

# MATERIAUX SEMI - CONDUCTEURS

## Références :

Bernard Gréhan : Physique des SC (très simple , très bien) 537 C10678  
Colinge: Physique des dispositifs SC (idem) 537 C14243  
Vapaille et Castagné : Dispositifs et circuits intégrés semi-conducteurs.  
(bien) 621.3 C9815  
Tessier-Brunet : physique des SC (bien mais ardu) 537 C10830  
Mathieu Henry : Physique des S.C.(complet mais ardu) 537 C14751  
Quaranta III p. 427-436

## I RAPPELS

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité, intermédiaire entre celles des isolants et des conducteurs, varie sur plusieurs ordres de grandeur sous l'effet de :

- la température
- l'éclairement
- la présence d'impuretés (dopage)

L'étude de la résistance en fonction de la température et de l'absorption optique permet d'accéder à la grandeur physique essentielle de ces matériaux, la largeur de bande interdite (en anglais «Gap»). L'effet Hall permet de mettre en évidence les deux types de porteurs et de mesurer leur densité.

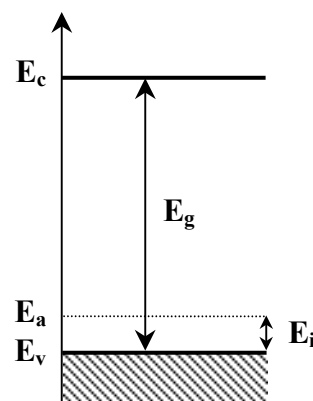
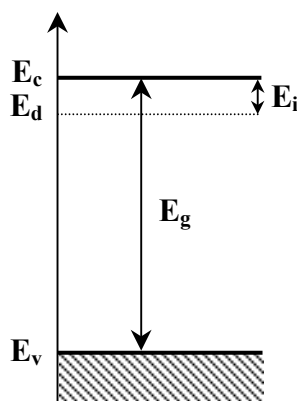
### Rappel sur les ordres de grandeur :

- gap  $E_g$  des semi-conducteurs usuels (Kittel, chapitre cristaux semi-conducteurs, tableau 1) :

Ge 0,7 eV Si 1,1 eV GaAs 1,4 eV GaP 2,3 eV

- à la température ambiante,  $kT = 25$  meV

- énergie d'ionisation des impuretés (donneurs et accepteurs) : de l'ordre de 10 meV



A température nulle, la bande de conduction est vide d'électrons, la bande de valence est pleine, et les impuretés dopantes sont dans leur état de charge neutre. Le matériau est isolant.

Aux basses températures, les donneurs libèrent leur électron dans la bande de

conduction et les accepteurs capturent un électron provenant de la bande de valence (on dit qu'ils libèrent un trou dans la bande de valence). Lorsque toutes les impuretés sont ionisées, la densité de porteurs libres devient constante. Les porteurs majoritaires sont les électrons de conduction si les donneurs sont prépondérants (matériau de type n), et les trous de la bande de valence dans le cas contraire (matériau de type p). C'est dans ce domaine de température que l'on souhaite utiliser le semi-conducteur.

**A plus haute température**, les paires électron-trou créées directement par excitation thermique d'un électron de la bande de valence dans la bande de conduction deviennent prépondérantes. **Le semi-conducteur est alors dit intrinsèque** (par opposition à la situation précédente, dite extrinsèque, où les propriétés sont gouvernées par les impuretés).

Le niveau de Fermi "intrinsèque"  $E_F$  (c'est-à-dire celui du cristal parfait) se situe vers le milieu de la bande interdite. **Les densités intrinsèques** des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence sont dans ces conditions données par la statistique de Boltzmann :

$$n_i = N_C e^{-(E_C - E_F) / kT} \quad \text{avec } N_C = 2 \left( \frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

