PROVA SCRITTA di DISPOSITIVI ELETTRONICI del 22 novembre 2024

ESERCIZIO 1

1) Si enunci e dimostri il teorema di Shockely.[5]

Una giunzione p^+n ha $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_p = 1$ μs, $S = 1$ mm^2, base lunga. È polarizzata in maniera tale da avere il quasi-livello di Fermi delle lacune, in x_n, pari a $E_{fp} - E_V = 0.35$ eV.

2) Determinare la concentrazione di minoritari in eccesso, verificare le condizioni di bassa iniezione e, mediante la relazione di Shockley, determinare la tensione applicata.[3]

3) Determinare la corrente nel diodo. [2]

ESERCIZIO 2

Si consideri una buca di energia potenziale infinita per gli elettroni di ampiezza a ($V = 0$ per $0 < x < a$, $V \to \infty$ per x esterno all'intervallo $(0, a)$).

1) Si determini l'espressione dei livelli discreti di energia (autovalori dell'energia), in funzione di un numero intero n. [5]

2) Per $a = 1$ nm determinare l'energia dello stato fondamentale (per $n = 1$), sia in Joule che in eV. [3]

3) Un elettrone viene eccitato al livello di energia $n = 5$. Determinare l'energia rilasciata quando ritorna nel livello fondamentale (in Joule e in eV). [2]

ESERCIZIO 3

Un semiconduttore intrinseco ha una resistività pari a 2000 Ωm a temperatura ambiente. I tempi medi tra gli urti sono pari a 10^{-13} s sia per gli elettroni che per le lacune, mentre la mobilità delle lacune è la metà di quella degli elettroni. Il gap e la massa efficace per la densità degli stati sono le stesse del silicio.

1) Determinare la mobilità e la massa effettiva per il trasporto per gli elettroni e per le lacune.[4]

Il tempo medio tra gli urti dimezza ogni 100 gradi.

2) Determinare la resistività a $T = 450$ K.[3]

3) Il semiconduttore viene drogato $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, e di conseguenza il tempo medio tra gli urti diventa la metà per l'interazione con le impurezze. Determinare la resistività a temperatura ambiente e a $T = 450$ K. [3]

ESERCIZIO 1

1) Si enunci e dimostri il teorema di Shockely.[5]

Una giunzione p^+n ha $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, $\mu_p = 0.04$ m^2/Vs, $\tau_p = 1$ μs, $S = 1$ mm^2, base lunga. È polarizzata in maniera tale da avere il quasi-livello di Fermi delle lacune, in x_n, pari a $E_{fp} - E_V = 0.35$ eV.

2) Determinare la concentrazione di minoritari in eccesso, verificare le condizioni di bassa iniezione e, mediante la relazione di Shockley, determinare la tensione applicata.[3]

3) Determinare la corrente nel diodo. [2]

SOLUZIONE 1

1) Si faccia riferimento alla dispensa per la dimostrazione.

2) Avremo:

$$p(x_n) = N_V e^{-\frac{E_{fp}-E_V}{kT}} = 1.3 \times 10^{13} \quad \text{cm}^{-3} \tag{1}$$

Quindi la bassa iniezione è verificata poiché $p(x_n) \ll N_D$ e $p(x_n) \gg p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = 2.25 \times 10^4$ cm^{-3}. Utilizzando la relazione di Shockley è possibile ricavare la tensione:

$$\begin{aligned}
\delta p(x_n) &\approx p(x_n) = \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{V}{V_T}} \\
V &= V_T \ln \frac{\delta p(x_n) N_D}{n_i^2} = 0.52 \quad \text{V}
\end{aligned}$$

3) Per quanto riguarda la corrente avremo:

$$\begin{aligned}
I &= I_S e^{\frac{V}{V_T}} \\
I_S &= qS \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \\
D_p &= \frac{kT}{q} \mu_p = 1.034 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2/\text{s} \\
L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} = 32.15 \quad \mu\text{m} \\
I_S &= 0.115 \quad \text{pA} \\
I &= 63 \quad \mu\text{A}
\end{aligned}$$

ESERCIZIO 2

Si consideri una buca di energia potenziale infinita per gli elettroni di ampiezza a ($V = 0$ per $0 < x < a$, $V \to \infty$ per x esterno all'intervallo $(0, a)$).

1) Si determini l'espressione dei livelli discreti di energia (autovalori dell'energia), in funzione di un numero intero n. [5]

2) Per $a = 1$ nm determinare l'energia dello stato fondamentale (per $n = 1$), sia in Joule che in eV. [3]

3) Un elettrone viene eccitato al livello di energia $n = 5$. Determinare l'energia rilasciata quando ritorna nel livello fondamentale (in Joule e in eV). [2]

SOLUZIONE 2

1) Si rimanda alle dispense dimostrare che:

$$E(n) = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2ma^2} n^2 \tag{2}$$

dove $\hbar$ è la costante ridotta di Plank, m è la massa dell'elettrone.

