UNIVERSITE ZIANE ACHOUR –DJELFA-

Faculté des Sciences Exactes et Informatique

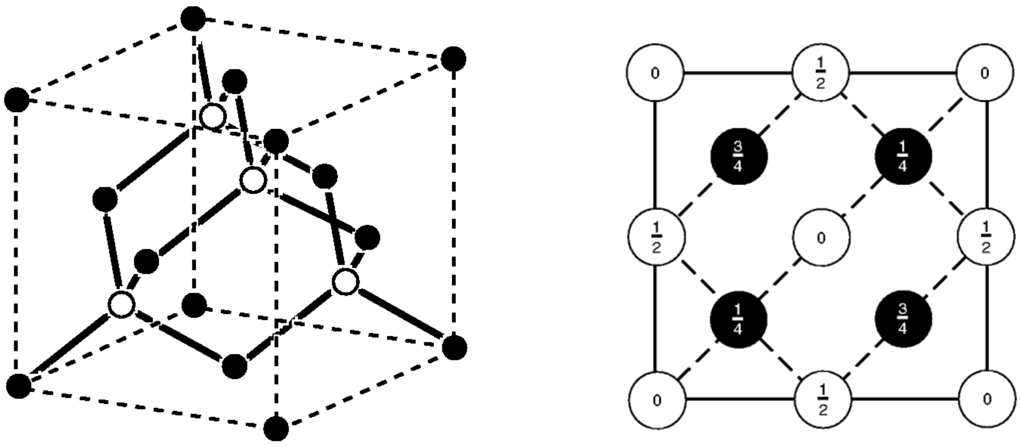
Département : PHYSIQUE - 3ème Année PHYSIQUE DES MATERIAUX **Année universitaire : 2019 /2020**

PHYSIQUE DES SEMICONDUCTEURS

CORRECTION DE TD N° 01

EXERCICE 01:

1. Structure cristalline du Silicium : Diamant.
Structure diamant = réseau cubique à faces centrées + base de deux atomes identiques $(0,0,0)$ et $(1/4\,,1/4\,,1/4)$.



Structure diamant, sa structure et l'emplacement des atomes dans la maille.

2. Nombre de plus proches voisins : $n_{ppv} = 4$.
Distance entre plus proches voisins = le quart de la grande diagonale

$$\boxed{d_{ppv} = \sqrt{\left(\frac{a}{4}\right)^2 + \left(\frac{a}{4}\right)^2 + \left(\frac{a}{4}\right)^2} = \frac{\sqrt{3}}{4}a} \qquad \text{A.N.} \qquad \boxed{d_{ppv} = 2{,}35\ \text{Å}}$$

3. Rayon de l'atome

$$2.r = d_{ppv} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{r = \frac{d_{ppv}}{2}} \qquad \text{A.N.} \qquad \boxed{r = 1{,}18\ \text{Å}}$$

4. Nombre d'atomes au cm^{-3} noté n.
Dans la structure diamant, nous avons 08 atomes de Si dans la maille conventionnelle de volume a^3.
Donc :

$$\boxed{n = \frac{8}{a^3}} \qquad \text{A.N.} \qquad \boxed{n = 5 \times 10^{22}\ cm^{-3}}$$

Densité ($\mathcal{N}$ est le nombre d'Avogadro).

$$\boxed{\rho = n.m_{at} = \frac{n.M}{\mathcal{N}}} \qquad \text{A.N.} \qquad \boxed{\rho = 2{,}33\ \ g.cm^{-3}}$$

EXERCICE 02:

4. $f_p(E)=1-f_n(E)=1-\dfrac{1}{1+e^{\frac{E-E_F}{kT}}}$ $\Rightarrow$ $f_p(E)=\dfrac{1}{1+e^{\frac{E_F-E}{kT}}}$.

EXERCICE 03:

1. $f_p(E)=1-f_n(E)=1-\dfrac{1}{1+e^{\frac{E-E_F}{kT}}}$ $\Rightarrow$ $f_p(E)=\dfrac{1}{1+e^{\frac{E_F-E}{kT}}}$.

2. Semiconducteur non dégénéré $f_n(E)\approx e^{-\frac{E-E_F}{kT}}$ et $f_p(E)\approx e^{-\frac{E_F-E}{kT}}$.

   Le nombre d'électrons par unité de volume dans la bande de conduction.

$$n=\int_{E_c}^{E} D_c(E).f_n(E).dE \approx \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m_c}{\hbar^2}\right)^{3/2}\int_{E_c}^{+\infty}(E-E_c)^{1/2}e^{-\frac{E-E_F}{kT}}\,dE$$

   En posant $x=\dfrac{E-E_c}{kT}$ on a : $n=\dfrac{1}{2\pi^2}\left(\dfrac{2m_c.kT}{\hbar^2}\right)^{3/2}.e^{-\frac{E_c-E_F}{kT}}\displaystyle\int_0^{+\infty}x^{1/2}e^{-x}dx$

