

Data _____ Cognome _____ Nome _____ n. matricola _____

Problema 1

Un diodo Schottky platino-silicio (*PtSi*) a temperatura $T=300K$ è fabbricato su silicio di tipo-n avente una concentrazione di impurità donatrici pari a $N_d=10^{16} cm^{-3}$. (a) Determinare l'altezza di barriera teorica $q\phi_{B0}$. (b) Determinare la distanza E_C-E_F fra il bordo inferiore della banda di conduzione ed il livello di Fermi.

L'altezza di barriera misurata sperimentalmente è $q\phi_{Bn}=0.89eV$. (c) Determinare l'energia potenziale di built-in qV_{bi} .

La densità di corrente di saturazione inversa in un diodo Schottky J_{sT} è data dalla relazione:

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_{Bn}}{kT}\right)$$

dove A^* è la costante di Richardson pari a $A^* = 120 A cm^{-2} K^{-2}$. (d) Determinare la densità di corrente di saturazione inversa J_{sT} a $T=300K$.

($q\phi_{Pt} = 5.65 eV$; $q\chi_{Si} = 4.01 eV$; $N_C = 2.8 \cdot 10^{19} cm^{-3}$; $k = 1.38 \cdot 10^{-23} J/K$.)

Quesito 1

La costante reticolare di un cristallo è $a=4.50 \text{ \AA}$. Calcolare la densità superficiale di atomi sui piani (100), (110) e (111) per le seguenti strutture: (a) cubica semplice; (b) cubica a corpo centrato; (c) cubica a facce centrate.

Quesito 2

Si calcoli nel silicio a $T=300K$ la posizione esatta del livello di Fermi intrinseco E_{Fi} rispetto al centro della bandgap $(E_C+E_V)/2$. Si utilizzino per le masse efficaci degli elettroni e delle lacune i seguenti valori: $m_n^* = 1.08m_0$ e $m_p^* = 0.56m_0$ dove m_0 è la massa dell'elettrone libero. Le densità efficaci di stati in banda di conduzione N_C e in banda di valenza N_V sono date dalle seguenti espressioni:

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \quad N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

Quesito 3

Un campione di silicio a $T=300K$ contiene impurità accettrici con concentrazione $N_a=10^{16} cm^{-3}$ e impurità donatrici con concentrazione $N_d=3 \cdot 10^{13} cm^{-3}$. Calcolare la concentrazione di lacune p_0 e di elettroni n_0 all'equilibrio termico. Si assuma $n_i=1.5 \cdot 10^{10} cm^{-3}$.

Quesito 4

Si consideri un campione di germanio a $T=300K$. Calcolare le concentrazioni di equilibrio termico di elettroni n_0 e di lacune p_0 nei seguenti casi: (a) $N_a=10^{13} cm^{-3}$ e $N_d=0$; (b) $N_d=5 \cdot 10^{15} cm^{-3}$ e $N_a=0$. Si assuma $n_i=2.4 \cdot 10^{13} cm^{-3}$.

Quesito 5

Si consideri una eterogiunzione n-P realizzata usando germanio (*Ge*) di tipo-n e arseniuro di gallio (*GaAs*) di tipo-P. Calcolare, utilizzando la regola dell'affinità elettronica, ΔE_C e ΔE_V .

($E_{gap, Ge} = 0.66 eV$, $e\chi_{Ge} = 4.13 eV$; $E_{gap, GaAs} = 1.42 eV$, $e\chi_{GaAs} = 4.07 eV$).

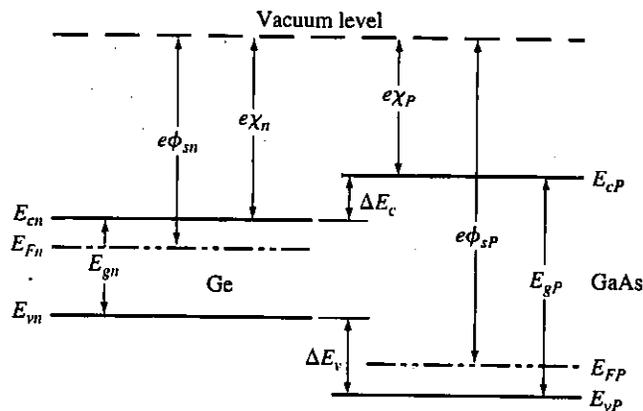


Table B.4 | Silicon, gallium arsenide, and germanium properties ($T = 300$ K)

