ESAME TELEMATICO DI DISPOSITIVI ELETTRONICI
23 Novembre 2020

Si consideri un transistore n-MOS con $W = L = 2$ μm, $\mu_n = 0.08$ m^2/s, realizzato con un condensatore MOS ideale con $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm. Il transistore è polarizzato con V_{DS} piccola ($V_{DS} = 0.1$ V).

1) Per tensioni V_{GS} nel range di svuotamento (approssimazione di svuotamento completo), determinare l'espressione della caduta di tensione $V(x)$ nel silicio per un certo valore di V_S, e l'espressione della concentrazione di elettroni in funzione di x, $n(x)$. Lasciare indicati i simboli di V_S e della regione di svuotamento W. [12]

Per $V_{GS} < V_{TH}$ la corrente I_{DS} si approssima usualmente con 0, poiché la carica mobile Q_n è trascurabile. Tuttavia, pur essendo piccola, I_{DS} è diversa da 0 per $V_{GS} \leq V_{TH}$ (corrente sotto-soglia).

2) Secondo le approssimazioni del punto 1, determinare la carica mobile Q_n per $V_{GS} = V_{TH}$. Si consideri $x^2 \ll W^2$, e quindi si trascuri x^2 rispetto a W^2 per $0 < x < W$ (dove W è l'ampiezza della regione di svuotamento). [12]

3) Si determini la resistenza di canale e la corrente I_{DS} per $V_{GS} = V_{TH}$. [6]

SOLUZIONE

1) Per $0 < V_{GS} < V_{TH}$ la concentrazione di elettroni e quella delle lacune è trascurabile, quindi il potenziale $V(x)$ ha lo stesso andamento (parabolico) che quello in una giunzione pn, con $V(0) = V_S$ e $V(W(V_S)) = 0$.

$$\begin{aligned} W(V_S) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}V_S} \\ V_S &= \frac{qN_A}{2\epsilon_s}W^2 \end{aligned}$$

Quindi avremo:

$$\begin{aligned} V(x) &= \frac{qN_A}{2\epsilon_s}\left(W - x\right)^2 \\ W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}V_S} \end{aligned}$$

Quindi $V(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s}W^2 = V_S$ per $x = 0$ e $V(x) = 0$ per $x = W$. L'espressione della concentrazione di elettroni in funzione di x può essere espressa usando $V(x)$. Dalla relazione all'equilibrio, assumendo V_{bulk} come riferimento, abbiamo:

$$\begin{aligned}
V(x) - V_{bulk} &= V_T \ln \frac{n(x)}{n_0} \\
n(x) &= n_0 e^{\frac{V(x)}{V_T}} \\
n(x) &= \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V(x)}{V_T}}
\end{aligned}$$

Quindi, per $0 < x < W$ avremo:

$$n(x) = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{qN_A}{2V_T\epsilon_s}(W-x)^2} \tag{1}$$

È facile verificare che per $x = 0$ viene $n(0) = n_0 e^{\frac{V_S}{V_T}} = n_s$, e per $x = W$ avremo $n(W) = n_i^2/N_A = n_0$.

2) La carica mobile Q_n per $V_{GS} = V_{TH}$ è piccola, e viene trascurata nelle formule solite. Per $V_{GS} = V_{TH}$ avremo che $V_S = 2\psi_B$. Dall'espressione del punto 1 la possiamo calcolarla come ($Q_n < 0$, calcolata in valore assoluto):

$$\begin{aligned}
Q_n &= q \int_0^W n(x)dx \\
Q_n &= qn_0 \int_0^W e^{\frac{qN_A}{2V_T\epsilon_s}(W-x)^2} dx \\
Q_n &= qn_0 \int_0^W e^{\frac{qN_A}{2V_T\epsilon_s}\left(W^2-2Wx\right)} dx \\
Q_n &= qn_0 e^{\frac{2\psi_B}{V_T}} \int_0^W e^{-\frac{qN_A}{2V_T\epsilon_s}2Wx} dx
\end{aligned}$$

A questo punto conviene sostituire i numeri. Per definizione di tensione di soglia, $n_0 e^{\frac{2\psi_B}{V_T}} = N_A$, quindi:

$$\begin{aligned}
Q_n &= qN_A \int_0^W e^{-\frac{qN_A}{2V_T\epsilon_s}2Wx} dx \\
\psi_B &= V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
W(2\psi_B) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}2\psi_B} = 0.302 \ \ \mu\text{m} \\
Q_n &= qN_A\int_0^W e^{-\frac{x}{5.63\times10^{-9}}}dx
\end{aligned}
$$

L'integrale si può approssimare come:

$$
\int_0^W e^{-\frac{x}{5.63\times10^{-9}}}dx = \int_0^{+\infty} e^{-\frac{x}{5.63\times10^{-9}}}dx \tag{2}
$$

Questo facilita il conto, ma non è un errore (e il conto non è molto più gravoso) se questa approssimazione non viene fatta. Quindi:

$$
Q_n = qN_A 5.63\times10^{-9} = 9\times10^{-6} \ \ \text{C/m}^2 \tag{3}
$$

3) Per $V_{DS} = 0.1$ V, in zona lineare, possiamo calcolare la resistenza di canale come:

$$
R = \frac{1}{\mu_n Q_n}\frac{L}{W} \tag{4}
$$

dove Q_n in genere si approssima con $Q_n = C_{ox}(V_{GS} - V_{TH})$. In questo caso, usando questa approssimazione avremo $Q_n = 0$. Usando il valore di Q_n calcolato nel punto precedente avremo:

$$
\begin{aligned}
I_{DS} &= \frac{V_{DS}}{R} \\
I_{DS} &= \mu_n\frac{W}{L}Q_nV_{DS} = 72 \ \ \text{nA}
\end{aligned}
$$

Risulta quindi diversa da 0, anche se molto piccola.