

# MP 18 Semi-Conducteurs

## Introduction [2]

En 1833, M. Faraday remarqua que certains matériaux deviennent plus conducteur lors de l'augmentation de température contrairement aux métaux classique. Ces matériaux, les semi-conducteurs, sont des matériaux présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux et les isolants. En effet la bande de conduction des électrons de ses matériaux est séparée de la bande de valence par une bande d'énergie interdite, ainsi les semi-conducteur intrinsèques conduisent moins bien le courant qu'un métal. Cependant la taille de la bande interdite est de l'ordre de 1 eV alors que celle des isolant est plutôt de 6 eV. Les semi-conducteurs sont primordiaux en électronique, car ils offrent la possibilité de contrôler, par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser que la direction que peut prendre ce courant.

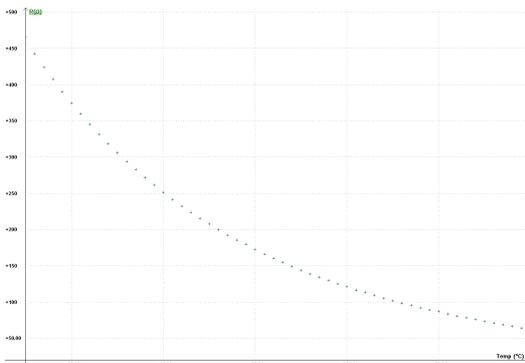
## I. Caractérisation des semi-conducteurs

### A. Influence de la température sur un semi conducteur intrinsèque [1]

L'agitation thermique dans un semi-conducteur intrinsèque permet à des électrons de la bande de valence d'atteindre celle de conduction et donc s'assurer la conduction électrique dans le cristal. Il y a alors une lacune d'électron au niveau d'une liaison covalente. Cette lacune positive peut être comblée par la venue d'un autre électron provenant d'une autre liaison covalente, la lacune s'est donc déplacée comme le ferai une charge +e. On appelle cette vacance d'électron un trou correspondant à une charge +e. Soit  $n$  et  $p$  la densité volumique d'électron et de trou dans le semi-conducteur intrinsèque, elles vérifient la relation  $n p = n^2 = p^2 = A T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}}$ . La conductivité du matériaux  $\sigma = (n \mu_n + p \mu_p) e$  augmente donc avec la température. Expérimentalement on cherche à vérifier la relation de la résistance avec la température sur une CTN comme :

$$R = R_0 e^{\frac{E_g}{2k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$
 où  $E_g$  est la largeur du gap à  $T_0$ .

On plonge la thermistance dans un bain d'eau chaude convenablement agité dont on suit la température à proximité du composant avec un thermomètre numérique. On réalise la mesure de la résistance du composant grâce à un ohmmètre (Celui ci fait circuler un courant d'environ 1 mA sur le calibre 20 k $\Omega$ ). Il est important que le courant circulant dans le matériau ne soit pas trop important afin de limiter la puissance dissipée par effet Joule et donc la modification de la température à proximité du composant. On trace  $\ln \frac{R}{R_0} = \frac{E_g}{2k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$  et la pente du graphique nous renseigne sur le gap du semi conducteur à 0 K.



$$E_g = 0,665 \pm 0,003 \text{ eV}$$

Pour le Silicium  $E_g = 1,12 \text{ eV}$  et pour le germanium  $E_g = 0,66 \text{ eV}$  à 300 K. La valeur du gap est à comparer à  $kT = 0,06 \text{ eV}$  à 300 K. On notera la forte dépendance de la résistance avec la température aux températures usuelles en comparaison avec une résistance de Platine (de l'ordre de  $-5 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$  contre  $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ). Les semi-conducteurs pourront donc être utilisés comme thermomètre après étalonnage.

