

## MP18: Matériaux semi-conducteurs

corrigé par A. Le Diffon

**Rapports du Jury** 2016 : *La variété des matériaux semi-conducteurs fait qu'il est parfois difficile de savoir quel est le matériau utilisé dans un composant commercial, ou quel est le dopage dans certaines plaquettes. Les candidats mesurent alors des propriétés sans pouvoir les comparer à quoi que ce soit. Il vaut donc mieux utiliser des composants de caractéristiques connues. Par ailleurs, il est essentiel de connaître quelques ordres de grandeur, en particulier celui de l'énergie de gap et de la densité de porteurs.*

Et c'est le même commentaire chaque année depuis 2013...

### Bibliographie

- *Physique des semi-conducteurs* de Christian et Hélène Ngo
- *Effet Hall dans les semi-conducteurs poly d'E. Deleporte, Y.Dumeige* (il est en ligne)

### Plan détaillé :

**Intro** L'énergie d'un SC se caractérise par une structure en bandes (bande de valence BV et bande de conduction BC), comme pour un isolant, la BV est complète mais au contraire de celui-ci, l'énergie du gap est suffisamment faible ( $\sim 1\text{eV}$ ) pour permettre le passage d'électrons dans la BC. Le SC est alors capable de conduire le courant.

## 1 Propriétés des matériaux semi-conducteurs

### 1.1 SC intrinsèque : Ge non dopé



On utilise la plaquette de Ge non dopé dont des dimensions (données constructeur sur la notice en ligne) sont :

- Longueur L = 20mm
- Largeur a = 10mm
- Épaisseur b = 1mm

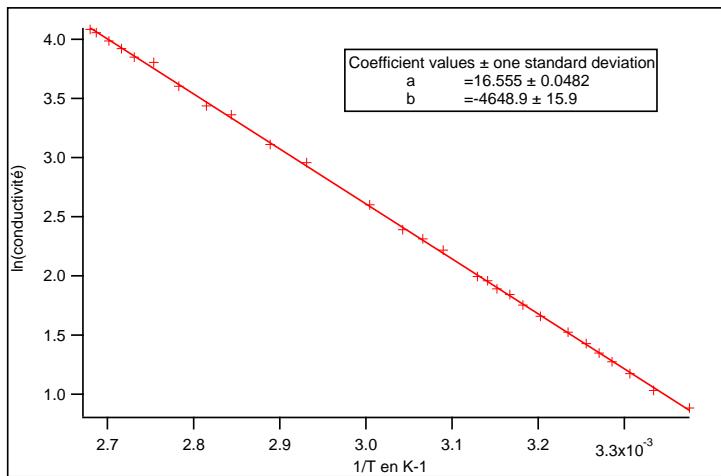
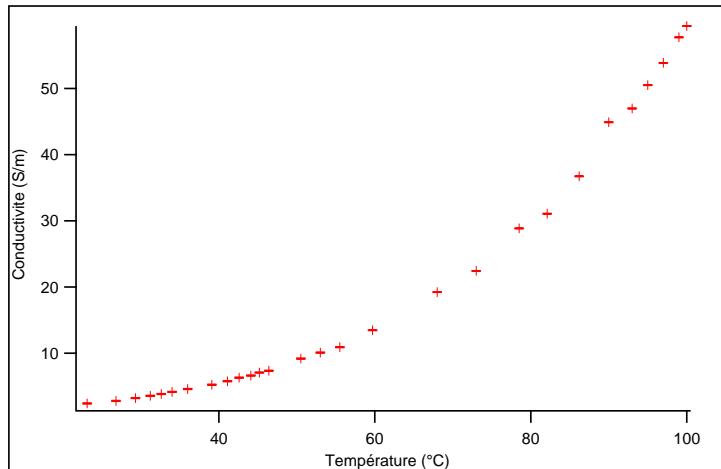
L'alimentation de la plaquette permet de contrôler le courant et la tension imposés à la plaquette de Ge. Elle est également équipée d'un système de chauffage qui permet de gérer la température. On relie à l'alimentation 3 ampèremètres pour mesurer ces paramètres.

Dans un premier temps, on fixe  $I = 2.02\text{mA}$  et on mesure  $U$  en fonction de la température. On est alors en mesure de tracer la conductivité en fonction de la température car en effet,  $\sigma = \frac{IL}{U_{ab}}$ . On met alors en lumière une propriété remarquable des SC : leur conductivité augmente avec la température (au contraire d'un métal).

