



Département : FPST

Fiche TD n°1 : ELN

Semestre : 4

Temps d'action : 2 semaines

Chapitre I : Notion sur les semiconducteurs



Exercice 01 :

I. Semi-conducteur intrinsèque

Rappelons que la population des porteurs libres (n électrons dans la BC et p trous dans la BV) pour un semiconducteur intrinsèque s'exprime selon les lois :

$$n = N_C e^{-\frac{\Delta E_n}{k_B T}} = N_C e^{-\frac{E_C - E_{F_i}}{k_B T}} \quad \text{et} \quad p = N_V e^{-\frac{\Delta E_p}{k_B T}} = N_V e^{-\frac{E_{F_i} - E_V}{k_B T}}$$

Où :

- N_C et N_V sont les densités équivalentes d'états énergétiques dans la BC et dans la BV respectivement.
- ΔE_p et ΔE_n : sont représentés deux différences d'énergies liées à un niveau de Fermi qui indique les écarts de population entre les électrons et les trous.
- T est la température (en Kelvin) et $k_B = 8.62 \times 10^{-5}$ eV/K est la constante de Boltzmann.

1. Déterminer l'expression de la densité intrinsèque n_i et la position du niveau de Fermi intrinsèque E_{F_i} .
2. Calculer la densité intrinsèque du Silicium et la

position du niveau de Fermi à 27 °C, 127 °C et 227 °C, en prenant comme référence énergétique, le haut de la bande de valence ($E_V = 0$ eV)

On donne : $E_g = 1.1$ eV, $N_C = 2.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et $N_V = 1.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

3. Tracer le diagramme énergétique du Silicium en indiquant les niveaux de conduction, de valence et le niveau de Fermi intrinsèque.

II. Semi-conducteur extrinsèque

Le Silicium est maintenant dopé avec de l'arsenic (As), élément du **groupe V** du tableau périodique, avec une concentration de $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

1. À 27°C, calculer la densité d'électrons n du Si dopé. En déduire la densité de trous p . Quel est le type de semi-conducteur obtenu ?
2. Calculer à 27 °C la position du niveau de Fermi E_F après dopage.
3. Tracer le diagramme énergétique du Silicium dopé en indiquant les niveaux de conduction, de valence et le niveau de Fermi.

Exercice 02 :

On donne le tableau suivant :

Matériau SC	E_g [eV]	N_C [atomes/cm ³]	N_V [atomes/cm ³]
AsGa	1.43	4.7×10^{17}	7.0×10^{18}
Ge	0.66	1.04×10^{19}	6.0×10^{18}
Si	1.12	2.7×10^{19}	1.1×10^{19}
InP	1.35	5.7×10^{17}	1.2×10^{18}
ZnO	3.37	3.0×10^{18}	2.0×10^{18}

1. Parmi ces cinq semi-conducteurs, lequel présente la concentration intrinsèque n_i la plus faible ? Justifier votre réponse en expliquant le lien entre la largeur de bande interdite E_g et n_i .
2. Calculer la concentration intrinsèque n_i pour chacun des semiconducteurs à 300 K.
3. Déterminer la position du niveau de Fermi intrinsèque E_{F_i} pour chacun des semi-conducteurs à 0 K, 100 K, 300 K et 600 K.
4. Représenter par un schéma énergétique les différentes positions du niveau de Fermi pour les semiconducteurs Ge et InP à différentes températures.
5. Expliquer comment la température influence la position de E_{F_i} et la densité de porteurs intrinsèques

Exercice 03 : (pour l'étudiant)

Un semiconducteur est caractérisé par ses densités d'états d'énergie N_V (dans la BV) et N_C (dans la BC), ainsi que par son énergie de bande interdite E_g . À la température ambiante (300 K), répondre aux questions suivantes :

1. Rappeler l'expression de la densité intrinsèque n_i en fonction de N_C , N_V , E_g et de la température T .
2. Calculer la valeur de n_i pour un semiconducteur donné avec $E_g = 1.1$ eV, $N_C = 2.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et $N_V = 1.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.
3. Expliquer comment la position du niveau de Fermi E_F est influencée par la température dans un semi-conducteur intrinsèque.
4. Calculer E_F à température ambiante si l'on considère que le niveau de référence est le haut de la bande de valence ($E_V = 0$).
5. Si le semiconducteur est dopé avec un élément donneur à une concentration de 10^{18} cm^{-3} , calculer la nouvelle densité d'électrons n et la densité de trous p .
6. Déterminer le type du semi-conducteur (n ou p) et justifier.
7. Comment évolue la densité de porteurs avec l'augmentation de la température ?
8. Expliquer pourquoi un semi-conducteur fortement dopé peut devenir intrinsèque à haute température.