Les incertitudes proviennent essentiellement des erreurs de mesure sur la température, le thermomètre numérique utilisé étant caractérisé par une incertitude de l'ordre de  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . L'incertitude sur la mesure de la résistance est faible puisque l'ohmmètre a une précision de l'ordre de  $0,2 \%$  et les câbles ayant une résistance de l'ordre de  $0,06 \Omega$ . Une autre source d'incertitude est la différence de température entre la température de la thermistance et celle du milieu extérieur, le constructeur nous donnant une estimation de la résistance thermique du composant, il est possible d'estimer cette différence de température. Supposons que la puissance dissipée par effet Joule serve totalement à l'élévation de température de la thermistance :

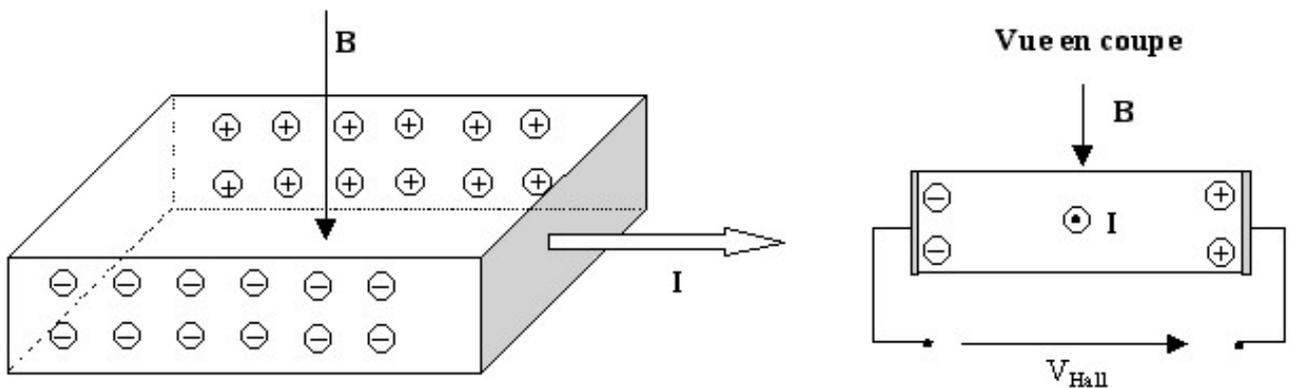
$$R(T_{\text{capteur}}) i^2 = \frac{T_{\text{capteur}} - T_{\text{ext}}}{R_{\text{thermique}}} \quad \text{d'où} \quad T_{\text{capteur}} - T_{\text{ext}} \simeq R_{\text{thermique}} R(T_{\text{capteur}}) i^2 \simeq 0,01 \text{ K}$$

Cette différence entre la température du capteur et celle du milieu engendre une incertitude négligeable devant les précédentes.

## B. Dopage des semi conducteurs. Densité de porteurs [3]

L'introduction d'éléments appartenant à la troisième ou cinquième colonne de la classification périodique dans un semi conducteur constitué à partir d'un élément tétravalent modifie radicalement sa conductivité. Lors de l'ajout d'atomes pentavalents, un des électrons de valence est peu lié et quelques centièmes d'électronvolt vont lui permettre de se déplacer dans le cristal. L'impureté introduite, bien qu'électriquement neutre, est donneuse d'électron, on dit que le semi conducteur est dopé N. A l'inverse l'introduction d'impureté trivalentes vont accroître le nombre de trou, on parle de semi-conducteurs P. Dans les semi-conducteurs dopés, même pour une faible concentration en impureté, le nombre de porteurs est déterminé par la concentration en impureté. La conduction est dite extrinsèque.

Il est possible de mesurer la densité et la mobilité des porteurs dans un échantillon de semi-conducteur à l'aide de l'effet Hall. En effet les porteurs d'un matériau soumis à un courant surfacique et à un champ magnétique extérieur vont être déviés vers les parois latérales créant ainsi une différence de potentiel appelée tension de Hall.



$$\text{L'expression de cette tension est : } V_{\text{Hall}} = \frac{IB}{nqh}$$

où  $I$  est le courant traversant le barreau,  $h$  son épaisseur,  $n$  sa densité de porteur et  $q$  leurs charges. On remarque que le signe de la tension de Hall nous renseigne sur le signe des porteurs majoritaire en fonction de l'orientation du champ magnétique.

