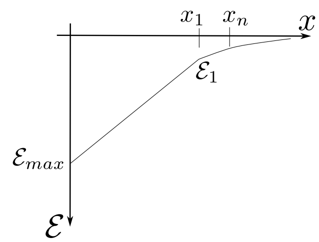
PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 11 novembre 2025

ESERCIZIO 1

Si consideri una giunzione p^+n, con $N_D = 5 \times 10^{15}$. Si applica una approssimazione migliore di quella dello svuotamento completo: assumiamo completamente svuotata solo la regione tra 0 ed $x_1 = 0.9x_n$. Si indichi con $\mathcal{E}_1$ il campo elettrico in x_1. Per $x > x_1$ il campo elettrico decade esponenzialmente, $\mathcal{E}(x) = \mathcal{E}(x_1)e^{-\frac{x-x_1}{a}}$, dove $a = 10$ nm (vedi figura).



1) Lasciando indicato $\mathcal{E}_1$ si determini una espressione per il campo elettrico massimo.[3]

2) Si determini il campo elettrico massimo per $V = 0$. [4]

3) Cosa cambia se $V = -5$? [3]

ESERCIZIO 2

Un transistore n-MOS polysilicon gate ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 20$ nm, $W = L = 2$ μm, $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs) è polarizzato con $V_{GS} = 5$ V, $V_{DS} = 3$ V.

1) Dopo aver calcolato la tensione di soglia e la corrente I_{DS}, determinare l'andamento $V(y)$ della tensione nel canale. [4]

2) Determinare la carica mobile totale nel canale. ATTENZIONE: si svolga l'esercizio numericamente. [4]

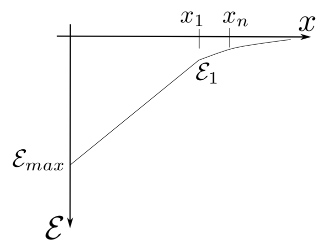
3) Determinare una espressione analitica della $Q_W(y)$. [2]

ESERCIZIO 3

Si enunci e si ricavi il teorema di Shocklely, descrivendo i concetti fondamentali e soprattutto le approssimazioni necessarie per la dimostrazione. Si descriva anche un esempio di applicazione. [10]

ESERCIZIO 1

Si consideri una giunzione p^+n, con $N_D = 5 \times 10^{15}$. Si applica una approssimazione migliore di quella dello svuotamento completo: assumiamo completamente svuotata solo la regione tra 0 ed $x_1 = 0.9x_n$. Si indichi con $\mathcal{E}_1$ il campo elettrico in x_1. Per $x > x_1$ il campo elettrico decade esponenzialmente, $\mathcal{E}(x) = \mathcal{E}(x_1)e^{-\frac{x-x_1}{a}}$, dove $a = 10$ nm (vedi figura).



1) Lasciando indicato $\mathcal{E}_1$ si determini una espressione per il campo elettrico massimo.[3]
2) Si determini il campo elettrico massimo per $V = 0$. [4]
3) Cosa cambia se $V = -5$? [3]

SOLUZIONE 1

1) Innanzitutto il campo elettrico è negativo, si fanno i conti con il valore assoluto. Tra 0 ed x_1 si assume lo svuotamento completo, quindi $\mathcal{E}(x) = \frac{qN_A}{\epsilon_s}x$+Cost. Avremo (in valore assoluto):

$$\mathcal{E}(x) = \mathcal{E}_1 + \frac{qN_A}{\epsilon_s}(x_1 - x) \quad \text{per } 0 < x < x_1 \tag{1}$$

NOTA SUL SEGNO: l'espressione considerando il segno giusto sarebbe:

$$\mathcal{E}(x) = \mathcal{E}_1 + \frac{qN_A}{\epsilon_s}(x - x_1) \tag{2}$$

dove $\mathcal{E}_1$ è negativo, e si somma un termine negativo $x - x_1$ per $0 < x < x_1$. Come suggerito dal testo, abbiamo preso il valore assoluto, cambiando di segno $x - x_1$ che è negativo.
$\mathcal{E}_{max}$ (negativo) si ricava ponendo $x = 0$:

$$\mathcal{E}_{max} = \mathcal{E}_1 + \frac{qN_A}{\epsilon_s}x_1 \tag{3}$$

2) Calcoliamo la differenza di potenziale di contatto e $x_1 = 0.9x_n$:

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A^+ N_D}{n_i^2} = 0.854 \ \text{ V} \\ x_n &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}V_0} = 0.474 \ \ \mu\text{m} \\ x_1 &= 0.9x_n = 0.426 \ \ \mu\text{m} \end{aligned}$$

L'area sottesa dal campo elettrico, cioè l'integrale del campo elettrico, è pari alla differenza di potenziale di contatto V_0. Possiamo dividere la curva sottesa dal campo elettrico in due aree, una trapezoidale e l'altra che decade esponenzialmente. L'area A_1 sottesa dall'andamento esponenziale è pari a:

