

MP18 : Semi-Conducteurs

Bibliographie

- [1] Dictionnaire de Physique expérimentale – Tome III – Electronique – D.Aubert
- [2] Dictionnaire de Physique expérimentale – Tome IV – Electronique – Donnini
- [3] Optique expérimentale – Sextant

1	Introduction	1
2	Caractéristiques physiques d'un semi conducteur	2
2.1	Mesure de l'énergie de gap d'un semi conducteur intrinsèque – thermistance [1] p543 2	
2.2	Mesure de la densité de porteurs – semi conducteurs intrinsèque et dopage [2] ...	3
3	Application des semi-conducteurs : la cellule photovoltaïque	5
3.1	Caractéristique [3] p.85	7
3.2	Optimisation du fonctionnement de la cellule [3] p.85	7
3.3	Calcul du rendement.....	7
4	Conclusion :.....	8

1 Introduction

Les semi-conducteurs sont des matériaux présentant une conductivité intermédiaire entre les isolants et les métaux.

Ceux-ci présentent une bande de valence (remplie à 0K) et une bande de conduction (vide à 0K) séparée par une bande interdite de largeur donnée correspondant à l'énergie de gap. Si cette énergie de gap n'est pas trop importante (1eV) on pourra avoir peuplement de la bande de conduction par voie thermique (ou à l'aide d'un rayonnement lumineux) qui expliquera la conductivité.

Les propriétés spécifiques des jonctions entre différents semi-conducteurs ont permis le développement de composants électroniques incontournables tels que la diode ou le transistor. Ces matériaux sont donc au cœur de l'ensemble des applications électroniques que l'on utilise au quotidien.

Dans le cadre de ce montage nous allons nous attacher à présenter quelques caractéristiques physiques des semi-conducteurs, en l'occurrence l'énergie de gap d'un semi-conducteur intrinsèque et la densité de porteur d'un semi-conducteur extrinsèque, puis nous nous attarderons sur la mise en œuvre de ceux-ci à travers l'étude d'une cellule photovoltaïque.

2 Caractéristiques physiques d'un semi conducteur

2.1 Mesure de l'énergie de gap d'un semi conducteur intrinsèque – thermistance [1] p543

Un semi conducteur intrinsèque est un solide dont le caractère semi-conducteur ne dépend que de la structure cristalline (et non d'un éventuel dopage).

L'agitation thermique dans le semi-conducteur permet aux électrons de passer de la bande de valence à la bande de conduction et ainsi d'assurer la conduction (déplacement d'électrons dans la bande de conduction et de trous dans la bande de valence).

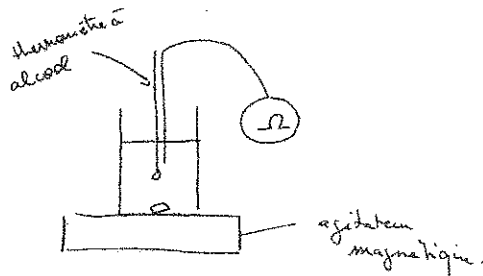
La densité d'électrons et de trou dans un semi-conducteur intrinsèque est fonction de la température et est donnée par :

$$n = p = AT^{3/2}e^{-E_g/2kT} \text{ avec } E_g \text{ l'énergie de gap à } 0K$$

La conductivité du matériau étant de la forme $\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)e$. On se doute dès lors que la résistance du matériau va diminuer lorsque la température augmente.

Aux températures usuelles (0-100°C) la dépendance en puissance 3/2 est faible par rapport à la dépendance exponentielle. On peut donc envisager une loi de variation de la résistance sous la forme :

$$R = R_0 e^{\frac{E_g}{2k}(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \text{ avec } R_0 \text{ la résistance à } T_0$$



Cette propriété est mise en œuvre dans le cadre de capteurs de température avec les thermistances. On se propose donc ici de remonter à l'énergie de gap du semi conducteur mis en œuvre dans ce capteur.

Pour ce faire nous allons mesurer la résistance à l'aide d'un ohmmètre à différentes températures.

Mesure de T°C : Thermomètre à alcool précision : 0.5K

Mesure de résistance : Ohmmètre Flucke précision : 0.05%+-2

Compte tenu du temps de réponse de la thermistance nous travaillerons en refroidissement.

Nous avons chauffé jusqu'à 80°C puis relevé température et résistance jusqu'à 20°C. De là on trace : $\ln(R) = f\left(\frac{1}{T}\right)$

On réalise une régression linéaire nous donnant :

$$\ln(R) = a \times \frac{1}{T} + b$$

$$\frac{E_g}{2k} = 3150K \Rightarrow E_g = 0,55eV$$

Commentaire des correcteurs :

- Il conviendrait de travailler avec un meilleur contrôle de la température (chauffe ballon, température stabilisée)
- Il faut discuter la dépendance en $T^{3/2}$ ainsi que les incertitudes.

ODG : Germanium $E_g=0.66eV$

Silicium $E_g=1.12eV$

La conduction à température ambiante est assurée par l'agitation thermique. Il convient donc de comparer E_g à kT : à 300K : $kT=1/40 eV = 0.025eV \Rightarrow$ peu conducteur à température ambiante.

Afin d'améliorer ces propriétés, on « dope » les électrons par l'ajout dans le réseau cristallin d'atomes présentant une lacune ou un excédent d'électrons par rapport à la matrice.

2.2 Mesure de la densité de porteurs – semi conducteurs intrinsèque et dopage [2]

On distingue donc deux principaux types de dopages suivant le type d'atomes insérés dans le réseau cristallin.

La conséquence du dopage est l'apparition d'un niveau d'énergie intermédiaire dans la bande de valence (proche de BC pour le dopage N, proche de BV pour le dopage P). Le gap entre ces niveaux intermédiaires étant très faible (0.01eV), ils sont respectivement dépeuplés en électrons au profit de la bande de conduction, et peuplés en électrons au dépens de la bande de valence.

Aux températures usuelles, on aura donc une conduction liée :

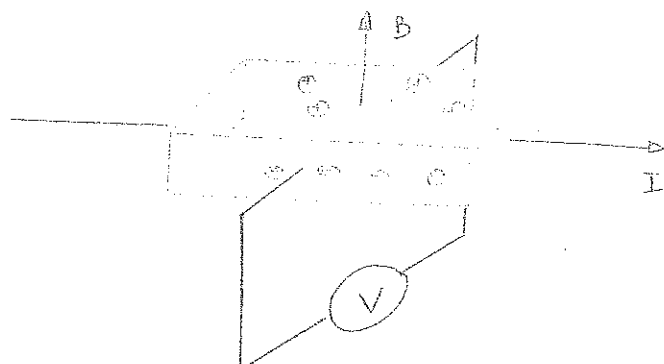
- Uniquement aux trous pour les SC dopés P,
- Uniquement aux électrons pour les SC dopés N.

Des concentrations très faibles (taux d'impureté 10^{-5} à 10^{-8}) modifient considérablement le comportement du semi-conducteur.

Nous allons pouvoir mesurer cette densité ainsi que la mobilité des porteurs dans un échantillon de Germanium dopé grâce à l'effet Hall.

Les porteurs sont mis en mouvement (courant I) et soumis à un champ B orthogonal au courant. Les porteurs sont donc déviés ($F = q\vec{v} \wedge \vec{B}$) vers les parois latérales.

L'accumulation de charge sur les parois crée dès lors une différence de potentiel entre elle.



L'équilibre des porteurs dans la direction transverse en régime permanent nous permet d'écrire :

$$\left. \begin{aligned} F_E &= \frac{qV_h}{l} \\ F_B &= \frac{IB}{nlh} \end{aligned} \right\} F_E = F_B \Rightarrow V_h = \frac{IB}{nqh}$$

Dispositif :

- plaquette Germanium dopé n (Dimension $L \times l \times h = 20 \times 10 \times 1$ mm). Cette plaquette est parcourue par un courant $I = \dots$ mA.

Nota1: Cette plaquette dispose d'un potentiomètre permettant de faire le zéro de la tension hall en l'absence de champ. Si la plaquette ne permet pas ce type de réglage, il convient de faire deux mesures en inversant le sens du courant dans la plaquette et le sens du champ B. La moyenne des deux mesures permet de s'affranchir de la tension de décalage.

Nota2: Prendre bien garde à ne pas dépasser 30mA dans la plaquette.

