

# MP18 - MATÉRIAUX SEMI-CONDUCTEURS

Guillaume Laurent & Solène Le Corre

## Niveau : L3

## Commentaires du jury

**2010 à 2013 :** 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.

**2008 :** Il est essentiel de savoir différencier les régimes de conduction intrinsèque et extrinsèque.

## Bibliographie

|                                                                                        |                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| ✎ <i>Dictionnaire de physique</i> , <b>Taillet</b>                                     | → Pour les définitions              |
| ✎ <i>Quaranta III</i>                                                                  | → Pour la plupart des manips        |
| ✎ <i>Quaranta IV</i>                                                                   | → Pour la CTN                       |
| ✎ <i>Dispositifs et circuits intégrés semiconducteurs</i> , <b>Vaupaille, Castagné</b> | → Pour des ordres de grandeur       |
| ✎ <i>Physique des semi-conducteurs</i> , <b>Ngô</b>                                    | → Pour la théorie                   |
| ✎ <i>Lasers</i> , <b>Cagnac, Faroux</b> , ou <i>Les lasers</i> , <b>Dangoisse</b>      | → Pour la diode laser               |
| ✎ ( <i>Cap Prepa MPSI</i> , <b>Pérez</b> )                                             | → Pour des détails sur l'effet Hall |

## Expériences

- ☛ Influence de la température sur la résistance d'un SC intrinsèque
- ☛ Mesure de conductivité d'un SC extrinsèque
- ☛ Mesure de la mobilité et de la densité de porteurs
- ☛ Influence de la température sur la densité de porteurs
- ☛ Mesure du temps de recombinaison des porteurs
- ☛ Diodes laser : effet de seuil, estimation de l'énergie de gap

## Table des matières

|          |                                                              |          |
|----------|--------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Etude d'un semi-conducteur intrinsèque : la CTN</b>       | <b>2</b> |
| <b>2</b> | <b>Semi-conducteur extrinsèque : le Germanium</b>            | <b>4</b> |
| 2.1      | Mesure de la conductivité . . . . .                          | 4        |
| 2.2      | Mesure de la mobilité et de la densité de porteurs . . . . . | 5        |
| 2.3      | Influence de la température . . . . .                        | 7        |
| <b>3</b> | <b>Quelques applications des SC</b>                          | <b>8</b> |
| 3.1      | La photorésistance . . . . .                                 | 8        |
| 3.2      | Les diodes laser . . . . .                                   | 9        |

## Introduction

✍ [Taillet], [Quaranta III] à semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la structure électronique à température nulle est constituée d'une bande de conduction vide et d'une bande de valence totalement occupée, ces deux bandes étant séparées par une bande interdite de largeur  $\epsilon_g$ . On le distingue des conducteurs et des isolants (voir figure 1). Pour les semi-conducteurs, l'énergie de gap est de l'ordre de l'énergie thermique. La bande de valence peut donc se peupler du fait de l'agitation thermique, contrairement à un isolant.

Lorsqu'un électron passe dans la bande de conduction, il laisse derrière lui un trou dans la bande de valence. Les porteurs de charge responsables du courant dans un semi-conducteur sont donc à la fois les électrons et les trous.

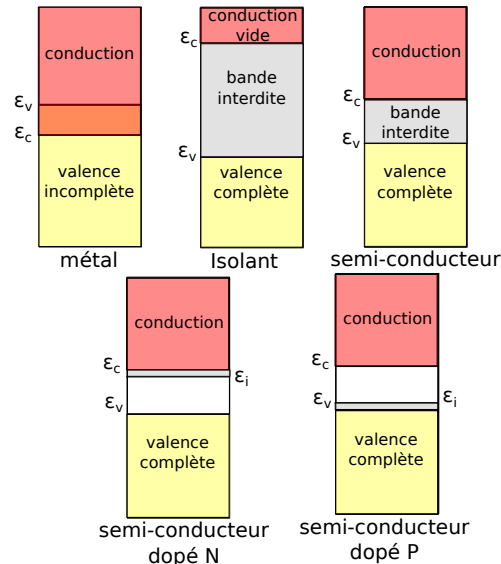


FIGURE 1 – Métaux, isolants et semi-conducteurs

Il existe deux types de semi-conducteurs :

- Les semi-conducteurs intrinsèques : ils sont constitués de corps simples à quatre électrons périphériques : 4ème colonne (Si, Ge) ou 6ème colonne (Sélénium, Tellure).
- Les semi-conducteurs extrinsèques, ou “dopés” : on introduit une très faible proportion d’atomes donneurs ou accepteurs d’électrons afin de faire varier le nombre de porteurs de charge.