Cette même série de mesure nous permet également de remonter à l'énergie du gap en utilisant la relation  $\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right)$ . Ainsi, en traçant  $\ln(\sigma)$  en fonction de  $\frac{1}{T}$ , on obtient une droite dont le coefficient directeur vaut  $\frac{-E_g}{2k_B}$ . On obtient  $E_g = 0.801 \pm 0.003\text{eV}$ .

Remarques :

- L'incertitude est celle obtenue avec le fit mais comme on a appliqué un  $\ln$ , elle n'est pas représentative des incertitudes de mesure qu'on a sur  $U$  et  $T$ .
- La valeur tabulée est  $E_g^{tab} = 0.67\text{eV}$  donc on est assez loin. Selon JBD, ça peut être dû à une chute de tension entre la plaquette de Ge et l'endroit où la tension est réellement mesurée.



## 1.2 SC extrinsèque : Ge dopé P

Un SC conducteur dopé P contient des impuretés qui sont des atomes possédant moins d'électrons de valence que les atomes de Ge. Cela provoque l'apparition d'un niveau riche en trous légèrement au

dessus de la BV. Les électrons de la BV vont pouvoir rejoindre ce niveau facilement.

On commence par mesurer la conductivité de la plaquette à température ambiante :

Pour  $I = 15.05 \pm 0.01\text{mA}$ , on mesure  $U = 0.735 \pm 0.001\text{V}$ . D'où

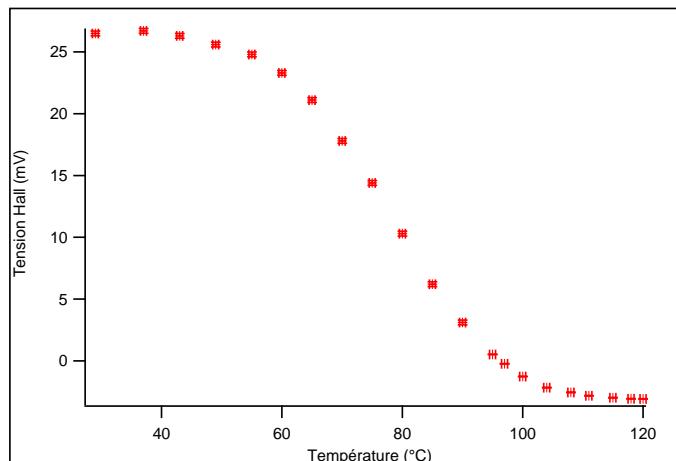
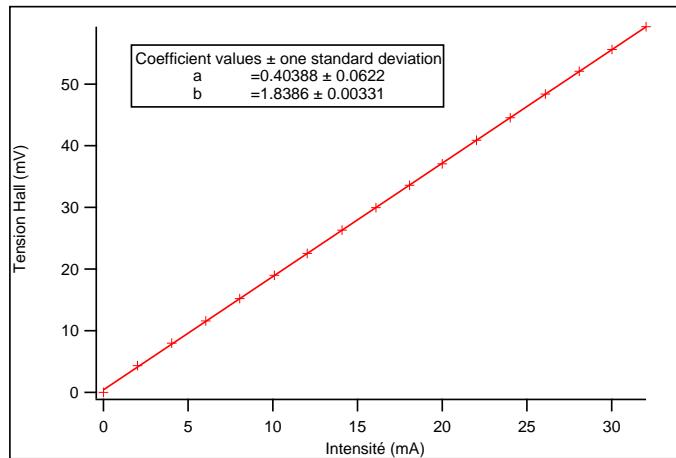
$$\sigma = \frac{IL}{Uab} = 41.01 \pm 0.06$$

A présent, on va utiliser l'effet Hall pour déterminer la densité et la mobilité des porteurs. On crée un champ magnétique à l'aide d'un électro-aimant, la plaquette est glissée dans l'entrefer. L'alimentation de la plaquette permet de mesurer la tension Hall. Le champ B est mesuré au gaussmètre et vaut  $B = 261 \pm 2\text{mT}$  dans l'entrefer. On fait varier I et on mesure la tension Hall  $U_h$ .

On a une relation linéaire :  $U_h = \frac{IB}{neb}$  où e est la charge d'un porteur (trou) et n est la densité de porteurs. Ainsi, la droite obtenue permet de remonter à n. On obtient  $n = 8.77 \pm 0.07 \cdot 10^{20}\text{m}^{-3}$  ce qui est bien l'ordre de grandeur auquel on s'attend pour un SC dopé.