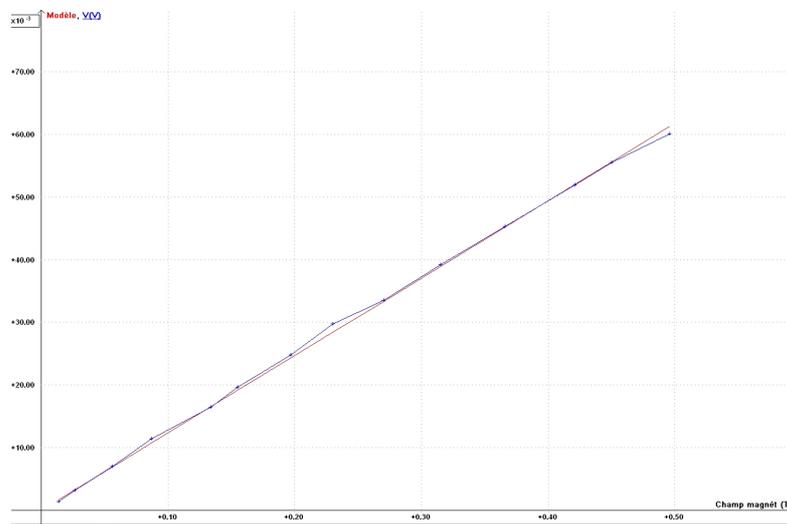
En pratique, on place le barreau d'un semi-conducteur de germanium dopé N dans l'entrefer d'un

électroaimant contrôlé en intensité. On fait circuler un courant d'intensité  $I$  constante dans le semi-conducteur et on fait varier le champ magnétique uniforme appliqué sur le barreau par l'intermédiaire du courant  $i$  appliqué aux électroaimants. Notons que l'on a branché les deux électroaimants en série et qu'on a diminué l'espace dans l'entrefer afin d'obtenir un champ magnétique important.

On commence par étalonner le champ magnétique dans l'entrefer en fonction de l'intensité envoyée dans les électroaimants à l'aide d'un teslamètre et de la règle du flux maximal. On fait ensuite varier l'intensité dans les bobines de l'électroaimant de 0 à 9 A et on mesure la tension de Hall correspondante à chaque valeur du champ magnétique. Notons que l'intensité envoyée dans le semi-conducteur ne peut excéder 50 mA, on utilise donc un générateur contrôlé en courant pour l'alimenter. Les valeurs de la tension de Hall sont déjà faibles au vu des limites du voltmètre, il serait donc illusoire de mesurer cette tension sur un conducteur métallique où la densité de porteurs est bien plus importante.

Étant donné qu'il est difficile de régler la perpendicularité du barreau semi-conducteur et du champ magnétique, on effectue deux mesures de la tension de Hall en inversant à chaque fois le sens du champ magnétique. Ainsi on se débarrasse de l'erreur systématique engendrée par la non perpendicularité du champ magnétique. La tension de Hall mesurée sera la moyenne de ces deux tensions.

Le tracé de la tension de Hall en fonction du champ magnétique nous permet en connaissant  $I$  et  $h$  d'accéder à la densité de porteurs.



On trouve :

$$n = 8,6 \pm 0,1 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

Il est possible de comparer cette valeur avec celle d'un conducteur métallique comme le cuivre à 20 °C pour lequel  $n = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$  et un semi-conducteur intrinsèque pour lequel  $n \approx 10^{18} \text{ m}^{-3}$ . Un raisonnement sur le sens de la force magnétique  $\vec{f}_m = q \vec{v} \wedge \vec{B}$  nous renseigne sur le signe des porteurs majoritaires dans le semi-conducteur. Dans cette expérience ce sont les électrons puisque le semi-conducteur est dopé N.

L'incertitude sur cette mesure repose en grande partie sur les caractéristiques du teslamètre qui délivrent des valeurs avec une incertitude de 5%, grande devant l'incertitude que l'on peut espérer sur l'intensité et la tension mesurée par les multimètres ou sur l'épaisseur du barreau.

La connaissance des caractéristiques d'un semi-conducteur dopé nous permet de réaliser des sondes à effet Hall pour mesurer des champs magnétiques, c'est d'ailleurs comme cela que fonctionne le teslamètre utilisé !

