
MP18 : MATÉRIAUX SEMI-CONDUCTEURS

Niveau

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.

Bibliographie

—

pré-requis

En lien avec les rapports de jury : un matériau semi-conducteur a une énergie de gap inférieure à 4 eV. Ordres de grandeur :

Matériau	Energie de gap (eV)
Silicium	1.12
Germanium	0.66
Phosphure de gallium	2.26

A comparer à $k_B T \approx 0.025$ eV à température ambiante. Densité de porteur de charge :

Matériau	Densité (m^{-3})
Cuivre	9×10^{30} à vérifier
Germanium dopé	7×10^{20}

Ordre de grandeur de dopage : 1 bore pour 10^5 silicium.

On différencie les semi-conducteurs intrinsèques (sans dopage, caractérisé par l'énergie de gap) des extrinsèques (avec dopage, caractérisé par l'énergie de gap et une densité de porteur de charge).

Dopage P, dopage N, jonctions PN, PNP, NPN...

Expériences

- Evolution de la conductivité avec la température pour un SC intrinsèque, énergie de gap
- Temps de réponse d'un capteur à base de SC
- Mesure du nombre de porteur de charge d'un SC extrinsèque
- influence de la température sur un SC extrinsèque

Table des matières

1 Evolution de la résistance d'un semi-conducteur intrinsèque

2

Historique [modifier | modifier le code]

- 1833 : [Michael Faraday](#) remarque l'augmentation du pouvoir conducteur de certains métaux lorsque l'on augmente la température, contrairement aux métaux classiques dont la résistivité augmente avec la température.
- 1839 : [Edmond Becquerel](#) découvre l'[effet photovoltaïque](#). Il constate une différence de potentiel en éclairant le point de contact entre un conducteur et un électrolyte.
- 1879 : [Effet Hall](#). [Edwin Herbert Hall](#) découvre une [différence de potentiel](#) dans le [cuivre](#) dans la direction perpendiculaire au [courant](#) et au [champ magnétique](#).
- 1947 : [John Bardeen](#), [William Shockley](#) et [Walter Brattain](#) découvrent l'[effet transistor](#)^{1,2}.
- 1947 : [Herbert Mataré](#) et Heinrich Welker développent à Aulnay-sous-Bois, à la CFSW, le premier « transistor français » réellement opérationnel en même temps et indépendamment des travaux des chercheurs américains, entre 1945 et 1948.
- 1951 : [Herbert Mataré](#) fonde la première compagnie au monde à proposer sur le marché des diodes et des transistors : Intermetall à [Düsseldorf](#).
- 1954 : Fabrication des premiers [transistors](#) en [silicium](#) par Gordon Teal de Texas Instruments ³.
- 1958 : Réalisation du premier [circuit intégré](#) par [Jack Kilby](#) de Texas Instruments ⁴.
- 1961 : Théorie moderne des semi-conducteurs. [Kenneth Geddes Wilson](#) décrit les semi-conducteurs comme isolant à faible bande interdite.

FIGURE 1 – *Historique des SC, wikipédia*

2	Semi-conducteur extrinsèque	5
2.1	Mesure du nombre de porteur par effet Hall	5
2.2	Influence de la température	5
3	Application : photo-résistance	6

Introduction

Un semi conducteur est un isolant électrique ayant un gap faible ($\simeq 0.6eV$ pour le germanium et $\simeq 1.12eV$ pour le silicium). On peut comparer à $k_B T$ qui vaut, à température ambiante : $0.025eV$. Donc a priori on est loin de l'ordre de grandeur de gap.

Les semi-conducteurs ont de nombreuses applications :

- En électronique, avec les transistors, les diodes et les circuits intégrés.
- Détecteur optique avec l'effet photovoltaïque (on arrache un électron d'un SC avec une zone P et une zone N. L'électron part vers la P et le trou formé vers la N).

Aujourd'hui on va voir certaines de leurs propriétés.