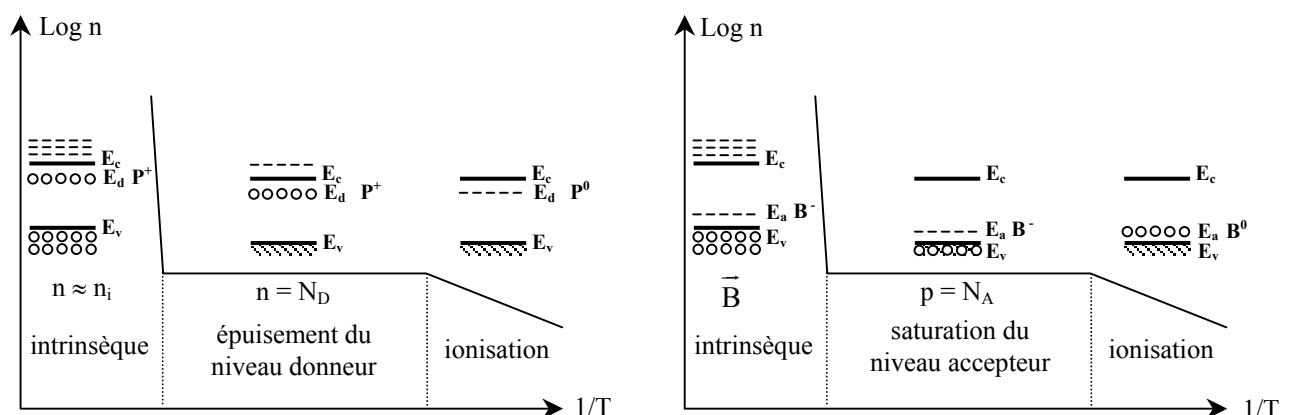
$$p_i = N_V e^{+(E_V - E_F) / kT} \quad \text{avec } N_V = 2 \left( \frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

Les masses  $m^*$  sont des masses effectives ; elles rendent compte du fait que les porteurs de charges ne sont pas dans le vide mais dans un cristal. Elles tiennent compte de l'action de la structure cristalline sur la particule (cf. Tessier p. 46 Colinge p.27).

Du fait de la neutralité électrique du semi-conducteur, les densités intrinsèques  $n_i$  et  $p_i$  sont égales et on a :

$$n_i = p_i = (n_i p_i)^{1/2} = (N_C N_V)^{1/2} e^{-(E_C - E_V) / 2kT} = (N_C N_V)^{1/2} e^{-E_g / 2kT}$$

Si on représente , compte tenu des remarques précédentes , l'évolution du logarithme des densités en porteurs de charge en fonction de l'inverse de la température , on obtient les courbes suivantes :



La partie intrinsèque du comportement du semi-conducteur est une droite alors que  $n$  dépend de la température à travers de  $(N_C N_V)^{1/2}$  et du terme exponentiel  $\rightarrow$  c'est donc l'exponentielle qui fixe dans les faits la loi de variation **dans cette partie**.

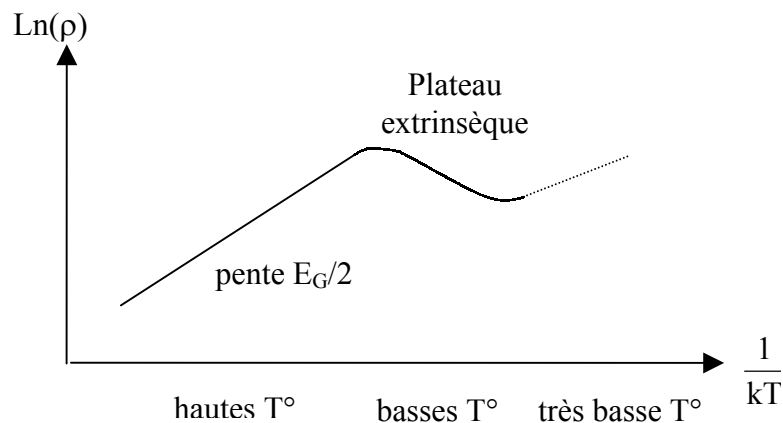
La conductivité du matériau se déduit de la concentration en porteurs de charges par la relation suivante :

$$\sigma = n(T) \cdot q \cdot \mu(T)$$

$$(\Omega.m)^{-1} = m^{-3} \cdot C.ms^{-1}/Vm^{-1}$$

Ou  $\mu$  représente la mobilité des porteurs de charge sous l'effet du champ électrique appliqué (cf. Tessier p. 202). On peut vérifier l'homogénéité de l'équation aux dimensions ( $R = Ut/q$ ).

Dans la partie intrinsèque de la variation en température de la conductivité, le terme dominant est encore le terme exponentiel, les autres facteurs ayant une variation plus lente en température. Le comportement attendu pour la résistivité  $\rho = 1/\sigma$  est donc essentiellement le suivant :



## II EXPERIENCES D'INTRODUCTION

On propose de mettre en évidence par deux manipulations simples les différences entre un métal et un semi-conducteur.

### 2.1 Variation de $\rho$ avec T

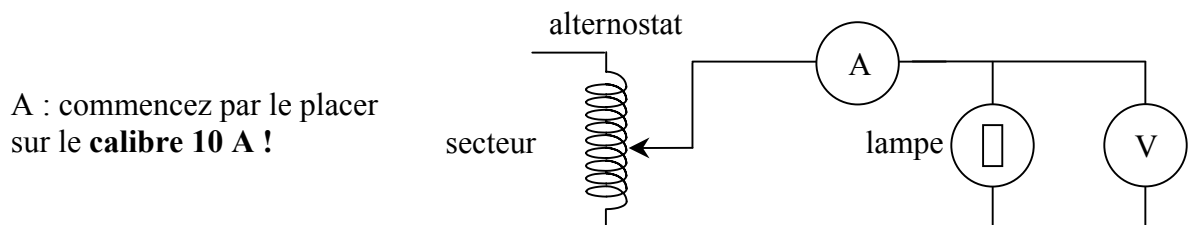
On utilise deux lampes, l'une à filament de tungstène (métal) et l'autre à filament de carbone (SC).

Première mesure :

Mesurez à l'ohmmètre la résistance des deux lampes à  $T_{\text{ambiante}}$ .

Deuxième mesure :

Réalisez le montage suivant :



A : commencez par le placer sur le **calibre 10 A** !

Pour chaque lampe, ajustez la puissance délivrée par l'alternostat pour avoir un éclairage conséquent mais non excessif. Mesurez U et I ; en déduire la résistance pour les deux lampes. Comparez l'évolution. Expliquez.

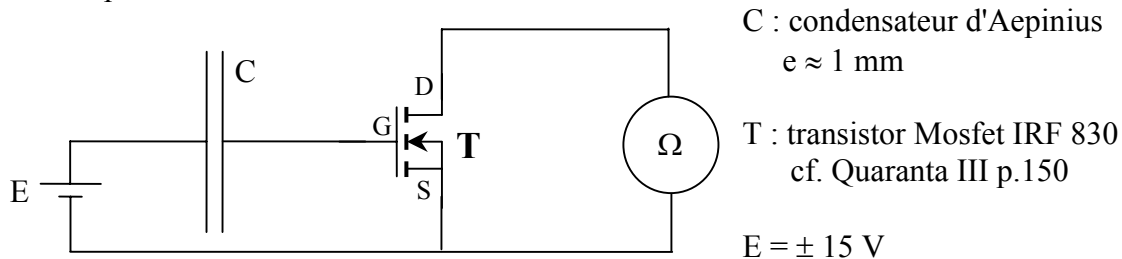
Remarque :

Si on ne dispose pas d'une lampe à filament de carbone, on peut utiliser des résistances sous forme de composants discrets. Les résistances bleues sont à couche métallique et les résistances marron sont au carbone. On peut alors les chauffer au sèche-cheveux ou avec un fer à souder.

## **2.2 Possibilité d'existence d'un champ interne**

Le champ électrique interne est nul dans un métal. Dans un semi-conducteur, il peut être différent de zéro.

Manipulation :



Mesurez la résistance du canal Drain - Source lorsque  $E = +15 \text{ V}$  et lorsque  $E = -15 \text{ V}$

Explication :

Lorsque  $E = +15 \text{ V}$  la grille se charge positivement par rapport à la source (les électrons de la grille sont attirés vers la plaque droite du condensateur) ; c'est l'inverse lorsque  $E = -15 \text{ V}$ . Le champ électrique ainsi créé entre la grille et la source induit une modification de la taille du canal Drain-Source (existence d'un champ interne) d'où une modification importante de la résistance de ce canal.

## **III VARIATION DE LA RESISTANCE D'UN SEMI-CONDUCTEUR AVEC LA TEMPERATURE**

L'observation, à température ordinaire, de la conduction intrinsèque ( $n_i \gg N_d$ ) requiert un semi-conducteur de petit gap et/ou un faible dopage (cf. annexe). Pour ce faire, on dispose à Rennes d'une plaquette de démonstration comportant un échantillon de Germanium dopé P (maquette Phywe référence 11805.00 aussi présente à l'oral). On précisera au fur et à mesure du TP le rôle de chaque connexion en ne précisant, à chaque étape, que celles utiles à la manipulation en cours.

Note :

**Les cristaux de germanium sont très fragiles (au sens mécanique du terme) et peuvent par conséquent très facilement se casser. Il est donc impératif de manier la plaque avec précautions, notamment lorsque l'on branche et débranche les fils de connexion (tenir la plaque à la base des contacts pour éviter toute torsion de la plaque qui serait fatale au cristal).**