On va donc étudier ces deux types de semi-conducteurs, comparer leurs propriétés aux métaux et voir dans quel cadre on les utilise.

## 1 Etude d'un semi-conducteur intrinsèque : la CTN

✍ [Quaranta IV] à thermistance, [Quaranta III] à semi-conducteurs

On sait que les métaux ont une résistance qui augmente en fonction de la température. Voyons comment réagit les semi-conducteurs intrinsèques en étudiant la CTN.

Une CTN (ou Thermistance à coefficient négatif) est réalisée avec des poudres semi-conductrices agglomérées.

Pour un semi-conducteur intrinsèque, on peut montrer que le nombre de porteurs, positifs (P) comme négatifs (N) sont de la forme : (voir le Ngô pour plus de détails)

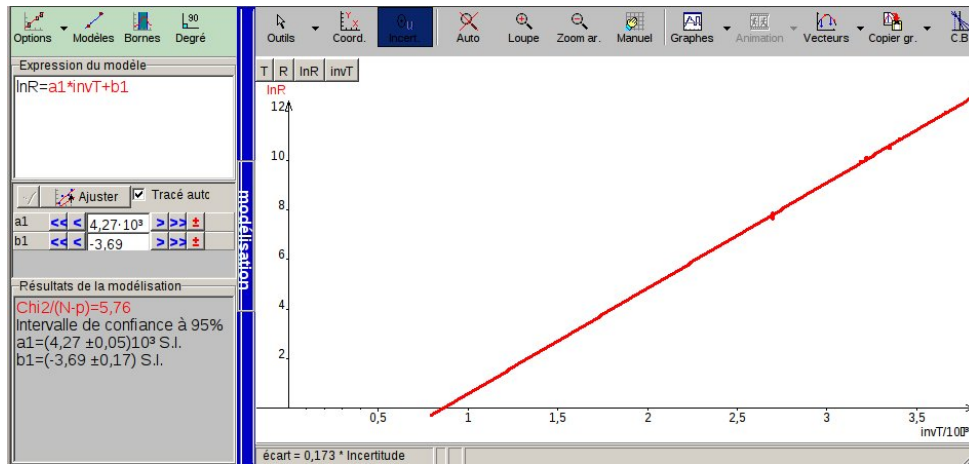
$$N = P = AT^{3/2}e^{-\epsilon_g/2kT} \quad (1)$$

avec A une constante dépendant du semi-conducteur.

On définit alors la conductivité  $\sigma$  :

$$\sigma = e(N\mu_N + P\mu_P) = e(\mu_N + \mu_P)AT^{3/2}e^{-\epsilon_g/2kT} \quad (2)$$

avec  $\mu_N, \mu_P$  la mobilité des électrons et des trous.

FIGURE 2 – Tracé de  $\ln(R) = f(1/T)$  pour la CTN

A température ambiante, c'est le terme en exponentielle qui domine et on a alors :

$$R(T) = R_0 \exp \left( \frac{\epsilon_g}{2k} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right] \right) \quad (3)$$

où  $R_0$  est la résistance mesurée à une température  $T_0$  de référence.

### Influence de la température sur la résistance

☞ Quaranta IV

⊖ 5mn de présentation, 30mn en préparation (thermalisation)

#### Matériel :

- CTN
- Agitateur magnétique chauffant
- Thermocouple
- Ohmmètre

On longe la CTN dans de l'eau à différentes températures (bain de glace pour l'étalonnage, eau à différentes températures chauffée par un agitateur magnétique chauffant, eau bouillante). On mesure la température via un thermocouple. On mesure la résistance  $R$  de la CTN à l'ohmmètre.

On trace  $\ln(R)=f(1/T)$  (cf figure 2).

La pente nous donne le coefficient  $\frac{\epsilon_g}{2k_B}$ . On en déduit la valeur de l'énergie de gap  $\epsilon_g$ .

Contrairement aux métaux, la résistance diminue quand  $T$  augmente !