1 Evolution de la résistance d'un semi-conducteur intrinsèque

Un semi conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé. Le matériaux est pur, son comportement électrique ne dépend que de sa structure intrinsèque. Pour avoir un vrai semi conducteur intrinsèque il faut qu'il n'y ait aucun défaut dans la maille cristalline ni aucune impureté. En pratique cela est difficile. Le silicium monocristallin pur est un bon candidat de semi conducteur intrinsèque. Pour obtenir des cristaux les plus purs possible on fait un tirage de monocristaux que l'on purifie ensuite pas fusion de zones. Dans un monocristal, la bande de valence est remplie à 0° K

Une thermistance CTN (Coefficient Thermique Négatif) c'est un capteur de température utilisé en électronique, dont la résistance varie avec la température. A température ambiante, en bonne approximation,

$$R(T) = R_0 e^{\frac{E_g}{2k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

En effet, a priori on a une dépendance en température du nombre de porteur de charge :

$$n_{intrinsque} = AT^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{k_b T}\right)$$

Donc la résistance va comme un sur les porteurs de charges dans le modèle de Drude, en remarquant que le terme en exponentielle domine largement dans l'échelle de température considéré, on a la relation en exponentielle énoncé plus haut. En effet pour $T \in [300, 400]^\circ K$, $-\frac{3}{2} \ln(T) \in [-8.98, -8.56]$ et $\frac{E_g}{2k_B T} \in [9.71, 12.95]$ avec $E_g \simeq 0.67eV$ et

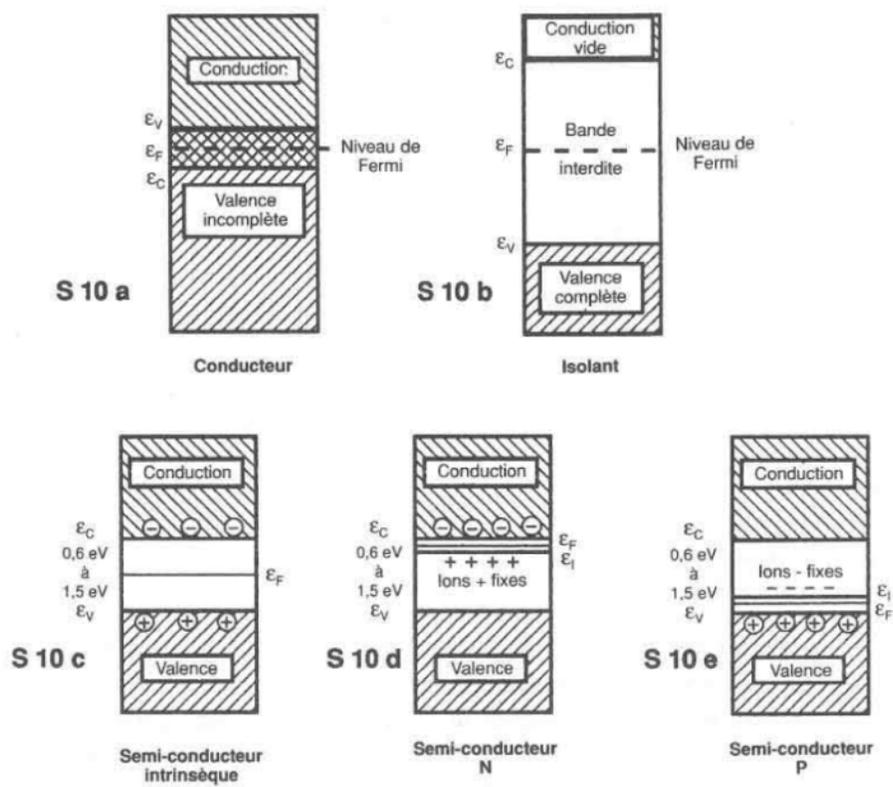


FIGURE 2 – Représentation schématique de la théorie des bandes

$k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K On a un écart relatif de $\epsilon = 0.012$ pour le premier terme et de $\epsilon = 0.28$ On a donc une variation relatives de l'influence de l'exponentielle 20 fois plus grande

On peut interpréter ce résultat : Pour un métal, on considère que la conduction est assuré par les électrons qui se comporte comme un gaz parfait. Plus la température augmente et plus les chocs avec les réseau (ou plus exactement les interactions avec les phonons) sont fréquents ce qui augmente la résistivité. Cependant pour les semiconducteurs, l'augmentation de la température permet au porteurs de passer plus facilement dans la bande de conduction et ainsi diminue la résistance du matériaux.

Evolution de la résistance d'un thermistance CTN Quaranta III page 427 et IV.
 On mesure la tension et le courant traversant la thermistance,
 On trace en $\ln(R) = f(\frac{1}{T})$ pour avoir une droite de pente $\frac{E_g}{2k_B}$

Comparer la valeur de E_g !! Avec la doc et avec les autres semi conducteurs.