### **3.1 Propriétés de transport à la température ambiante**

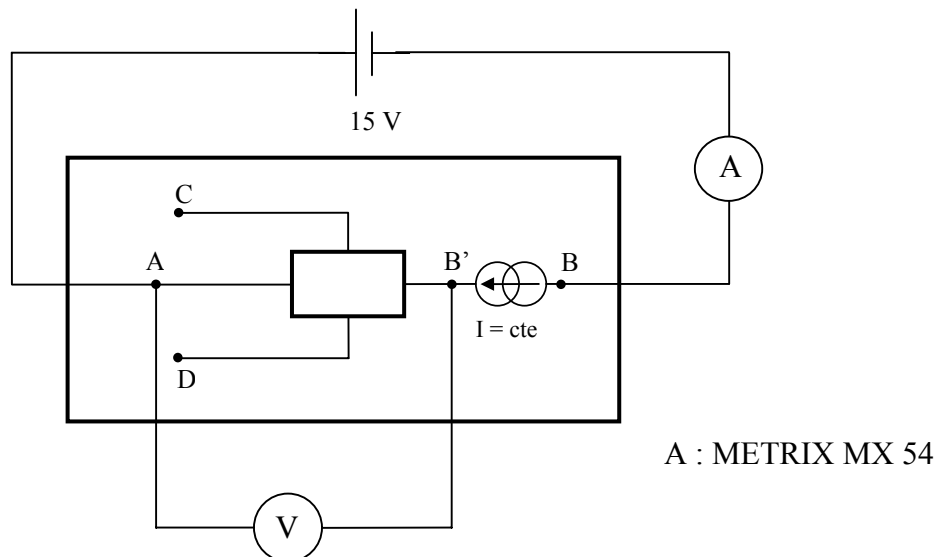
La mesure de la résistivité du barreau de semi-conducteur s'effectue par la méthode du voltmètre-ampèremètre. L'échantillon de Germanium dont on dispose à une résistivité nominale annoncée par le constructeur (cf. doc.)  $\rho = 2,25 \Omega \cdot \text{cm}$  (attention à l'unité  $\rightarrow \Omega \cdot \text{cm}$  et pas  $\Omega$

par cm ). Ses dimensions sont :

$$L = 20 \text{ mm}, a = 10 \text{ mm}, b = 1 \text{ mm}$$

#### Montage :

L'échantillon est alimenté entre A et B, sous une tension comprise entre 12 et 30 V. Utilisez par exemple une alimentation d'ampli. op. entre "0 et 15". Une régulation de courant située entre B et B' (intégrée dans la plaque) fournit un courant constant (ajustable à l'aide d'un potentiomètre situé au-dessous de la plaque) à travers l'échantillon. Les bornes A et B' permettent de mesurer la d.d.p. longitudinale aux bornes de l'échantillon.



#### Mesures :

Voici à titre indicatif un résultat obtenu à la température de 21° C .

$$\left. \begin{array}{l} U = 1.355 \text{ V} \\ I = 31.88 \text{ mA} \end{array} \right\} \Rightarrow R = 42.5 \, \Omega = \rho L / S$$

$$\text{D'où } \rho = \frac{RS}{L} = \frac{42.5 \times (10 \times 1) 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-3}} = 0.0212 \, \Omega \cdot \text{m} \quad \text{Soit } \rho = 2.12 \, \Omega \cdot \text{cm}$$

La valeur mesurée corrobore celle annoncée par le constructeur ; elle est à comparer à celles des métaux ou des isolants (cf. Handbook p. E.90 et F.140).

#### Remarque :

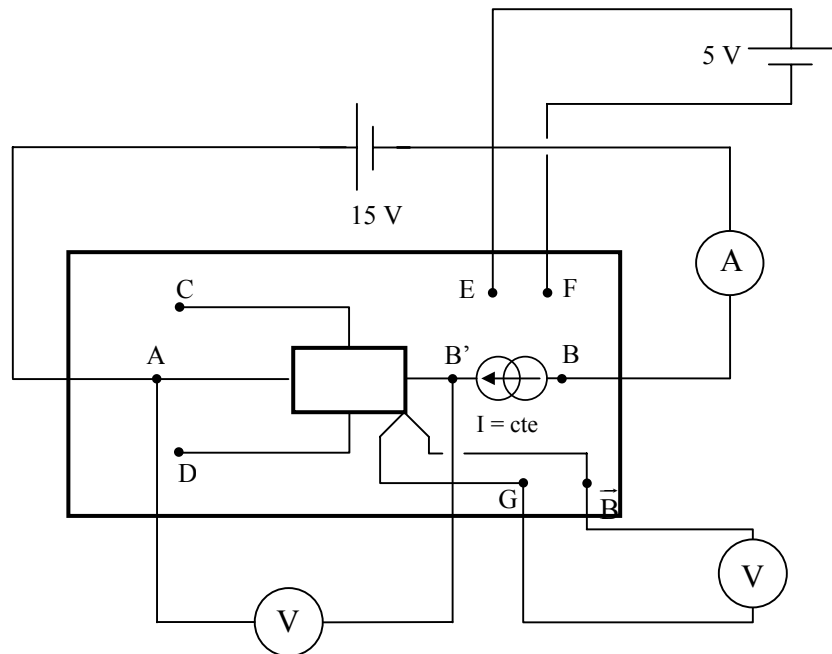
Une manipulation alternative (mais plus limitée) est proposée dans le Quaranta III p. 432.

