ESAME TELEMATICO DI DISPOSITIVI ELETTRONICI
21 Luglio 2021

Un diodo p^+n ha $N_A = 10^{19}$ cm^{-3}, $N_D = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.12$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_p = \tau_n = 10^{-6}$ s, S=1 mm^2, $W_n = 4$ μm.

1) Determinare il profilo dei portatori minoritari per $V = 0$ e per $V = -5$ V (eseguirne il grafico nei due casi). Per $V = -5$ V determinare inoltre la corrente usando il modello a controllo di carica. [12]

2) Si consideri $V = 0.55$ V. Determinare le espressioni ed i valori del campo elettrico nelle diverse regioni del diodo (la regione di svuotamento non si può trascurare). [10]

3) Determinare la resistenza differenziale del diodo per $V = 0.55$ V e per $V = -5$ V (verificare che è molto piccola in un caso, e molto grande nell'altro). [8]

SOLUZIONE

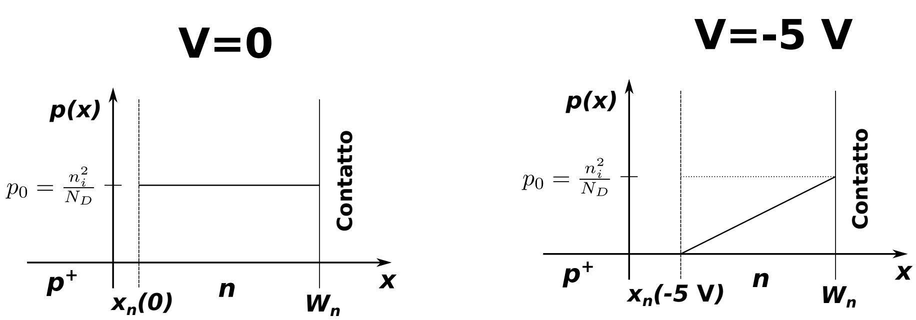
1) Calcoliamo i coefficienti di diffusione e la lunghezza di diffusione per le lacune:

$$
\begin{aligned}
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 0.02585 \times 0.12 = 3.102 \times 10^{-3} \quad \mathrm{m^2/s} \\
D_p &= \frac{kT}{q}\mu_n = 0.02585 \times 0.04 = 1.034 \times 10^{-3} \quad \mathrm{m^2/s} \\
L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 32.15 \quad \mu\mathrm{m}
\end{aligned}
$$

Calcoliamo le regioni di svuotamento per $V = 0$ e per $V = -5$ V:

$$
\begin{aligned}
V_0 &= V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.854 \quad \mathrm{V} \\
W(0) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} V_0} = 0.47 \quad \mu\mathrm{m} \\
W(-5 \mathrm{\ V}) &= x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}(V_0 - V)} = 1.2 \quad \mu\mathrm{m}
\end{aligned}
$$

I grafici DEI PORTATORI MINORITARI (NON dell'eccesso) vengono allora come segue:



Essenzialmente per $V = 0$ la concentrazione $p(x)$ è 0 nella regione di svuotamento (approssimazione di svuotamento completo), è costante al di fuori della regione di svuotamento e pari a $p_0 = \frac{n_i^2}{N_D}$. Per $V = -5$ V la regione di svuotamento si allarga, e all'estremo $p(x_n) = 0$. La concentrazione $p(x)$ cresce linearmente fino a p_0 sul contatto, per $x = W_n$.

Per quando riguarda il calcolo della corrente con il modello a controllo di carica, bisogna calcolare la carica immagazzinata nella regione n quasi-neutra, che è negativa perché in realtà è una mancanza di carica. Facendo riferimento alla figura, avremo:

$$\begin{aligned}
Q_p &= -qSp_0\frac{W_n - x_n}{2} = -qS\frac{n_i^2}{N_D}\frac{W_n - x_n}{2} = -10^{-20} \ \ \text{C} \\
\tau_t &= \frac{(W_n - x_n)^2}{2D_p} = 3.79 \ \ \text{ns} \\
I &= \frac{Q_p}{\tau_t} = -2.64 \ \ \text{pA}
\end{aligned}$$

È correttamente negativa, poiché scorre dalla parte n alla parte p.

