

ESAME TELEMATICO DI DISPOSITIVI ELETTRONICI
26 Gennaio 2022

Un transistor n -MOS polysilicon gate ha $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_n = 0.08 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $L = 2 \text{ }\mu\text{m}$, $W = 12 \text{ }\mu\text{m}$, $t_{ox} = 20 \text{ nm}$.

Il transistor viene polarizzato con $V_{GS} = 5 \text{ V}$ (tenere conto degli eventuali effetti di modulazione del canale).

1) Determinare e disegnare il circuito equivalente per le variazioni (comprendente le capacità differenziali) per $V_{DS} = 10 \text{ V}$. Determinare inoltre il tempo di transito nel canale. [10]

2) Determinare e disegnare il circuito equivalente per le variazioni (comprendente le capacità differenziali) per $V_{DS} = 0.55 \text{ V}$. Determinare inoltre il tempo di transito nel canale. [10]

3) L'area della giunzione Drain-Substrato è pari a 1 mm^2 ; la mobilità degli elettroni nel bulk è pari a $\mu_n = 0.10 \text{ m}^2/\text{Vs}$, mentre $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$. Determinare e disegnare il circuito equivalente per le variazioni per $V_{DS} = -0.55 \text{ V}$. (La capacità dovuta alla regione di svuotamento si può trascurare).[10]

NOTA: l'area della giunzione Drain-Substrato non è realistica, serve solo ai fini dell'esercizio.

SOLUZIONE

1) Calcoliamo anzitutto la tensione di soglia:

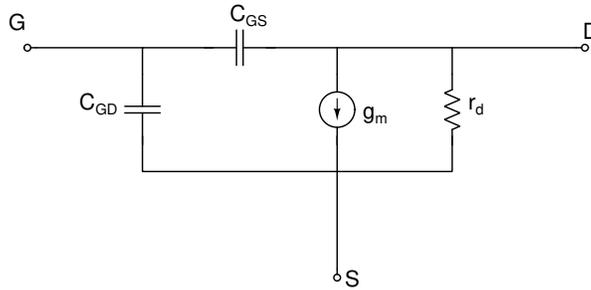
$$\begin{aligned}
 C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.73 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2 \\
 \psi_B &= V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \text{ V} \\
 \Phi_{MS} &= -\frac{E_g}{2q} - \psi_B = -0.887 \text{ V} \\
 V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 0.087 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Per $V_{DS} = 10 \text{ V}$, $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ e quindi il MOS è in saturazione. Calcoliamo prima la lunghezza effettiva del canale, e poi I_{DS} , g_m , r_d e la capacità $C_{GS} = \frac{2}{3}C_{ox}WL_{eff}$:

$$\begin{aligned}
 L_{eff} &= L - W(V_{DS} - V_{DSSat}) \\
 V_{0DS} &= |\Phi_{MS}| = 0.887 \\
 V_{DSSat} &= V_{GS} - V_{TH} = 4.91 \text{ V} \\
 W(V_{DS} - V_{DSSat}) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}(V_{0DS} + V_{DS} - V_{DSSat})} = 0.087 \text{ } \mu\text{m} \\
 L_{eff} &= 2 - 0.90 = 1.10 \text{ } \mu\text{m} \\
 I_{DS} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 18.2 \text{ mA} \\
 g_m &= \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH}) = 7.4 \times 10^{-3} \\
 r_d &= \frac{V_{DS} - V_{DSSat}}{I_{DS} - I_{DS}(V_{DSSat})} \\
 I_{DS}(V_{DSSat}) &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = 10.01 \text{ mA} \\
 r_d &= 621 \text{ } \Omega \\
 C_{GD} &= 0 \\
 C_{GS} &= \frac{2}{3}C_{ox}WL_{eff} = 8.53 \text{ fF}
 \end{aligned}$$

Il circuito equivalente per le variazioni risulta:

In cui il valore di C_{GD} è pari a 0, in assenza di sottodiffusione.



Il tempo di transito nel canale è dato da:

$$\begin{aligned}
 I_{DS} &= \frac{Q_{can}}{\tau_t} \\
 \tau_t &= \frac{Q_{can}}{I_{DS}} \\
 Q_{can} &= \frac{2}{3} C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) W L_{eff} = 74.8 \text{ fC} \\
 \tau_t &= 4.1 \text{ ps}
 \end{aligned}$$

2) Per $V_{DS} = 0.55 \text{ V}$ il MOS si può considerare in zona lineare. In questo caso, la carica è praticamente costante nel canale e la lunghezza di canale coincide con la distanza Drain-Source. Avremo:

$$\begin{aligned}
 I_{DS} &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} = 2.24 \text{ mA} \\
 g_m &= \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{DS} = 0.46 \times 10^{-3} \\
 r_d &= \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})} = 245 \text{ } \Omega \\
 C_{GS} &= C_{GD} = \frac{1}{2} C_{ox} W L = 3.5 \text{ fF}
 \end{aligned}$$

Il tempo di transito avrà la stessa espressione, ma in questo caso la carica è praticamente costante nel canale e quindi $Q_{can} = C_{ox} (V_{GS} - V_{TH}) W L = 0.203 \text{ pC}$. Quindi:

$$\tau_t = \frac{Q_{can}}{I_{DS}} = 91 \text{ ps} \quad (1)$$

Il circuito equivalente per le variazioni è uguale a quello del punto 1, con i valori opportuni.

3) Nel caso $V_{DS} = -0.55$ V, la giunzione Drain-Substrato entra in conduzione. Quindi, in parallelo al transistore MOS interviene anche il diodo con la sua resistenza e le sue capacità differenziali.

$$\begin{aligned}
 D_n &= V_T \mu_n \text{ bulk} = 2.583 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \\
 L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 50.84 \text{ } \mu\text{m} \\
 I_{\text{diodo}} &= qS \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} \left(e^{\frac{-V_{DS}}{V_T}} - 1 \right) = 318 \text{ } \mu\text{A} \\
 r_{\text{diodo}} &= \frac{1}{\frac{\partial I}{\partial V}} = \frac{V_T}{I_{\text{diodo}}} \\
 r_{\text{diodo}} &= 81 \text{ } \Omega \\
 C_{\text{diffusione}} r_{\text{diodo}} &= \tau_n \\
 C_{\text{diffusione}} &= \frac{\tau_n}{r_{\text{diodo}}} = 12 \text{ nF}
 \end{aligned}$$

La resistenza e la capacità differenziali del diodo vanno tra la giunzione Drain-Substrato, quindi in parallelo alla resistenza r_d del canale. I parametri differenziali dovuti al canale: g_m , r_d , C_{GS} e C_{GD} sono quelli calcolati nel punto 2. Il circuito equivalente risulta adesso:

