

Travaux Dirigés de Physique des Semi-conducteurs Série N° 1

Exercice 1 : Notions de base

1. Donner la différence entre un isolant, un semi-conducteur et un conducteur ainsi qu'une schématisation simple de leurs bandes d'énergie.
Donner quelques exemples.
2. Définir l'énergie de valence E_v , l'énergie de conduction E_c et l'énergie de gap.
3. Définir un semi-conducteur à gap direct et un semi-conducteur à gap indirect. Donner des exemples.

Exercice 2 : Semi-conducteur intrinsèque

1. Définir un semi-conducteur intrinsèque
2. Donner la relation entre la densité des électrons n dans la bande de conduction et celle de trous p dans la bande de valence.
3. On considère un semi-conducteur intrinsèque dont les densités équivalentes d'états énergétiques dans la bande de conduction et dans la bande de valence sont notées respectivement N_c et N_v ,
Rappelez les expressions de la densité d'électron n dans la bande de conduction et la densité de trous p dans la bande de valence.
4. En déduire l'expression de la densité intrinsèque n_i et la position du niveau de Fermi intrinsèque E_{Fi} .
5. Calculer N_c , N_v , n_i et E_{Fi} pour le silicium à $T = 300$ K. On prend E_v l'origine des énergies.
6. A partir de l'expression théorique de n_i , mettre en évidence les termes qui varient en fonction de la température. En déduire que la variation de n_i avec la température est essentiellement exponentielle.

Exercice 3 : Semi-conducteur extrinsèque

1. Définir un semi-conducteur extrinsèque.
2. Quelle est l'utilité de dopage d'un semi-conducteur. Expliquer comment se fait le dopage dans le cas du silicium (type N et P).
3. Le tableau suivant résume la configuration électronique du silicium et de quelques éléments de colonnes voisines de la classification périodique. Parmi ces derniers, quels sont ceux qui vont jouer pour le silicium le rôle :
 - D'atomes donneurs
 - D'atomes accepteurs

N°atomique	Elément	Configuration électronique

5	Bore	$1s^2 2s^2 2p^1$
13	Aluminium	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
14	Silicium	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
15	Phosphore	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
31	Gallium	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^1$
33	Arsenic	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^3$
49	Indium	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^3$
51	Antimoine	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^3$

- Le silicium est dopé avec du phosphore avec une concentration 10^{18} cm^{-3} . Calculer à 27°C , la densité d'électrons du Si ainsi dopé. En déduire la densité de trous. Quel est le type de semi-conducteur ainsi obtenu ?
- Calculer à 27°C la position du niveau de Fermi E_F puis donnez une représentation du diagramme de bandes du silicium ainsi dopé. On prend l'origine des énergies le sommet de la bande de valence $E_v=0 \text{ eV}$.

On donne :

Masse de l'électron $m_0 = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$

Largeur de la bande interdite de silicium à 300 K: $E_g = 1.12 \text{ eV}$

La masse effective de densité d'états des électrons et des trous est : $m_e^* = 1.06 m_0$, $m_h^* = 0.59 m_0$

La constante de Planck $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} = 4.134 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$

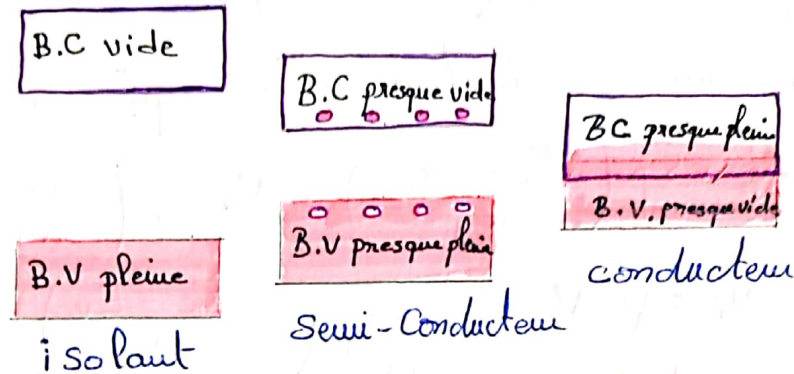
La constante de Boltzmann $= 8.6173324 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$

$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Kg.m}^2.\text{s}^{-2}$

Exercice n°1 : Notions de base :

1) Les matériaux solides peuvent être classés en trois groupes que sont les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs. On considère comme isolants les matériaux de conductivité $\sigma < 10^{-8} \text{ S/cm}$, comme semi-conducteurs les matériaux tels que $10^{-8} \text{ S/cm} < \sigma < 10^3 \text{ S/cm}$ et comme conducteurs les matériaux tels que $10^3 \text{ S/cm} < \sigma$

Bandes d'énergie :

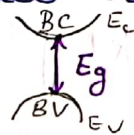


des exemples: (diamant 10^{14} S/cm) (Silicium 10^{-5} S/cm) (argent 10^6 S/cm)

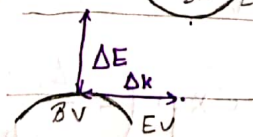
2) Il existe deux bandes continues d'énergie (BC et BV) et ces bandes sont séparées par une bande interdite car d'énergie inaccessible aux électrons. Cette région interdite est appelée "gap" et sa largeur E_g est caractéristique du matériau.