### **3.2 Evolution en fonction de T : calcul du Gap**

Le germanium, de part son faible gap, permet d'observer le passage de la conduction extrinsèque à la conduction intrinsèque à des températures ordinaires.

#### Montage :

La plaquette comporte un dispositif permettant de chauffer par effet joule le cristal de germanium (bornes E et F). Un thermocouple cuivre constantan, placé au niveau du cristal, permet de mesurer la température (bornes G et H).



La formule permettant la conversion entre la tension aux bornes du thermocouple  $V_{th}$  et la température est la suivante :

$$T(K) = \frac{V_{th}(mV)}{40.10^{-3}} + T_{ambiante}(K)$$

La tension à mesurer étant faible, il faut utiliser un voltmètre performant.

Mode opératoire :

Voltmètre → Keithley 199 ou 2000

Chauffage → alimentation de puissance ELC AL924A

**La température de la plaque ne devant pas dépasser 175 °C sous peine d'endommagement, arrêter de chauffer dès que  $V_{thermocouple} = 6 \text{ mV}$  !**

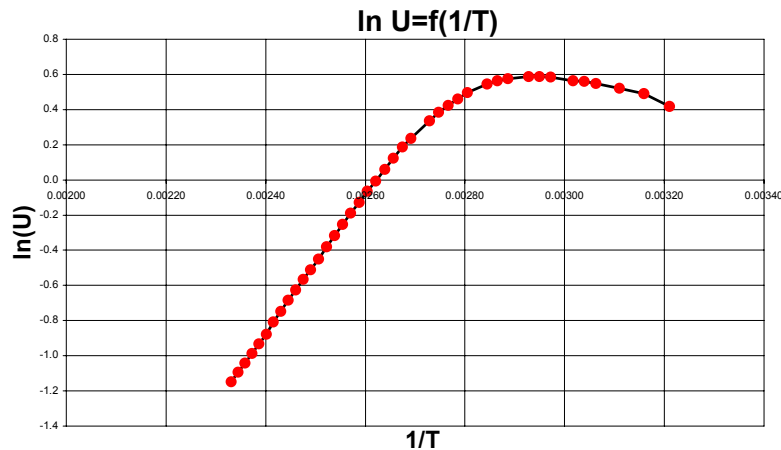
Réalisez une montée en température progressive en jouant sur la tension de chauffage (**ne dépasser en aucun cas 5 A !**). Mesurez l'évolution de la tension aux bornes du cristal ainsi que celle de la tension aux bornes du thermocouple (faire les mesures à la volée). On peut aussi prendre les mesures après arrêt du chauffage, lors du refroidissement de l'échantillon (les mesures sont cependant plus difficiles à prendre surtout aux températures élevées en raison de la faible inertie thermique de la plaque).

Voici à titre indicatif une série de mesures effectuées avec un **courant constant** de 31.88 mA passant dans le cristal :

$U_{Ge} \text{ (V)}$	0.296	0.380	0.482	0.655	0.866	1.148	1.659	1.747	1.712	1.613
$U_{Th} \text{ (mV)}$	6	5.5	5	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5
$T_{Ge} \text{ (K)}$	444	431.5	419	406.5	394	381.5	356.5	344	331.5	319
$1/T \times 10^{-3} \text{ (K}^{-1}\text{)}$	2.252	2.317	2.387	2.460	2.538	2.621	2.805	2.907	3.016	3.134

D'autres mesures ont été effectuées après 319 K ; la tension  $U_{Ge}$  continue de baisser après être passée par un maximum. On représente alors  $\ln U = f(1/T)$  ; on obtient la courbe

suivante :



#### Interprétation :

Lorsque la température est élevée, le germanium se comporte comme un semi-conducteur intrinsèque. La conductivité peut alors s'écrire avec une bonne approximation sous la forme :

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 \cdot e^{-E_G / 2kT} \\ \text{comme } U_{Ge} = RI &= \frac{\rho LI}{S} = \frac{LI}{\sigma S} \end{aligned} \right\} \Rightarrow U_{Ge} = \frac{LI}{\sigma_0 S} e^{E_G / 2kT}$$

La pente de la droite  $\ln U_{Ge} = f(1/T)$  vaut donc  $E_G/2k$ . On trouve pour la série de mesure  $E_G/2k = 3673 \text{ K}$  soit :

$$E_G = 0.63 \text{ eV}$$

#### Remarque :

Le faible gap du germanium ne le prédispose pas à une utilisation dans les dispositifs de puissance puisqu'il passe rapidement en conduction intrinsèque lorsque la température augmente. Le silicium est mieux adapté à cette application (gap plus élevé → début de conduction intrinsèque à environ  $500^\circ \text{C}$ ).

