Problema 1

Si consideri a $T=300K$ un diodo Schottky realizzato con oro (Au) su arseniuro di gallio ($GaAs$) di tipo-n drogato con $N_d = 5\cdot 10^{16} cm^{-3}$. L'altezza di barriera è $q\varphi_{B0}$=0.87eV. Determinare in assenza di polarizzazione *(a)* l'energia potenziale di built-in qV_{bi}; *(b)* la larghezza x_d della zona di svuotamento; *(c)* il campo elettrico E_{max} alla giunzione metallo-semiconduttore. (d) Determinare il voltaggio inverso V_R a cui l'abbassamento $q\Delta\varphi$ della barriera Schottky è pari al 7% di $q\varphi_{B0}$.

($N_C = 4.7\ 10^{17}\ cm^{-3}$; $\epsilon_{rel,GaAs} = 13.1$; $\epsilon_0 = 8.85\cdot 10^{-14}$ F/cm; $k = 1.38\ 10^{-23}$ J/K)

a) $qV_{bi} = q\Phi_{B0} - (E_c - E_F)$ $\qquad q\Phi_{B0} = 0.870 eV$; $E_c - E_F$

si ricava dalla relazione $n = N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_F}{KT}\right]$

$n = N_d = 5\cdot 10^{16} cm^{-3}$ $\qquad \frac{N_c}{n} = \exp\left[\frac{E_c - E_F}{KT}\right] = \frac{N_c}{N_d}$

$E_c - E_F = KT \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) = 0.0259 \ln \frac{4.7\ 10^{17}}{5\ 10^{16}} = 0.058 eV$

$qV_{bi} = 0.870 - 0.058 = 0.812 eV$

b) $x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_{GaAs} V_{bi}}{qN_d}} = \sqrt{\frac{2\cdot 13.1\cdot 8.85\cdot 10^{-14}\ 0.812}{1.6\cdot 10^{-19}\ 5\cdot 10^{16}}} = 0.153 \mu m$

c) $|E_{max}| = \frac{qN_d x_d}{\epsilon_{GaAs}} = \frac{1.6\cdot 10^{-19}\ 5\cdot 10^{16}\ 0.153\cdot 10^{-4}}{13.1\cdot 8.85\ 10^{-14}} \simeq 1.06\cdot 10^5 \frac{V}{cm}$

d) $\Delta\varphi = 7\%\ q\varphi_{B0} = 0.07\ 0.870 = 0.0609 eV$

$\Delta\varphi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_{GaAs}}} \Rightarrow \Delta\varphi^2 = \frac{qE'_{max}}{4\pi\epsilon_{GaAs}} \Rightarrow$ (per E si è usato il valore di E_{max})

$E'_{max} = \frac{4\pi\epsilon_{GaAs}}{q}\Delta\varphi^2 = \frac{4\cdot\pi\cdot 13.1\cdot 8.85\cdot 10^{-14}(0.0609)^2}{1.6\cdot 10^{-19}} \simeq 3.38\cdot 10^5 \frac{V}{cm}$

$\frac{1}{2} E'_{max} x'_d = (V_{bi} + V_R)$ $\qquad$ con $x'_d = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_{bi}+V_R)}{qN_d}}$

$\frac{1}{2} E'_{max} \sqrt{\frac{2\epsilon_{GaAs}(V_{bi}+V_R)}{qN_d}} = V_{bi} + V_R \Rightarrow \frac{1}{2} E'_{max} \sqrt{\frac{2\epsilon_{GaAs}}{qN_d}} = \sqrt{V_{bi}+V_R}$

$\frac{1}{4} E'^2_{max} \frac{2\epsilon_{GaAs}}{qN_d} = V_{bi} + V_R = \frac{1}{4}\frac{(3.38\cdot 10^5)^2\ 2\cdot 13.1\cdot 8.85\cdot 10^{-14}}{1.6\ 10^{-19}\ 5\cdot 10^{16}} = 8.28 V$

$\Rightarrow V_R = 8.28 - 0.812 \cong 7.47 V$

Quesito 1

Si consideri una quantum well in *GaAs*. La massa efficace degli elettroni nel *GaAs* è $m^*_e=0.07\ m_0$, la massa efficace delle lacune è $m^*_h=0.5\ m_0$ (dove $m_0=9.11\ 10^{-31}\ kg$ è la massa dell'elettrone libero), $E_{gap}=1.42\ eV$. Lo spessore della quantum well è $d=10\ nm$.