Property	Si	GaAs	Ge
Atoms (cm^{-3})	5.0×10^{22}	4.42×10^{22}	4.42×10^{22}
Atomic weight	28.09	144.63	72.60
Crystal structure	Diamond	Zincblende	Diamond
Density (g/cm^{-3})	2.33	5.32	5.33
Lattice constant (\AA)	5.43	5.65	5.65
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	1415	1238	937
Dielectric constant	11.7	13.1	16.0
Bandgap energy (eV)	1.12	1.42	0.66
Electron affinity, χ (volts)	4.01	4.07	4.13
Effective density of states in conduction band, N_c (cm^{-3})	2.8×10^{19}	4.7×10^{17}	1.04×10^{19}
Effective density of states in valence band, N_v (cm^{-3})	1.04×10^{19}	7.0×10^{18}	6.0×10^{18}
Intrinsic carrier concentration (cm^{-3})	1.5×10^{10}	1.8×10^6	2.4×10^{13}
Mobility ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)			
Electron, μ_n	1350	8500	3900
Hole, μ_p	480	400	1900
Effective mass $\left(\frac{m^*}{m_0}\right)$			
Electrons	$m_c^* = 0.98$ $m_v^* = 0.19$	0.067	1.64 0.082
Holes	$m_{lh}^* = 0.16$ $m_{hh}^* = 0.49$	0.082 0.45	0.044 0.28
Effective mass (density of states)			
Electrons $\left(\frac{m_n^*}{m_0}\right)$	1.08	0.067	0.55
Holes $\left(\frac{m_p^*}{m_0}\right)$	0.56	0.48	0.37

Problema 1

Un diodo Schottky platino-silicio (PtSi) a temperatura $T=300K$ è fabbricato su silicio di tipo-n avente una concentrazione di impurità donatrici pari a $N_d=10^{16}cm^{-3}$. (a) Determinare l'altezza di barriera teorica $q\phi_{B0}$. (b) Determinare la distanza E_c-E_F fra il bordo inferiore della banda di conduzione ed il livello di Fermi.

L'altezza di barriera misurata sperimentalmente è $q\phi_{Bm}=0.89eV$. (c) Determinare l'energia potenziale di built-in qV_{bi} .

La densità di corrente di saturazione inversa in un diodo Schottky J_{sT} è data dalla relazione:

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_{Bm}}{kT}\right)$$

dove A^* è la costante di Richardson pari a $A^*=120 A cm^{-2} K^{-2}$. (d) Determinare la densità di corrente di saturazione inversa J_{sT} a $T=300K$.

($q\phi_{Pt} = 5.65 eV$; $q\chi_{Si} = 4.01 eV$; $N_c = 2.8 \cdot 10^{19} cm^{-3}$; $k = 1.38 \cdot 10^{-23} J/K$.)

$$(a) \quad q\phi_{B0} = q\phi_{Pt} - q\chi_{Si} = 5.65 - 4.01 = 1.64 eV$$

$$(b) \quad N_d = 10^{16} cm^{-3} \Rightarrow n_i = 1.5 \cdot 10^{10} cm^{-3} \text{ a } T=300K$$

~~nell'ipotesi di ionizzazione completa~~

$$n \approx N_d = 10^{16} cm^{-3}$$

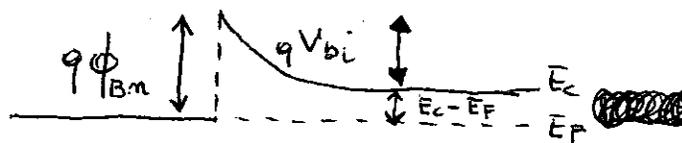
$$n = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}} \Rightarrow \frac{N_d}{N_c} = e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$$

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

$$E_c - E_F = kT \ln \frac{N_c}{N_d} = 0.0259 \ln\left(\frac{2.8 \cdot 10^{19}}{10^{16}}\right) = 0.206 eV$$

