Corrigé de l'EMD : Module physique des semi-conducteurs

Niveau L3 : PM   Date : 16-05-2024

Exercice 01 : ***(06 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**

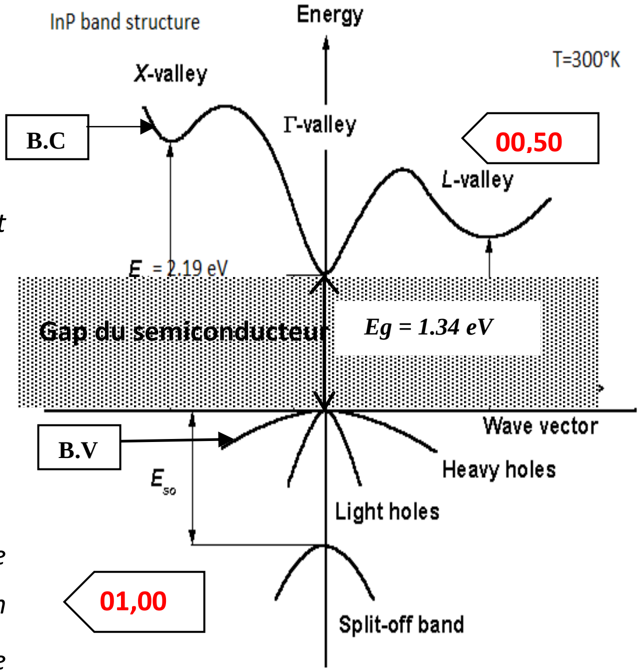
2- La densité atomique des plans (100) et (110) : tracé des plans est demandé **00,50**

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

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

3- La densité atomique = nombre d'atomes renfermé dans le cube/ volume de cube (cm^3), alors **01,00**

$N_{InP} = {nombre\ d'atomes}/{a^3} = \frac{1+3+4}{(5.87\times10^{-8})^3} =$ *3,95.10^{22} cm^{-3}* $\Rightarrow N_{In} = N_P = {N_{InP}}/{2}$ *=3,95.10^{22} cm^{-3}.*



01,00 *4- D'après le schéma de structures de bandes d'énergie, le sommet de la (BV) E_V se trouve en position $\Gamma(0, 0, 0)$ qui représente le centre de 1ère Z.B, et le bas de la (B.C) E_C se trouve également à la même position $\Gamma(0, 0, 0)$. Etant donné qu'il existe un seul centre $\Gamma(0, 0,0)$ 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 $\Gamma(0, 0, 0)$, le semiconducteur est à gap direct $\Rightarrow$ les recombinaisons dans ce semiconducteur sont donc radiatives.* **00,50**

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.* **01,00**

Exercice 02 : ***(13.5 points)***

1. La densité n des électrons dans la (BC) est donnée par :

$$n = \int_{E_c}^{\infty} f_n(E,T).N_c(E)\,dE \quad avec\ \ f_n(E,T) = \left[1+\exp\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)\right]^{-1} \longrightarrow \textit{(01.00)}$$

Pour un semiconducteur non dégénéré le niveau de Fermi se trouve dans a B.I et on aura la différence :

$$E - E_f = qq.kT \Rightarrow\ exp\left[\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)\right] \gg 1 \Rightarrow f_n(E,T) \approx\ exp\left[\left(\frac{E_f-E}{kT}\right)\right] \longrightarrow \textit{(0.50)}$$

$$n = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2}\right)^{3/2} \int_{E_c}^{\infty} exp\left[\left(\frac{E_f - E}{kT}\right)\right] (E - E_c)^{1/2} dE$$

Aprés calcul (détail de calcul nécessaire) et le changement de variable $= \left(\frac{E\ \ -E_c}{kT}\right)$*, l'intégrale devient de la forme* ⟶ **(02.00)**

$$n = A.(kT)^{3/2} \int_0^{\infty} \sqrt{x}.e^{-x}.dx = 2\left(\frac{2m_t^*\pi kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) = N_c.exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right)$$