La mesure de la conductivité du semi-conducteur nous permet alors de remonter à la mobilité des porteurs de charges. En effet il existe la relation  $\sigma = nq\mu$  entre la conductivité  $\sigma$  et la mobilité des porteurs  $\mu$  et la conductivité est reliée à la résistance du matériau par  $\frac{1}{R} = \sigma \frac{S}{l}$ . La mesure à l'ohmètre

de la résistance du conducteur nous permet de remonter à la conductivité et donc à la mobilité des électrons. On détermine :

$$\mu = 5,33 \pm \quad \text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

L'incertitude sur cette mesure repose sur la non uniformité du courant volumique dans le semi-conducteur au voisinage du contact avec les fils. La faible résistance des soudures en étain aura cependant tendance à minimiser ce phénomène.

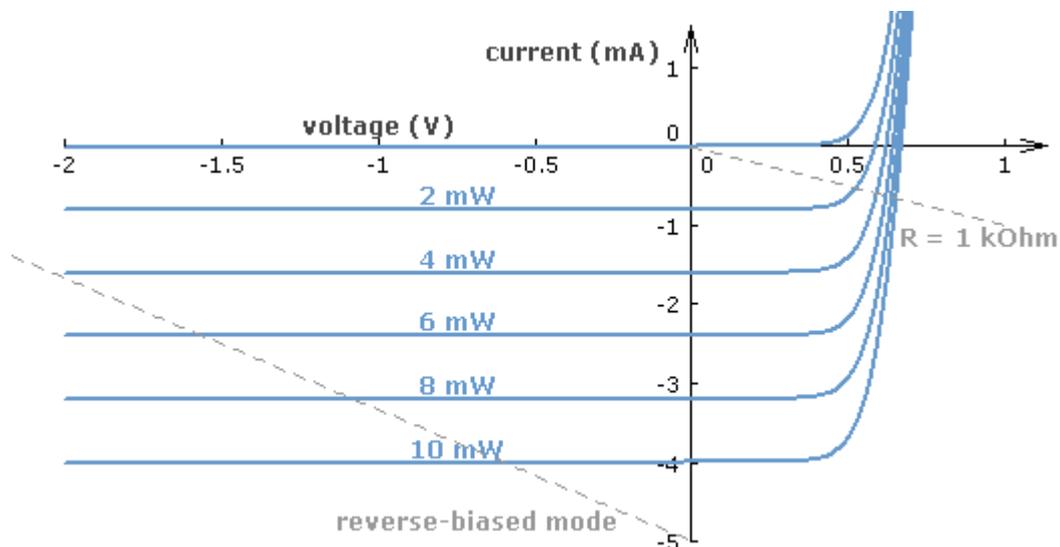
Ainsi les propriétés macroscopiques remarquables des semi-conducteurs s'expliquent par leurs caractéristiques microscopiques particulières.

## II. Application. La jonction PN

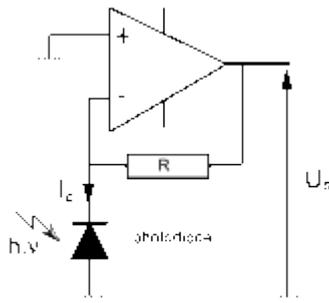
On réalise une jonction PN en accolant deux semi-conducteurs, l'un dopé N et l'autre P. Le système est alors déséquilibré et l'excès de trous de la zone P diffusent vers la zone N et inversement. Les zones P et N étant initialement neutres, la zone P perd ses trous et se charge négativement et la zone N positivement. Autour de la jonction on trouve une zone dépourvue de porteurs majoritaires, la zone de déplétion. La nouvelle distribution de charge entraîne un champ interne dans la zone de déplétion qui finit par stopper la diffusion des porteurs. Si l'on applique une différence de potentiel à la jonction, l'effet va dépendre de l'orientation du champ appliqué par rapport à celui interne à la zone de déplétion. En appliquant un champ de même direction que celui interne, on renforce la zone de déplétion qui agit comme un isolant pour les porteurs majoritaires. À l'inverse en appliquant un champ dans la direction inverse à celui interne, il existe un seuil à partir duquel les trous et les électrons peuvent franchir la zone de déplétion, la jonction devient passante.

