

Expérience n°4 – SEMI-CONDUCTEURS

Domaine: Électricité

Lien avec le cours de Physique Générale:

Cette expérience est reliée aux chapitres suivants du cours de Physique Générale:

- Physique I, Chapitre 11 : Les charges, la force et le champ électrique
- Physique I, Chapitre 12 : Potentiel et énergie électrique, courant électrique
- Physique II, Chapitre 8 : Le début de la mécanique quantique

Objectif général de l'expérience

L'objectif de cette expérience est de caractériser la **conductivité électrique en fonction de la température** pour des échantillons basés sur trois **matériaux semi-conducteurs** différents. En utilisant ces données, on peut déterminer l'**énergie potentielle modifiée** de la transition inter-bande correspondante des électrons.

Puis l'extrapolation de l'énergie potentielle modifiée vers le zéro absolu de température ($T = 0$ K) permet de déterminer la **bande interdite** pour chaque échantillon ; cette valeur énergétique est une constante caractéristique du matériau.

1 Introduction**1.1) Conduction électrique dans les solides**

Les matériaux à l'état solide possèdent une **structure cristalline**, c'est-à-dire que leurs atomes se trouvent sur un réseau dont l'espacement et l'ordre sont bien définis. Dans ces conditions, les niveaux électroniques qui se présentent sous la forme d'énergies discrètes dans les atomes isolés s'élargissent en **bandes d'énergie**.

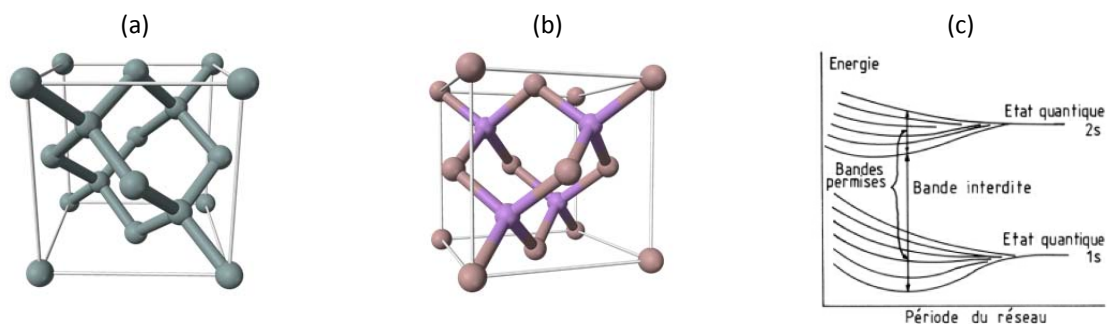


Figure 1: Maille du réseau cristallin en configurations "diamant" (a, ex. Si) et "blende" (b, ex. GaAs).
(c) Elargissement des niveaux individuels des atomes isolés en bandes d'énergie dans les cristaux.

Le moyen mathématique permettant de calculer les bandes d'énergie à partir des niveaux atomiques s'appelle la méthode des "liaisons fortes" [1].

Une des lois fondamentales de la mécanique quantique, le principe d'exclusion de Pauli-Fermi, interdit l'occupation d'un état énergétique par plus de deux électrons. Par conséquent, une bande est considérée comme remplie une fois que deux électrons occupent chacun de ses états. A la température du zéro absolu, s'il n'y pas de recouvrement des bandes, toutes les bandes sont remplies jusqu'à une bande qui s'appelle la **bande de valence (BV)**. La première bande plus haute en énergie est entièrement vide à $T = 0$ K; elle s'appelle la **bande de conduction (BC)**. Aux températures élevées, des électrons peuvent être excités thermiquement de la bande de valence à la bande de conduction.

