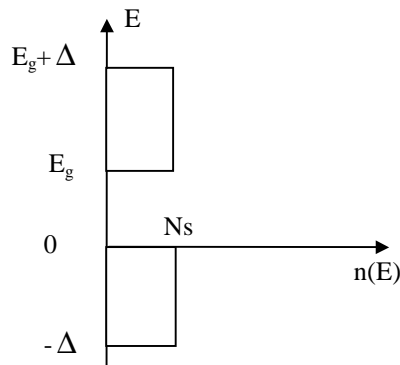


PHYSIQUE DU SOLIDE

Exercice 1: Etude élémentaire d'un semi-conducteur intrinsèque (≈ 7 points)

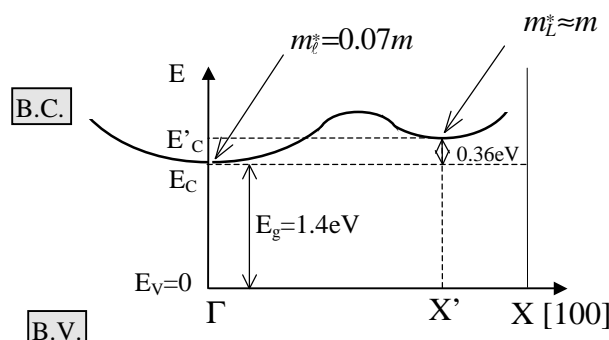
On considère un semi-conducteur de volume V caractérisé par une densité d'états N_s (spin inclus) constante et de même valeur dans la bande de valence et la bande de conduction. Ces bandes, séparées par E_g , ont comme largeur Δ (avec $\Delta \gg kT$), l'origine des énergies étant prise au sommet de la bande de valence.



1. En faisant l'hypothèse que le niveau de FERMI E_f se trouve dans la bande interdite (préciser la condition exacte), et en faisant les simplifications usuelles dans la fonction de FERMI (approximation de BOLTZMANN), établir l'expression littérale de la concentration n d'électrons dans la bande de conduction et de la concentration p de trous dans la bande de valence en fonction de E_f , des données de l'énoncé (E_g , Δ et N_s) à la température T ambiante.
2. En déduire la concentration intrinsèque n_i et la position du niveau de FERMI intrinsèque E_i .
Application numérique: $E_g=0.7\text{eV}$, $\Delta=5\text{ eV}$, $N_s/V=2 \times 10^{21}\text{ cm}^{-3}\text{eV}^{-1}$, $T=300^\circ\text{K}$.
3. Le matériau est dopé avec N_a impuretés de type accepteur toutes ionisées. Donner les nouvelles expressions à l'équilibre de n , p et du niveau de FERMI E_f à température ambiante en supposant que $N_a \gg n_i$.

Exercice 2: Densité d'électrons libres dans une diode GUNN au GaAs. (≈ 7 points)

On considère un parallépipède rectangle en Arséniure de Gallium (GaAs) dopé de type n (concentration N_D en atomes donneurs, tous ionisés à température ambiante). La bande de conduction du GaAs est représentée schématiquement sur la figure suivante:



1. Quand une tension U faible est appliquée aux extrémités du barreau, la conductivité électrique σ du barreau est assurée par le seul type d'électrons libres alors présents (dits 'légers'), situés autour de Γ au minimum principal de la bande de conduction, de masse effective $m_\ell^* = 0.07 m$ et de mobilité μ_ℓ .

Préciser l'expression littérale, puis la valeur numérique de la résistivité ρ du barreau en tenant compte des données suivantes: $N_D = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_\ell \approx 7500 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$.

2. La bande de conduction présente cependant un deuxième minimum (en X' dans la direction $[100]$, X représentant la limite de la 1^{ère} zone de BRILLOUIN dans cette direction, et séparé seulement de 0.36 eV du minimum principal en Γ) correspondant à des électrons 'lourds' dont la masse effective est sensiblement celle des électrons libres $m_L^* \approx m$.

a) Préciser le nombre de minima équivalents à X' dans la 1^{ère} zone de BRILLOUIN.

b) Rappeler et justifier l'expression de la densité d'états $n(E)$ (sans tenir compte de la dégénérescence de spin) d'un gaz d'électrons libres tridimensionnel enfermé dans un volume V . A l'aide de cette expression modifiée pour tenir compte de la structure de bandes de GaAs, exprimer la densité n_ℓ d'électrons légers dans l'approximation de la masse effective en fonction de la position E_F du niveau de FERMI. Faire de même pour la densité d'électrons lourds n_L .