On trouve une pente de  $4.27 \pm 0.05)10^3$ , soit  $\epsilon_g \sim 0.73 \pm 0.01\text{eV}$ , à comparer aux valeurs suivantes :

| Matériau            | $\epsilon_g$ (eV) |
|---------------------|-------------------|
| Germanium           | 0.76              |
| Silicium            | 1.12              |
| Arsénium de Gallium | 1.43              |
| Diamant             | 7                 |

#### Remarque

A température ambiante, on a  $\epsilon \sim kT \sim 0.025$ . Quand on compare à l'énergie de gap, on voit qu'un semi-conducteur est peu conducteur à température ambiante !

#### Applications des semi-conducteurs intrinsèques :

- Photodétecteurs, qui conduisent grâce à un apport énergétique dû à un rayonnement lumineux (et non plus thermique) ;
- Les thermomètres grâce à la variation de la résistance en fonction de la température.

Comment avoir des SC conducteurs à température ambiante ? C'est là qu'intervient le dopage. On va donc étudier les SC extrinsèques.

## 2 Semi-conducteur extrinsèque : le Germanium

☞ [Quaranta III] à semi-conducteurs.

**Semi-conducteur dopé N :** on augmente la densité d'électrons en introduisant en petite quantité (densité  $n_i$ ) des atomes à 5 électrons (phosphore, arsenic, antimoine). Ces atomes sont appelés atomes donneurs. Les électrons ajoutés ont une énergie  $\epsilon_i$  très proche de la bande de conduction :  $\Delta\epsilon = \epsilon_c - \epsilon_i \sim 10^{-2}eV$ . Il faut donc très peu d'énergie pour les faire passer dans la bande de conduction : à température ambiante, le matériau peut être conducteur.

**Semi-conducteur dopé P :** on augmente la densité de trous en introduisant en petite quantité des atomes à 3 électrons (aluminium, gallium, indium), appelés atomes accepteurs. Ces atomes captent un électron pour assurer la liaison covalente avec les atomes voisins. L'atome qui a donné son électron, sous l'action d'un champ électrique, peut en prendre un à l'un de ses proches voisins pour redevenir neutre. La charge positive se déplace donc de proche en proche sur le réseau. Le réseau conduit donc et les porteurs sont donc positifs : ce sont les trous.

En terme d'énergie, on a de nouveau  $\Delta\epsilon = \epsilon_c - \epsilon_i \sim 10^{-2}eV$ . Les électrons peuvent facilement passer sur la couche supérieure, augmentant de ce fait le nombre de trous sur la bande de valence.

(cf figure 1).

Comme ce sont les semi-conducteurs les plus utilisés, on va en faire une étude plus poussée.

### 2.1 Mesure de la conductivité

#### Mesure de conductivité

☞ Quaranta III p 432/433

⊙ 10mn en préparation, 5mn en présentation

##### Matériel :

- Plaquette pour effet Hall (pas la noire!!)
- Deux multimètres
- Alimentation continue

ATTENTION : Ne pas utiliser la plaquette noire toute faite, on ne sait pas bien comment il gère le courant... Donc vivement déconseillée par les anciens agrégatifs.

On alimente la plaquette, on mesure le courant avec un ampèremètre et la tension aux bornes du semi-conducteur avec un voltmètre. On relève U et I et on remonte à R.

On peut mesurer R pour plusieurs valeurs de (U,I) pour avoir une meilleure précision.

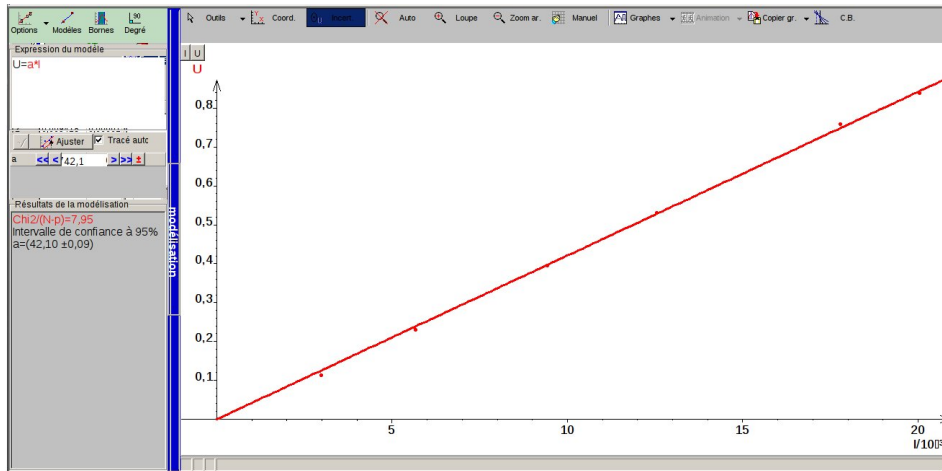
On remonte alors à la conductivité via  $\sigma = \frac{1}{R} \frac{L}{S}$  et à la résistivité ( $Res = \frac{1}{\sigma}$ ).