On calcule également la mobilité des porteurs :  $\mu = \frac{\sigma}{ne} = 0.291 \pm 0.002\text{m}^2/\text{Vs}$

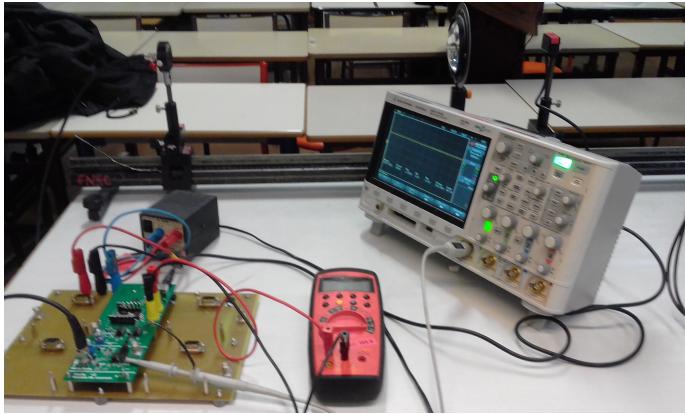
On étudie enfin l'évolution de la tension hall en fonction de la température. La courbe a été faite en préparation et on ne fait que la commenter car la mesure est identique à celle effectuée au début. Ce qu'il faut remarquer, c'est le changement de signe de la tension hall à partir d'une certaine température. Ceci correspond à un changement de la nature des porteurs qui participent le plus à la conduction du courant. En effet, les électrons deviennent alors prépondérants devant les trous.



## 2 Utilisation des SC à travers la photodiode

Les SC sont omniprésents en électronique notamment au travers de la jonction pn qui est constituée d'un SC dopé n et d'un SC dopé p accolés. Nous avons choisi de traiter l'exemple de la photodiode. Une photodiode est constituée d'une jonction pn polarisée en inverse. L'énergie du gap est augmentée par rapport à une jonction pn qui ne serait pas polarisée. Le courant direct, celui correspondant aux électrons allant de n vers p, est bloqué. En revanche, on observe un courant inverse ou photocourant constitué d'électrons allant de p vers n.

### 2.1 La photodiode : un bon détecteur de photons



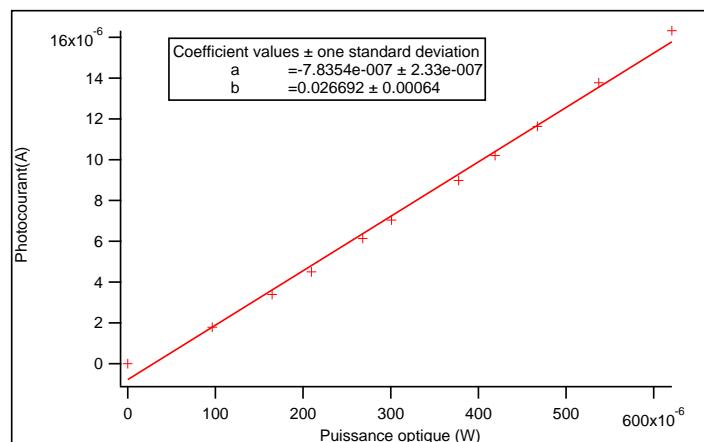
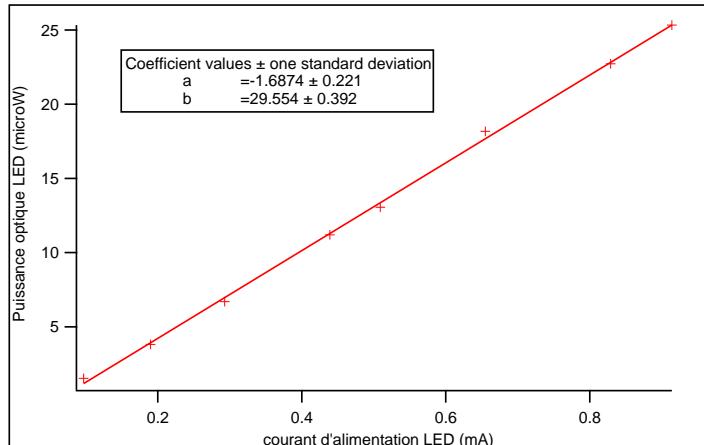
La caractéristique courant-tension d'une photodiode est celle d'une diode. Dans la partie polarisée en inverse (tension négative), plus le flux lumineux est intense, plus la caractéristique est basse. On va vérifier que la réponse de la photodiode est bien linéaire.