   Enfin en utilisant : $\displaystyle\int_0^{+\infty}x^{1/2}.e^{-x}dx=\frac{\sqrt{\pi}}{2}$

$$\boxed{n=2\left(\frac{2\pi.m_c.kT}{h^2}\right)^{3/2}e^{-\frac{E_c-E_F}{kT}}}$$

   Le nombre de trous par unité de volume dans la bande de valence.

$$p=\int_{E}^{E_v} D_v(E).f_p(E).dE \approx \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m_v}{\hbar^2}\right)^{3/2}\int_{-\infty}^{E_v}(E_v-E)^{1/2}e^{-\frac{E_F-E}{kT}}\,dE$$

   En posant $x=\dfrac{E_v-E}{kT}$ on a : $p=\dfrac{1}{2\pi^2}\left(\dfrac{2m_v.kT}{\hbar^2}\right)^{3/2}.e^{-\frac{E_F-E_v}{kT}}\displaystyle\int_0^{+\infty}x^{1/2}e^{-x}dx$

   Enfin en utilisant : $\displaystyle\int_0^{+\infty}x^{1/2}.e^{-x}dx=\frac{\sqrt{\pi}}{2}$

$$\boxed{p=2\left(\frac{2\pi.m_v.kT}{h^2}\right)^{3/2}e^{-\frac{E_F-E_v}{kT}}}$$

3. Semiconducteur intrinsèque $\Rightarrow$ $\boxed{n_i=p_i}$

4. $n_i^2=n_i.p_i=(N_cN_v)e^{-\frac{E_g}{kT}}$ $\Rightarrow$ $\boxed{n_i=p_i=2\left(\dfrac{2\pi.kT}{h^2}\right)^{3/2}(m_c.m_v)^{3/4}e^{-\frac{E_g}{2kT}}}$.

5. Niveau de Fermi E_F .

   $n_i=p_i$ $\Rightarrow$ $(m_c)^{3/2}e^{-\frac{E_c-E_F}{kT}}=(m_v)^{3/2}e^{-\frac{E_F-E_v}{kT}}$ $\Rightarrow$ $\left(\dfrac{m_c}{m_v}\right)^{3/2}=e^{-\frac{E_c+E_v-2E_F}{kT}}$.

   D'où $\boxed{E_F=\dfrac{E_c+E_v}{2}-\dfrac{3}{4}kt.\ln\left(\dfrac{m_c}{m_v}\right)}$.

6. L'écart d'énergie $E_F - \left(\frac{E_c + E_v}{2}\right) = -\frac{3}{4} kt.\ln\left(\frac{m_c}{m_v}\right)$

		Silicium	Germanium
m_c/m_v		1,7966	1,5278
$E_F - \left(\frac{E_c + E_v}{2}\right)$	300 K	–0,01124	–0,00826
	1000 K	–0,03808	–0,02753

7. D'après les résultats du tableau précédent, nous remarquons que E_F est proche du milieu de la Bande Interdite.

EXERCICE 04 :

Système de 2 équations à 2 variables

1. Concentration intrinsèque : $\boxed{n_i = \sqrt{N_c.N_v}.e^{-\frac{E_g}{2k_BT}}}$

$N_c/N_v = 2,7$

$E_g = 1,12$ eV T= 300 K et $n_i = 1,45\ 10^{16}$ cm^{-3}.

A.N.

EXERCICE 05:

A.N. $\boxed{\begin{cases} \frac{m_c}{m_0} = 0,915 \\ \frac{m_v}{m_0} = 0,976 \end{cases}}$.

2. 1. Concentration intrinsèque : $\boxed{n_i = \sqrt{N_c.N_v}.e^{-\frac{E_g}{2k_BT}}}$

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi.m_c k_B T}{h^2}\right)^{3/2} = 2,5.10^{25}\left(\frac{m_c}{m_0}\right)^{3/2}\left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \quad \text{m}^{-3}$$

$$N_v = 2\left(\frac{2\pi.m_v k_B T}{h^2}\right)^{3/2} = 2,5.10^{25}\left(\frac{m_v}{m_0}\right)^{3/2}\left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \quad \text{m}^{-3}$$

T = 300 K	T = 400 K
N_c = 2,188 10^{19} cm^{-3}	N_c = 3,369 10^{19} cm^{-3}
N_v = 2,411 10^{19} cm^{-3}	N_v = 3,711 10^{19} cm^{-3}
n_i(300 K) = 9,959 10^5 cm^{-3}	n_i(400 K) = 3,3598 10^9 cm^{-3}

2. Niveau de Fermi : $E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln\left(\frac{m_v}{m_c}\right)$ comme $E_v = 0$ alors $E_c = E_g$.

$$\boxed{E_F = \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln\left(\frac{m_v}{m_c}\right)}$$

A.N. : $\boxed{E_F(300\text{ K}) = 0,8013\ \text{eV}}$ et $\boxed{E_F(400\text{ K}) = 0,8017\ \text{eV}}$.

