

**ESAME TELEMATICO DI DISPOSITIVI ELETTRONICI**  
**1 Febbraio 2021**

Si consideri un transistor  $n$ -MOS (a tre terminali) con  $W = 50 \mu\text{m}$ ,  $L = 2 \mu\text{m}$ ,  $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$ , realizzato con un condensatore MOS polysilicon gate con  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $t_{ox} = 30 \text{ nm}$ .

1) Per  $V_{GS} = 0 \text{ V}$  determinare la caduta di tensione nel silicio e l'espressione del campo elettrico  $\mathcal{E}(x)$  nell'ossido e, soprattutto, nel silicio. [10]

2) Si consideri lo stesso transistor MOS, ma con una concentrazione di impurezze all'interfaccia ossido-silicio, pari a  $2 \times 10^{12}$  ioni sodio/ $\text{cm}^2$  ( $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ). Si determini la tensione di soglia e, per  $V_{GS} = 0$ , si determini l'espressione  $V(x)$  della tensione nell'ossido. [10]

3) Si considerino le condizioni della domanda 2) (carica nell'ossido e  $V_{GS} = 0$ ). Si determini la corrente  $I_{DS}$  per  $V_{DS} = -0.5 \text{ V}$ . L'area della giunzione Drain-substrato è pari a  $500 \mu\text{m}^2$ , e  $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$ . [10]

NOTA: le tre domande possono essere affrontate separatamente, non sono sequenziali.

SOLUZIONE

1) Calcoliamo la  $V_{TH}$ , verificando che  $V_{GS} = 0 < V_{TH}$ :

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^3 \text{ F/m}^2 \\ \psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V} \\ \Phi_{MS} &= -\left(\psi_B + \frac{E_G}{2q}\right) = -0.887 \text{ V} \\ V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 0.228 \text{ V} \end{aligned}$$

Quindi il condensatore è in svuotamento. Calcoliamo la caduta di tensione nel silicio, scrivendo l'equazione in  $V_S$ :

$$0 = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S + \Phi_{MS} \quad (1)$$

che ha come soluzione accettabile  $V_S = 0.522$ . Il potenziale nell'ossido è lineare, quindi avremo  $\mathcal{E}_{ox}(x) = \text{Costante} = -\frac{Q_{Si}}{\epsilon_{ox}}$ . Trascurando la carica mobile, avremo:

$$\begin{aligned} Q_{Si} &= Q_W = -qN_A W(V_S) \\ Q_{Si} &= -\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} = -0.420 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2 \\ \mathcal{E} &= -\frac{Q_{Si}}{\epsilon_{ox}} = +12.16 \text{ MV/m} \end{aligned}$$

Nel silicio il campo elettrico non è costante, ma varia linearmente dalla superficie, dove vale  $\mathcal{E}_{Si}(x=0) = \mathcal{E}_{ox} \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_{Si}} = 3.98 \text{ MV/m}$ , fino a  $x = W$  dove vale zero. L'espressione si può ottenere considerando l'approssimazione di svuotamento completo:

$$\begin{aligned} W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} V_S} = 0.262 \text{ } \mu\text{m} \\ \mathcal{E}(x) &= \frac{qN_A}{\epsilon_s} (W - x) \end{aligned}$$

per  $0 < x < W$ , e 0 per  $x > W$ .

2) Calcoliamo la tensione di soglia con carica all'interfaccia:

$$Q_{ox} = q \times \text{Conc. di ioni} = 3.204 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2$$

$$V_{TH} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = -2.56 \text{ V}$$

La tensione di soglia è negativa, come potevamo aspettarci vista la presenza di ioni positivi all'interfaccia ossido-silicio. Quindi, per  $V_{GS} = 0 > V_{TH}$  il condensatore MOS è in inversione e  $V_S = 2\psi_B$ . Per calcolare il campo elettrico nell'ossido possiamo calcolare la carica totale per  $x > 0^-$ :

$$Q_W = -\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} = -0.484 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2$$

$$Q_n = -C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) = -2.9 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2$$

Da questo possiamo calcolare il campo elettrico nell'ossido, che è costante per  $x < 0^-$ , e la caduta di tensione nell'ossido che è lineare:

$$\mathcal{E} = -\frac{Q_{ox} + Q_n + Q_W}{\epsilon_{ox}} = 5.2 \text{ MV/m}$$

$$V(x) = \mathcal{E} (t_{ox} + x)$$

per  $-t_{ox} < x < 0$ , cioè nell'ossido. Da notare che è stata applicata la condizione a contorno  $V_{GS} = V(x = -t_{ox}) = 0$ .

3) Il transistor risulta polarizzato con  $V_{GS} > V_{TH}$  e  $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$ , quindi si trova in regime lineare (si può calcolare anche la corrente in zona triodo). La corrente nel canale sarà data da:

$$I_{SD} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) (-V_{DS}) = 2.9 \text{ mA} \quad (2)$$

A questo bisogna aggiungere la corrente del diodo Drain-Substrato  $pn^+$ , che è polarizzato in diretta (Source cortocircuitato con il substrato). Per la mobilità degli elettroni, in mancanza di altre indicazioni, usiamo quella del canale  $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$ :

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = 2.068 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 45.47 \text{ } \mu\text{m}$$

$$I_{SD \text{ giunzione } pn^+} = qS \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V_{SD}}{V_T}} = 20 \text{ nA}$$