Nota3: Electroaimant : utiliser les entrefers cylindriques afin de disposer d'un champ le plus uniforme possible (distance d'entrefers utilisé : 1,8cm).

Intercaler une résistance en série entre l'alimentation (rhéostat qqes Ohms) permet de stabiliser le champ si besoin

On commence par déterminer la courbe d'étalonnage $B=f(I)$. Teslamètre : précision 5%

Puis on place l'échantillon dans l'entrefers de l'électroaimant ne prenant soin de bien le centrer et de le positionner le plus perpendiculairement possible.

Nota : tant pour les mesures de champ que pour les mesures de tension hall, il convient de réaliser toutes les mesures en augmentant le champ.

On trace alors :

$$V_{hall} = f(B) \text{ dont la pente est } a = \frac{I}{nqh} = 0.109 \text{ mV/T}$$

Incertitudes :

$$V_{\text{hall}} = 0.05\% \pm 2$$

$$I_{\text{germanium}} = 0.05\% \pm 2$$

$$B = 5\%$$

on en déduit :

$$n = \frac{I}{aqh} \approx 10^{24} m^{-3}$$

$$\text{OdG : SC intrinsèque : } n \approx 10^{18} m^{-3}$$

$$\text{Métal : } n \approx 10^{28} m^{-3}$$

Remarque : la sonde du teslamètre est composée de SC et mesure elle aussi une tension Hall. Avoir en tête la possibilité de travailler au fluxmètre (même si ce n'est pas jouable compte tenu du temps imparti)

On peut aussi remonter à la mobilité des porteurs dans le SC en mesurant la conductivité du SC. En effet la conductivité d'un SC extrinsèque étant assurée par les seuls porteurs majoritaires on a :

$$\sigma = n \times q \times \mu = \frac{1}{R} \times \frac{L}{l \times h} \Rightarrow \mu = \frac{1}{R} \times \frac{L}{l \times h} \times \frac{1}{n \times q}$$

On mesure :

$$R = \pm \Omega$$

$$\mu = \pm cm^2 V^{-1} s^{-1}$$

$$\text{Odg : Germanium : } \mu = 3900 cm^2 V^{-1} s^{-1}$$

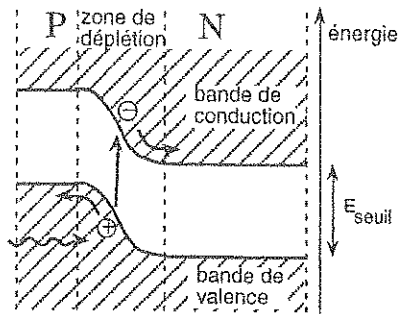
Commentaire : on peut aussi remonter au type de porteurs : pour ce faire deux possibilités :

- on détermine la direction du champ dans l'entrefer et le signe du courant dans la plaquette. Le signe de la tension Hall nous permet de remonter au signe des porteurs,
- On chauffe la plaquette (elle dispose d'un système de chauffage). Si la plaquette est dopée n, le nombre de porteur impliqués dans le phénomène Hall augmente, la tension Hall augmente en valeur absolue avec T. Dans le cas d'une plaquette dopée P, on va observer une diminution en valeur absolue de la tension Hall, voire même une inversion de celle-ci (ceci est possible du fait des différences de mobilités entre les porteurs N et P).

3 Application des semi-conducteurs : la cellule photovoltaïque

Les propriétés particulières des semi-conducteurs sont en général mises en œuvre dans des jonctions PN, c'est à dire des matériaux dans lesquelles sont accolés des semi conducteurs dopés P et N. Nous allons nous intéresser à un des nombreux composant mettant en œuvre une jonction PN : la cellule photovoltaïque.

Le principe de la jonction PN est le suivant :



Le système au niveau de la jonction est déséquilibré et on observe un mouvement de diffusion :

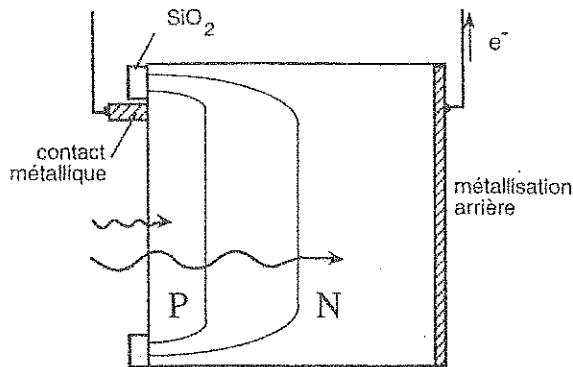
- des trous de P vers N
- des électrons de N vers P.