2. La densité des trous, par analogie à la densité des électrons, est donnée par ⟶ **(0.50)**

$$p = N_v.exp\left(\frac{E_v - E_f}{kT}\right) = N_v.exp\left(\frac{-E_f}{kT}\right) \ \ avec\ \ N_v = 2\left(\frac{2m_t^*\pi kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$$

3.a. Un semiconducteur intrinsèque est un SC dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité des porteurs de charges libres à l'équilibre. ⟶ **(0.50)**

3. b. Dans un tel semiconducteur on a n = p = n_i. En utilisant la loi d'action de masse $n.p = {n_i}^2$ *nous trouvons l'expression de la densité intrinsèque* $n_i = (N_v \cdot N_c)^{1/2} exp(-E_g/2kT)$. ⟶ **(0.75)**

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

$n = p \Rightarrow N_c.exp\left(\frac{E_{fi}-E_c}{kT}\right) = N_v.exp\left(\frac{E_v-E_{fi}}{kT}\right) \Rightarrow E_{fi} = \frac{E_c+E_v}{2} + \frac{1}{2}kT.ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right)$. ⟶ **(0.50)**

A.N : A température ambiante, pour l'InP : $n_i = (1{,}1 \cdot 10^{19} \times 5{,}7 \cdot 10^{17})^{1/2} exp(-1.34/2 \times 26.10^{-3}) = 1{,}61.10^7 cm^{-3}$. $E_{fi} = (1.34/2) + \frac{26}{2}.10^{-3}\ ln(\frac{5{,}7\cdot 10^{17}}{1{,}1\cdot 10^{19}}) = 0{,}63\ eV$. ⟶ **(01.00)**

4. La conductivité intrinsèque équivalente est donnée par : $\sigma_i = n_i e\mu_n + n_i e\mu_p = n_i e(\mu_n + \mu_p)$. *A.N :* $\sigma_i = 1{,}61.10^7.1{,}6.10^{-19}(4600 + 150) = 1{,}22.10^{-8}\ \Omega^{-1}cm^{-1}$. *Cette conductivité est trop faible et le semiconducteur intrinsèque est semi-isolant.* ⟶ **(01.00)**

5.a. 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, par conséquent il se trouve dans la BC à cette température. Cet atome est alors donneur d'un électron. un tel dopage a pour effet d'augmenter la densité des électrons libres dans le SC et par conséquent améliorer la conductivité électrique de celui-ci. ⟶ **(01.50)**

5.b. Le calcul de la densité des électrons en fonction de la densité des donneurs N_d*, des accepteurs* N_a *et de la densité des porteurs intrinsèques* n_i *à température ambiante donne (voir le cours) :*

$$n = \frac{1}{2}\left[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4{n_i}^2}\right]$$ ⟶ **(0.50)**

Dans notre cas, le SC est dopé par des donneurs c.-à-d. $N_d \gg N_a$ *,* $N_d \gg n_i$*, on néglige* n_i *et* N_a *devant* N_d*, ce qui donne* $n \approx N_d = 10^{16} cm^{-3}$*. et* $p = ({n_i}^2/n) \approx ({n_i}^2/N_d) \approx 0$*. Le semiconducteur est alors de type n.* ⟶ **(01.00)**

5.c. La position du niveau de Fermi du SV de type n est trouvée à partir de l'équation

$n = N_c\ exp\left(\frac{E_{Fn}-E_c}{kT}\right) = N_d \Rightarrow E_c - E_{Fn} = kT\ ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) = 0.1\ eV$ ⟶ **(01.00)**

5.d. La conductivité électrique du SV de type n $\sigma_n = ne\mu_n + pe\mu_p \approx N_d e\mu_n = 7.36\,\Omega^{-1}cm^{-1}$. *On constate que* $\sigma_n \gg \sigma_i$. *Il est claire que le dopage a considérablement amélioré la conductivité électrique du semiconducteur d'où l'importance de ce procédé.* **→ *(01.00)***

Schéma de bandes (plates) montrant les positions du niveau de Fermi E_{Fi} ***et*** E_{Fn}. **→ 0.50**