2) Basta sostituire il valore delle costanti $h = 6.62 \times 10^{-34}$ Js, $\hbar = h/2\pi$, $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg:

$$E(1) = 6.01 \times 10^{-20} \text{ J} = 0.37 \text{ eV}$$

3) Basta calcolare $E(5)$ e sottrarci $E(1)$

$$\begin{aligned} E(5) &= E(1) \times 25 \\ E(5) - E(1) &= 24E(1) = 3 \times 10^{-19} \text{ kg} = 8.9 \text{ eV} \end{aligned}$$

ESERCIZIO 3

Un semiconduttore intrinseco ha una resistività pari a 2000 Ωm a temperatura ambiente. I tempi medi tra gli urti sono pari a 10^{-13} s sia per gli elettroni che per le lacune, mentre la mobilità delle lacune è la metà di quella degli elettroni. Il gap e la massa efficace per la densità degli stati sono le stesse del silicio.

1) Determinare la mobilità e la massa effettiva per il trasporto per gli elettroni e per le lacune.[4]

Il tempo medio tra gli urti dimezza ogni 100 gradi.

2) Determinare la resistività a $T = 450$ K.[3]

3) Il semiconduttore viene drogato $N_D = 10^{16}$ cm^{-3}, e di conseguenza il tempo medio tra gli urti diventa la metà per l'interazione con le impurezze. Determinare la resistività a temperatura ambiente e a $T = 450$ K. [3]

SOLUZIONE

1) Poiché il gap e le masse efficaci per le densità degli stati sono quelli del silicio, per il semiconduttore intrinseco avremo che $p = n = n_i$. Dunque:

$$\begin{aligned}
\sigma &= \frac{1}{\rho} = 5 \times 10^{-4} \\
\sigma &= \sigma_n + \sigma_p = 2\sigma_p + \sigma_p = 3\sigma_p \\
\sigma_p &= q\mu_p p = \frac{\sigma}{3} = 1.7 \times 10^{-4} \\
\mu_p &= \frac{1.7 \times 10^{-4}}{qp} = \frac{1.7 \times 10^{-4}}{qn_i} = 0.071 \quad \mathrm{m^2/Vs} \\
\mu_n &= 0.141 \quad \mathrm{m^2/Vs} \\
\mu_p &= \frac{q}{m_{ep}}\tau \\
m_{ep} &= \frac{q\tau}{\mu_p} = 2.25 \times 10^{-31} \quad \mathrm{kg} \\
m_{ep} &= 0.247 m_0 \\
m_{en} &= 0.12 m_0
\end{aligned}$$

dove m_0 è la massa a riposo dell'elettrone.

2) Il tempo medio tra gli urti, e quindi le mobilità, dimezzano ogni 100 gradi. La concentrazione di portatori aumenta però esponenzialmente:

$$\begin{aligned}
n_i &= \sqrt{N_C N_V} e^{\frac{-E_g}{2kT}} \\
N_C(450) &= N_C(300) \left(\frac{450}{300}\right)^{\frac{3}{2}} = 5.14 \times 10^{19} \quad \mathrm{cm^{-3}} \\
N_V(450) &= N_V(300) \left(\frac{450}{300}\right)^{\frac{3}{2}} = 1.83 \times 10^{19} \quad \mathrm{cm^{-3}} \\
n_i &= 2.73 \times 10^{13} \quad \mathrm{cm^{-3}} \\
\mu_p(450) &= \mu_p(300) \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{450-300}{100}} = 0.025 \\
\mu_n(450) &= 0.049 \\
\sigma &= (q\mu_p + q\mu_n)\, n_i = 0.315 \\
\rho &= 3.17 \quad \Omega \mathrm{m}
\end{aligned}$$

3) A temperatura ambiente $n = N_D >> p$, quindi $\sigma_n >> \sigma_p$ e la mobilità dimezza

per l'aumento delle impurezze:

$$\begin{aligned}
\mu_n &= 0.141/2 = 0.0705 \quad \mathrm{m^2/Vs} \\
\sigma_n &= q\mu_n n = 113 \\
\rho_n &= 8.85 \times 10^{-3} \quad \Omega\mathrm{m}
\end{aligned}$$

Questo a temperatura ambiente. A 450 K la concentrazione di elettroni è la stessa, poich'e siamo nel range delle temperature di svuotamento. La mobilità si riduce ulteriormente, rispetto a quella a temperatura ambiente:

$$\begin{aligned}
\mu_n(450) &= \mu_n(300)\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{450-300}{100}} = 0.025 \\
\sigma_n &= q\mu_n n = 56.5 \\
\rho_n(450) &= 2\rho_n(300) = 0.0176 \quad \Omega\mathrm{m}
\end{aligned}$$