ESAME TELEMATICO DI DISPOSITIVI ELETTRONICI
16 Febbraio 2022

Si consideri una giunzione *pn* a base lunga con drogaggi generici.

1) Dimostrare che la capacità differenziale dovuta alla diffusione dei portatori minoritari $C_{diffusione} = C_d$ e la resistenza differenziale r_d stanno in relazione come $C_d r_d = \tau$ se $\tau = \tau_p = \tau_n$. Ricavare inoltre la relazione generica C_d per $\tau_n \neq \tau_p$.[11]

Si consideri una giunzione *pn* con $N_A = 5 \times 10^{15}$ cm^{-3}, $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\mu_p = 350$ cm^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 10^{-5}$ s, S=1 mm^2.

2) Determinare il circuito equivalente per piccolo segnale, per $V = -5$ V e per $V = 0.55$ V.[8]

3) Si consideri una giunzione *pn* con le stesse caratteristiche, ma con le basi corte: $W_n = W_p = 5$ μm. Si determini la corrente di saturazione inversa per $V = -5$ V, nonché la massima tensione inversa applicabile. [11]

SOLUZIONE

1) Partiamo dalla definizione di capacità differenziale:

$$C = \frac{\partial Q}{\partial V} \tag{1}$$

dove Q è la carica totale immagazzinata, dovuta ai portatori iniettati sia nella parte n (lacune) che nella parte p (elettroni). Indichiamo con Q_n la carica in eccesso dovuta agli elettroni iniettati, e con Q_p la carica in eccesso dovuta alle lacune iniettate. Entrambe le cariche devono essere considerate in valore assoluto:

$$\begin{aligned}
Q &= Q_n + Q_p \\
Q_n &= qS \int_{-\infty}^{0} \delta n(x) dx \\
Q_p &= qS \int_{0}^{+\infty} \delta p(x) dx \\
\delta n(x) &= \frac{n_i^2}{N_A}\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) e^{\frac{x}{L_n}} \\
\delta p(x) &= \frac{n_i^2}{N_D}\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) e^{-\frac{x}{L_p}} \\
Q_n &= qS \frac{n_i^2}{N_A} L_n \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \\
Q_p &= qS \frac{n_i^2}{N_D} L_p \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \\
Q_n + Q_p &= qS \left(\frac{n_i^2}{N_A} L_n + \frac{n_i^2}{N_D} L_p\right)\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right)
\end{aligned}$$

Per $\tau_n = \tau_p = \tau$ possiamo scrivere, dividendo e moltiplicando per τ:

$$\begin{aligned}
Q_n + Q_p &= \tau \; qS \left(\frac{n_i^2}{N_A} \frac{L_n}{\tau_n} + \frac{n_i^2}{N_D} \frac{L_p}{\tau_p}\right)\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \\
Q_n + Q_p &= \tau I_S \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \\
C_d &= \frac{\partial (Q_n + Q_p)}{\partial V} = \tau \frac{\partial I_S \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right)}{\partial V} \\
C_d &= \tau \frac{I_S e^{\frac{V}{V_T}}}{V_T}
\end{aligned}$$

Poiché $I_S e^{\frac{V}{V_T}}/V_T$ è proprio il reciproco della resistenza differenziale r_d avremo:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_d} &= \frac{I_S e^{\frac{V}{V_T}}}{V_T} \\ C_d r_d &= \tau \end{aligned}$$

L'espressione generica di C_d per $\tau_n \neq \tau_p$ si ricava:

$$\begin{aligned} Q_n + Q_p &= qS\left(\frac{n_i^2}{N_A}L_n + \frac{n_i^2}{N_D}L_p\right)\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) \\ C_d &= \frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{\partial\left(Q_n + Q_p\right)}{\partial V} \\ C_d &= \frac{qS}{V_T}\left(\frac{n_i^2}{N_A}L_n + \frac{n_i^2}{N_D}L_p\right)e^{\frac{V}{V_T}} \end{aligned}$$

2) Per $V = -5$ V il diodo ha una resistenza differenziale infinita, e si comporta come un condensatore la cui capacità differenziale $C = C_W$ è dovuta alla regione di svuotamento $W(-5\text{ V})$:

$$\begin{aligned} V_0 &= V_T \ln\frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.675\ \text{ V} \\ W(-5\text{ V}) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 + \mid V \mid)} = 1.49\ \ \mu\text{m} \\ C_W &= S\frac{\epsilon_s}{W} = 70\ \text{ pF} \end{aligned}$$

Per $V = 0.55$ V il diodo è polarizzato in diretta, e il circuito per piccolo segnale è costituito dalla resistenza differenziale r_d, dalla capacità differenziale dovuta alla regione di svuotamento C_W e dalla capacità differenziale dovuta all'iniezione. Avremo:

$$\begin{aligned} D_n &= V_T\mu_n = 2.585 \times 10^{-3} \\ D_p &= V_T\mu_p = 0.904 \times 10^{-3} \\ L_n &= \sqrt{D_n\tau} = 160.8\ \ \mu\text{m} \\ L_p &= \sqrt{D_p\tau} = 95\ \ \mu\text{m} \\ I_S &= qS\left(\frac{n_i^2}{N_A}\frac{L_n}{\tau} + \frac{n_i^2}{N_D}\frac{L_p}{\tau}\right) = 1.5 \times 10^{-13}\ \ \text{A} \end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
I &= 0.26 \text{ mA} \\
r_d &= \frac{V_T}{I} = 98.9 \ \ \Omega \\
C_d &= \frac{\tau}{r_d} = 101 \ \ \text{nF} \\
W(0.55 \text{ V}) &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)(V_0-0.55)} = 0.22 \ \ \mu\text{m} \\
C_W &= S\frac{\epsilon_s}{W} = 0.47 \ \ \text{nF}
\end{aligned}
$$

3) La corrente di saturazione inversa dipende dall'ampiezza della regione di svuotamento W per $V = -5$ V (calcolata nel punto precedente):

$$
\begin{aligned}
x_n &= W\frac{N_A}{N_A+N_D} = 0.50 \ \ \mu\text{m} \\
x_p &= W\frac{N_D}{N_A+N_D} = 1.0 \ \ \mu\text{m} \\
I_S &= qS\left(\frac{n_i^2}{N_A}\frac{D_n}{W_p-x_p}+\frac{n_i^2}{N_D}\frac{D_p}{W_n-x_n}\right) = 4.6\times 10^{-12} \ \ \text{A}
\end{aligned}
$$

La corrente di saturazione inversa risulta correttamente più grande del caso a base lunga. La massima tensione inversa applicabile è quella per cui una delle due basi diventa completamente svuotata. A quel punto il diodo non funziona più e la corrente aumenta bruscamente. Poiché la regione di svuotamento si ripartisce maggiormente nella zona meno drogata, possiamo considerare la parte p,con $N_A = 5\times 10^{15}$ cm^{-3}. La massima tensione inversa applicabile è dunque quella per cui $x_p = W_p = 5$ μm:

$$
\begin{aligned}
x_p &= W_p = 5 \ \ \mu\text{m} \\
W &= x_p\frac{N_A+N_D}{N_D} = 7.5 \ \ \mu\text{m} \\
W &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)(V_0+\mid V\mid)} \\
V_0+\mid V\mid &= W^2\frac{q}{2\epsilon_s}\frac{N_AN_D}{N_A+N_D} = 142 \ \ \text{V} \\
\mid V\mid &= 141.4 \ \ \text{V}
\end{aligned}
$$