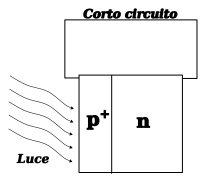
PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 13 settembre 2023

ESERCIZIO 1

In figura è rappresentata una giunzione p^+n, con $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $W_p = 5$ μm, W_n lunga, $\mu_p = 0.045$ m^2/Vs, $\mu_n = 0.11$ m^2/Vs, $\tau_p = \tau_n = 1$ μs, $S = 1$ m^2 (un metro quadrato, pannello fotovoltaico). Il diodo è illuminato sulla superficie p^+ come in figura. La luce viene assorbita in uno strato di spessore trascurabile, e alla superficie genera $\delta n = \delta p = 2 \times 10^{12}$ cm^{-3}.



1) Determinare il profilo dell'eccesso di portatori minoritari nella base p.[4]

2) Determinare la corrente per $V = 0$ (in condizioni di corto circuito, come in figura).[3]

3) Scrivere la caratteristicha $I - V$ del dispositivo, e determinare la tensione V in condizioni di circuito aperto.[3]

ATTENZIONE! I numeri sono molto diversi da quelli usuali, proprii dei dispositivi per circuiti integrati.

ESERCIZIO 2

Considerare un condensatore n-MOS ideale ($N_A = 10^{16}$ cm^{-3}, $t_{ox} = 30$ nm). Viene applicato un gradino di ampiezza V ($V_{GB} = 0$ per $t < 0$, $V_{GB} = V$ per $t \geq 0$).

1) Determinare la carica fissa e mobile per $t = 0^+$ e $t \to \infty$ per un'ampiezza del gradino $V = 5$ V. [3]

2) Determinare la carica fissa e mobile per $t = 0^+$ e $t \to \infty$ per un'ampiezza del gradino $V = 2/3V_{TH}$. [4]

3) Con riferimento al punto 2 ($V = V_{GB} = 2/3V_{TH}$), determinare la concentrazione di elettroni all'interfaccia per $t = 0^+$ e $t \to \infty$, confermando di essere sotto la soglia di inversione. [3]

ESERCIZIO 3

Un transistore bipolare npn ha $N_{AB} = N_{DC} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 1$ μs, S=1 mm^2), $W_{met} = 4$ μm, sia l'emettitore che il collettore sono lunghi.

1) Determinare l'efficienza e il drogaggio minimo di emettitore per avere un β_f almeno pari a 150. [4] SUGGERIMENTO: fare riferimento alla W_{met}; in qualsiasi

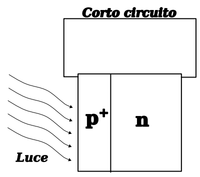
condizione di polarizzazione avremo $W < W_{met}$ e $\beta_f > \beta f\ min$.

2) Determinare la condizione di polarizzazione per avere β_f almeno pari a 170 (quale parametro bisogna imporre?). [4]

3) Con riferimento al punto 2, determinare le tensioni e le correnti ai terminali per $I_B = 10\ \mu$A. [2]

ESERCIZIO 1

In figura è rappresentata una giunzione p^+n, con $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $W_p = 5$ μm, W_n lunga, $\mu_p = 0.045$ m^2/Vs, $\mu_n = 0.11$ m^2/Vs, $\tau_p = \tau_n = 1$ μs, $S = 1$ m^2 (un metro quadrato, pannello fotovoltaico). Il diodo è illuminato sulla superficie p^+ come in figura. La luce viene assorbita in uno strato di spessore trascurabile, e alla superficie genera $\delta n = \delta p = 2 \times 10^{12}$ cm^{-3}.



1) Determinare il profilo dell'eccesso di portatori minoritari nella base p.[4]

2) Determinare la corrente per $V = 0$ (in condizioni di corto circuito, come in figura).[3]

3) Scrivere la caratteristica $I - V$ del dispositivo, e determinare la tensione V in condizioni di circuito aperto.[3]

ATTENZIONE! I numeri sono molto diversi da quelli usuali, proprii dei dispositivi per circuiti integrati.

