ESAME TELEMATICO DI DISPOSITIVI ELETTRONICI
11 Gennaio 2022

Un transistore n-MOS polysilicon gate ha $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs, $L = 3$ μm, $W = 6$ μm, $t_{ox} = 6$ nm, e una concentrazione di difetti all'interfaccia, carichi negativamente, pari a 10^{11} cm^{-2}.
Sfruttando la resistenza differenziale $\frac{\partial V_{DS}}{\partial I_{DS}}$ in regime lineare, si vuole realizzare un resistore con $R_{DS} = 1$ kΩ.

1) Determinare la tensione V_{GS} con cui polarizzare il transistore. [9]

2) Determinare l'intervallo di valori di V_{DS} per cui la R_{DS} si mantiene entro il 10% dal valore nominale di 1 kΩ. [10]

3) L'area della giunzione Drain-substrato è pari a 0.1 mm^2; la mobilità degli elettroni nel bulk è pari a $\mu_n = 0.11$ m^2/Vs, mentre $\tau_n = 10^{-4}$ s. Determinare la resistenza differenziale $\frac{\partial V_{DS}}{\partial I_{DS}}$ per $V_{DS} = -0.6$ V. [11]

SOLUZIONE

1) Calcoliamo anzitutto la tensione di soglia:

$$
\begin{aligned}
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{F/m^2} \\
Q_{ox} &= -qN_{difetti} = -1.602 \times 10^{-4} \ \ \mathrm{C/m^2} \\
\psi_B &= V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.328 \ \ \mathrm{V} \\
\Phi_{MS} &= -\frac{E_g}{2q} - \psi_B = -0.868\mathrm{V} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_S q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = 0.22 \ \ \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

Per piccoli valori di V_{DS}, in regime lineare, avremo che $I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_{TH}\right) V_{DS}$, per cui:

$$
\begin{aligned}
R_{DS} &= \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_{TH}\right)} \\
V_{GS} &= \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} R_{DS}} + V_{TH} = 5.65 \ \ \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

Questo per piccole V_{DS}, per cui si può trascurare il termine $V_{DS}^2/2$.

2) All'aumentare della V_{DS} si fa sentire il termine $V_{DS}^2/2$. Avremo dunque:

$$
\begin{aligned}
R_{DS}(V_{DS}) &= \frac{1}{\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}}} \\
I_{DS} &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[\left(V_{GS} - V_{TH}\right) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \\
R_{DS}(V_{DS}) &= \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[\left(V_{GS} - V_{TH}\right) - V_{DS} \right]}
\end{aligned}
$$

All'aumentare della V_{DS}, la caratteristica non è più lineare, e la resistenza R_{DS} aumenta. Dovremo cercare il valore di V_{DS} per cui:

$$
\begin{aligned}
R_{DS} = 1100 \ \mathrm{k\Omega} &= \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_{TH}\right) - V_{DS}} \\
\left(V_{GS} - V_{TH}\right) - V_{DS} &= \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} R_{DS}} \\
V_{DS} &= \left(V_{GS} - V_{TH}\right) - \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} R_{DS}} = 0.49 \ \ \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

3) Nel caso $V_{DS} = -0.6$ V, oltre alla resistenza di canale bisogna considerare in parallelo la resistenza differenziale della giunzione Drain-Substrato, che adesso è polarizzata in diretta.

$$
\begin{aligned}
r_{diodo} &= \frac{1}{\frac{\partial I}{\partial V}} = \frac{V_T}{I_{diodo}} \\
I_{diodo} &= qS\frac{D_n}{L_n}\frac{n_i^2}{N_A}\left(e^{\frac{-V_{DS}}{V_T}} - 1\right) \\
D_n &= V_T \mu_{n\ bulk} = 2.843 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{m^2/s} \\
L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 533.2 \ \ \mu\mathrm{m} \\
I_{diodo} &= 46 \ \ \mu\mathrm{A} \\
r_{diodo} &= 558\ \Omega
\end{aligned}
$$

La resistenza differenziale di canale risulta invece ($V_{SD} = -V_{DS}$):

$$
R_{DS} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) - V_{SD}} = 1668 \ \ \Omega \tag{1}
$$

Le due resistenze sono in parallelo, per cui avremo $R_{DS} \parallel R_{diodo} = 539\ \Omega$.