On obtient  $R = 42.10 \pm 0.09\Omega$ , soit  $Res = (2.11 \pm 0.01)\Omega.cm$  (on considère l'incertitude sur les dimensions du SC négligeables devant celles sur R), à comparer avec la valeur théorique (donnée dans les docs de la plaquette) :  $Res_{th} \in [2, 2.5]\Omega.cm$ .

**Ordres de grandeur : [Dispositifs et circuits intégrés semiconducteurs p1]**

| Matériau | Résistivité ( $\Omega cm$ ) |
|----------|-----------------------------|
| Métaux   | $10^{-6}$                   |
| SC dopés | $10^{-3}$ à $10^3$          |
| Isolants | $10^8$                      |

On voit le grand intérêt des semi-conducteurs : on peut énormément adapter leur résistivité en fonction du dopage.

FIGURE 3 – Tracé de  $U = f(I)$  pour le SC au germanium dopé n

Essayons de caractériser ce dopage : à température ambiante, le nombre de porteurs  $n_{\text{porteurs}} \sim n_i$  avec  $n_i$  le nombre d'impuretés introduites dans le milieu. Voyons si on peut la mesurer !

## 2.2 Mesure de la mobilité et de la densité de porteurs

☞ [Quaranta III]

Pour mesurer la densité de porteurs de charge dans le SC, on va utiliser l'effet Hall. En plaçant un semi conducteur alimenté par un courant  $I$  dans un champ magnétique  $B$ , on observe une accumulation de charges sur les bords. En régime permanent, ces porteurs sont soumis à deux forces :

$$\vec{F}_B = -e\vec{v} \wedge \vec{B} \quad \vec{F}_E = e\frac{V_H}{a}\vec{e}_y$$

D'où, comme  $I = j.ab = -nev.ab$ , on déduit, en norme :

$$F_B = \frac{IB}{nab} \quad F_E = e\frac{V_H}{a}$$

A l'équilibre, ces deux forces sont égales. On en déduit que :

$$V_H = R_H \frac{IB}{b}$$

avec  $R_H = \frac{1}{ne}$

### Mesure de la mobilité et de la densité de porteurs

☞ Quaranta III p 432/433

⊙ 30mn en préparation, 10mn en présentation

#### Matériel :

- Plaquette SC
- Electroaimant
- Teslamètre
- Deux alims
- Ampèremètre.

On alimente un électroaimant muni des pièces plates. On alimente la plaquette par un courant  $I_0$  fixe, mesuré par un ampèremètre, et on la place dans l'entrefer (bien faire attention au sens!!) Comme le champ est bien uniforme dans l'entrefer, on ne va pas étalonner l'électroaimant à l'avance mais mesurer directement lorsqu'il y a la plaquette.

On mesure  $B$  avec le Teslamètre (des deux côtés),  $I_0$  passant dans le SC et  $V_H$  la tension de Hall.

On trace  $V_H = f(B)$ . La pente nous donne  $R_H$ , et par extension  $n$  la densité des porteurs et  $\mu$  la mobilité.