Exercice 04 : étude d'une jonction PN

On considère une jonction PN abrupte en silicium de surface $S=4.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ réalisée comme suit :

- a) Une région P dopée à $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (atomes accepteurs).
- b) Une région N dopée à $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (atomes donneurs).

On suppose que la température ambiante est telle que : $k_B T = 40^{-1} \text{ eV}$.

Les données pour le silicium à cette température sont :

- $n_i^2(T) = 5.0 \times 10^{31} \text{ m}^{-6}$ (densité de porteurs intrinsèques).
 - Largeur de la bande interdite : $E_g = 1.12 \text{ eV}$.
 - Mobilité des électrons : $\mu_n(T) = 1.5 \times 10^3 \text{ V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.
 - Mobilité des trous : $\mu_p(T) = 4.5 \times 10^2 \text{ V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.
 - Permittivité du silicium : $\epsilon = 1.0 \times 10^{-12} \text{ F/cm}$.
1. Déterminer la concentration des porteurs majoritaires (trous dans P et électrons dans N).
 2. Calculer le potentiel de la jonction PN en utilisant l'équation de contact.
 3. Déterminer la largeur de la zone de charge d'espace (W) et la répartition de W dans les régions P et N.
 4. Dédire le champ électrique maximal dans la jonction.
 5. Calculer la capacité de la jonction en régime de polarisation nulle.
 6. Étudier l'influence d'une polarisation inverse sur la largeur de la zone de charge d'espace et la capacité de la jonction.

Exercice 05 : étude d'une jonction PN

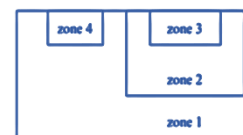
On considère une jonction PN à base de Germanium.

- La **région I** est dopée par 10^{18} cm^{-3} d'atomes accepteurs.
 - La **région II** est dopée par 10^{15} cm^{-3} d'atomes donneurs.
 - **Densité intrinsèque du Ge** : $n_i = 1.87 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.
 - **Température d'étude** : 300 K.
1. Quelle région est de type P et quelle région est de type N ? Justifiez votre réponse.
 2. Quelle région est de type P et quelle région est de type N ? Justifiez votre réponse.
 3. Déterminez la concentration des trous majoritaires (p) et des électrons minoritaires (n) dans la région de type P.
 4. Comparez qualitativement la position des niveaux de Fermi dans les régions P et N par rapport au niveau intrinsèque du Germanium.

Exercice 06 : (pour l'étudiant)

On considère une plaquette de silicium dopée avec une concentration d'atomes accepteurs $N_A = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Après des diffusions successives d'impuretés :

- La zone 2 est dopée avec des atomes donneurs à une concentration de $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.
- Les zones 3 et 4 sont dopées avec des atomes accepteurs à une concentration de $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.



On considère que la température est **300 K**, avec une concentration intrinsèque de porteurs dans le silicium donnée par : $n_i = 8.3 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$.

1. Déterminer la concentration des électrons n et des trous p dans chacune des zones en supposant l'approximation de neutralité de charge.
2. Identifier le type de dopage de chaque zone (type P ou N).
3. Écrire la relation d'équilibre reliant les concentrations des porteurs majoritaires et minoritaires dans un semi-conducteur.
4. Identifier les jonctions PN formées dans la plaquette et discuter qualitativement la répartition des charges et la formation des zones de charge d'espace aux interfaces.
5. Déterminer le potentiel de contact V_{bi} aux interfaces des différentes jonctions PN en utilisant la relation :

$$V_{bi} = \frac{K_B T}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

où $k_B T / q \approx 0.0259 \text{ V}$ à 300 K

6. En supposant une approximation à une jonction abrupte, exprimer la largeur de la zone de charge d'espace W et déterminer sa répartition dans les régions P et N.
7. Déterminer la capacité de la jonction en régime de polarisation nulle en utilisant l'expression :

$$C_j = \frac{\epsilon}{W}$$

Où ϵ est la permittivité du silicium.

8. Étudier qualitativement l'effet d'une polarisation directe et inverse sur la largeur de la zone de charge d'espace et sur la capacité de la jonction.