On éclaire la photodiode à l'aide d'une LED alimentée par une plaquette sur laquelle on peut régler l'intensité. Sur la plaquette, on a choisi de mettre une résistance de  $1.8k\Omega$  (assez forte pour ne pas griller la LED et suffisamment faible pour qu'elle éclaire assez).

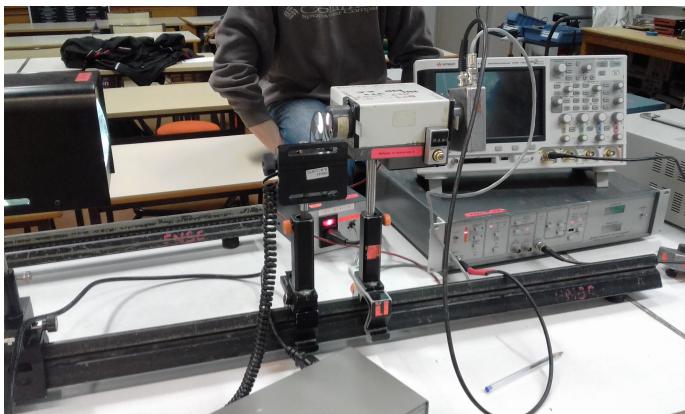
En préparation, on a étalonné la puissance optique émise par la LED en fonction de l'intensité d'alimentation (mesurée sur la plaquette avec un ampèremètre). On a utilisé un puissance-mètre optique. Le montage est fait sur banc avec une lentille pour condenser la lumière de la LED de façon à pouvoir placer la photodiode exactement à l'endroit où on a placé le puissance-mètre.

La photodiode est reliée à la même plaquette qui permet de convertir le courant en tension qu'on lit alors sur un oscillo. Sur cette plaquette, on a placé une résistance  $R = 98k\Omega$ . On mesure alors la tension en fonction de l'intensité d'alimentation de la LED. On trace le photocourant  $i_{photo} = \frac{U_{photo}}{R}$  en fonction de la puissance optique fournie par la LED. On obtient une droite. La photodiode est donc un bon détecteur de photons. Le coefficient directeur de la droite obtenue permet de calculer l'efficacité quantique de la photodiode, c'est-à-dire le nombre de paires électron-trou créées pour un photon incident. On trouve,

$$\frac{N_{electrons}}{N_{photons}} = \frac{ihc}{P_{opt}e\lambda} = 0.47$$



## 2.2 Réponse spectrale de la photodiode



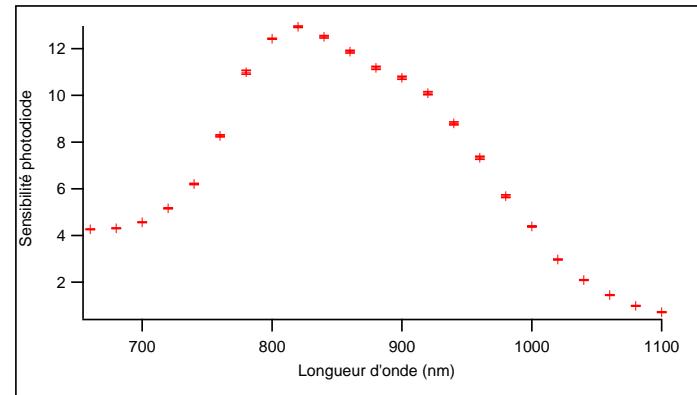
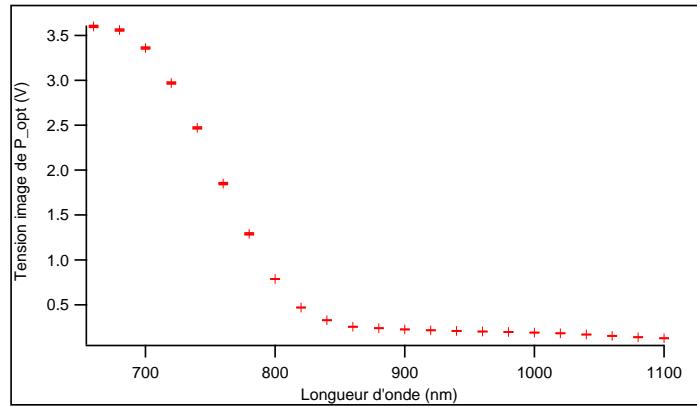
Pour finir, on s'intéresse à la réponse spectrale d'une photodiode (cellule de Si). On utilise une lampe blanche et un monochromateur permettant de sélectionner une longueur d'onde. En préparation, on a établi le spectre de la lampe à l'aide d'un pyromètre dont la réponse est identique quelque soit la longueur d'onde. Comme celui-ci réagit à des variations de flux lumineux, on place un chopper devant le monochromateur qui permet de hacher la lumière. On utilise une boucle à verrouillage de phase (PLL) afin de nettoyer le signal du pyromètre, qui sinon est trop bruité, puis on l'envoie sur l'oscillo. La PLL utilisée est un appareil commercial, on ne la fabrique pas. Pour nettoyer le signal, une autre méthode consiste à synchroniser l'oscillo sur la sortie TTL du chopper et à moyenner (ça marche