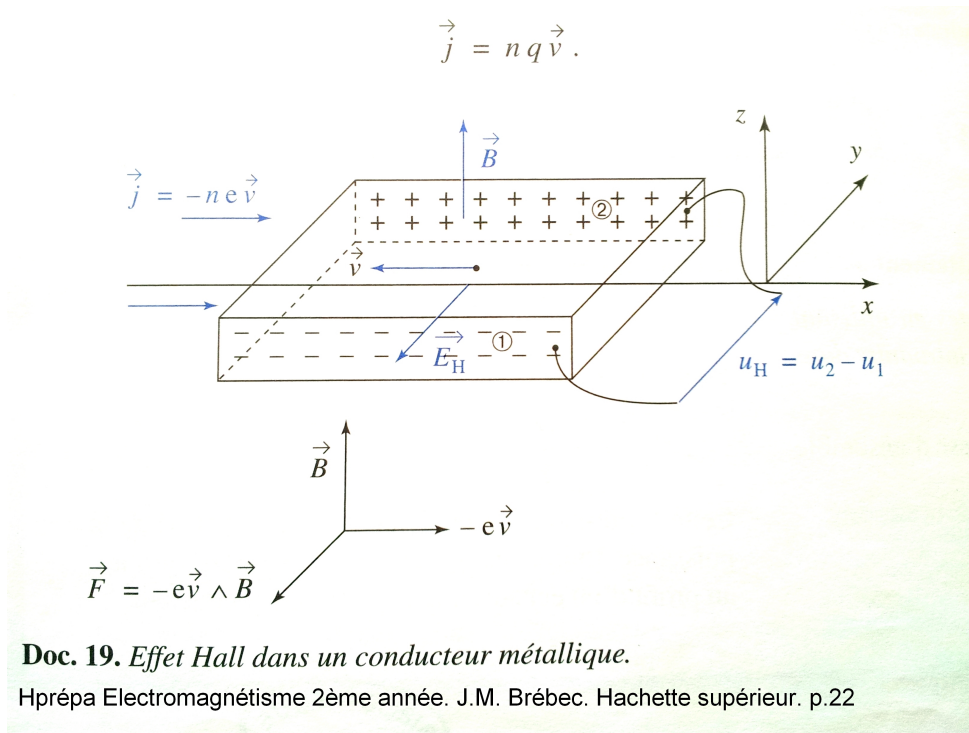
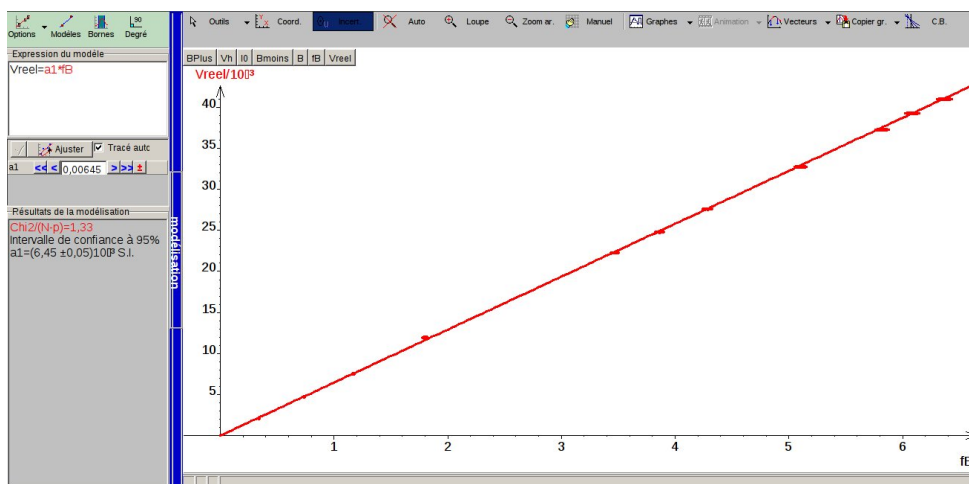


FIGURE 4 – Effet Hall (image dans la banque de donnée)

Pour les incertitudes, pour  $I_0$ , on prend les incertitudes de l'ampèremètre. Pour le champ  $B$ , l'incertitude de la sonde est extrêmement faible, ce qui influe est donc la légère variation lorsqu'on bouge la sonde à l'intérieur de l'entrefer. Pour la hauteur  $b$  de la plaquette, il n'y a pas d'incertitudes sur les données constructeur, j'ai donc supposé une incertitude au centième de millimètre (ça ne paraît pas trop aberrant pour une fabrication industrielle...).