(c) L'altezza di barriera ricavata sperimentalmente è $q\phi_{Bm} = 0.89 eV$. L'energia potenziale di built-in può essere ricavata dalle relazioni:

$$qV_{bi} = q\phi_{Bm} - (E_c - E_F)$$



(d)

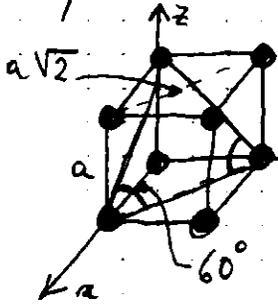
$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bm}}{kT}\right) =$$

$$= 120 \cdot 300^2 \exp\left(-\frac{0.89}{0.0259}\right) = 1.29 \cdot 10^{-8} \frac{A}{cm^2}$$

Quesito 1

La costante reticolare di un cristallo è $a=4.50 \text{ \AA}$. Calcolare la densità superficiale di atomi sui piani (100), (110) e (111) per le seguenti strutture: (a) cubica semplice; (b) cubica a corpo centrato; (c) cubica a facce centrate.

a) struttura cubica semplice (sc): $a=4.50 \text{ \AA} = 4.50 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$



•) nel piano (100) $n^{\circ} \text{ atomi} = 4 \cdot \frac{1}{4} = 1$

$$n(100) = \frac{1 \text{ atomo}}{a^2} = \frac{1}{(4.5 \cdot 10^{-8})^2} \approx 4.94 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$$

•) nel piano (110) $n^{\circ} \text{ atomi} = 4 \cdot \frac{1}{4} = 1$

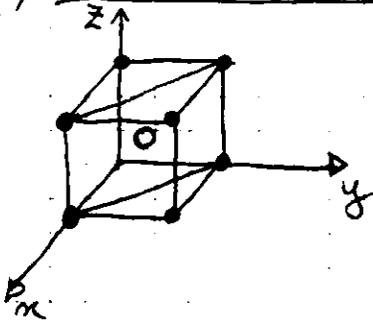
$$n(110) = \frac{1 \text{ atomo}}{a \cdot a \sqrt{2}} = 3.49 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$$

•) nel piano (111) $n^{\circ} \text{ atomi} = 3 \cdot \frac{60^{\circ}}{360^{\circ}} = 3 \cdot \frac{1}{6} = \frac{1}{2}$

$$n(111) = \frac{n^{\circ} \text{ atomi}}{\text{area triangolo equilatero}} = \frac{\frac{1}{2}}{a \sqrt{2} \cdot (a \sqrt{2} \sin 60^{\circ})} =$$

$$= \frac{\frac{1}{2}}{a^2 \frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{1}{\sqrt{3} a^2} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{3} (4.5 \cdot 10^{-8})^2} = 2.85 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$$

b) struttura cubica a corpo centrato, body centered cubic (bcc):



•) nel piano (100) la situazione è perfettamente identica a quella delle strutture simple cubic (sc)

$$n = \frac{1 \text{ atomo}}{a^2} = 4.94 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$$

•) Nel piano (110) l'atomo al centro della cella cubica appartiene completamente al piano (110), quindi

$$n^{\circ} \text{ atomi} = 4 \cdot \frac{1}{4} + 1 = 2 \text{ atomi}$$

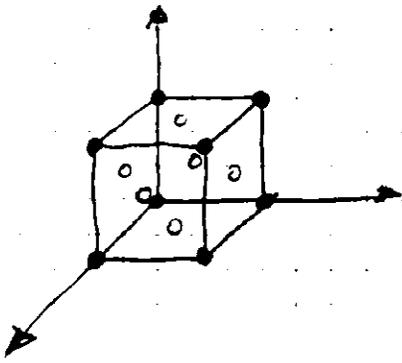
$$n(110) = \frac{n^{\circ} \text{ atomi}}{a \cdot \sqrt{2} a} = \frac{2}{\sqrt{2} a^2} = 6.98 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$$

•) nel piano (111) la condizione è perfettamente identica a quella delle strutture "simple cubic" perché l'atomo al centro della ~~cella~~ cella cubica NON sta sul piano (111)

$$n = 2.85 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$$

c) struttura cubica a facce centrate (Face centered cubic, fcc)

gli atomi al centro delle facce quadrate sono indicati con il pallino vuoto \circ .