### A. Linéarité de la photodiode avec l'éclairement [4]

Une photodiode est constituée d'une jonction PN, sa caractéristique courant-tension est la suivante.



On observe sur ce graphique que le courant inverse de la jonction PN dépend du flux lumineux qu'elle reçoit. En effet un photon d'énergie suffisante peut créer dans la zone de déplétion une paire électron-trou, c'est l'effet photoélectrique. Cette paire électron-trou sera soumise au champ électrique de la zone de déplétion et les deux porteurs vont s'éloigner en direction opposée créant un faible courant inverse. La création de paire électron-trou étant proportionnelle au flux lumineux, on s'attend à ce que le courant inverse fasse de même. On vérifie la linéarité du courant inverse de la photodiode en fonction du flux lumineux avec le montage suivant :



Ce montage permet de mesurer le courant inverse sur une droite de charge verticale, en effet la résistance vu par la photodiode est égale à la résistance de contre réaction divisée par le gain en boucle ouverte de l'amplificateur opérationnel, elle est donc très faible. On choisit la valeur de  $r$  de manière à ce que la tension mesurée  $U_s = rI_c$  reste facilement détectable, nous avons choisi  $r = 10\text{k}\Omega$ .

On fait ensuite varier le flux en éloignant une source d'éclairage constant de la photodiode. Nous savons que le flux détecté par la photodiode varie en un sur la distance à la source au carré, on reporte donc la dépendance de  $1/\sqrt{I} = f(r)$  et on vérifie la linéarité du phénomène. Cette linéarité est limitée par l'existence d'un courant inverse d'obscurité et par la modification des caractéristiques de la diode aux forts éclairagements.

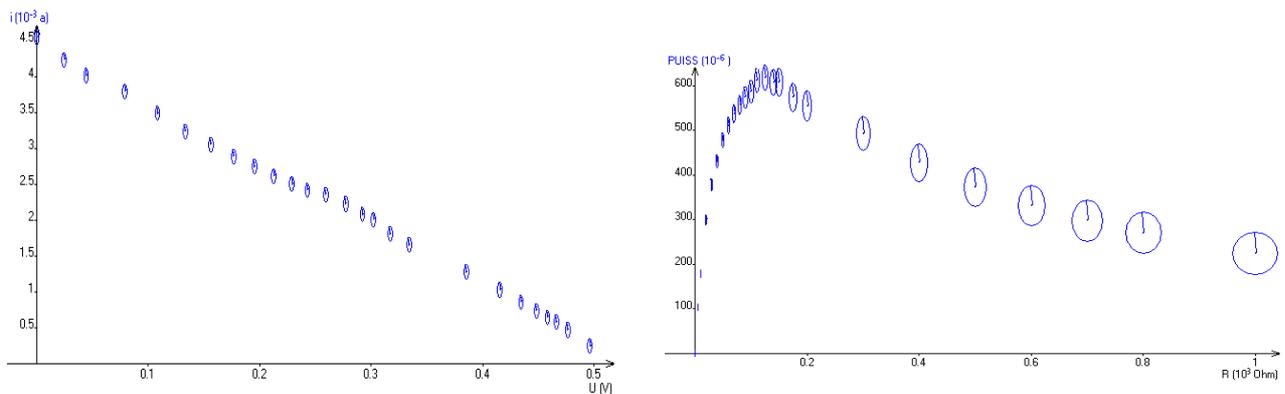
La linéarité du courant inverse d'une jonction PN polarisée en inverse va permettre de construire des spectrophotomètres de manière relativement simple. En effet, il suffit que l'on place en amont un objet dispersant comme un réseau et que l'on détecte l'intensité perçue par la photodiode dans chaque bande spectrale pour établir le spectre d'une source.

