



**MATERIAUX ET
NANOTECHNOLOGIES**

Cours de physique des composants à semi-conducteurs
TD n°1 : Rappels de Physique des Semi-conducteurs

Exercice I

On considère un modèle simplifié de semi-conducteurs dans lequel les densités d'énergie dans les bandes de conduction et de valence sont respectivement données par les équations :

$$g_c(E) = R_c \sqrt{E - E_c} \quad (1)$$

$$g_v(E) = R_v \sqrt{E_v - E} \quad (2)$$

On note E_f l'énergie de Fermi. On admet que les hypothèses suivantes sont vérifiées : $E_c - E_f \gg kT$ et $E_f - E_v \gg kT$ avec k la constante de Boltzmann et T la température.

- 1) L'énergie de Fermi ayant une valeur donnée, calculer la densité d'électrons libres n dans la bande de conduction et la densité p de trous libres dans la bande de valence. On posera $E_c - E_v = W$. Expliciter la densité de porteurs intrinsèque n_i .
- 2) Sachant que le matériau est un semi-conducteur intrinsèque, calculer n , p et trouver une relation permettant de calculer le niveau de Fermi à l'équilibre thermique en fonction de R_c , R_v et kT . Calculer R_c et R_v .

Données : $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$; $E_f(T) - E_f(0) = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ pour $T = 300\text{K}$; $W = 0,7 \text{ eV}$.

Exercice II

- 1) Quelle est la concentration en électrons dans un cristal de silicium (Si) ayant une concentration de donneurs de $1,4 \cdot 10^{16} \text{ atomes/cm}^3$ à $T = 300 \text{ K}$? Quel est le rapport des concentrations en électrons et en trous ?
- 2) Montrer que pour un semi-conducteur ayant un dopage quelconque, la densité de porteurs se met (à la température ambiante) sous la forme suivante :

$$x = \pm \frac{N}{2} + \sqrt{n_i^2 + \frac{N^2}{4}} \quad (3)$$

avec $x = n, p$ et N une quantité que l'on explicitera.

3) Montrer que pour un semi-conducteur ayant un dopage quelconque la position du niveau de Fermi est donnée par la relation :

$$E_F = E_{F_i} + \frac{kT}{2} \ln \frac{n}{p} \quad (4)$$

avec E_{F_i} le niveau Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque.

Exercice III

Dans un semi-conducteur intrinsèque, la concentration en porteurs libres est donnée par la relation :

$$n_i = p_i = A.T^{3/2} \exp^{[(E_v - E_c)/2kT]} \quad (5)$$

1) A la température ambiante, la concentration des porteurs et la bande interdite valent :

$T = 300 \text{ K}$	Silicium (Si)	Germanium (Ge)	Arséniure de Gallium (GaAs)
$n_i \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$1,6 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^7$
$E_c - E_v \text{ (eV)}$	1,12	0,66	1,43

Calculer le facteur A .

On donne maintenant les valeurs suivantes de mobilités :

Semi-conducteur	Température (K)	$\mu_n \text{ (cm}^2/\text{V.s)}$	$\mu_p \text{ (cm}^2/\text{V.s)}$
Si	300	1500	500
Si	1200	25	7
Ge	300	4000	2000
GaAs	300	8500	400
$E_c - E_v \text{ (eV)}$	1,12	0,66	1,43

Calculer la conductivité des différents semi-conducteurs aux températures données.

2) Quelle énergie minimum doit avoir un photon pour provoquer une transition électronique entre un niveau plein de la bande de valence et un niveau vide de la bande de conduction? En déduire le domaine spectral d'absorption de ces matériaux?

Exercice IV

Le tableau ci-dessous regroupe un ensemble de semi-conducteur, et la longueur d'onde relative à leur bande interdite.

1) Déterminer pour chacun des matériaux l'énergie de bande interdite.

2) L'énergie de bande interdite de tous les semi-conducteurs varient avec la température, selon une loi empirique (la loi de Varshni), dont l'expression est la suivante :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (6)$$

Nitride de Gallium (GaN)	$\lambda_g = 0,360 \mu\text{m}$
Silicium (Si)	$\lambda_g = 1,097 \mu\text{m}$
Arseniure de Gallium (GaAs)	$\lambda_g = 0,871 \mu\text{m}$
Germanium (Ge)	$\lambda_g = 1,87 \mu\text{m}$
Phosphure d'Indium (InP)	$\lambda_g = 0,922 \mu\text{m}$
Antimoniure d'Indium (InSb)	$\lambda_g = 5,39 \mu\text{m}$

Représenter la variation de $E_g(T)$ du silicium en supposant une rampe de température de 20 K à 1000 K.

