

MP18 – MATÉRIAUX SEMI-CONDUCTEURS

14 avril 2020

Aurélien Goerlinger & Yohann Faure

Commentaires du jury

- 2010 à 2017 : 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.
- 2008 : Il est essentiel de savoir différencier les régimes de conduction intrinsèque et extrinsèque.

Bibliographie

- ⚡ *Dictionnaire de physique expérimentale. Tome 3. Elec-* → Manips
tronique, Aubert, Quaranta
- ⚡ *Physique du solide, Kittel* → Théorie
- ⚡ *Lasers, Cagnac* → Application : Diode Laser
- ⚡ *Expériences d'électronique, Duffait* → Diode Laser
- ⚡ *Optique expérimentale, Sextant* → Application : Cellule photovoltaïque.
- ⚡ *Physique de l'état du solide, Kittel* → ODG

Table des matières

1	Introduction aux semi-conducteurs : le comportement intrinsèque	2
2	Semi-conducteur dopé (ou extrinsèque)	2
2.1	Conductivité électrique en fonction de la température	3
2.2	Effet Hall	3
3	Applications	4
3.1	Diode Laser	4
3.2	Photorésistance (optionnel)	5
3.3	Cellule photovoltaïque (optionnel)	6

Introduction

Dans une séquence précédente, on a étudié les métaux, qui se sont vu caractérisés par leurs grandes conductivités thermique et électrique en comparaison aux isolants. Ces différentes propriétés sont explicables en étudiant la répartition énergétique des électrons. On distingue deux bandes d'énergie : la bande de conduction et la bande de valence. Chez les isolants, la bande de valence est pleine et séparée de la bande de conduction, vide, par un gap d'énergie de l'ordre de 10 eV. Dans les métaux, ces bandes se chevauchent et de nombreux électrons peuplent donc la bande de conduction. Comme son nom l'indique les semi conducteurs sont à la frontière entre ces deux types de matériaux. C'est ce qu'on va étudier au travers de ce montage en commençant par mettre en lumière les propriétés des semi-conducteurs, remonter aux valeurs de l'énergie de gap et du nombre de porteurs. Enfin on étudiera une application : la jonction PN.

But de ce montage Étudier les propriétés des semi-conducteurs et éventuellement regarder une ou deux applications.

1 Introduction aux semi-conducteurs : le comportement intrinsèque

↗ Quaranta 3, Kittel

À la différence des métaux, dont la résistance augmente avec la température (collisions avec les phonons), la résistance d'un semi-conducteur diminue avec la température (plus de $k_B T$ donc plus d'e- dans la bande de conduction) donc résistance diminue. La théorie est faite dans le Kittel p197.

Un SC est dit intrinsèque s'il est pur, on a avec ϵ_g l'énergie de gap

$$n = p \propto T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\epsilon_g}{2k_B T}\right)$$

et on a pour la conductivité $\sigma = ne(\mu_p + \mu_n)$ donc

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\epsilon_g}{2k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

R_0 désigne une résistance caractéristique : c'est la résistance du semi-conducteur à T_0 . Pour vérifier cette loi, on va chauffer une thermistance CTN (coefficient de température négatif) et obtenir l'évolution de la résistance en fonction de la température. On utilise le dispositif P102.5 constitué d'un bloc de cuivre chauffé par une résistance chauffante. Au sein du bloc de cuivre est encastré un thermocouple et la thermistance CTN.



Mesure de la caractéristique de la CTN



Incorporer la thermistance CTN P102.5 et un thermocouple P102.16 dans le bloc de cuivre. Brancher le thermocouple sur l'appareil P102.27 (attention à la polarité). À température ambiante, mesurer la résistance de la CTN au multimètre et la température au thermocouple.

Alimenter la résistance chauffante en 5V continu. Le bloc chauffe : relever régulièrement la température T et la résistance R.

Remonter à $\epsilon_g \simeq 0,76$ eV et vérifier le comportement non-métallique de ce composé magique.

Une remarque toute bête c'est que cela ressemble pas mal à l'énergie de gap du Germanium : 0.75eV

↓ On a donc vu le comportement qui diffère d'un métal! Cependant on est pas au bout de nos surprises puisque ce comportement est sans dopage...

2 Semi-conducteur dopé (ou extrinsèque)

Dopage : Insertion dans une matrice faite d'un seul élément un autre élément, généralement proche dans la classification périodique. (↗ Kittel p201, par ex, 1 bore pour 10^5 silicium)

À température ambiante l'énergie de gap est grande devant l'énergie d'excitation thermique. Afin d'avoir des matériaux ayant une conduction plus élevée à température ambiante, on ajoute des impuretés au cristal. Le SC est

dit dopé P si l'on ajoute des trous dans la bande de valence, et dopé N si l'on ajoute des électrons à la bande de conduction.