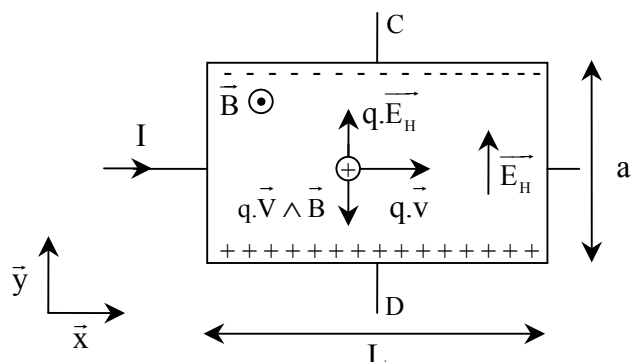
### **IV DENSITE ET MOBILITE DES PORTEURS**

La mesure de la résistivité associée à la mesure de l'effet Hall permet le calcul de ces deux grandeurs.

#### **4.1 Principe de l'effet Hall**

Lorsque le barreau est plongé dans un champ magnétique  $B \parallel Oz$  et parcouru par un courant  $I$  longitudinal  $\parallel Ox$ , il apparaît un champ électrique transversal  $\parallel Oy$ , dit champ de Hall.

Le dessin est effectué en considérant une charge positive ; on appelle  $b$  l'épaisseur du cristal



Soit  $n$  la densité de porteurs,  $q$  leur charge algébrique, et  $\vec{v}$  leur vitesse moyenne. La densité de courant dans la section  $a.b$  du cristal vaut alors :

$$\vec{j} = n.q.\vec{v}$$

$$\text{Am}^{-2} = \text{m}^{-3} \cdot \text{C} \cdot \text{ms}^{-1}$$

Cette densité se déduit du courant circulant dans le circuit par  $\vec{j} = \frac{I}{a.b} \vec{x}$

Chaque porteur est soumis à la force de Lorentz  $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ . Cette force tend à dévier les porteurs qui s'accumulent sur la face latérale du barreau : il se crée donc un champ électrique  $\vec{E}_H$  parallèle à  $\vec{y}$ . En régime permanent, les deux forces se compensent exactement et les trajectoires des porteurs sont parallèles à  $\vec{x}$  :

$$q\vec{v} \wedge \vec{B} + q\vec{E}_H = \vec{0} \Rightarrow \vec{E}_H = -\vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$\text{Comme } \vec{v} = \frac{\vec{j}}{nq} = \frac{I}{nqab} \vec{x} \Rightarrow \vec{E}_H = \frac{IB}{nqab} \vec{y}$$

$$\text{D'où la tension de Hall : } U_H = V_D - V_C = \frac{IB}{nqb}$$

On peut faire le même raisonnement avec des électrons. On voit tout de suite qu'ils vont être déviés **dans le même sens** (car  $q$  et  $\vec{v}$  s'inversent donc les effets se compensent). En revanche la tension de Hall **change de signe** puisque ce sont des électrons qui cette fois-ci s'accumulent sur la face inférieure du cristal. Cela corrobore la formule donnant  $U_H$  (car  $q$  y est une grandeur algébrique).

**→ La mesure de  $U_H$  donne ainsi directement accès à la fois au type de porteurs (par son signe) et à leur concentration  $n$  (par sa valeur).**

#### Remarques :

L'expression simple précédente n'est valable que si un seul type de porteurs contribue à la conductivité, ce que nous avons supposé depuis le début. Ce n'est donc vrai que dans la gamme de température où le semi-conducteur a un comportement extrinsèque ; or c'est justement dans ce domaine que l'on utilise les semi-conducteurs.

On notera que plus la concentration des porteurs est élevée, plus l'effet Hall est petit. Il existe aussi dans les métaux mais y est souvent difficilement mesurable car  $n$  est trop élevée :  $n$  est de l'ordre de  $10^{28} \text{ e}^-/\text{m}^3$  pour les métaux contre  $10^{18}$  à  $10^{24} \text{ e}^-/\text{m}^3$  pour les semi-conducteurs → l'effet est donc au minimum  $10^4$  fois supérieur dans les SC !