Matériau	E_g ($T = 300$ K)	E_g ($T = 0$ K)	E_0 (extrapolation linéaire à $T = 0$)	Linéaire jusqu'à
Si	1,12 eV	1,17	1,2	200 K
Ge	0,67	0,75	0,78	150
PbS	0,37	0,29	0,25	
PbSe	0,26	0,17	0,14	20
PbTe	0,29	0,19	0,17	
InSb	0,16	0,23	0,25	100
GaSb	0,69	0,79	0,80	75
AlSb	1,5	1,6	1,7	80
InAs	0,35	0,43	0,44	80
InP	1,3		1,4	80
GaAs	1,4		1,5	
GaP	2,2		2,4	
Sn gris	0,1			
Se gris	1,8			
Te	0,35			
B	1,5			
C (diamant)	5,5			

FIGURE 3 – Tableau issu du Aschcroft p675

La résistance diminue avec la température : si elle augmente, les porteurs de charge ont plus d'énergie pour franchir le gap. C'est le comportement inverse des métaux.

On néglige la dilatation.

Matériel :

- P102.5 : bloc de cuivre avec résistance chauffante
- socle polystyrène
- on peut demander de la pâte thermique
- thermocouple K avec le boîtier
- ampèremetre
- RLC mètre
- alimentation continue. La résistance interne est de 2Ω et la puissance max admissible par le dispositif est 25 W.

On a donc vu que les semi-conducteurs intrinsèques ont une dépendance négative de leurs résistance avec leurs température. Cette propriété peut être utilisée pour en faire un capteur de température. Il est possible de doper des semi-conducteurs, c'est à dire rajouter des impuretés dans le cristal de sorte à modifier ses propriétés.

2 Semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur qui a été dopé. C'est à dire que l'on y a rajouté des impuretés. Un ordre de grandeurs des impuretés rajouté est que l'on rajoute un atome d'impureté pour 10^8 (ou 10^5 atomes du cristal. Cela a pour conséquence d'augmenter le nombre de porteurs de charges.

— Dopage N : les impuretés sont des atomes avec un nombre plus important d'électrons de valence que les atomes de réseau. Les porteurs de charges dominants sont les électrons. On peut citer l'exemple on peut doper le silicium (ayant 4 électrons de valence) avec du phosphore, de l'arsenic ou de l'antimoine qui ont 5 électrons de valences. Le cinquième électrons participe peu à la liaison covalente et peut alors facilement se détacher et laisser un ion positif fixe. On interprète les propriétés conductrices d'un semi conducteur dopé N en terme de théorie de bande : l'électron est situé dans une bande normalement interdite, très peu en dessous de la bande de conduction (différence d'énergie de l'ordre de 10^{-2} eV) ainsi la température peut facilement faire passer cette électrons dans la bande de conduction.

— Dopage P : c'est l'inverse... Dans le cas du silicium, on peut par exemple rajouter du bore qui est trivalent. Concrètement, pour doper un semi-conducteur, on utilise un procédé de diffusion : Par exemple pour le silicium, on le monte à 1100°C puis on insère les atomes d'impureté dans la chambre qui finissent pas diffuser au sein du matériau.

Ce sur quoi on peut appuyer c'est que le nombre d'impureté est très faible mais que les propriétés conductrices ont beaucoup changées.

Il y a alors plusieurs cas en fonction de la température : en notant $\Delta\epsilon$ le petit gap en énergie entre la bande de conduction et la nouvelle bande autorisée par le dopage et ϵ_g le gap, on :

- à très basse température, $k_bT \gg \Delta\epsilon$ (ce qui n'est pas observé pour nous parce qu'on est à trop haute température) le nombre de porteur de charge est proportionnel à $\exp(\Delta\epsilon/2k_B T)$
- Si la température dépasse 100°K tous les électrons de la bande des impuretés sont passés dans la bande de conduction. Le nombre de porteur de charge correspond environs au nombre d'impureté. On a alors :

$$\sigma = n_{\text{impureté}} e \mu_n \quad \text{avec} \quad \mu_n \propto (1/T)^{2,6} \quad \text{pour le silicium}$$

Donc la conductivité décroît en $(1/T)^{2,6}$

2.1 Mesure du nombre de porteur par effet Hall

Plaquette au germanium : on mesure la résistivité avec l'électroaimant étalonné (il faut l'étalonner au flux mètre pour qu'il n'y ait pas de problème d'étalonnage fait avec une mesure par effet hall), par effet Hall. En mesurant la constante de Hall, on obtient la densité de porteurs (et leur mobilité). (Voir production et mesure de champ magnétique)

2.2 Influence de la température

Pareil qu'avant en changeant la température. Attention à ne pas trop monter trop haut en température!! On fait chauffer et la mesure se fait ne descente pendant le refroidissement.