Le déplacement des électrons dans un solide sous l'effet d'une tension (un champ électrique) se manifeste par un courant électrique. La **conductivité électrique** (ainsi que son inverse, la résistivité) permet de relier la tension et le courant (ce qui correspond à loi d'Ohm dans le cas d'une structure purement résistive). Des électrons en mouvement occupent des niveaux plus élevés en énergie que ceux qui sont localisés. La disponibilité des niveaux correspondants aux énergies élevées et leur taux d'occupation sont donc décisifs pour la conduction. Ceci implique que des **bandes entièrement remplies ne peuvent pas contribuer à la conduction**, mais que des électrons dans la bande de conduction et/ou des niveaux libres dans la bande de valence (appelés des "trous") sont requis.

1.2) Isolants, semi-conducteurs et conducteurs

En fonction du matériau considéré, on observe les deux situations extrêmes suivantes en fonction du positionnement relatif des bandes de valence et de conduction¹:

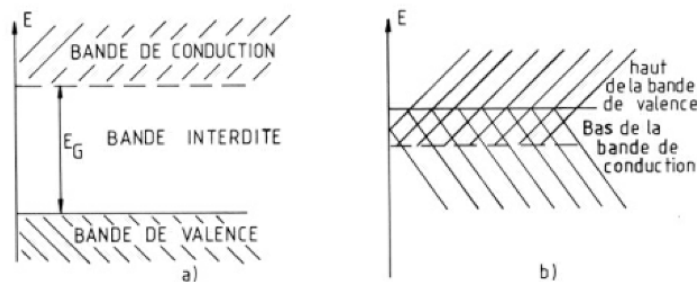


Figure 2: Structures de bandes simplifiées pour des isolants et des semi-conducteurs (a), ou des conducteurs/métaux (b).

Dans le cas des **isolants** et des **semi-conducteurs**, il existe une bande d'énergie entre la BV et la BC où il n'existe aucun état électronique. Cette bande s'appelle la **bande interdite** ou **énergie de gap** E_g . Contrairement au cas des isolants, la bande interdite des semi-conducteurs est suffisamment étroite pour permettre à un nombre d'électrons important d'être excités thermiquement de la BV à la BC à température ambiante. Historiquement, les matériaux jusqu'à une bande interdite de 3 eV étaient classifiés comme semi-conducteurs. Aujourd'hui cependant, des dispositifs modernes de haute puissance se basent sur des semi-conducteurs à large gap comme le GaN ($E_g = 3.39$ eV) ou le 6H-SiC ($E_g = 3.05$ eV).

La **distribution de Boltzmann** donne une bonne approximation de la densité n_i d'électrons dans la BC (nombre d'électrons par unité de volume) en fonction de température dans la gamme de températures de notre expérience (de -30 °C à 50 °C)

$$n_i^2 = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{k_B T}}, \quad (\text{Eq. 1})$$

où N_c et N_v sont les densités effectives d'états électroniques dans les bandes de conduction et de valence (qui dépendent du matériau) et l'énergie thermique $k_B T = 25.9$ meV à température ambiante. L'expression de la conductivité σ_i est donnée par

$$\sigma_i = n_i q \cdot (\mu_n + \mu_p), \quad (\text{Eq. 2})$$

où $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C est la charge de l'électron, alors que μ_n et μ_p représentent la mobilité des électrons et des trous, respectivement, qui dépendent du matériau considéré. Selon les équations (Eq. 1) et (Eq. 2), il est évident qu'aux températures élevées, la conductivité des semi-conducteurs augmente.

¹Une troisième possibilité se présente dans les semi-conducteurs à bande interdite "zéro" dont la transition de la BV à la BC s'effectue sans énergie: le graphène est un matériau bien connu de ce type [2].

Dans les **conducteurs** (ou métaux), les bandes de valence et de conduction se recouvrent, donc aucune excitation thermique n'est requise pour obtenir une conduction des électrons.

1.3) Matériaux semi-conducteurs et leurs applications

Les matériaux semi-conducteurs constituent la base de l'industrie de l'électronique grâce à la possibilité de fabriquer des microstructures dont la disponibilité ou le passage des électrons peut être contrôlé de manière précise (mot-clé: dopage [3]) en appliquant des faibles tensions et courants.