On va donc étudier ces semi-conducteurs dopés. Pour le Silicium, le dopage N est réalisé avec du Phosphore (juste après dans le tableau), le dopage P avec du Bore (colonne d'avant). Pour le Germanium, on utilise plus l'arsenic et le gallium AsGa). On va étudier les différentes caractéristiques d'un tel SC, dit extrinsèque, sur un exemple : Ge dopé N.

2.1 Conductivité électrique en fonction de la température

☞ Quaranta 3, Kittel p197.

Pour un SC dopé, il peut présenter le comportement intrinsèque à haute température mais la résistance est indépendante de la température quand celle-ci est basse.

On refait la même expérience que précédemment mais avec la plaquette au germanium, on chauffe avec le dispositif intégré à la plaquette.

Évolution de la résistance avec la température du Ge dopé N

☞ Quaranta 3, p432

⊖

Matériel : Voltmètre, plaque de Germanium N, alim alternative 12V.

On impose un courant de quelques mA avec le support, on chauffe la plaque SC jusqu'au alentours de 150 degrés (la notice conseille de ne pas dépasser 170 degrés, ainsi, si vous souhaitez vous aventurer au delà, soyez particulièrement vigilant à toutes fumées ou odeurs suspectes), et on relève en faisant refroidir à l'air la tension à différentes températures.

Faire joujou à l'azote si possible.

Remarque : On peut, en prépa, faire le très chaud et le très froid, et en live faire la température ambiante.

On peut tracer de même $\ln(R) = f(\frac{1}{T})$, et on observe deux régimes :

- le régime précédent à hautes températures (une droite) où on a un comportement intrinsèque (on évalue le gap : $a = \frac{e_g}{2k_B}$ à comparer à 0.67eV (☞ Kittel p183))
- un le comportement d'SC dopé où la résistance ne dépend pas de la température à basse température.

rem : il existe deux autres régimes difficiles à atteindre expérimentalement : $k_B T \gg e_g$ où on retrouve un métal et très basse T où il y a un "gel" des porteurs et la conductivité chute brutalement.

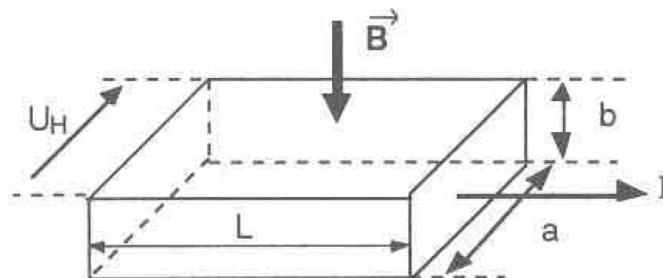
Une autre caractéristique importante des SC est la densité de porteurs de charge, on va essayer de la déterminer.

2.2 Effet Hall

☞ Quaranta tome 4, p133 (voir également tome 3)

Il est possible de mesurer un champ magnétique autrement qu'avec un fluxmètre. Ainsi, le teslamètre utilisé précédemment utilise un autre phénomène physique que l'induction de Faraday : l'effet Hall.

Lorsque l'on soumet un matériau parcouru par un courant I_{sc} (de densité \vec{j} à un champ \vec{B} , on observe en régime permanent l'apparition d'une ddp U_H perpendiculaire à la fois à \vec{j} et \vec{B} . En gros, \vec{j} indique le déplacement des électrons qui subissent une force de Laplace volumique $\vec{f} = \vec{j} \wedge \vec{B}$ et qui vont donc tous être déviés vers la même face du matériau. On a alors une accumulation de charges négatives d'un côté et de charges positives de l'autre donc paf ça fait des chocapics (et une ddp par la même occasion).



Cette tension dite de Hall est donnée par :

$$U_H = \frac{I_{sc} B}{neb} \quad (1)$$

avec e la charge élémentaire et n la densité électronique.

Les sondes à effet Hall sont ainsi plutôt composées de semi-conducteurs ($n \simeq 10^{21} \text{ m}^{-3}$) que de métaux ($(n \simeq 10^{29} \text{ m}^{-3})$).

Étalonnage de l'électroaimant



Avec un teslamètre fixé sur une potence, mesurer le champ B dans l'entrefer d'un électroaimant avec des pièces cylindriques en fonction de l'intensité le parcourant. Pour des raisons d'hystérésis, toujours aller dans le même sens, par exemple aller dans le sens des I croissants.

Sonde à effet Hall

🔧 Quaranta tome 4 p133

🕒 10 min

Matériel :

- plaquette P64.30 alimentée en 12 V par le générateur P64.37
- électroaimant avec des pièces cylindriques avec son alimentation
- voltmètre

Choisir un écartement entre les pièces de l'électroaimant, par exemple 2 cm. Ne plus y toucher. Placer la plaquette dans l'entrefer.

Noter la valeur U_H mesurée au voltmètre au niveau de la plaquette. Faire de même en retournant la plaquette ou bien en inversant le courant dans l'électroaimant

Répéter l'opération pour des I croissantes (évite l'hystérésis) allant de 1 à 8 A. L'étalonnage fait en préparation permet de connaître B .