SOLUZIONE 1

1) Alla superficie abbiamo un'eccesso di portatori minoritari pari a $\delta n = 2 \times 10^{18}$ m^{-3}. Dato che la base p è corta:

$$\begin{aligned} D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.845 \times 10^{-3} \ \ \mathrm{m^2/s} \\ L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} = 53.3 \ \ \mu\mathrm{m} \end{aligned}$$

avremo che il profilo dell'eccesso è lineare dalla superficie fino all'estremo $-x_p$ della regione di svuotamento, che praticamente coincide con il piano della giunzione: $-x_p \simeq 0$. Alla superficie vale $\delta n = 2 \times 10^{18}$ m^{-3}, mentre alla giunzione avremo che $\delta_n = 0$. Infatti la tensione applicata è nulla, quindi per la relazione di Shockley l'eccesso in $-x_p$ è zero.

2) Gli elettroni, arrivati in $-x_p$, vengono prelevati dal campo elettrico e vanno nella parte n, come nel transistore bipolare. La corrente è costante, e proporzionale alla derivata del profilo ($S = 1$ m^2):

$$I = qSD_n \frac{d\delta_n}{dx} = -qD_n \frac{\delta_{n\ sup} - \delta_n(-x_p)}{W} = 182 \ \ \mathrm{A} \tag{1}$$

3) La corrente calcolata nel punto 2 è quella dovuta all'illuminazione (fotocorrente), I_G. Quindi la caratteristica $I-V$ è quella di un fotodiodo- di un pannello fotovoltaico:

$$I = I_S\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) - I_G \tag{2}$$

e la tensione a circuito aperto è pari a:

$$0 = I_S\left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1\right) - I_G$$
$$V = V_T \ln\left(\frac{I_G}{I_S} - 1\right)$$

Dove ($S = 1$ m^2):

$$\begin{aligned}
I_S &= qn_i^2\left(\frac{D_n}{N_A W} + \frac{D_p}{L_p N_D}\right) \\
I_S &\simeq q\frac{D_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D} \\
D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.163 \times 10^{-3} \quad \mathrm{m^2/s} \\
L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 34.1 \quad \mu\mathrm{m} \\
I_S &= 1.23 \times 10^{-7} \quad \mathrm{A}
\end{aligned}$$

Quindi, a circuito aperto, avremo $V = 0.51$ V.

ESERCIZIO 2

Considerare un condensatore n-MOS ideale ($N_A = 10^{16}\ cm^{-3}$, $t_{ox} = 30$ nm). Viene applicato un gradino di ampiezza V ($V_{GB} = 0$ per $t < 0$, $V_{GB} = V$ per $t \geq 0$).

1) Determinare la carica fissa e mobile per $t = 0^+$ e $t \to \infty$ per un'ampiezza del gradino $V = 5$ V. [3]

2) Determinare la carica fissa e mobile per $t = 0^+$ e $t \to \infty$ per un'ampiezza del gradino $V = 2/3V_{TH}$. [4]

3) Con riferimento al punto 2 ($V = V_{GB} = 2/3V_{TH}$), determinare la concentrazione di elettroni all'interfaccia per $t = 0^+$ e $t \to \infty$, confermando di essere sotto la soglia di inversione. [3]

SOLUZIONE 2

1) Calcoliamo anzitutto la tensione di soglia:

$$\psi_B = V_T \ln\frac{N_A}{n_i} = 0.347 \quad \mathrm{V}$$

$$
\begin{aligned}
C_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = 1.151 \times 10^{-3} \\
\Phi_{MS} &= \frac{E_G}{2q} - \psi_B = 0.193 \;\; \mathrm{V} \\
V_{TH} &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B}}{C_{ox}} + 2\psi_B + \Phi_{MS} = 1.12 \;\; \mathrm{V}
\end{aligned}
$$

Quindi per $V = 5$ V siamo ben oltre la soglia. Per $t = 0^+$ abbiamo solo carica fissa, per determinare la quale serve calcolare $V_S(0^+)$.

