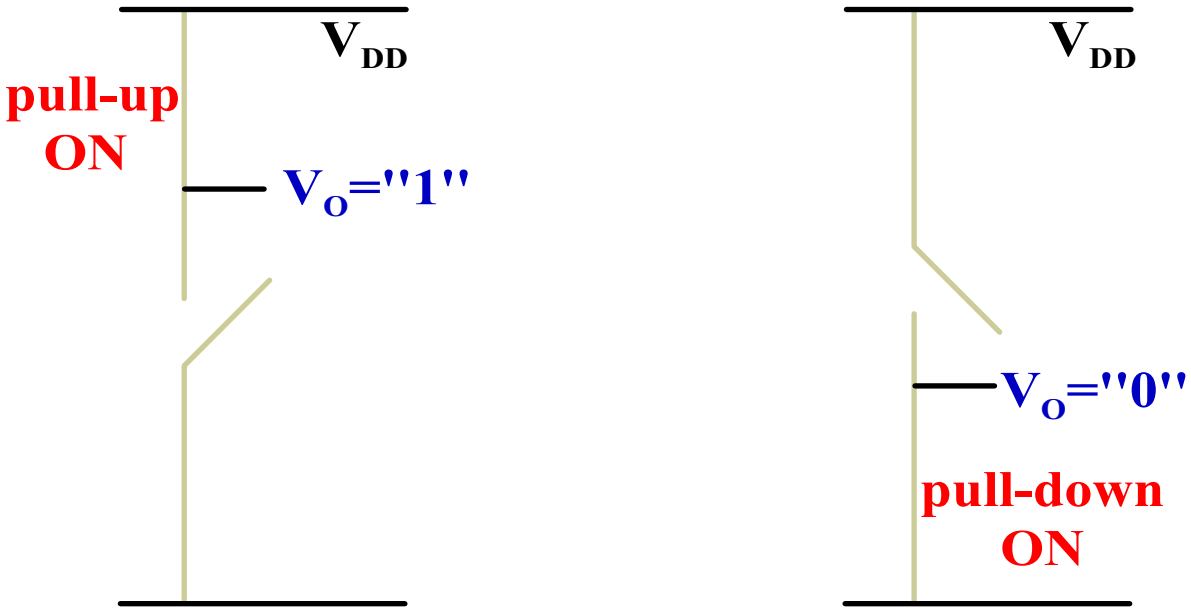
- ***Se*** $V_{\mathrm{I}} = 0 = \text{“0”}$

$$\left.\begin{array}{l}\text{il } p\text{MOS (pull–up) conduce}\\ \text{il } n\text{MOS (pull–down) è interdetto}\end{array}\right\} \Rightarrow V_{\mathrm{O}} = \text{“1”}$$

- ***Se*** $V_{\mathrm{I}} = V_{\mathrm{DD}} = \text{“1”}$

$$\left.\begin{array}{l}\text{il } p\text{MOS (pull–up) è interdetto}\\ \text{il } n\text{MOS (pull–down) conduce}\end{array}\right\} \Rightarrow V_{\mathrm{O}} = \text{“0”}$$