Le silicium (Si), un élément du 4^{ème} groupe principal du tableau périodique, est à la base de la plupart des dispositifs de **microélectronique**. Les dispositifs microélectroniques de base sont des **diodes** et des **transistors**. Pour établir des circuits intégrés, des grands disques ("wafers", d'un diamètre jusqu'à 450 mm) de la matière monocristalline sont fabriqués. Ensuite, par des techniques de micro-fabrication, des circuits comprenant des centaines de millions de transistors par cm² sont réalisés.

L'**optoélectronique** utilise des transitions électroniques luminescentes de la BC à la BV pour la réalisation de sources de lumière (diodes électroluminescentes (LEDs) et diodes laser). Les énergies photoniques correspondent aux énergies des bandes interdites (voir Tableau 1). En fonction de la longueur d'onde (couleur) d'émission souhaitée, plusieurs alliages entre des composants des 3^{ème} et 5^{ème} colonnes du tableau périodique peuvent être fabriqués. Par exemple, on utilise l'InP pour les applications télécom dans l'infra-rouge, le GaAs pour les télécommandes optiques, le GaP pour les LED vertes et l'InGaN pour les LED bleues.

Matériau	E_g [eV]	λ_g [μm]
GaN	3.39	0.366
GaP	2.26	0.549
InP	1.34	0.925

Tableau 1 : Exemples d'énergie de gap E_g et leur correspondance en longueur d'onde. Un électron peut se désexciter de la bande de conduction vers la bande de valence par émission de radiation (un photon) dont l'énergie équivaut à la bande interdite.

2 Principe général de l'expérience

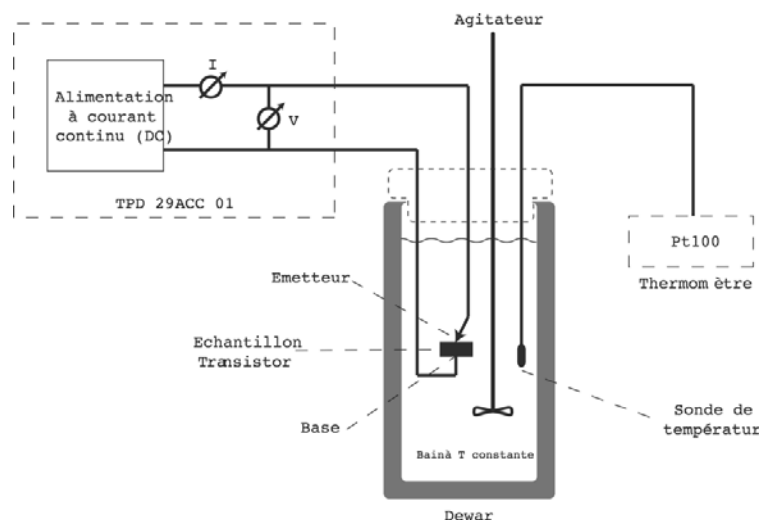


Figure 3 : Schéma de l'appareillage expérimental.

Lors de l'expérience, trois échantillons semi-conducteurs encapsulés (jonctions p-n de transistors ou diodes) sont plongés dans des bains de température connue. Les échantillons sont constitués de germanium (Ge), silicium (Si) et d'arséniure de gallium (GaAs). Les bains sont préparés dans un "dewar" (récipient de bonne isolation thermique) en utilisant de l'eau pour les températures

supérieures à 0 °C, et un mélange d'éthanol et d'azote liquide pour des températures inférieures. Pour chaque température, une fois le système stabilisé, on mesurera la tension U nécessaire pour faire passer un courant I donné dans les différents échantillons. Les mesures seront faites pour deux courants différents (0.1 mA et 0.2 mA) à chaque température.