## **4.2 Manipulation**

Reprendre le montage du § 3.1. Mesurez cette fois  $V_D - V_C$  avec un voltmètre de haute impédance (pour qu'aucun courant ne soit admis à circuler suivant  $y$ ).

→ Prendre le Keithley 199 ( $Z_e > 1 \text{ G}\Omega$  sur  $300 \text{ mV}$ ).

Comme il est difficile de placer les deux contacts C et D exactement l'un en face de l'autre, la d.d.p.  $V_D - V_C$  comporte une partie de chute ohmique lorsque le courant circule dans l'échantillon. Annulez celle-ci au préalable en l'absence de champ magnétique en agissant sur le potentiomètre de compensation. Placez ensuite **avec précaution** le barreau de germanium dans l'entrefer du gros électroaimant alimenté en continu (épaisseur de l'entrefer  $\approx 4 \text{ cm}$  – **vérifiez la fixation des pôles !**). Repérez le sens du champ magnétique à



l'aide d'une boussole (il sort par le pôle rouge). Mesurer le champ magnétique  $B$  à l'aide d'un tesla mètre et la différence de potentiel  $V_D - V_C$  pour différentes valeurs de  $B$ .

#### Nature des porteurs libres :

Le déduire du signe de  $U_H$ . Vérifiez que  $U_H(\vec{B}) = -U_H(-\vec{B})$

Il y a à l'oral une plaquette de germanium dopée P qu'on utilise de la même façon. On peut alors vérifier que la tension de Hall s'inverse lorsque l'on passe d'un échantillon de type N à un échantillon de type P.

#### Concentration en porteurs :

Le déduire de la valeur mesurée pour  $U_H$  par  $n = \frac{IB}{qbU_H}$ .

On trouve typiquement  $n = 10 \times 10^{20}$  porteurs/m<sup>3</sup>. Cela est en accord avec la valeur annoncée par Phywe ( $9.7 \times 10^{20}$  porteurs/m<sup>3</sup>) et les valeurs données en annexe.

Quelle est la concentration relative des impuretés dopantes par rapport aux atomes du cristal, sachant que chaque atome dopant fournit un porteur ?

#### Mobilité des porteurs :

On peut y accéder en combinant les mesures d'effet Hall et de résistivité. En effet, on sait que :

- $\sigma = n.q.\mu$  cf. fin du chapitre I
- $\sigma = 1/\rho$  or  $\rho$  a été mesuré au § 2.1 ( $\rho = 2.12 \Omega.cm$ )

$$\Rightarrow \mu = \frac{1}{\rho.n.|e|} \text{ car ici les porteurs libres sont de type P}$$

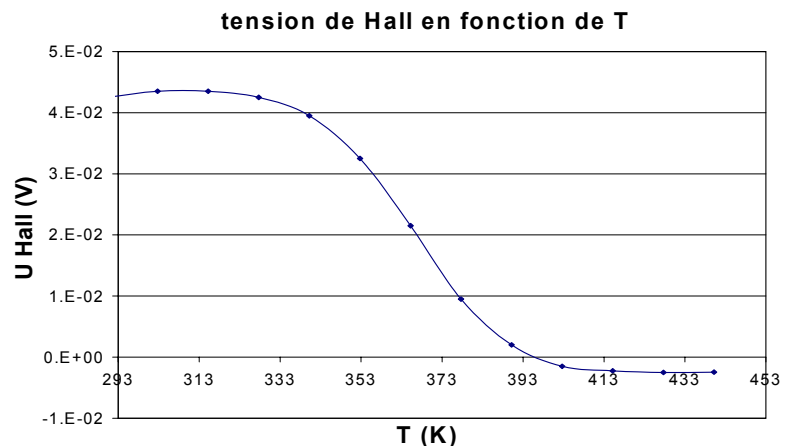
On trouve ici avec les valeurs mesurées :  $\mu = 0.289 \text{ m}^2/\text{V.s}$

On pourra vérifier, à l'aide de la notice, si cette valeur est cohérente. On peut faire un encadrement de cette valeur en tenant compte de la dispersion des résultats sur  $n$ .

### **4.3 Evolution de $U_H$ en fonction de $T$**

Le protocole de chauffage de la plaque est identique au § 3.2. On mesure la tension de Hall pour une valeur du champ  $B$  donnée en fonction de la température.

On obtient l'évolution suivante (mesures effectuées avec un champ magnétique de 250 mT et un courant  $I$  de 30,6 mA).