EXERCICE 06:

Dans le cas d'un semiconducteur intrinsèque on considère que le gap est fonction de la température :

$E_g(T) = \alpha.T + \beta$ (T est exprimé en Kelvin et E_g en eV).

La mesure des concentrations intrinsèques à T = 350 K et T = 400 K a donné :

n_i(350 K) = 2,235.10^{8} cm^{-3} et n_i(400 K) = 6,236.10^{9} cm^{-3}.

On donne : $m_c/m_0 = 0{,}068$, $m_v/m_0 = 0{,}64$.

1. Calculer les constantes α et β en précisant leur unité.
2. En déduire l'énergie du gap E_g(300 K) et la concentration intrinsèque n_i(300 K) à T = 300 K.
3. Trouver l'expression du niveau de Fermi E_{Fi} en fonction de la température et calculer sa valeur à T = 300 K (on prend comme origine des énergies le haut de la bande de valence E_v = 0).

Dans la suite nous considérerons que E_g = 1,43 eV.
Nous dopons le semiconducteur avec une concentration d'atomes donneurs N_d = 2,7.10^{7} cm^{-3} et une concentration d'atomes accepteur N_a = 3.10^{6} cm^{-3}.
Ces atomes induisent des niveaux donneur E_d = 1,38 eV et accepteur E_a = 0,1 eV dans le structure énergétique de bande du semiconducteur.

4. Calculer les concentrations des électrons n et des trous p à T = 300 K.
5. Calculer le niveau de Fermi E_F à T = 300 K.

<u>On donne :</u> m_0 = 9,1 10^{-31} kg ; h = 6,626 10^{-34} J.s ; k_B = 1,38 10^{-23} J/K.

1. Calcul des constantes α et β.

$$n_i = \sqrt{N_c.N_v}.e^{-\frac{E_g}{2k_BT}}$$

$$N_c = 2{,}5.10^{25}\left(\frac{m_c}{m_0}\right)^{3/2}\left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \text{ m}^{-3} \quad \text{et} \quad N_v = 2{,}5.10^{25}\left(\frac{m_v}{m_0}\right)^{3/2}\left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \text{ m}^{-3}$$

$$\frac{n_i(T_1)}{n_i(T_2)} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{3/2}.e^{-\frac{E_g}{2k_BT_1}+\frac{E_g}{2k_BT_2}}$$

En remplaçant par $E_g(T) = \alpha.T + \beta$ on a : $\dfrac{E_g}{2.k_BT} = \dfrac{\alpha}{2.k_B} + \dfrac{\beta}{2.k_BT}$.

Et
$$-\frac{E_g}{2.k_BT_1} + \frac{E_g}{2.k_BT_2} = -\frac{\beta}{2.k_B}\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2T_1}\right).$$

D'où
$$-\frac{\beta}{2.k_B}\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2T_1}\right) = \ln\left[\frac{n_i(T_1)}{n_i(T_2)}\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{3/2}\right]$$

Donc
$$\boxed{\beta = 2.k_B\left(\frac{T_2T_1}{T_2 - T_1}\right)\ln\left[\frac{n_i(T_2)}{n_i(T_1)}\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{3/2}\right]}.$$

A.N.
$$\boxed{\beta = 1{,}5204 \text{ eV}}.$$

En remplaçant dans l'expression de n_i :

$$\frac{E_g}{2.k_BT} = \frac{\alpha}{2.k_B} + \frac{\beta}{2.k_BT} = \ln\left(\frac{\sqrt{N_cN_v}}{n_i}\right)$$

Donc

$$\boxed{\alpha = -\frac{\beta}{T} + 2.k_B \ln\left(\frac{\sqrt{N_cN_v}}{n_i}\right)}$$

A.N. à $T = 400$ K ; $N_c =$ 6,825 10^{17} cm^{-3} ; $N_v =$ 1,97 10^{19} cm^{-3} ; n_i(400 K) = 6,236.10^9 cm^{-3}

$$\boxed{\alpha = -3{,}01\times10^{-4}\ \text{eV/K}}.$$

2. En remplaçant à $T = 300$K.

$$\boxed{E_g(300\ \text{K}) = \alpha.300 + \beta = 1{,}43\ \text{eV}}$$

$N_c =$ 4,433 10^{17} cm^{-3} ; $N_v =$ 1,28 10^{19} cm^{-3} $\Rightarrow$ $\boxed{n_i(300\ \text{K}) = 2{,}7155\times10^{6}\ \text{cm}^{-3}}$.

3. Niveau de Fermi : $E_{Fi} = \dfrac{E_g}{2} + \dfrac{3}{4}k_B T \ln\left(\dfrac{m_v}{m_c}\right)$ ($E_v = 0 \Rightarrow E_c = E_g$)

Donc $\boxed{E_{Fi} = \left[\dfrac{\alpha}{2} + \dfrac{3}{4}k_B \ln\left(\dfrac{m_v}{m_c}\right)\right]T + \dfrac{\beta}{2}}$ A.N. $\boxed{E_{Fi}(300\ \text{K}) = 0{,}759\ \text{eV}}$.