

**ESAME TELEMATICO DI DISPOSITIVI ELETTRONICI**  
**15 Settembre 2021**

Un transistoro  $n$ -MOS polysilicon gate è fabbricato con  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $t_{ox} = 10 \text{ nm}$ ,  $W = 5 \text{ }\mu\text{m}$ , lunghezza di canale  $L = 0.5 \text{ }\mu\text{m}$ , mobilità degli elettroni nel canale  $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$ , source e substrato cortocircuitati. All'interfaccia ossido-silicio è presente una concentrazione di difetti con carica NEGATIVA, pari a  $N_{difetti} = 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .

1) Per  $V_{GS} = 3 \text{ V}$  determinare la tensione e la corrente di saturazione se il campo elettrico critico è pari a  $\mathcal{E}_c = 10^6 \text{ V/m}$ . Determinare inoltre la tensione e la corrente di saturazione per  $\mathcal{E}_c = 10^8 \text{ V/m}$ . [12]

2) Si determini il guadagno  $g_m$  del transistoro per  $V_{GS} = 3 \text{ V}$  e  $V_{DS} = 3 \text{ V}$  nei due casi ( $\mathcal{E}_c = 10^6 \text{ V/m}$  e  $\mathcal{E}_c = 10^8 \text{ V/m}$ ). [8]

3) Facendo riferimento ai modelli semplificati visti a lezione, per  $V_{GS} = 3 \text{ V}$  e  $V_{DS} = 3 \text{ V}$  si calcoli la resistenza differenziale  $r_d = \frac{1}{\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}}}$  nei due casi ( $\mathcal{E}_c = 10^8 \text{ V/m}$  e  $\mathcal{E}_c = 10^6 \text{ V/m}$ ). [10]

## SOLUZIONE

1) Calcoliamo anzitutto la tensione di soglia:

$$\begin{aligned}
 C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 3.45 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \\
 Q_{ox} &= -qN_{difetti} = -3.20 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2 \\
 \psi_B &= V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V} \\
 \Phi_{MS} &= -\frac{E_g}{2q} - \psi_B = -0.887 \text{ V} \\
 V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = 0.874 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Se  $V_{GS} = 3 \text{ V}$  abbiamo  $V_{GS} > V_{TH}$ , il canale è formato. Se  $\mathcal{E}_{canale} \approx V_{DS}/L$  è pari al campo elettrico critico, la velocità di drift, e di conseguenza il transistore MOS, raggiunge la saturazione. Quindi avremo che, per  $\mathcal{E}_c = 10^6 \text{ V/m}$ , la saturazione della velocità di drift avviene per  $V_{DS} = \mathcal{E}_c L = 0.5 \text{ V}$ , quindi  $V_{DSsat} = 0.5 \text{ V}$ . Come spiegato sulla dispensa, per  $V_{DS} = V_{DSsat} = 0.5 \text{ V}$  possiamo assumere che il transistore sia in zona lineare, e quindi:

$$\begin{aligned}
 V_{DSsat} &= 0.5 \text{ V} \\
 I_{DSsat} &= \mu_n C_{ox} W (V_{GS} - V_{TH}) \mathcal{E}_c = 2.9 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Nel caso invece  $\mathcal{E}_c = 10^8 \text{ V/m}$  la saturazione della velocità avviene per  $V_{DS} = \mathcal{E}_c L = 100 \text{ V}$ , e quindi il transistore MOS raggiunge la saturazione per strozzamento di canale. Abbiamo:

$$\begin{aligned}
 V_{DSsat} &= V_{GS} - V_{TH} = 2.13 \text{ V} \\
 I_{DSsat} &= \frac{\mu_n C_{ox} W}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 6.2 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

2) Avremo nei due casi:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E}_c &= 10^6 \text{ V/m} \\
 g_m &= \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \mu_n C_{ox} W \mathcal{E}_c = 1.38 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

e:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E}_c &= 10^8 \text{ V/m} \\
 g_m &= \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) = 5.9 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

Più correttamente, dovremo calcolare la  $L_{eff}$ , come viene mostrato nel punto seguente.

3) Secondo i modelli semplificati visti a lezione, la caratteristica ( $I_{DS}, V_{DS}$ ) è orizzontale nel caso di saturazione della velocità (in prima approssimazione), quindi  $r_d \rightarrow \infty$  per  $\mathcal{E}_c = 10^6$  V/m. Nel caso di saturazione per strozzamento di canale, possiamo procedere nel modo usuale, calcolando la corrente  $I_{DS}$  per una tensione  $V_{DS} > V_{DSsat}$ , ad esempio  $V_{DS} = 3$  V, e considerando la lunghezza effettiva di canale per  $V_{DS} - V_{DSsat} = 0.87$  V:

$$\begin{aligned}
 V_{0DS} &= |\Phi_{MS}| = 0.887 \text{ V} \\
 W_{Dcanale} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} (V_{0DS} + 0.87)} = 0.48 \text{ } \mu\text{m} \\
 L_{eff} &= L - W_{Dcanale} = 0.02 \text{ } \mu\text{m} \\
 I_{DS}(V_{DS} = 3 \text{ V}) &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 156 \text{ mA} \\
 r_d &= \frac{1}{\frac{156 \times 10^{-3} - 6.2 \times 10^{-3}}{3 - 2.13}} = 5.7 \text{ } \Omega
 \end{aligned}$$

Quindi se non ci fosse la saturazione della velocità (che invece è tipica dei MOS ultracorti) la resistenza differenziale sarebbe inaccettabilmente bassa.