Corrigé de l'EMD : Module physique des semi-conducteurs
Niveau L3 : PF Date : 24-01-2024

Exercice 01 : (11 points)

1- Un S.C III-V est composé d'un élément de la colonne III (un métal) tel que l'Indium (In) et un élément de la colonne V (non métal) tel que le phosphore (P). La structure Zinc Blende est similaire à celle dite Diamant où le réseau est cubique à faces centrées (CFC). Le motif est constitué de deux atomes différents : le phosphore P occupant les nœuds du réseau CFC et les atomes d'Indium In occupant les positions (1/4, 1/4, 1/4), (1/4, 3/4, 3/4), (3/4, 1/4, 3/4) et (3/4, 3/4, 1/4). **01,00**

2- La densité atomique des plans (100) et (110)

$$le\ plan\ (100): N_{(100)} = \frac{4.\left(\frac{1}{4}\right)+1}{a^2} = \frac{2}{(5.87\times10^{-8})^2} = 5{,}8.10^{14}cm^{-2}$$

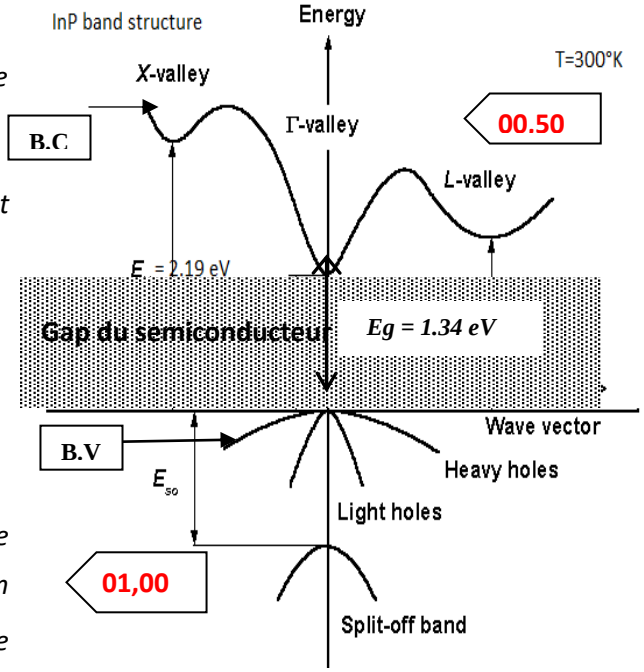
$$le\ plan\ (110): N_{(100)} = \frac{4.\left(\frac{1}{4}\right)+2.\left(\frac{1}{2}\right)}{a.a\sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{2}.(5.87\times10^{-8})^2} = 4{,}1.10^{14}cm^{-2}$$ **01,00**

3- La densité atomique = nombre d'atomes renfermé dans le cube/ volume de cube (cm³), alors **01.00**

$N_{InP} = {nombre\ d'atomes}/{a^3} = \frac{1+3+4}{(5.87\times10^{-8})^3} =$ *4,94.10²²*

cm⁻³ $\Rightarrow N_{In} = N_P = {N_{InP}}/{2}$ *=3,95.10²² cm⁻³.*

4- D'après le schéma de structures de bandes d'énergie, le sommet de la (BV) E_V se trouve en position Γ(0, 0, 0) qui représente le centre de 1ère Z.B, et le bas de la (B.C) E_C se trouve également à la même position Γ(0, 0, 0). Etant donné qu'il existe un seul centre Γ(0, 0,0) le schéma de bandes présente un seul minima E_C, on dit que ce semiconducteur est mono-vallée. Puisque les positions du bas de la B.C et du sommet de B.V se trouvent à la même position Γ(0, 0, 0), le semiconducteur est à gap direct ⇒ les recombinaisons dans ce semiconducteur sont donc radiatives. **01,00**



5- L'énergie de gap : E_g=1.34 eV à 300°K. La longueur d'onde de coupure pour l'InP : $\lambda_g = \frac{hc}{E_g} = 1240/1{,}34$*=925.37nm (longueur d'onde qui correspond à un rayonnement proche infrarouge). Ce Le matériau se trouve son application dans la fabrication des diodes laser infrarouge.*

6. La densité des porteurs de charge intrinsèques est donnée par : $n_i = (N_v \cdot N_c)^{1/2} exp(-E_g/2kT)$

A température ambiante, pour l'InP : $n_i = \left(1{,}1\cdot10^{19}\times5{,}7\cdot10^{17}\right)^{1/2} exp(-1.34/2\times26.10^{-3}) = 1{,}61.10^7 cm^{-3}$.

L'énergie niveau de Fermi du semiconducteur intrinsèque E_{Fi} est calculée en écrivant ; **01.50**

$$n = p \Rightarrow N_c.exp\left(\frac{E_{fi}-E_c}{kT}\right) = N_v.exp\left(\frac{E_v-E_{fi}}{kT}\right) \Rightarrow E_{fi} = \frac{E_c+E_v}{2} + \frac{1}{2}kT.ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right).$$

A.N : $E_{fi} = (1.34/2) + \frac{26}{2}.10^{-3}\ ln(\frac{5{,}7\cdot10^{17}}{1{,}1\cdot10^{19}}) = 0{,}63\ eV.$

La conductivité intrinsèque équivalente est donnée par : $\sigma_i = n_i e\mu_n + n_i e\mu_p = n_i e(\mu_n + \mu_p)$ **01.00**

A.N : $\sigma_i = 1{,}61.10^7.1{,}6.10^{-19}(4600+150) = 1{,}22.10^{-8}\ \Omega^{-1}cm^{-1}$.