$$
\begin{aligned}
5 &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A}}{C_{ox}}\sqrt{V_S} + V_S \\
5 &= 0.505\sqrt{V_S} + V_S \\
5 - V_S &= 0.505\sqrt{V_S} \\
25 + V_S^2 - 10V_S &= 0.255V_S \\
V_S^2 - 10.255V_S + 25 &= 0
\end{aligned}
$$

Da cui si ricava $V_{S1} = 6.135$ V e $V_{S2} = 3.86$ V, e quindi $V_S = 3.86$ V ($V_{S1} > V_{GS}$, inaccettabile). Quindi per $t = 0^+$ avremo (in valore assoluto, carica negativa):

$$
\begin{aligned}
Q_n &= 0 \\
Q_W &= \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} = 1.14 \;\; \mathrm{mC/m^2}
\end{aligned}
$$

A regime avremo (sempre in valore assoluto):

$$
\begin{aligned}
Q_n &= C_{ox}\left(V_{GS} - V_{TH}\right) = 4.24 \;\; \mathrm{mC/m^2} \\
Q_W &= \sqrt{2\epsilon_s q N_A 2\psi_B} = 0.48 \;\; \mathrm{mC/m^2}
\end{aligned}
$$

2) Secondo le approssimazioni usuali, $Q_n \approx 0$ per $V_{GS} < V_{TH}$. Tutta la carica è dovuta alla regione di svuotamento, che si forma istantaneamente (con tempi comparabili al tempo medio tra gli urti), e quindi è la stessa per $t = 0^+$ e $t \to \infty$. Re-impostiamo il conto di prima, ma con $V = 2/3V_{TH} = 0.873$:

$$
\begin{aligned}
0.873 &= \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A}}{C_{ox}}\sqrt{V_S} + V_S \\
0.873 &= 0.505\sqrt{V_S} + V_S \\
0.873 - V_S &= 0.505\sqrt{V_S} \\
0.762 + V_S^2 - 1.746V_S &= 0.255V_S \\
V_S^2 - 2.0V_S + 0.873 &= 0
\end{aligned}
$$

Da cui si ricava $V_{S1} = 1.35$ V e $V_{S2} = 0.645$ V, e quindi $V_S = 0.645$ V ($V_{S1} > V_{GS}$, inaccettabile). Avremo dunque:

$$\begin{aligned} Q_n(0^+) &= Q_n(\infty) \approx 0 \\ Q_W(0^+) &= Q_W(\infty) \approx \sqrt{2\epsilon_s q N_A V_S} = 0.47 \quad \mathrm{mC/m^2} \end{aligned}$$

3) La carica mobile (elettroni) all'interfaccia ossido-silicio (alla superficie) è $n_0 = n_i^2/N_A$ per $t < 0^+$, e cresce con $t > 0$ dopo l'applicazione del gradino. La carica mobile rimane comunque molto piccola, per cui vale sempre l'approssimazione di svuotamento completo. A regime avremo che la concentrazione di elettroni all'interfaccia è determinata da V_S:

$$\begin{aligned} V_S - V_{bulk} &= V_T \ln \frac{n_s}{n_{bulk}} \\ V_S &= V_T \ln \frac{n_s N_A}{n_i^2} \\ n_s &- \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{V_S}{V_T}} = 1.75 \times 10^{21} \quad \mathrm{m^{-3}} \end{aligned}$$

Quindi $n_s < N_A$, siamo sotto la soglia di inversione.

ESERCIZIO 3

Un transistore bipolare *npn* ha $N_{AB} = N_{DC} = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_n = 0.1$ m^2/Vs, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_n = \tau_p = 1$ μs, S=1 mm^2), $W_{met} = 4$ μm, sia l'emettitore che il collettore sono lunghi.

1) Determinare l'efficienza e il drogaggio minimo di emettitore per avere un β_f almeno pari a 150. [4] SUGGERIMENTO: fare riferimento alla W_{met}; in qualsiasi condizione di polarizzazione avremo $W < W_{met}$ e $\beta_f > \beta f\ min$.