Notons que l'énergie du bas de la bande de conduction est noté E_c et que celle du haut de la bande de valence est notée E_v aussi nous avons l'égalité $E_g = E_c - E_v$

3) un semi-conducteur à gap direct lorsque le minimum E_c égale au maximum de E_v



un semi conducteur à gap indirect lorsque le minimum E_c différent du maximum de E_v



des exemples : direct \rightarrow GaAs ; indirect \rightarrow Si

Exercice n°2 : Semi - Conducteur intrinsèque :

- 1) un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, c'est à dire qu'il contient peu d'impuretés (atomes étrangers) en comparaison avec la quantité de trous et d'électrons générés thermiquement.
- 2) Relation entre la densité des électrons n dans la bande de conduction

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

Relation entre la densité des trous p dans la bande de valence

$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{kT}\right)$$

- 4) Pour un semi-conducteur intrinsèque $n = p = n_i$

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

$$\Rightarrow n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{2kT}\right)$$

Le niveau de Fermi s'obtient en écrivant :

$$\frac{n}{p} = 1 \Leftrightarrow \frac{N_c}{N_v} \exp\left(-\frac{E_c - E_v - 2E_{Fi}}{kT}\right) = 1$$

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

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

$$5) N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 2 \left(\frac{2\pi \times 1,06 \times 9,1 \times 10^{-31} \times 8,6173324 \times 10^{-5} \times 300}{(4,13 \times 10^{-15})^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$N_c = 1,755 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 2 \left(\frac{2\pi \times 0,59 \times 9,1 \times 10^{-31} \times 8,6173324 \times 10^{-5} \times 300}{(4,13 \times 10^{-15})^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$N_v = 7,29 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{2kT}\right) = \sqrt{1,755 \times 10^{23} \times 7,29 \times 10^{22}} \exp\left(-\frac{1,12}{2 \times 8,6173324 \times 10^{-5} \times 300}\right)$$

$$n_i = 4,425 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

$$E_{Fi} = \frac{E_c - E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = \frac{1,12}{2} + \frac{8,6173324 \times 10^{-5} \times 300}{2} \ln \frac{7,29 \cdot 10^4}{1,75 \cdot 10^3}$$

$$E_{Fi} = 0,548 \text{ eV}$$

$$6) n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) = T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

Exercice n°3: Semi-conducteur extrinsèque.

1) un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques et optoélectroniques.

2) Puisque la conductivité des semi-conducteurs est faible à une température ambiante et afin de l'augmenter, on doit le doper par des atomes étrangers afin de créer des porteurs libres (é ou h)

* un Semi-conducteur type P est un semi-conducteur intrinsèque (ex: silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de types accepteurs (ex: Bore B). Les électrons sont les porteurs minoritaires et les trous, les porteurs majoritaires.

* un Semi-conducteur type N est un semi-conducteur intrinsèque (ex: silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de types donneurs. Les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous, les porteurs minoritaires.

3) atomes donneurs: Arsenic; Phosphore, Antimoine

atomes accepteurs: Bore, Indium, Gallium, Aluminium

4) le phosphore est une impureté de type donneur: $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
 $N_D \gg n_i$, ainsi la densité d'électrons est égale à la densité de donneurs
 $n = N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

à $T = 27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$, la densité de trous est $p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(4,1425 \cdot 10^{-19})^2}{10^{18}} = 1,715 \cdot 10^{-35} \text{ cm}^{-3}$

→ Le semi-conducteur obtenu est de type N

(4)

5) L'énergie de Fermi peut être déduite de la densité d'électrons
Comme suit :

$$n = N_D = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

$$\Leftrightarrow N_D = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_{Fi} + E_{Fi} - E_F}{kT}\right)$$

$$\Leftrightarrow N_D = n_i \exp\left(-\frac{E_{Fi} - E_F}{kT}\right)$$

$$\Leftrightarrow E_F = E_{Fi} + kT \times \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

$$\Leftrightarrow E_F = 0,548 + 8,6173324 \times 10^{-5} \times 300 \times \ln\left(\frac{10^{18}}{4,425 \times 10^{13}}\right)$$

$$E_F = 0,99 \text{ eV.}$$