Cette diffusion a pour conséquence l'apparition d'un champ E_e qui s'oppose à la diffusion et permet d'atteindre un équilibre. A l'interface entre P et N apparaît une zone de déplétion dépourvue de porteurs majoritaires.

Si on applique un champ supplémentaire à la jonction, deux effets sont envisageables :

- champ dans le même sens que E_e (jonction polarisée en inverse) : la jonction agit comme un isolant,
- champ dans le sens opposé à E_e (jonction polarisée en direct) : il existe un seuil au delà duquel les électrons/trous peuvent franchir la jonction : la jonction est dite passante.

La cellule photovoltaïque est composée d'un ensemble de photodiodes qui fonctionnent en générateur.



L'énergie des photons incidents est absorbée et permet le passage d'un électron vers la bande de conduction. On crée donc une paire électron/trou qui, du fait du champ régnant dans la zone de déplétion, sera collectée. Il apparaît un ddp aux bornes de la cellule $E_g/(2q) \Rightarrow$ plus l'énergie de gap sera grande, plus la DDP sera grande.

Par ailleurs, plus E_g est faible, plus il sera facile de faire passer des électrons dans la bande de conduction $\Rightarrow$ plus l'énergie de gap sera faible, plus le courant sera grand.

Il y a donc un compromis à trouver sur E_g pour assurer une puissance maximum.

Souvent Si ($E_g=1,1\text{eV}$)

3.1 Caractéristique [3] p.85

Pour un éclairement donné on trace I en fonction de U en faisant varier la charge.

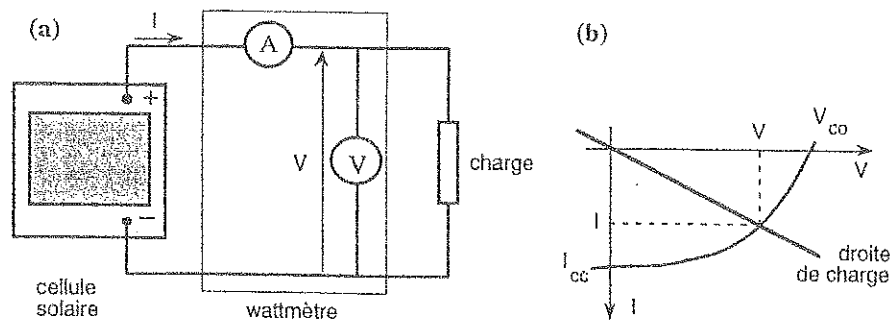


Figure II.14 : (a) Montage électrique pour l'étude d'une cellule solaire.
(b) Caractéristique $I(V)$ à éclairement donné.

3.2 Optimisation du fonctionnement de la cellule [3] p.85

On voit que la caractéristique précédente n'est absolument pas linéaire. On se propose de mesurer la charge pour laquelle la puissance obtenue est maximale.

A partir des mesures précédentes on trace $P=f(R)$

Afin d'optimiser le rendement on cherchera à travailler proche de la charge optimale. Pour ce faire on réalise des montages en série (pour augmenter la valeur de la charge optimale) ou parallèle (pour diminuer la charge optimale)

3.3 Calcul du rendement

On se place à la valeur de charge optimale afin de déterminer le rendement maximal de la cellule photovoltaïque.

La puissance délivrée est alors :

$U =$

$I =$ d'où $P_{\max} =$

Au luxmètre on relève un éclairement incident : $E_{inc} =$ klux soit une puissance incidente :

$$P_{incidente} = 1,46 \cdot 10^{-3} E_{inc} S =$$

Soit un rendement

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{incidente}} \cdot 100 =$$

4 Conclusion :

Nous avons donc pu dans le cadre de ce montage déterminer expérimentalement deux grandeurs caractérisant le comportement des semi-conducteurs et leur conférant leurs propriétés. Leurs mises en œuvre seuls (capteur thermométrique, teslamètre) ou sous forme de jonction dans toute l'électronique moderne font des semi-conducteurs matériaux incontournables.