(a) Calcolare il valore E_1 del primo livello di energia di un elettrone rispetto al bordo E_C della banda di conduzione.

(b) Calcolare il valore E'_1 del primo livello di energia di una lacuna rispetto al bordo E_V della banda di valenza.

(c) Calcolare la distanza in energia fra il primo livello di energia dell'elettrone e il primo livello di energia di una lacuna nella quantum well.

(d) Calcolare la lunghezza d'onda del fotone emesso per ricombinazione *e-h* nella quantum well e confrontarla con quella del *GaAs "bulk"*. Calcolare la variazione di lunghezza d'onda $\Delta\lambda$.

a) $$E_1 = \frac{h^2}{8\, m^*_e d^2} = \frac{(6.625\cdot 10^{-34})^2}{8\ 0.07\ 9.11\ 10^{-31}\,(10\cdot 10^{-9})^2} \simeq 8.6\cdot 10^{-21}\ J \simeq$$

$$\simeq 0.0538\ eV$$

b) $$E'_1 = \frac{h^2}{8\, m^*_h d^2} = \frac{(6.625\cdot 10^{-34})^2}{8\cdot 0.5\ 9.11\cdot 10^{-31}\,(10\cdot 10^{-9})^2} \simeq 1.2\ 10^{-21}\ J \simeq$$

$$\simeq 0.0075\ eV$$

c) $E_{gap} = 1.42\ eV$

$$E_1 + E_{gap} + E'_1 = 0.0538 + 1.42 + 0.0075 \simeq 1.48\ eV$$

d) $$\lambda_{QW}(nm) \simeq \frac{1240}{E_{QW}(eV)} \simeq 838\ nm$$

$$\lambda_{GaAs\ bulk}(nm) = \frac{1240}{E_{gap\ GaAs}(nm)} = \frac{1240}{1.42} \simeq 873\ nm$$

$$\Delta\lambda = \lambda_{bulk} - \lambda_{QW} = 873 - 838 \simeq 35\ nm$$

Quesito 2

Si consideri un campione di *GaAs* di tipo-*n* irradiato con fotoni di energia $h\nu = 1.9\ eV$. La concentrazione di portatori minoritari in eccesso è $\delta p = 10^{15} cm^{-3}$ sulla superficie del campione. Sapendo che il coefficiente di assorbimento del *GaAs* a $1.9\ eV$ è $\alpha = 1.3 \cdot 10^4\ cm^{-1}$ e che il tempo di vita τ dei portatori in eccesso è $\tau = 10^{-7}\ s$, calcolare:

(a) l'intensità I_0 del fascio incidente sulla superficie del campione;

(b) a quale distanza x dalla superficie del campione il rate di generazione $g'(x)$ diventa il *20%* di quello alla superficie ($g'(0)$).

---

a) $h\nu = 1.9\ eV$

$\delta p = \delta n = 10^{15} cm^{-3}$

$\alpha(1.9\ eV) = 1.3\ 10^4\ cm^{-1}$

$\tau = 10^{-7}\ s$

sappiamo che $\delta p = \delta n = g' \tau \implies g' = \frac{\delta p}{\tau} = \frac{10^{15}}{10^{-7}} = 10^{22}\ cm^{-3} s^{-1}$

ma $g'(x) = \frac{\alpha I(x)}{h\nu}$

quindi $I(x) = \frac{h\nu}{\alpha} g'(x)$

In prossimità della superficie $g'(0) = 10^{22} cm^{-3} s^{-1}$ quindi

$$I_0 = I(0) = \frac{h\nu}{\alpha} g'(0) = \frac{1.9 \cdot 1.6\ 10^{-19}}{1.3\ 10^4}\ 10^{22} = 0.234\ \frac{W}{cm^2}$$

b) $g'(x)$ diventa il 20% di $g'(0)$ a quella distanza x a cui l'intensità $I(x)$ diventa il 20% di I_0:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \implies \frac{I(x)}{I_0} = \exp(-\alpha x)$$

$$\frac{I(x)}{I_0} = 0.2 = \exp(-1.3 \cdot 10^4 x)$$

$$\ln 0.2 = -1.3 \cdot 10^4 x \implies x = -\frac{\ln 0.2}{1.3}\ 10^{-4} cm = 1.24\ \mu m$$