03.00

7. Le dopage du semiconducteur pour qu'il soit de type P entraine un décalage du niveau de Fermi vers le bas par rapport à sa position E_{fi} *de sorte que la nouvelle position* E_{fp} *se trouve à 0.2 eV au-dessus de* E_v*, c'est-à-dire* $E_{fp} - E_v = 0{,}2\ eV$*. Alors la densité des électrons et des trous est calculée par les formules usuelles :*

$$p = N_v.exp\left(\frac{E_v - E_{fp}}{kT}\right) = 5{,}7\cdot 10^{17} exp\left(\frac{-0.2}{26.10^{-3}}\right) = 2{,}6.10^{14} cm^{-3}$$

$$n = N_c.exp\left(\frac{E_{fp}-E_c}{kT}\right) = N_c.exp\left(\frac{E_{fp}-E_v+E_v-E_c}{kT}\right) = 1{,}1\cdot 10^{19}.exp\left(\frac{0{,}2-1{,}34}{26.10^{-3}}\right) = 1\ cm^{-3}$$

Il est claire que $n \ll p$. *A température ambiante la densité des atomes accepteurs* $N_a = p = 2{,}6.10^{14} cm^{-3}$.

La conductivité électrique correspondante $\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p \approx pe\mu_p = 6{,}24.10^{-3}\ \Omega^{-1}cm^{-1}$.

Exercice 02 : (09 points)

1- Un atome donneur est un atome impureté introduit volontairement dans un SC dans le but d'augmenter la densité des électrons libres. Il généralement de de valence égale à 5. Il se place dans le cristal de semiconducteur en position de substitution. Il développe, par conséquent, 4 liaisons covalentes avec les atomes du SC proches voisins. Le 9ème électron se trouve alors sur une orbitale délocalisé dans le champ de l'ion d'atome donneur D^+ *à Température ambiante, ce qui veut dire cet électron se trouve dans la BC à basses températures. En effet le niveau introduit par cet atome donneur d'électron est introduit dans la bande interdite tout près du bas de la BC* (E_c).

02.00

2- La condition de neutralité électrique du SC est régie par l'équation : $n + N_a^- = N_d^+ + p$ *: où* N_a^- *et* N_d^+ *représentent la densité des accepteurs et donneurs ionisés respectivement. A température ambiante tous les donneurs et accepteurs sont ionisés, cette condition est écrite alors :*

01

$$n + N_a = N_d + p \Rightarrow N_d - N_a + p - n = 0 \text{---------}\ (1)$$

3- Compte tenu de la loi d'action de masse $n.p = n_i^2 \Rightarrow p = n_i^2/n$ *------- (2)*

0.5

En remplaçant (2) dans (1) on trouve l'équation $n^2 - (N_d - N_a)n - n_i^2 = 0$ *pour les (e⁻). De la même manière on trouve l'équation* $p^2 + (N_d - N_a)p - n_i^2 = 0$ *pour les trous.*

0.5

4- La solution de l'une des deux équations du deuxième ordre donne (on ne tient compte que de la racine positive) (le développement des calculs est nécessaire) :

$n = \frac{1}{2}\left[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2}\right]$ *et* $p = \frac{1}{2}\left[(N_a - N_d) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2}\right]$.

01,50

5-a. Dans le cas où $N_a \ll N_d$ *, on néglige* N_a *devant* N_d *puis* n_i *devant* N_d*(semiconducteur de type n pris à température ambiante) :* $n = \frac{1}{2}\left[N_d + N_d\sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_d^2}}\right] \approx \frac{1}{2}\left[N_d + N_d\left(1 + \frac{4n_i^2}{2N_d^2}\right)\right]$ *(on utilise le développement en série de Taylor* $(1+\varepsilon)^n \approx (1 + n\varepsilon)$*), on trouve finalement*

$$n = N_d + \frac{n_i^2}{N_d} \approx N_d \text{ et } p \approx \frac{n_i^2}{N_d}$$

01.50

5-b. Dans le cas où $N_d \ll N_a$ *, on néglige* N_d *devant* N_a *puis* n_i *devant* N_a*(semiconducteur de type p pris à température ambiante) :* $p = \frac{1}{2}\left[N_a + N_a\sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_a^2}}\right] \approx \frac{1}{2}\left[N_a + N_a\left(1 + \frac{4n_i^2}{2N_a^2}\right)\right] = N_a + \frac{n_i^2}{N_a} \approx N_a$ *et* $n \approx \frac{n_i^2}{N_a}$

01.50

5-c. Dans le cas où $N_d = N_a$ *on trouve facilement* $n = p = n_i$

0.50