**ESAME TELEMATICO DI DISPOSITIVI ELETTRONICI**
**23 Luglio 2020**

Si consideri un transistore $n$-MOS polysilicon gate con $N_A = 10^{16}$ cm$^{-3}$, $W = 2$ $\mu$m, $L = 2$ $\mu$m, $t_{ox} = 30$ nm, nel canale $\mu_n = 0.08$ cm$^2$/Vs. Il campo elettrico di break-down nel silicio è pari a $\varepsilon_{BD} = 24$ MV/m.

1) Determinare il drogaggio $N_D$ del pozzetto di drain affinchè la tensione massima $V_{DS}$ applicabile, per il corretto funzionamento del transistore, sia almeno pari a 20 V (si trascuri la differenza di potenziale di contatto).[10]

2) Si consideri il pozzetto di drain fortemente drogato, $10^{19}$ cm$^{-3}$. Per $V_{GS} = 5$ V e $V_{DS} = 10$ V determinare il circuito equivalente per il piccolo segnale e in particolare la resistenza e le capacità differenziali. Si determini inoltre il tempo di transito nel canale e la frequenza di taglio. [10]

3) Per $V_{GS} = 5$ V e $V_{DS} = 0.1$ V si determinino la resistenza e le capacità differenziali. Si determini inoltre l'espressione ed il valore del tempo di transito nel canale e si evidenzi la sua dipendenza dal campo elettrico. [10]

SOLUZIONE

1) La tensione $V_{DS}$ massima applicabile è quella di break-down della giunzione Drain-substrato (cortocircuitato con il Source). Trascurando la differenza di potenziale di contatto possiamo scrivere:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{max} &= \frac{qN_A}{\epsilon_s}x_p = \frac{q}{\epsilon_s}\frac{N_A N_D}{N_A + N_D}W \\
W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}V_{DS}} \\
\varepsilon_{max} &= \sqrt{\frac{2q}{\epsilon_s}\frac{N_A N_D}{N_A + N_D}V_{DS}}
\end{aligned}$$

La $V_{DSmax}$ è la tensione per cui $\varepsilon_{max} = \varepsilon_{BD}$. Quindi avremo:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{BD}^2 &= \frac{2q}{\epsilon_s}\frac{N_A N_D}{N_A + N_D}V_{DS} \\
\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} &= \frac{\varepsilon_{BD}^2}{\frac{2q}{\epsilon_s}V_{DS}} \\
\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} &= 9.5 \times 10^{21}
\end{aligned}$$

Da cui si ricava che $N_D$ deve essere minore di $2 \times 10^{23}$ cm$^{-3}$.

2) Calcoliamo la tensione di soglia:

$$\begin{aligned}
\psi_B &= V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \ \text{ V} \\
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \ \text{ F/m}^2 \\
\Phi_{MS} &= -(\frac{E_g}{2q} + \psi_B) = -0.887 \ \text{ V} \\
C_{ox} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_S q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B - \Phi_{MS} = 0.23 \ \text{ V}
\end{aligned}$$

Calcoliamo la lunghezza effettiva del canale, assumendo $V_{DSsat} = V_{GS} - V_{TH} = 4.77$ V:

$$\begin{aligned}
V_{0DS} &= \Phi_{MS} \\
W(V_{DS} - V_{DSsat}) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}(V_{DS} - V_{DSsat} + V_{ODS})} = 0.9 \ \ \mu\text{m} \\
L_{eff} &= L - W(V_{DS} - V_{DSsat}) = 1.1 \ \ \mu\text{m}
\end{aligned}$$

È immediato calcolare il $g_m$ e la capacità differenziale $C_{GS}$ ($C_{GD} = 0$):

$$\begin{aligned}
g_m &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{L_{eff}}(V_{GS} - V_{TH}) = 0.8 \times 10^{-3} \\
C_{GS} &= \frac{2}{3} C_{ox} W L_{eff} = 1.7 \ \text{ fF}
\end{aligned}$$

Per la resistenza differenziale $r_d$ avremo:

$$\begin{aligned}
I_{DSsat} &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L}(V_{GS} - V_{TH})^2 = 1.04 \ \text{ mA} \\
I_{DS}(V_{DS} = 10) &= \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L_{eff}}(V_{GS} - V_{TH})^2 = 1.90 \ \text{ mA} \\
r_d &= \frac{V_{DS} - V_{DSsat}}{1.90 \times 10^{-3} - 1.04 \times 10^{-3}} = 6081 \ \ \Omega
\end{aligned}$$

3)Per $V_{DS} = 0.1$ V siamo in regime lineare. La resistenza differenziale è quella del canale, le capacità differenziali si ricavano:

$$\begin{aligned}
R_{can} &= \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}(V_{GS} - V_{TH})} = 2279 \ \ \Omega \\
C_{GS} &= C_{GD} = \frac{1}{2} C_{ox} W L = 2.3 \ \text{ fF}
\end{aligned}$$

Il tempo di transito si ricava:

$$
\begin{aligned}
I_{DS} &= \frac{Q}{\tau_t} \\
\tau_t &= \frac{Q}{I_{DS}} \\
Q &= C_{ox}(V_{GS} - V_{TH})WL \\
I_D S &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} \\
\tau_t &= \frac{L}{\mu_n \frac{V_{DS}}{L}} = 0.5 \quad \text{ns}
\end{aligned}
$$

In zona lineare avremo $\varepsilon$ lungo il canale costante, e pari a $\frac{V_{DS}}{L}$ Quindi avremo che la velocità di drift è pari a $v_{drift} = \mu_n \frac{V_{DS}}{L}$, e quindi avremo la semplice espressione $\tau_t = \frac{L}{v_{drift}}$.