2) Calcoliamo innanzitutto la corrente nel diodo:

$$\begin{aligned}
W(V = 0.55 \text{ V}) &= x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}(V_0 - V)} = 0.28 \ \ \mu\text{m} \\
W_n - x_n &= 3.72 \ \ \mu\text{m} \\
I &= qS\frac{n_i^2}{N_D}\frac{D_p}{W_n - x_n}\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) = 3.48 \ \ \text{mA}
\end{aligned}$$

Nella regione p^+ la corrente è dovuta al trascinamento delle lacune, quindi avremo $I = qS\mu_p p\mathcal{E} = qS\mu_p N_A\mathcal{E}$. Da cui segue:

$$\mathcal{E} = \frac{I}{qS\mu_p N_A} = 0.054 \ \ \text{V/m} \tag{1}$$

Nella regione di svuotamento, per $0 < x < x_n$, il campo elettrico è lineare e assume l'espressione:

$$\begin{aligned}
\mathcal{E} &= \frac{qN_D}{\epsilon_s}(x - x_n) \\
\mathcal{E}(x = 0) &= -\frac{qN_D}{\epsilon_s}x_n = 2.15 \ \ \text{V/m} \\
\mathcal{E}(x = x_n) &= 0
\end{aligned}$$

Rimane da calcolare il campo elettrico nella regione quasi-neutra n, per $x_n < x < W_n$. Il diodo è polarizzato in diretta, quindi avremo un eccesso di portatori minoritari (lacune) nella parte n, il cui profilo si può approssimare come lineare. La corrente totale del diodo coincide con la corrente di diffusione di lacune, che è costante nella parte n (zero in x_n):

$$
\begin{aligned}
\delta p(x) &= \delta p(0)\left(1 - \frac{x}{W_n - x_n}\right) \\
I_p(x) &= I = -qSD_p \frac{d\ \delta p(x)}{dx}
\end{aligned}
$$

L'eccesso di portatori maggioritari è quasi uguale a quello di portatori minoritari:

$$
\begin{aligned}
\delta n(x) &\simeq \delta p(0)\left(1 - \frac{x}{W_n - x_n}\right) \\
I_{n\ diff}(x) &= qSD_n \frac{d\ \delta n(x)}{dx} \\
I_{n\ drift}(x) &= qS\mu_n n(x)\mathcal{E}(x) = qS\mu_n N_D \mathcal{E}(x)
\end{aligned}
$$

Quindi avremo $I_{n\ diff}(x) = -\frac{D_n}{D_p} I$. La corrente di trascinamento dei maggioritari non è trascurabile, quindi avremo che la corrente totale del diodo risulta:

$$
\begin{aligned}
I &= I_p + I_{n\ diff} + I_{n_drift} \\
I &= I - \frac{D_n}{D_p} I + qS\mu_n N_D \mathcal{E}(x)
\end{aligned}
$$

Quindi avremo che il campo elettrico è costante con x, e pari a:

$$
\begin{aligned}
0 &= -\frac{D_n}{D_p} I + qS\mu_n N_D \mathcal{E}(x) \\
\mathcal{E} &= \frac{\frac{D_n}{D_p} I}{qS\mu_n N_D} = 108.6 \ \ \text{V/m}
\end{aligned}
$$

È positivo, correttamente, perché è il campo elettrico che ostacola la diffusione di elettroni verso destra, tendendoli a respingere verso l'origine.

3) Per $V = 0.55$ V la resistenza differenziale è pari a $\frac{V_T}{I} = 7.42\ \Omega$. Per $V = -5$ V, la resistenza differenziale $1/\frac{\partial I}{\partial V}$ è dovuta al fatto che, al variare della polarizzazione inversa, la corrente non è costante (come avviene nel caso della base lunga), ma aumenta (in valore assoluto). Nel caso del diodo a base

lunga, la resistenza differenziale in polarizzazione inversa è infinito, nel caso del diodo a base corta è molto grande ma finita. Abbiamo $I(V = -5) = 2.64$ pA. Calcoliamo I per un'altra tensione inversa, ad esempio per $V = -10$ V:

$$
\begin{aligned}
W(-10 \text{ V}) &= x_n(-10 \text{ V}) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D}(V_0 + 10)} = 1.69 \;\; \mu\text{m} \\
I &= -qS\frac{n_i^2}{N_D}\frac{D_n}{W_n - x_n} = 9.68 \;\; \text{pA}
\end{aligned}
$$

Quindi la resistenza di uscita in inversa risulta:

$$
\begin{aligned}
r_d &= \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \\
r_d &= \frac{-10 - (-5))}{(-9.68^{-12} - (-2.64 \times 10^{-12})} = 7.10 \times 10^{11} \;\; \Omega
\end{aligned}
$$

Quindi non è infinita, ma è comunque molto grande.