Quesito 3
Un fascio di luce incide su un lastra di *GaAs* di spessore $d=1\mu m$. Se il *60%* dell'intensità incidente è assorbita dal semiconduttore, determinare il coefficiente di assorbimento α.

$$I(x) = I_0 \exp[-\alpha x]$$

per $x = d = 1\,\mu m = 10^{-4}\,cm$ il 60% dell'intensità è assorbita dal semiconduttore, quindi il 40% viene trasmesso

$$I(d) = 0.40 I_0$$

$$\frac{I(d)}{I_0} = 0.40 = \exp[-\alpha d]$$

$$\ln 0.40 = -\alpha d$$

$$\alpha = -\frac{1}{d}\ln(0.40) = -\frac{1}{10^{-4}}\ln 0.40 =$$

$$= 9.16 \cdot 10^{3}\,cm^{-1}$$

Quesito 4
Partendo dalla relazione

$$n_0 = N_c \exp\left[\frac{-(E_c - E_F)}{kT}\right]$$

che esprime la concentrazione n_0 di elettroni in banda di conduzione all'equilibrio termico in funzione di N_C e di E_C-E_F, ricavare n_0 in funzione di n_i e di E_F-E_{Fi} :

$$n_0 = n_i \exp\left[\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right]$$

$$n_0 = N_c \exp\left[-\frac{(E_c - E_F)}{kT}\right]$$

La concentrazione intrinseca è data da:

$$n_i = N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_{Fi}}{kT}\right]$$

Aggiungendo e togliendo E_{Fi} dall'argomento dell'esponenziale nella 1ª eq.:

$$n_0 = N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_{Fi} + E_{Fi} - E_F}{kT}\right] =$$

$$= N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_{Fi}}{kT}\right] \exp\left[-\frac{E_{Fi} - E_F}{kT}\right] \Rightarrow$$

$$\boxed{n_0 = n_i \exp\left[\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right]}$$

Quesito 5

Un campione di *GaAs* a $T=300K$ contiene impurità accettatrici con concentrazione $N_a=10^{15}cm^{-3}$.

(a) Calcolare la distanza fra il livello di Fermi intrinseco E_{Fi} e il livello di Fermi E'_F.

(b) Si vuole che il livello di Fermi E_F si trovi $0.45eV$ sotto il livello di Fermi intrinseco. Determinare la concentrazione e il tipo di impurità (donori oppure accettori) che devono essere aggiunte.

a) $$p'_0 = n_i \exp\left[\frac{E_{Fi} - E'_F}{KT}\right]$$

$n_i(GaAs) = 1.8 \cdot 10^6 \ cm^{-3}$ (vedi Tabella 4.2 Neamen)

$p'_0 = N_a = 10^{15} \ cm^{-3}$ $\qquad KT = 0.0259 \ eV$ (a $T = 300K$)

$$\frac{p'_0}{n_i} = \frac{N_a}{n_i} = \exp\left[\frac{E_{Fi} - E'_F}{KT}\right] = \frac{10^{15}}{1.8 \cdot 10^6} \Rightarrow$$

$$E_{Fi} - E'_F = KT \ln \frac{N_a}{n_i} = 0.0259 \ln\left[\frac{10^{15}}{1.8 \ 10^6}\right]$$

$$\cong 0.52 \ eV$$

b) Si vuole portare il livello di Fermi a 0.45eV sotto il livello di Fermi intrinseco. Dobbiamo quindi aggiungere impurità donatrici che compensino parzialmente le impurità accettatrici la cui concentrazione $p'_0 = N_a = 10^{15} \ cm^{-3}$ determina un livello di Fermi a 0.52eV sotto E_{Fi}.

$$p_0 = n_i \exp\left[\frac{E_{Fi} - E_F}{KT}\right] = 1.8 \cdot 10^6 \exp\left[\frac{\overbrace{E_{Fi} - E_F}^{0.45eV}}{0.0259}\right]$$

$p_0 \cong 6.32 \cdot 10^{13} \ cm^{-3} \Rightarrow p_0 = N_a - N_d$ ← numero donori da aggiungere

$$N_d = N_a - p_0 = 10^{15} - 6.32 \cdot 10^{13} \cong 9.37 \cdot 10^{14} \ cm^{-3}$$