Tracer $U_H = f(B)$ et faire une régression affine. En déduire n .

On définit la **mobilité** μ des porteurs de charge par

$$\mu = \frac{\sigma}{ne}$$

avec σ la conductivité électrique du SC mesurée précédemment et n ce qu'on vient de mesurer. On peut donc calculer μ .

Comparer la valeur obtenue à la valeur théorique de $3900 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Incertitudes :

$$u(\mu) = \mu \sqrt{\left(\frac{u(\sigma)}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{u(n)}{n}\right)^2}$$

3 Applications

Selon le temps, on peut en présenter une, deux ou aucune.

3.1 Diode Laser

🔧 Cagnac, p268 ; Duffait p64 ;

Diode = jonction PN, ici DEL, peut émettre de la lumière, et on peut réaliser la jonction de sorte à ce qu'elle forme la cavité optique.

On a un seuil, pour le voir il faut tracer la caractéristique courant-intensité. Ensuite on mesure la longueur d'onde au spectro : $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = e_g$

2014 : Prix Nobel attribué à Shuji Nakamura, Isamu Akasaki et Hiroshi Amano pour la création de la LED bleue.

Diode Laser



⊖ 5mn

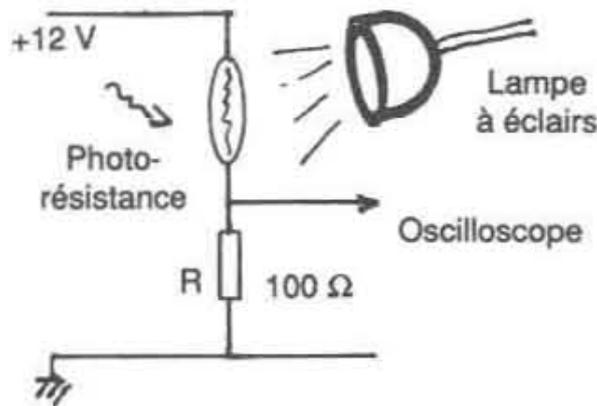
Matériel : Spectro, diode laser, polariseur-analyseur pour éviter la saturation du spectro.
Relever le spectre de la diode laser

On obtient une gaussienne centrée autour de 650 nm , ce qui équivaut donc bien à une énergie de gap de l'ordre de 2 eV.

3.2 Photorésistance (optionnel)

Une photorésistance est un SC dont l'excitation permettant la conduction est lumineuse et non thermique. On envoie donc de la lumière pour créer un courant. Elles sont utilisées pour détecter des variations de flux (pas assez précises pour mesurer des flux), notamment pour déclencher l'allumage des éclairages publics.

Lorsque la lumière s'éteint, le courant ne cesse pas automatiquement : il y a un **temps de recombinaison** pendant lequel les électrons de la bande de conduction se recombinent avec les trous de la bande de valence. On va pouvoir mesurer le temps de recombinaison des porteurs avec un stroboscope.



Mesure du temps de recombinaison des porteurs de charge

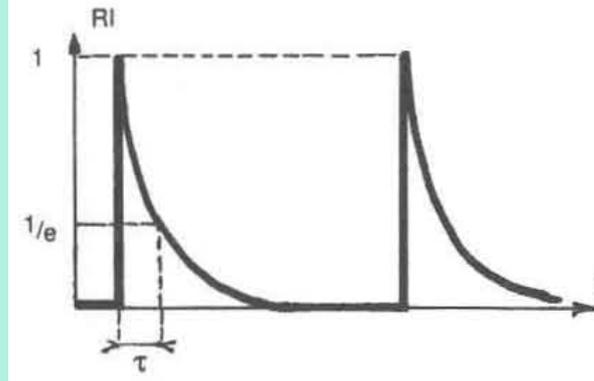
🔧 Quaranta tome 3 p435

⊖

Matériel :

- Photorésistance
- Stroboscope
- Alimentation 12 V
- Résistance
- Oscilloscope
- GBF

On effectue le montage de la figure 7. On mesure la tension aux bornes de la résistance pour avoir l'image du courant en sortie de la photorésistance. On l'éclaire avec un stroboscope avec des flashes de fréquence 100Hz (commandé avec un GBF en pulses de faible largeur). A l'oscillo, on voit une décroissance exponentielle du courant.



On estime le temps de recombinaison grâce à l'oscillo en mesurant le temps de décroissance exponentielle du courant. Pour du Silicium, on attend un temps de recombinaison de l'ordre de la milliseconde.

3.3 Cellule photovoltaïque (optionnel)

⚡ Sextant p85 On réalise l'étude donnée.

Conclusion

On a vu les caractéristiques des semi-conducteur, qui sont présent dans le quotidien (transistors = ordinateurs, téléphones...) mais aussi en recherche (détection, électronique...) et en physique atomique (accordabilité de la diode LASER). Ces caractéristiques : résistance (candidat pour la thermométrie) et nombre de porteurs de charge (effet hall, mesure de B) les rendent très utiles.