A partir des tensions mesurées à chaque température, l'énergie potentielle modifiée Y sera déterminée selon une relation connue pour des jonctions p-n :

$$Y = 3k_B T \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + qU, \quad (\text{Eq. 3})$$

avec $T_0 = 300$ K, $k_B = 8.617 \cdot 10^{-5}$ eV/K est la constante de Boltzmann, $q = 1$ eV/V est la charge électronique. Notez que l'équation ci-dessus est normalisée à l'unité d'énergie de l'électron volt (1 eV = $1.602 \cdot 10^{-19}$ J). Finalement, une extrapolation linéaire de l'énergie potentielle modifiée vers la température du zéro absolu ($T = 0$ K) sera effectuée pour chaque matériau à chaque courant. Au zéro absolu de température, cette énergie correspond à l'énergie de la bande interdite (E_g) du matériau (qui devrait ainsi être indépendante du courant).

3 Marche à suivre

3.1) Caractérisation expérimentale des trois échantillons semi-conducteurs

Choisir sept températures dans la gamme de +50 °C à -30 °C réparties de manière à peu près équidistante. En commençant avec la température la plus haute, préparer des bains d'eau dans le premier "dewar" et immerger les échantillons. Les températures au-dessus de la température ambiante se réalisent avec un mélange d'eau froide (du robinet) et d'eau chauffée dans une bouilloire. Les températures inférieures, jusqu'à 0 °C, s'obtiennent en ajoutant des glaçons. Agiter toujours doucement le "dewar" pour homogénéiser la température et relever sa valeur lorsque l'équilibre thermique est atteint. Faire passer successivement un courant de 0.1 mA dans chaque échantillon et relever les tensions nécessaires correspondantes. Répéter la procédure pour un courant de 0.2 mA.

Pour les mesures au-dessous de 0 °C, utiliser le 2^{ème} "dewar" qui est sec. Remplir jusqu'à un niveau de 4 cm avec de l'éthanol pour assurer l'immersion des échantillons et ajouter de l'azote liquide pour obtenir les températures restantes. Pour chaque température, effectuer les mêmes mesures que précédemment.

Attention: l'azote liquide (température: 77K ou -196 °C) peut provoquer des brûlures sévères s'il est mis en contact avec la peau. Donc: prudence, et enlever tous les bijoux (bagues, montres, etc.). Mettre en ordre votre poste de travail avant de débiter cette partie de l'expérience. Ne jamais fermer des récipients (par exemple des bouteilles) qui contiennent de l'azote liquide.

Calcul d'erreur: estimer les erreurs ΔT et ΔU sur les températures et tensions mesurées, puis calculer l'expression de l'incertitude ΔY sur l'énergie potentielle corrigée Y (propagation des erreurs) qu'on appliquera à l'aide de la feuille de mesure Excel de l'expérience.

Déterminer ΔT , Y et ΔY pour chaque mesure et tracer six graphes $Y(T)$ indépendants (pour chaque échantillon et chaque courant) avec les barres d'erreur correspondantes.

3.2) Détermination des bandes interdites

On peut montrer que l'expression (Eq. 3) donne lieu à une relation linéaire entre température et énergie potentielle modifiée, de sorte que le graphique prend la forme

$$Y = CT + E_g. \quad (\text{Eq. 4})$$

En dériver la valeur de la bande interdite pour chaque échantillon par extrapolation linéaire vers $T = 0$ K.

4 Préalable

Cette partie est à **préparer en avance**, avant la séance de TP, afin de gagner du temps lors de celle-ci.

Partie	Descriptif
1.3)	Identifier les trois matériaux concernés dans le tableau périodique et trouver les bandes interdites correspondantes en utilisant des ressources on-line.
3.1)	Déterminer le volume occupé par 1 l d'azote liquide lorsqu'il s'évapore. Quelques informations: densité de l'azote liquide $\rho_{\text{LN}_2} = 808 \text{ g/l}$, masse molaire de l'azote $M_{\text{N}} = 14.006 \text{ g/mol}$, volume molaire d'un gaz parfait à température ambiante : $V_m = 24.465 \text{ l/mol}$.