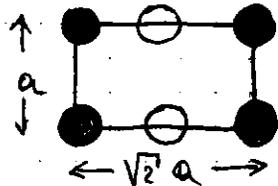


•) Piano (100):

$$n^{\circ} \text{ atomi} = 4 \cdot \frac{1}{4} + 1 = 2 \text{ atomi}$$

$$m(100) = \frac{2}{(4.50 \cdot 10^{-8})^2} = 9.88 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$$

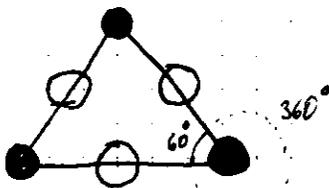
•) Piano (110)



$$n^{\circ} \text{ atomi} = 4 \cdot \frac{1}{4} + 2 \cdot \frac{1}{2} = 2 \text{ atomi}$$

$$m(110) = \frac{2 \text{ atomi}}{\sqrt{2} a \cdot a} = \frac{2}{\sqrt{2} (4.50 \cdot 10^{-8})^2} = 6.98 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$$

•) Piano (111)



$$n^{\circ} \text{ atomi} = 3 \cdot \frac{1}{6} + 3 \cdot \frac{1}{2} = 2 \text{ atomi}$$

$$\begin{aligned} \text{area triangolo equilatero} &= \frac{b \cdot h}{2} \\ &= \frac{\sqrt{2} a \cdot \sqrt{2} a \sin 60^{\circ}}{2} = a^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned}$$

$$m(111) = \frac{2}{a^2 \frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{4}{\sqrt{3} (4.50 \cdot 10^{-8})^2} = 1.14 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$$

Quesito 2

Si calcoli nel silicio a $T=300K$ la posizione esatta del livello di Fermi intrinseco E_{Fi} rispetto al centro della bandgap $(E_c+E_v)/2$. Si utilizzino per le masse efficaci degli elettroni e delle lacune i seguenti valori: $m_n^*=1.08m_0$ e $m_p^*=0.56m_0$ dove m_0 è la massa dell'elettrone libero. Le densità efficaci di stati in banda di conduzione N_c e in banda di valenza N_v sono date dalle seguenti espressioni:

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

In un semiconduttore intrinseco $n_i = p_i$.

$$n_i = N_c \exp\left(-\frac{(E_c - E_{Fi})}{kT}\right) \quad p_i = N_v \exp\left[-\frac{(E_{Fi} - E_v)}{kT}\right]$$

$$N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_{Fi}}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{E_{Fi} - E_v}{kT}\right)$$

$$\exp + \frac{E_{Fi} - E_v}{kT} \exp \frac{E_{Fi} - E_c}{kT} = \frac{N_v}{N_c}$$

$$\exp \frac{2E_{Fi} - (E_c + E_v)}{kT} = \frac{N_v}{N_c}$$

$$\frac{2E_{Fi} - (E_c + E_v)}{kT} = \ln \frac{N_v}{N_c}$$

$$2E_{Fi} = E_c + E_v + kT \ln \frac{N_v}{N_c}$$

$$E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{1}{2} kT \ln \frac{N_v}{N_c}$$

$$\text{ma } N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$\Rightarrow \frac{N_v}{N_c} = \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)^{3/2} \Rightarrow \frac{1}{2} kT \ln \frac{N_v}{N_c} = \frac{1}{2} kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)^{3/2}$$

$$= \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p^*}{m_n^*} \Rightarrow \boxed{E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)}$$

$$E_{Fi} - \frac{E_c + E_v}{2} = \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p^*}{m_n^*} =$$

$$= \frac{3}{4} 0.0259 \ln \frac{0.56 m_0}{1.08 m_0} \cong -0.0128 \text{ eV}$$

Quesito 3

Un campione di silicio a $T=300K$ contiene impurità accettatrici con concentrazione $N_a=10^{16}cm^{-3}$ e impurità donatrici con concentrazione $N_d=3 \cdot 10^{15}cm^{-3}$. Calcolare la concentrazione di lacune p_0 e di elettroni n_0 all'equilibrio termico. Si assuma $n_i=1.5 \cdot 10^{10}cm^{-3}$.

$$T = 300 K \quad n_i = 1.5 \cdot 10^{10} cm^{-3}$$

$$N_a = 10^{16} cm^{-3} = 10 \cdot 10^{15} cm^{-3}$$

$$N_d = 3 \cdot 10^{15} cm^{-3}$$

$N_a > N_d \Rightarrow$ la concentrazione ~~di~~ netta di impurità è:

$$N_a - N_d = 10 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{15} = 7 \cdot 10^{15} cm^{-3}$$

il semiconduttore compensato è quindi di tipo-p.