FIGURE 5 – Courbe  $V_H = f(\frac{IB}{b})$ 

On trouve  $R_H = (6.45 \pm 0.05) \cdot 10^{-3} \text{ V.m}^3 \cdot \text{J}^{-1}$ , soit  $n = (9.69 \pm 0.08) \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , pour une valeur théorique de  $10^{21}$  et  $\mu = \frac{\sigma}{ne} = \frac{R_H}{R_{es}} = (3.06 \pm 0.03) \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{Vs}$  à comparer aux valeurs théoriques (Handbook) de  $3.8 \text{ m}^2/\text{Vs}$  pour le Germanium. On a un bon ordre de grandeur (le Handbook ne précise pas le dopage...).

L'avantage des semiconducteurs est donc la possibilité de changer la densité de porteurs de charge.

On utilise souvent des semi-conducteurs pour la mesure de champs magnétiques par la méthode de l'effet Hall : en connaissant  $V_H$  et  $I_0$ , on en déduit  $B$ . Cependant, la relation liant  $B$ ,  $V_H$  et  $I_0$  dépend de  $n$  qui peut varier en fonction de la température ! Voyons dans quelle mesure cela peut être gênant...

## 2.3 Influence de la température

On rappelle que les porteurs, pour un semi-conducteur intrinsèque, ont une densité de la forme :  $n = p = AT^{3/2}e^{-\epsilon_g/2kT} \sim e^{-\epsilon_g/2kT}$ .

### Influence de la température

⚡ Pas de référence

⌚ 40 mn en préparation, 10 mn en présentation

#### Matériel :

- Plaquette SC
- Deux multimètres
- Trois alims
- Electroaimant
- Teslamètre

On place la plaquette dans l'entrefer de l'électroaimant dont le champ  $B$ , mesuré par le teslamètre, est fixé. On alimente le SC avec un courant  $I_0$  et on mesure la tension de Hall  $V_H$ .

On alimente le chauffage intégré dans la plaquette et on mesure le couple  $(I_0, V_H)$  pour différentes températures. (Le réglage est particulièrement chiant et il est difficile d'avoir une température stable. La tension délivrée par l'alim de fixe pas une température, elle permet juste de choisir si on chauffe ou si on ne chauffe pas...).

On peut remonter à la densité de porteurs de charge via  $n = \frac{IB}{ebV_H}$ . On trace la courbe  $\ln(n) = f(1/T)$  et on interprète.

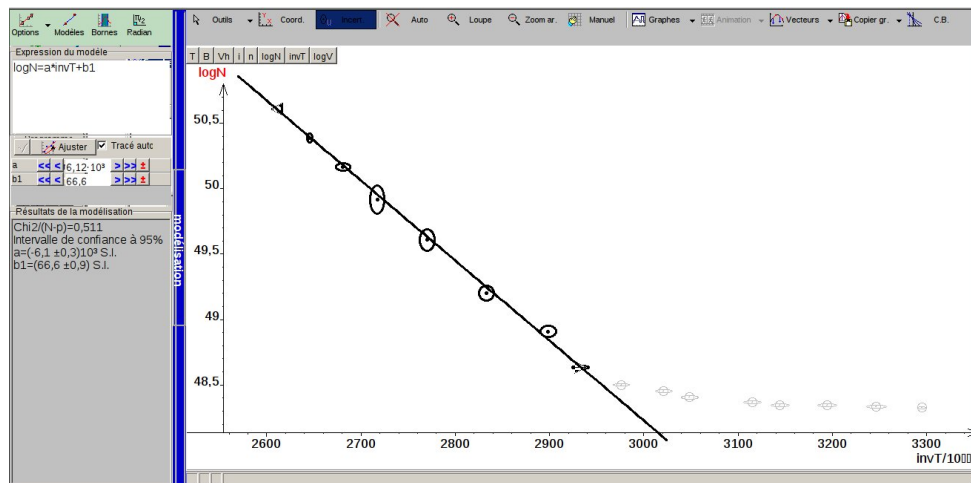


FIGURE 6 – Courbe  $\ln(n) = f(\frac{1}{T})$

On peut voir sur la courbe deux domaines : une partie, à basse température, où la densité de porteurs est constante : c'est le régime extrinsèque. Tous les porteurs de charge apportés par les impuretés sont sur la bande de conduction, et la température n'est pas encore suffisante pour que les atomes constituant principalement le SC passent dans la bande de conduction.