On mettra n_ℓ et n_L sous la forme $A \exp\left(-\frac{E_0 - E_F}{k_B T}\right)$ en précisant l'expression et la valeur de

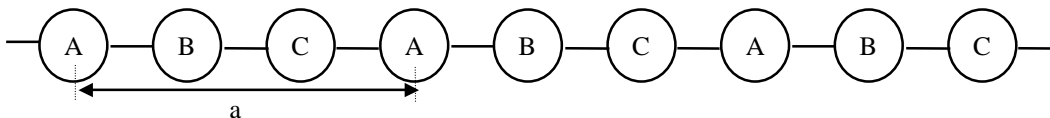
E_0 et A dans chacun des deux cas. On utilisera également le résultat suivant:

$$\int_0^\infty \sqrt{x} e^{-x} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}.$$

c) Donner le rapport n_L/n_ℓ à température ambiante et préciser la position de E_F . L'approximation de la question 1 est-elle justifiée?

Exercice 3: Structure de bandes d'un solide unidimensionnel (≈ 6 points)

On considère le cristal unidimensionnel suivant de longueur L (N =nombre de mailles), où A, B et C sont des atomes de nature différente. Chaque atome A possède 2 électrons sur sa couche de valence et chaque atome B ou C possède 1 électron sur sa couche de valence.



Pour étudier la structure de bandes de ce solide dans l'approximation des liaisons fortes, on considérera une orbitale de type "s" sur chaque atome A (φ_{sA}), une orbitale de type "s" sur chaque atome B (φ_{sB}), une orbitale de type "s" sur chaque atome C (φ_{sC}) et on notera:

$$E_A = \langle \varphi_{sA} | \hat{H} | \varphi_{sA} \rangle = -20 \text{ eV}$$

$$E_B = \langle \varphi_{sB} | \hat{H} | \varphi_{sB} \rangle = -10 \text{ eV}$$

$$E_C = \langle \varphi_{sC} | \hat{H} | \varphi_{sC} \rangle = -10 \text{ eV}$$

$$\beta = \langle \varphi_{sA} | \hat{H} | \varphi_{sB} \rangle = -2 \text{ eV si A et B sont premiers voisins}$$

$$\beta' = \langle \phi_{sA} | \hat{H} | \phi_{sC} \rangle = -3 \text{ eV si A et C sont premiers voisins}$$

$$\Delta = \langle \phi_{sB} | \hat{H} | \phi_{sC} \rangle = -0.5 \text{ eV si B et C sont premiers voisins}$$

1. Préciser les données cristallographiques de ce solide (maille élémentaire, motif primitif, réseau et réseau réciproque, zone de Brillouin)
2. En précisant, mais sans chercher à le résoudre, le système obtenu, expliquer comment on pourrait déterminer la structure de bandes de ce matériau par la méthode des liaisons fortes aux premiers voisins (en prenant une fonction "s" par atome A, une fonction "s" par atome B et une fonction "s" par atome C).
3. Qu'advient-il du système lorsque $\Delta = 0$ (ou si Δ est beaucoup plus faible que les autres énergies). Préciser alors les niveaux d'énergie accessibles aux électrons (en exploitant le fait fortuit que $E_B = E_C$ pour obtenir des expressions analytiques). A quoi est alors équivalent ce système?
4. Préciser dans ce dernier cas le remplissage des niveaux et la position du niveau de FERMI à $T=0^\circ\text{K}$. A $T \neq 0^\circ\text{K}$, préciser en fonction du niveau de FERMI E_F et de a les concentrations d'électrons (ou de trous si cette notion vous semble plus pertinente) sur les différents niveaux. En déduire la position approximative du niveau de FERMI.

Liste de valeurs numériques utiles:

Constante de Planck:	$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
Constante de Planck réduite:	$\hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
Masse de l'électron:	$m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$
Charge de l'électron:	$e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Electron-Volt:	$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
Constante de BOLTZMANN:	$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

Annexe : Zone de BRILLOUIN du CFC