La concentrazione di portatori si ricava, nell'ipotesi di ionizzazione completa, osservando che

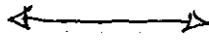
$$N_a - N_d \gg n_i \quad \text{quindi} \quad p_0 \approx (N_a - N_d) = 7 \cdot 10^{15} cm^{-3}$$

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} \quad \text{dalla legge di azione di massa}$$

$$n_0 = \frac{(1.5 \cdot 10^{10})^2}{7 \cdot 10^{15}} = 3.2 \cdot 10^4 cm^{-3}$$

Quesito 4

Si consideri un campione di germanio a $T=300K$. Calcolare le concentrazioni di equilibrio termico di elettroni n_0 e di lacune p_0 nei seguenti casi: (a) $N_a=10^{13} \text{ cm}^{-3}$ e $N_d=0$; (b) $N_d=5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ e $N_a=0$. Si assumi $n_i=2.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.



Nel germanio a $T=300K$ la $n_i = 2.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

(a) $N_a = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ e $N_d = 0$

La concentrazione di impurità ~~accettatrici~~ accettatrici N_a è confrontabile con la concentrazione intrinseca n_i , quindi è necessario utilizzare la formula esatta

$$p_0 = \frac{(N_a - N_d) + \sqrt{(N_a - N_d)^2 + 4n_i^2}}{2} =$$

$$= \frac{10^{13} + \sqrt{(10^{13})^2 + 4 \cdot (2.4 \cdot 10^{13})^2}}{2} \approx 2.95 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = \frac{(2.4 \cdot 10^{13})^2}{2.95 \cdot 10^{13}} \approx 1.95 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

(b) $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \gg n_i = 2.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

possiamo utilizzare la formula approssimata

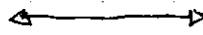
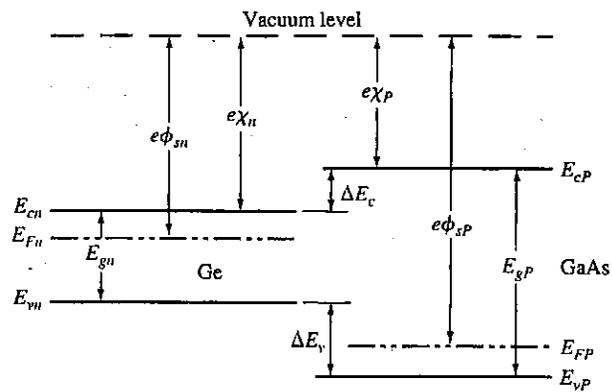
$$n_0 \approx N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = 1.15 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

Quesito 5

Si consideri una eterogiunzione n - P realizzata usando germanio (Ge) di tipo- n e arseniuro di gallio ($GaAs$) di tipo- P . Calcolare, utilizzando la regola dell'affinità elettronica, ΔE_c e ΔE_v .

($E_{gap, Ge} = 0.66 \text{ eV}$, $e\chi_{Ge} = 4.13 \text{ eV}$; $E_{gap, GaAs} = 1.42 \text{ eV}$, $e\chi_{GaAs} = 4.07 \text{ eV}$).



$$E_{gap}^{GaAs} = E_{gap}^{Ge} + \Delta \bar{E}_c + \Delta \bar{E}_v$$

$$\Delta \bar{E}_c = e\chi_{Ge} - e\chi_{GaAs} = 4.13 - 4.07 = 0.06 \text{ eV}$$

$$\Delta E_v = E_{gap}^{GaAs} - E_{gap}^{Ge} - \Delta \bar{E}_c =$$

$$= 1.42 - 0.66 - 0.06 = 0.7 \text{ eV}$$