Références :

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/Tight_binding (source Octobre 2013)

[2] <http://www.graphene.manchester.ac.uk/> (source Octobre 2013)

[3] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/dope.html> (source Octobre 2013)

Pour une introduction au sujet des semi-conducteurs, voir: <http://britneyspears.ac/lasers.htm>

Travaux Pratiques de Physique

Expérience N°4 : Semiconducteurs

3.1) Mesure de la tension aux bornes des jonctions en fonction de la température

Incertitude sur les températures mesurées: [°C]

i) Germanium (Ge):

T [°C]	T [K]	$I = 0.1 \text{ mA}$				$I = 0.2 \text{ mA}$			
		U_{Ge} [V]	ΔU_{Ge} [V]	Y_{Ge} [eV]	ΔY_{Ge} [eV]	U_{Ge} [V]	ΔU_{Ge} [V]	Y_{Ge} [eV]	ΔY_{Ge} [eV]

ii) Silicium (Si):

T [°C]	T [K]	$I = 0.1 \text{ mA}$				$I = 0.2 \text{ mA}$			
		U_{Si} [V]	ΔU_{Si} [V]	Y_{Si} [eV]	ΔY_{Si} [eV]	U_{Si} [V]	ΔU_{Si} [V]	Y_{Si} [eV]	ΔY_{Si} [eV]

iii) Arséniure de gallium (GaAs):

T [°C]	T [K]	$I = 0.1 \text{ mA}$				$I = 0.2 \text{ mA}$			
		U_{GaAs} [V]	ΔU_{GaAs} [V]	Y_{GaAs} [eV]	ΔY_{GaAs} [eV]	U_{GaAs} [V]	ΔU_{GaAs} [V]	Y_{GaAs} [eV]	ΔY_{GaAs} [eV]

Travaux Pratiques de Physique

Expérience N°4 : Semiconducteurs

3.2a) Détermination de la bande interdite du Germanium

Valeur des tables

$E_g =$ [eV]

Représentation graphique: $Y = Y(T)$

$I = 0.1$ mA

insérer graphique ici

$C =$ [eV/K]
 $\Delta C =$ [eV/K]

$E_g =$ [eV]
 $\Delta E_g =$ [eV]

$I = 0.2$ mA

insérer graphique ici

$C =$ [eV/K]
 $\Delta C =$ [eV/K]

$E_g =$ [eV]
 $\Delta E_g =$ [eV]

Travaux Pratiques de Physique

Expérience N°4 : Semiconducteurs

3.2b) Détermination de la bande interdite du Silicium

Valeur des tables

$E_g =$ [eV]

Représentation graphique: $Y = Y(T)$

$I = 0.1$ mA

insérer graphique ici

$C =$ [eV/K]
 $\Delta C =$ [eV/K]

$E_g =$ [eV]
 $\Delta E_g =$ [eV]

$I = 0.2$ mA

insérer graphique ici

$C =$ [eV/K]
 $\Delta C =$ [eV/K]

$E_g =$ [eV]
 $\Delta E_g =$ [eV]

Travaux Pratiques de Physique

Expérience N°4 : Semiconducteurs

3.2c) Détermination de la bande interdite de l'Arséniure de Gallium (GaAs)

Valeur des tables

$E_g =$ [eV]

Représentation graphique: $Y = Y(T)$

$I = 0.1$ mA

insérer graphique ici

$C =$ [eV/K]
 $\Delta C =$ [eV/K]

$E_g =$ [eV]
 $\Delta E_g =$ [eV]

$I = 0.2$ mA

insérer graphique ici

$C =$ [eV/K]
 $\Delta C =$ [eV/K]

$E_g =$ [eV]
 $\Delta E_g =$ [eV]