aussi).

On remplace ensuite le pyromètre par la cellule de Si en faisant attention de ne pas bouger les différents éléments du montage, on enlève le chopper et la PLL qui ne sont plus utiles. On mesure alors la tension en fonction de la longueur d'onde choisie sur le monochromateur. Il faut faire les mesures pour les mêmes longueurs d'onde que celles choisies avec le pyromètre. Pour s'affranchir du spectre de la lampe, on calcule le rapport de la réponse de la photodiode sur celle du pyromètre et on obtient la sensibilité de la photodiode. On peut alors commenter la courbe obtenue.

Dans la première partie de la courbe, la sensibilité augmente à mesure que la longueur d'onde augmente. En effet, quand  $\lambda$  augmente, l'énergie des photons diminue et donc pour une même puissance optique, le nombre de photons est plus grand et le nombre de paires électrons-trous créées croît. Cependant, à partir d'une certaine longueur d'onde, les photons n'ont plus assez d'énergie pour permettre aux électrons de passer dans la bande de conduction et la sensibilité chute brutalement. En fait, la courbe théorique prévoit une coupure brutale pour la longueur d'onde correspondant au gap mais cette courbe est un modèle très simplifié de ce qui se passe en vrai.

Ainsi, l'étude spectrale de la photodiode permet de mettre en valeur des propriétés caractéristiques du SC qui la compose.



**Conclusion** Ce montage nous a permis de mettre en lumière les propriétés caractéristiques des matériaux semi-conducteurs et nous avons montré leur utilité dans le cas de la photodiode. Toutefois, leur utilisation ne se limite pas à la photodiode, on aurait tout aussi bien pu étudier la LED, les transistors ou les cellules photovoltaïques.

## Questions

- Questions concernant les plaquettes de SC : comment on chauffe, quelle confiance accorder à la mesure ?
- D'où vient la formule reliant la conductivité à l'énergie du gap ? statistiques quantiques, distribution de Fermi-Dirac... Il faut connaître le principe du calcul qui permet d'aboutir à cette formule.
- La création de paires électron-trou lors de l'arrivée d'un photon, est-ce un effet photoélectrique ? Oui, c'est un effet photoélectrique interne.
- Comment fonctionne un monochromateur ? réseau qui disperse la lumière et on sélectionne une fine bande de longueurs d'onde avec une fente
- Comment fonctionne un pyromètre ? détecteur thermique
- Quel autre détecteur peut-on utiliser plutôt que le pyromètre ? une thermopile (elle a aussi une réponse plate en fonction de  $\lambda$ )
- Pour un SC intrinsèque, où est le niveau de Fermi ? entre les deux bandes
- Est-ce que la courbure des bandes influence la conduction ? Oui car c'est lié à la masse effective

## Remarques

- globalement, un bon montage, les expériences choisies sont bien
- Pour mesurer le champ dans l'entrefer, il faut fixer le gaussmètre sur un statif.
- Pour être sûr de mesurer la tension Hall, il faut faire 2 mesures en retournant la plaquette pour supprimer l'erreur systématique qui proviendrait du fait que les soudures ne seraient pas exactement l'une en face de l'autre.
- Quand on mesure la tension Hall, c'est mieux de fixer le courant et de faire varier le champ B (on a fait l'inverse).
- Au lieu de mesurer la conductivité en fonction de la température, on pourrait regarder la densité de porteurs en fonction de T.
- A choisir entre dopé p et dopé n vaut mieux prendre dopé p car on peut alors discuter l'inversion de porteur quand on augmente T (la tension Hall devient négative)
- La réponse spectrale c'est bien mais ça peut être zappé si on manque de temps.