On observe deux régimes en fonction de la température :

- A basse température, on observe que la densité de porteur de charge est constante. Cela est dû au fait que ce qui domine la conduction sont les porteurs de charge supplémentaire apportés par dopage.

- a haute température nous avons une dépendance de la résistance comme :

$$R(T) = R_0 e^{\frac{-E_g}{2k_B T}}$$

Ceci correspond au même comportement qu'en première partie, c'est à dire pour un semi-conducteur intrinsèque ! comment peut-on expliquer cela ? En fait si la température est suffisamment élevée, l'excès de porteur de charge est déjà intégralement dans la bande de conduction, aussi une augmentation de la température ne change pas la conductivité de ce point de vue là, cependant l'énergie thermique permet à des porteurs de charge de la bande de valence de franchir le gap, tout comme un semi-conducteur intrinsèque.

Particularité du germanium : il est intrinsèque à haute température (nombre de porteurs de charge qui varie avec la température), et extrinsèque à basse température (nombre de porteurs de charge constant).

On peut faire le même ajustement qu'en partie 1 et comparer les valeurs de Gap. **Matériel :**

- Electroaimant
- plaquette germanium
- Amperemètre x2
- Potence, noix,
- teslamètre
- Alim spéciale plaquette Ge P64.37
- alim qui balance des ampères

3 Application : photo-résistance

Temps de recombinaison des paires électrons-trous en fonction du flux incident Manip dans le Fruchart p. 175. On mesure un temps de réponse qui vaut à peu près 30 ms, indépendamment du flux. On peut le mettre en évidence en utilisant des polariseurs.

- On envoie le laser dans la roue dentée, puis dans le polariseur, puis dans la photorésistance.
- La photorésistance est polarisée avec une alim -5V et une résistance $R = 10 \text{ k}\Omega$. On peut aussi utiliser un AO.
- On regarde à l'oscillo la tension aux bornes de la résistance. Attention, selon le branchement, le temps de descente peut être vers le bas... Le temps de montée est toujours le plus long.
- On mesure le temps de réponse à 90 % avec les curseurs. Selon le temps dont on dispose, on peut voir s'il varie avec le flux (normalement peu).

Le temps de descente de la photorésistance donne le temps caractéristique de recombinaison électron-trou dans le semi-conducteur.

Source d'incertitudes :

- Lecture à l'oscillo
- Temps mis pour que la lumière soit complètement occultée par une pale : en fonction de la largeur de la tâche et de la vitesse angulaire des pales. Il faut bien se placer le plus loin possible de la roue. Tâche de largeur $l = 2 \text{ mm}$, à une distance de 5cm du centre et une vitesse de rotation de $0.5 \text{ tr/s} = 3.141 \text{ rad/s}$ (on l'estime à partir du signal : en 2 périodes, on a fait un tour), on obtient : $v = 0.625 \text{ m/s}$ donc un temps mis pour recouvrir la tâche de $u(\tau) = \frac{2 \text{ mm}}{0.625 \text{ m/s}} = 3 \text{ ms}$.

Matériel :

- Photorésistance
- pieds d'optique
- laser
- support boy
- Polariseur, analyseur
- Alim continue qui peut envoyer -5V
- Dispositif hacheur optique : P15.41 avec la roue à 2 trous MC1F2, le moteur et l'alim.
- S'il faut changer la roue dentée, il faut une clé allen de taille 2
- oscilloscope

Attention ! Le laser peut être polarisé.

Conclusion

La physique des semi-conducteurs est riche, et offre énormément de possibilité. En conséquence, le marché mondial des semi-conducteurs représente de gros enjeux, et c'est un thème de recherche très contemporain (matériaux semi-conducteurs organiques, pour lesquels il est facile de choisir les propriétés que l'on veut, pas très écolo par contre).