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_{x_1}^{\infty} \mathcal{E}_1 e^{-\frac{x-x_1}{a}} dx \\ A_1 &= \int_{0}^{\infty} \mathcal{E}_1 e^{-\frac{x}{a}} dx \\ A_1 &= a\mathcal{E}_1 \end{aligned}$$

La seconda area A_2 e' trapezoidale:

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_{max}}{2} x_1 \\ A_2 &= \mathcal{E}_1 x_1 + \frac{qN_A}{2\epsilon_s} x_1^2 \end{aligned}$$

Quindi avremo una equazione nell'incognita $\mathcal{E}_1$:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1(a + x_1) + \frac{qN_A}{2\epsilon_s} x_1^2 &= V_0 \\ \mathcal{E}_1 &= \frac{V_0 - \frac{qN_A}{2\epsilon_s} x_1^2}{a + x_1} = 337 \ \text{ kV/m} \end{aligned}$$

Da cui ricavare:

$$\mathcal{E}_{max} = \mathcal{E}_1 + \frac{qN_A}{\epsilon_s} x_1 = 3.57 \ \text{ MV/m} \tag{4}$$

3) Questo è un puro esercizio di calcolo. Per $V = -5$ V x_n aumenta, e quindi anche $x_1 = 0.9x_n$. Nell'espressione dell'area basta mettere $V_0 + \mid V \mid$:

$$\mathcal{E}_1(a + x_1) + \frac{qN_A}{2\epsilon_s} x_1^2 = V_0 + \mid V \mid \tag{5}$$

Per il resto, i conti sono uguali al caso precedente. Il campo elettrico massimo aumenta, in valore assoluto.

ESERCIZIO 2

Un transistore n-MOS polysilicon gate ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 20$ nm, $W = L = 2$ μm, $\mu_n = 0.08$ m^2/Vs) è polarizzato con $V_{GS} = 5$ V, $V_{DS} = 3$ V.

1) Dopo aver calcolato la tensione di soglia e la corrente I_{DS}, determinare l'andamento $V(y)$ della tensione nel canale. [4]

2) Determinare la carica mobile totale nel canale. ATTENZIONE: si svolga l'esercizio numericamente. [4]

3) Determinare una espressione analitica della $Q_W(y)$. [2]

SOLUZIONE 2

1) Iniziamo calcolando la tensione di soglia e la corrente I_{DS}:

$$\begin{aligned}
C_{ox} &= \frac{\epsilon_s}{t_{ox}} = 1.726 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{F/m^2} \\
\psi_B &= V_T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.347 \\
\Phi_{MS} &= -\frac{E_g}{2q} - \psi_B = -0.887 \ \ \mathrm{V} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_{Bp}}}{C_{ox}} + 2\psi_{Bp} + \Phi_{MS} = 0.09 \ \ \mathrm{V}
\end{aligned}$$

Quindi avremo (siamo in zona triodo):

$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] = 1.41 \ \ \mathrm{mA} \tag{6}$$

Per calcolare l'andamento della tensione $V(y)$ impostiamo l'equazione:

$$\begin{aligned}
I_{DS} &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{y} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V(y) - \frac{V(y)^2}{2} \right] \\
I_{DS} y &= 1.356 \times 10^{-9} V(y) - 1.381 \times 10^{-10} V(y)^2 \\
V(y)^2 - 9.819 V(y) + 10.210 \times 10^6 \times y &= 0 \\
V(y) &= \frac{9.819 - \sqrt{96.41 - 40.84 \times 10^6 y}}{2} \\
V(y) &= 4.91 - \sqrt{24.10 - 10.21 \times 10^6 y}
\end{aligned}$$

Da ricordare che y è nel range dei micrometri, quindi l'espressione è accettabile, ed inoltre $V(0) = 0$ e $V(y = L) = V_{DS}$.

2) La carica mobile Q_n è negativa, la calcoliamo in valore assoluto:

$$\begin{aligned}
Q &= W C_{ox} \int_0^L (V_{GS} - V_{TH} - V(y))\, dy \\
Q &= W C_{ox} \int_0^L \left(V_{GS} - V_{TH} - 4.91 + \sqrt{24.10 - 10.21 \times 10^6 y} \right) dy \\
Q &= W C_{ox} \int_0^L \left(\sqrt{24.10 - 10.21 \times 10^6 y} \right) \\
Q &= W C_{ox} \left(\frac{2}{3} \left(24.10 - 10.21 \times 10^6 L \right)^{\frac{3}{2}} + 24.10^{\frac{3}{2}} \right) \\
Q &= 28.85 \ \ \mu\mathrm{C/m^2}
\end{aligned}$$

3) L'espressione analitica è semplicemente:

$$Q_W(y) = q N_A \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q N_A} V_{inv}(y)} = \sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B + V(y)} \tag{7}$$

ESERCIZIO 3

Si enunci e si ricavi il teorema di Shocklely, descrivendo i concetti fondamentali e soprattutto le approssimazioni necessarie per la dimostrazione. Si descriva anche un esempio di applicazione. [10]

SOLUZIONE 3

Si rimanda alle dispense