Esercizio 4: soluzione



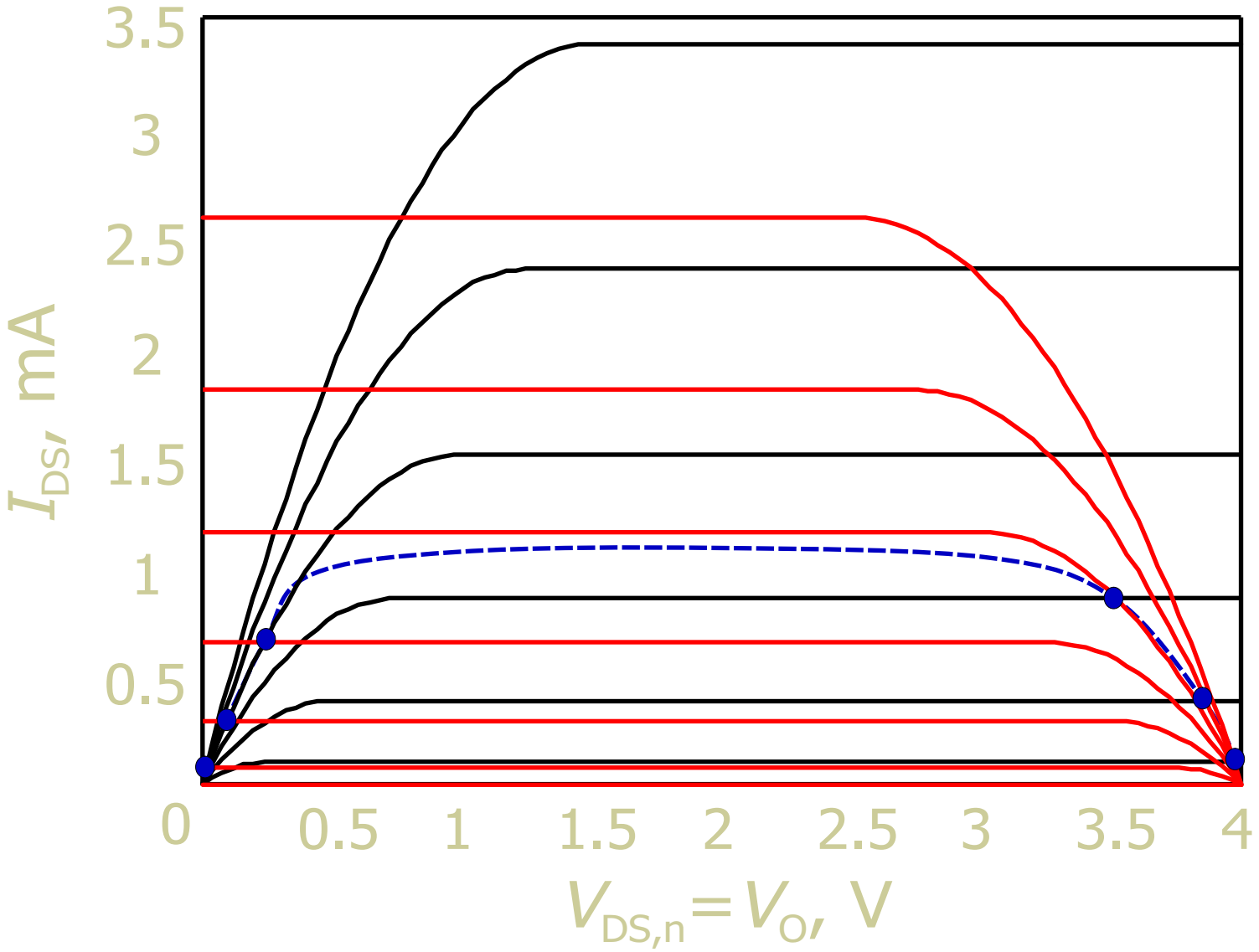
- ***Per valori della tensione di ingresso crescenti tra 0 e V_{DD} si può osservare come varia la tensione di uscita:***
  - transcaratteristica dell'inverter
- ***Si determinano i margini di rumore***

Esercizio 4: soluzione

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

1. Il pMOS è in zona lineare, il nMOS il saturazione (vicino alla interdizione con correnti molto basse)
2. Il pMOS è in zona triodo, il nMOS in saturazione (inizio della inversione)
3. Il pMOS e il nMOS sono entrambi in saturazione (inversione)
4. Il pMOS è in saturazione, il nMOS in zona triodo (fine della inversione)
5. Il pMOS è in saturazione (vicino alla interdizione con correnti molto basse), il nMOS in zona lineare

Esercizio 4: soluzione



Esercizio 4: soluzione

- ***All'inversione*** **(**$V_\mathrm{I} = V_\mathrm{O} = V_\mathrm{DD}/2$**)** ***entrambi i MOS sono in saturazione***
- ***La corrente del*** n***MOS e quella del*** p***MOS sono uguali***
- ***Ponendo*** $\beta_n = \dfrac{W_n\,\mu_n\,C_\mathrm{ox}}{L_n}$ **e** $\beta_p = \dfrac{W_p\,\mu_p\,C_\mathrm{ox}}{L_p}$**:**

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

- ***da cui***

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

Esercizio 4: soluzione

- ***Risolvendo rispetto a*** $V_{\mathrm{I}} = V_{\mathrm{inv}}$ ***si ottiene***

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

- ***perchè sia*** $V_{\mathrm{inv}} = V_{\mathrm{DD}}/2$ ***deve essere:***

$$\beta_n = \beta_p$$

- ***Per ipotesi è*** $V_{\mathrm{th},p} = -V_{\mathrm{th},n}$

Esercizio 4: soluzione

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