Lorsque la température est suffisamment élevée, l'agitation thermique permet aux électrons de la bande de valence de passer dans la bande de conduction : on retrouve le comportement intrinsèque comme dans la première partie.

Ce second domaine nous permet de remonter à l'énergie de gap. On trouve une pente de  $(-6.1 \pm 0.3) \cdot 10^3 K^{-1} = -\frac{\epsilon_g}{2k_B}$ , d'où  $\epsilon_g = 1.05 \pm 0.05 eV$ , pour une valeur théorique du germanium  $\epsilon_g = 0.664$ . On n'est pas franchement dans les clous par rapport au Handbook, d'autant plus que l'énergie de gap est censée diminuer quand on augmente en température... Donc je ne sais pas bien à quoi est due l'erreur...

↓ Les semi-conducteurs, dopés ou non, sont très utilisés. On va voir quelques exemples d'application.

### 3 Quelques applications des SC

#### 3.1 La photorésistance

⚡ [Quaranta IV] à photorésistance

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.

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

⚡ Quaranta III p 435

⊖ 10 mn en préparation, 5mn en présentation

##### Matériel :

- Photorésistance
- Stroboscope
- Alimentation continue
- 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.

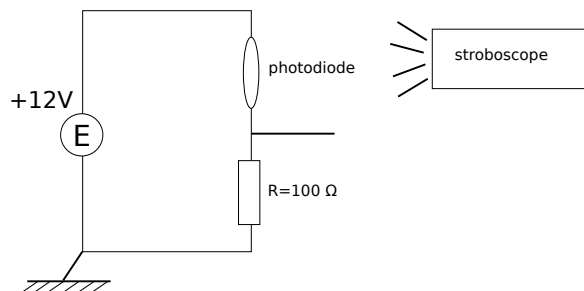


FIGURE 7 – Montage de la photodiode

⚡ [Dispositifs et circuits intégrés semiconducteurs p40]

On obtient un temps  $\tau \sim 1$  ms. Pour du Silicium, on a un temps de recombinaison de l'ordre de  $10^{-3}$  s. On a donc un bon ordre de grandeur !

##### Utilité des photorésistances

Les photorésistances sont utilisées lorsqu'on doit détecter des variations de flux (elles ne sont pas assez précises pour mesurer la valeur d'un flux). On les utilise notamment pour déclencher l'allumage des éclairages publics (merci Wikipédia...)

## 3.2 Les diodes laser

🔗 [Cagnac] p268

On peut utiliser deux semi-conducteurs dopés respectivement n et p et les accoler : on appelle cela une jonction pn. Si on applique une tension positive du côté P par rapport au côté N, on voit l'apparition d'un courant de N vers P on dit que la jonction (ou la diode) est passante. A l'inverse, si on applique une tension négative, le courant disparaît : la jonction est bloquée.

Il y a de nombreux types de diodes : diodes de redressement, diodes électroluminescentes (LED) qui émettent de la lumière lorsque les électrons se recombinent avec les trous...

Depuis les années 70, on est capable de provoquer de l'émission stimulée au sein de telles jonctions : c'est l'apparition des diodes lasers (qui marchent sur le même principe que les lasers, avec inversement de population et cavité optique).



### Diode laser : effet de seuil, estimation de l'énergie de gap

🔗 Inspiré du Duffait d'élec

⌚ temps 5mn

#### Matériel :

- Diode laser de puissance modulable (P5.16)
- Alimentation continue
- Spectrophotomètre (type Ocean Optics)

On alimente la diode laser en augmentant progressivement la tension. Observer le seuil d'émission du laser (apparition du speckle).

Mesurer la longueur d'onde du laser avec un spectro. On sait que la longueur d'onde du laser correspond à l'énergie du photon émis lors de la recombinaison des électrons :  $h\nu = \epsilon_g$ , d'où  $\lambda = \frac{hc}{\epsilon_g}$ . On peut donc remonter à l'énergie de gap.

On trouve une énergie de gap de  $\epsilon_g = \dots \pm \dots$

## Conclusion

On a vu ce qu'étaient les SC, quelles étaient leurs propriétés (évolution de R en fonction de T, nombre de porteurs de charge, caractère intrinsèque, extrinsèque...).

Les SC sont très utilisés, tant en électronique (composants) qu'en laboratoire (diodes laser...).