2) Determinare la condizione di polarizzazione per avere β_f almeno pari a 170 (quale parametro bisogna imporre?). [4]

3) Con riferimento al punto 2, determinare le tensioni e le correnti ai terminali per $I_B = 10$ μA. [2]

SOLUZIONE 3

1) Calcoliamo α_f, α_T e l'efficienza di emettitore minima $\gamma = \gamma_E$. Da questo possiamo calcolare il drogaggio minimo:

$$\alpha_f = \frac{\beta_f}{\beta_f + 1} = 0.993377$$

$$
\begin{aligned}
\alpha_T &= \frac{1}{1+\frac{W^2}{2L_n^2}} \\
D_n &= \frac{kT}{q}\mu_n = 2.585\times10^{-3} \quad \mathrm{m^2/s} \\
L_n &= \sqrt{D_n\tau_n} = 50.84 \quad \mu\mathrm{m} \\
\alpha_T &= 0.996914 \\
\alpha_f &= \gamma\alpha_T \\
\gamma &= \frac{\alpha_f}{\alpha_T} = 0.996 \\
\gamma &= \frac{\frac{D_n}{N_{AB}W}}{\frac{D_n}{N_{AB}W}+\frac{D_p}{N_{DE}L_p}} \\
D_p &= \frac{kT}{q}\mu_p = 1.034\times10^{-3} \quad \mathrm{m^2/s} \\
L_p &= \sqrt{D_p\tau_p} = 32.15 \quad \mu\mathrm{m} \\
\gamma &= \frac{6.46\times10^{-20}}{6.46\times10^{-20}+\frac{32.16}{N_{DE}}}
\end{aligned}
$$

Da cui si ricava $N_{DE} = 7\times10^{22}\ \mathrm{m^{-3}}$.

2) Il β_f aumenta col diminuire della lunghezza effettiva, dovuto alla polarizzazione inversa della giunzione base-collettore. Calcoliamo W_{eff} necessaria per avere $\beta_f = 170$:

$$
\begin{aligned}
\alpha_f &= \frac{\beta_f}{\beta_f+1} = 0.994152 \\
\alpha_T &= \frac{\alpha_f}{\gamma} = 0.998146 \\
\alpha_T &= \frac{1}{1+\frac{W^2}{2L_n^2}} \\
W_{eff} &= 3.1 \quad \mu\mathrm{m} \\
x_{n\ base} &= W_{met} - W = 0.9 \quad \mu\mathrm{m}
\end{aligned}
$$

Quindi $W_{CB}(V_{CB}) = 1.8\ \mu$m, p oichè $N_{AB} = N_{DC}$. Avremo:

$$
\begin{aligned}
V_{0CB} &= V_T \ln\frac{N_{AB}N_{DC}}{n_i^2} = 0.69 \quad \mathrm{V} \\
W_{CB} = 1.8\ \mu\mathrm{m} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q}\frac{2}{N_{AB}}\left(V_{0CB}+V_{CB}\right)}
\end{aligned}
$$

da cui si ricava $V_{CB} = 48.6$ V. ATTENZIONE: il problema è mal condizionato numericamente;i numeri che si ottengono possono differire lievemente, in base ai decimali che si considerano per il calcolo.

3) Per $I_B = 10\ \mu$A avremo (I_C e I_B entranti, I_E uscente):

$$\begin{aligned}
I_C &= \beta_f I_B = 1.7 \ \ \text{mA} \\
I_E &= I_C + I_B \approx I_C \\
Q_{base} &= I_B \tau_n = qS\delta_n(0)\frac{W_{eff}}{2} \\
\delta_n(0) &= \frac{2I_B\tau_n}{qSW_{eff}} = 4 \times 10^{19} \ \ \text{m}^{-3} \\
\delta_n(0) &= \frac{n_i^2}{N_{AB}}\left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1\right) \\
V_{BE} &= V_T \ln \frac{\delta_n(0) N_{AB}}{n+i^2} = 0.55 \ \ \text{V}
\end{aligned}$$

Quindi $V_{CE} = 49.1$ V