## B. Optimisation du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [4]

Le courbe caractéristique de la jonction PN montre qu'elle peut fonctionner en régime générateur, c'est sur ce principe qu'est basé l'utilisation de l'énergie solaire par les cellules photovoltaïques. Ces cellules sont optimisées pour fournir la puissance maximale pour un éclairage énergétique dont la distribution spectrale est celle du rayonnement solaire.

L'énergie d'un photon est absorbé par un électron pour passer de la bande de valence à celle de conduction. Le champ électrique régnant dans la jonction met en mouvement ces électrons d'énergie potentielle  $E_g$ . Il apparaît aux bornes du dispositif une tension en circuit ouvert de l'ordre de  $E_g/q$ . Le courant de court circuit est égal au flux de photons absorbés multiplié par  $q$ , au rendement quantique près. Afin d'optimiser la puissance il faut choisir un compromis sur la valeur du gap, en effet une forte valeur du gap assure une tension élevée tandis que si elle est faible elle favorise un fort courant et l'absorption d'un plus grand nombre de photons. En pratique on choisit le silicium de largeur de bande interdite égale à 1,1 V.

On trace la caractéristique de la cellule photovoltaïque en mesurant le courant et la tension qu'elle débite dans une résistance  $R$  variable pour un éclairage constant.



On comprend en étudiant la caractéristique qu'il existe une résistance adaptée pour laquelle le rendement fournie par la cellule photovoltaïque est maximale. Traçons la puissance fournie à la résistance  $R$  en fonction de sa valeur :

On constate que pour une résistance de l'ordre de  $R = 120 \pm 5 \Omega$  la puissance dissipée par la résistance de charge est maximale, le rendement de la cellule l'est donc aussi.

## Conclusion

Il faut retenir de l'étude des semi-conducteurs leur propriété intrinsèque dépend de manière connue de la température, ils sont donc de bons candidats comme instrument thermométrique. Les impuretés que l'on peut ajouter par dopage aux semi-conducteurs permet de contrôler le nombre de porteurs de ces matériaux, cette connaissance précise permettra de construire des teslamètres. Finalement on retiendra que les jonctions entre différents semi-conducteurs dopés permettent de mettre en évidence l'effet photovoltaïque et de l'utiliser pour la construction de photodétecteurs ou l'utilisation de l'énergie solaire.

## Références

[1] Duffait, « Expériences d'électroniques », Edition Bréal.

[2] Quaranta, Donnini, « Introduction à l'électronique », Edition Masson.

[3] Quaranta, « Dictionnaire de physique expérimentale »,

[4] Sextant, « Optique expérimentale », Edition Hermann.

## Correction

- Le teslamètre est une sonde à effet hall, il existe d'autres moyens de mesurer le champ magnétique dans l'entrefer, par exemple en mesurant la force exercée sur un aimant ou un liquide dont les propriétés magnétiques sont connues.
- Il n'est pas nécessaire de montrer l'étalonnage du champ magnétique avec le teslamètre, ce n'est pas l'objet du montage. D'autant plus que il ne faut absolument pas repositionner la plaquette de germanium dans l'entrefer si l'on veut obtenir des mesures reproductibles.
- Insister sur les différents ordres de grandeurs de densité de porteurs entre conducteur, semi-conducteurs extrinsèque et semi-conducteurs intrinsèque.
- Il est possible de chiffrer l'incertitude liée à la non uniformité du champ magnétique de l'entrefer en repositionnant la plaquette au germanium et en évaluant le changement sur la tension de Hall.
- La zone de déplétion de la jonction PN est un bon détecteur de particule.
- Il aurait été judicieux de polariser la photodiode en inverse plutôt que se placer à tension nulle afin d'être dans une zone où la linéarité est mieux vérifiée.
- Dans l'expérience de la cellule photovoltaïque il faut bien faire attention que le point origine du flux lumineux est la foyer image de la lentille qui fait converger les rayons lumineux. On peut aussi évaluer la linéarité de l'intensité inverse en faisant varier le flux lumineux à l'aide d'un polariseur et analyseur qui vérifient la loi de Malus.
- Les semi-conducteurs sont la base de l'électronique de commutation, on peut réaliser une expérience introductive à l'aide d'un transistor.