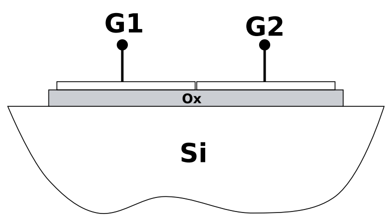
ESAME TELEMATICO DI DISPOSITIVI ELETTRONICI
22 Febbraio 2021

Si considerino due condensatori MOS come in figura. I due condensatori hanno la stessa superficie, $t_{ox} = 30$ nm e $N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, gate in polisilicio. Al condensatore 1 è applicata una $V_{GS1} = 3$ V.



1) A $t = 0$ la V_{GS1} viene portata a 5 V ($V_{GS2} = 0$ V). Determinare la carica fissa e mobile del MOS1 per $t < 0$ e per $t = 0^+$.[10]

2) Il tempo di vita medio degli elettroni in banda di conduzione è $\tau_n = 1$ ms. Scrivere un'espressione nel tempo della carica mobile $Q_n(t)$, e determinare la carica fissa e mobile del MOS1 per $t = 2$ ms.[8]

3) A $t = 2$ ms, la V_{GS1} viene portata bruscamente a 0, mentre la V_{GS2} viene portata a 3 V. Determinare le cariche fisse e mobili sia del MOS1 che del MOS2 per $t = 2$ ms e per $t \to \infty$. [12]

NOTA: considerare istantanei i tempi di trascinamento (drift) degli elettroni e delle lacune.

Si ricorda che l'andamento nel tempo di una grandezza fisica (tensione v, corrente, carica, ...), legata ad una costante di tempo τ, può essere indicata con la tipica espressione:

$$v(t) = v_{finale} + (v_{iniziale} - v_{finale})\, e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{1}$$

SOLUZIONE

1) Calcoliamo la V_{TH}:

$$
\begin{aligned}
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.15 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{F/m^2} \\
\psi_B &= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \ \ \mathrm{V} \\
\Phi_{MS} &= -\left(\psi_B + \frac{E_G}{2q}\right) = -0.887 \ \ \mathrm{V} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 0.228 \ \ \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

Per $t < 0$ il MOS è in inversione, ed è all'equilibrio, quindi avremo (le cariche sono negative, viene riportato il valore assoluto):

$$
\begin{aligned}
Q_n &= C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 3.19 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{C/m^2} \\
V_S &= 2\psi_B \\
Q_W &= \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} = \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} = 0.48 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{C/m^2}
\end{aligned}
$$

A $t = 0^+$ la carica mobile è la stessa, poiché gli elettroni non hanno avuto il tempo di generarsi. Quindi, l'aumento di tensione di gate provoca una estensione della regione di svuotamento sotto il gate, generando cosí carica fissa. Bisogna trovare la caduta di tensione nel silicio, scrivendo l'equazione per V_S, con $V_{GS} = 5$ V:

$$
V_{GS} = -\frac{Q_n(0^-)}{C_{ox}} + \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S + \Phi_{MS} \tag{2}
$$

la cui soluzione ammmissibile è $V_S = 2.280$ V. Quindi avremo $Q_W(0^+) = \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} = 0.87 \times 10^{-3}$ C/m^2.

2) Per applicare la formula suggerita serve la carica finale del condensatore MOS, cioè quella che si ha per tempi molto lunghi (in valore assoluto):

$$
Q_n(t \to \infty) = C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 5.49 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{C/m^2} \tag{3}
$$

Questa è la carica finale, di equilibrio, del condensatore MOS. Avremo dunque:

$$
Q_n(t) = 5.49 \times 10^{-3} - 2.3 \times 10^{-3} e^{-\frac{t}{\tau_n}} \tag{4}
$$

Avremo in particolare $Q_n(2\text{ ms}) = 5.18 \times 10^{-3}$ C/m^2. Per calcolare la carica fissa possiamo procedere come nel punto precedente, scrivendo l'equazione:

$$V_{GS} = -\frac{Q_n(2\text{ ms})}{C_{ox}} + \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S + \Phi_{MS} \tag{5}$$

che da come soluzione accettabile $V_S = 0.906$. Avremo quindi:

$$Q_W(t = 2\text{ ms}) = \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} = 0.55 \times 10^{-3} \;\; \text{C/m}^2 \tag{6}$$

3) La carica mobile del condensatore 1 passa al condensatore 2, ma non tutta. Infatti il condensatore 1, prima del cambio di polarizzazione, aveva impostata una tensione di 5 V, e la carica mobile era oltre a quella di equilibrio per $V = 3$ V. Quindi, al cambio delle tensioni, una parte si muove rapidamente sotto il MOS 2, portandono istantaneamente all'equilibrio (con i tempi dovuti al drift, assunti trascurabili). La parte in eccesso si ricombina sulla batteria. Avremo dunque che per $t > 2$ ms sia il MOS1 che il MOS2 sono all'equilibrio. In particolare, il MOS2 si trova nelle stesse condizioni in cui si trovava il MOS1 per $t < 0$, con $V_S = 2\psi_B$:

$$\begin{aligned} Q_{n2}(t = 2\text{ ms}) &= C_{ox}\left(V_{GS2} - V_{TH}\right) = 3.19 \times 10^{-3} \;\; \text{C/m}^2 \\ V_{S2}(t = 2\text{ ms}) &= 2\psi_B \\ Q_{W2}(t = 2\text{ ms}) &= \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} = 0.48 \times 10^{-3} \;\; \text{C/m}^2 \end{aligned}$$

Questa condizione vale per ogni $t \geq 2$ ms, ed in particolare vale per $t \to \infty$. Il MOS1 rimane senza carica mobile, mentre la carica fissa è quella dovuta a Φ_{MS}. Dobbiamo risolvere l'equazione:

$$0 = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S}}{C_{ox}} + V_S + \Phi_{MS} \tag{7}$$

che ha come soluzione accettabile $V_S = 0.522$ V. Avremo dunque $Q_{W1} = \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} = 0.42 \times 10^{-3}$ C/m^2.