3) Déterminer la concentration de porteurs intrinsèques n_i aux températures de 20 K, 77 K, 300 K et 500 K. Comparer ces valeurs avec une concentration extrinsèque (impuretés, dopants,) de 10^{15} cm^{-3} . Conclure.

Données : $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}$.

Pour le silicium on prendra : $E_g(0\text{K}) = 1,175 \text{ eV}$, $\alpha = 4,73 \cdot 10^{-4} \text{ eV.K}^{-1}$, $\beta = 636 \text{ K}$, $N_c = 0,64 \cdot 10^{15} \text{ T}^{3/2} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$, $N_v = 1,22 \cdot 10^{15} \text{ T}^{3/2} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$.

Exercice V

Soit un cristal de silicium à $T = 300 \text{ K}$. Le niveau de fermi est situé à $0,25 \text{ eV}$ au-dessous de la bande de conduction. Calculer la concentration à l'équilibre en électrons et en trous.

Données : $E_g(\text{Si}) = 1,12 \text{ eV}$, $N_c = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_v = 1,04 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

Exercice VI

Pour doper un échantillon de silicium, on peut utiliser des composés tels que le phosphore (P) ou bien encore le bore (B).

1) Déterminer quel est le type de dopage induit par ces composés, dès lors qu'on les introduit dans un monocristal de silicium.

2) Pour chacun des trois cas suivants, déterminer les concentrations (et le type) des porteurs majoritaires, minoritaires ainsi que la position du niveau de Fermi dans le gap (dessin).

Cas 1 : dopage au phosphore à 10^{16} cm^{-3} ,

Cas 2 : dopage au bore à 10^{15} cm^{-3} ,

Cas 3 : codopage au phosphore à 10^{16} cm^{-3} et au bore à 10^{15} cm^{-3} .

Données : $n_i(300 \text{ K}) = 1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $N_v(300 \text{ K}) = 1,04 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_c(300 \text{ K}) = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

Exercice VII :

Déterminer dans chacun des cas suivants la concentration en électrons et trous ainsi que la résistivité d'un échantillon de silicium :

Cas 1 : intrinsèque (non dopé intentionnellement),

Cas 2 : dopé au bore à 10^{15} cm^{-3} ,

Cas 3 : dopé au bore à $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, au phosphore à $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

Conclure sur l'effet du dopage sur la résistivité du silicium.

Données : $n_i(300\text{ K})=10^{10}\text{ cm}^{-3}$, $\mu_e=1350\text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$, $\mu_p=450\text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

Exercice VIII

1) La résistivité du germanium intrinsèque est $0,44\ \Omega.\text{m}$ à 300 K . Les mobilités des électrons et des trous dans le germanium sont respectivement de $0,4\text{ m}^2/\text{V}.\text{s}$ et $0,19\text{ m}^2/\text{V}.\text{s}$. Calculer la densité des électrons et des trous.

2) Le germanium est dopé avec des impuretés d'antimoine de telle sorte qu'il y ait un atome d'impureté pour 10^6 atomes de germanium. La densité des atomes de germanium est de $4,4 \cdot 10^{28}\text{ m}^{-3}$. Le matériau dopé sera-t-il de type n ou de type p ? Calculer la densité des électrons et des trous. Quelle est la résistance du matériau dopé? (on supposera que tous les atomes d'antimoine sont ionisés à 300K).

Exercice IX

On cherche à faire passer des électrons le plus rapidement possible à travers un barreau de matériau semi-conducteur (cf. figure ci-dessous). La dimension latérale du barreau est de $10\ \mu\text{m}$ et on applique une tension de 10 V entre les électrodes (pour des tensions supérieures, on observerait un claquage du composant). Calculer le temps de transit pour les électrons pour passer d'une électrode à l'autre dans les trois cas suivants :

Cas 1 : silicium (Si), $\mu_e=1350\text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$,

Cas 2 : germanium (Ge), $\mu_e=3500\text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$,

Cas 3 : arséniure de gallium (GaAs), $\mu_e=8500\text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