On remarque l'existence de trois régimes :

- un palier aux basses températures : c'est le palier extrinsèque. Le comportement du SC est gouverné par les impuretés ; le nombre de trous est constant, égal au nombre d'accepteurs.
- une forte décroissance pour des températures plus élevées : c'est le début de l'activation thermique des paires électron-trou. Dans ce domaine, les trous imposent le signe de l'effet Hall car ils sont encore en concentration plus forte que les électrons.
- enfin une inversion du signe de la tension de Hall. A haute température, les concentrations d'électrons et de trous sont élevées et pratiquement égales. Comme les électrons ont, dans le germanium, une mobilité plus élevée que celle des trous, ce sont eux qui dominent les propriétés de transport, et la tension de Hall change de signe.

Remarque :

Il n'y a évidemment pas d'inversion de signe pour l'échantillon de type n. Cette inversion de la tension de Hall est typique des SC dopés P.

#### **4.4 Magnétorésistance**

Cité pour mémoire (non disponible à Rennes).

On appelle magnétorésistance la variation de résistance d'un échantillon sous l'effet d'un champ magnétique. La magnétorésistance est généralement positive ( $R$  augmente avec  $B$ ), et quadratique en  $B$  à faible champ. Ce phénomène est, comme l'effet Hall, dû à la force de Lorentz, qui dévie les électrons. C'est cependant un effet plus "fin": le modèle simple utilisé ci-dessus pour expliquer l'effet Hall ne permet pas de rendre compte de la dépendance  $R(B)$ . La vitesse introduite lors de l'étude de l'effet Hall dans l'expression  $\vec{j} = n.q.\vec{v}$  est en fait une vitesse de dérive moyenne des porteurs libres (cf. Tessier p.215). Suite aux collisions avec le réseau, ces porteurs acquièrent en fait des vitesses différentes. Aussi, les deux forces (magnétique et électrique) ne se compensent-elles exactement que pour certains de ces porteurs. On observe par conséquent sous l'action de la force magnétique la déviation d'une partie des porteurs vers l'une ou l'autre face latérale du cristal. Il s'ensuit une diminution de l'intensité du courant longitudinal et par suite de la conductivité du matériau. On peut accroître considérablement cet effet magnétorésistif en annulant la tension de Hall par court circuit (cf. Asch p.370).

La magnétorésistance sert beaucoup comme capteur de déplacement. Dans les claviers d'ordinateurs, la touche est solidaire d'un petit aimant. La résistance du semi-conducteur placé à son voisinage augmente lorsque la touche est enfoncée.

Expérience réalisable à l'oral :

On peut mettre en évidence le phénomène de magnétorésistance transverse ( $\vec{j} \perp \vec{B}$ ) sur une "magnétorésistance" constituée d'InSb contenant du NiSb. Faire la mesure avec un ohmmètre. Placez la magnétorésistance dans l'entrefer d'un électro-aimant. Montrer que la résistance augmente avec le champ magnétique et tracer la courbe  $R = f(B)$ .

## **V PROPRIETES OPTIQUES**

Retrouvez la relation numérique liant la longueur d'onde à

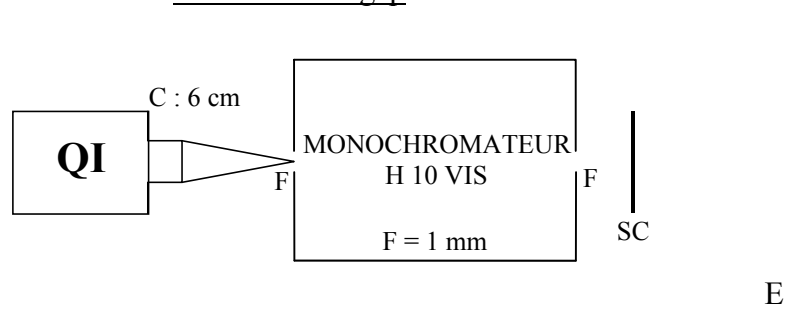
l'énergie en eV du photon. Cette relation servira dans tout ce qui suit.

### 5.1 Absorption fondamentale d'un semi-conducteur

Le cristal semi-conducteur, transparent pour  $hc/\lambda < E_g$ , devient opaque lorsque  $hc/\lambda$  dépasse  $E_g$ . Le photon a alors en effet une énergie suffisante pour exciter un électron de la bande de valence dans la bande de conduction.

On dispose ici de deux échantillons de séléniure de zinc dopé au manganèse d'aspect "orange" déposés sous forme de mince pellicule sur plaque de verre. Utiliser cette simple observation visuelle pour situer le gap de ces semi-conducteurs par rapport aux limites du visible, qui sont 1.6 et 3.1 eV.

#### 5.1.1 Estimation du gap



Ajustez le tirage de la lampe de façon à avoir la convergence du faisceau incident la plus forte possible. Ajustez la position la lampe QI afin d'avoir le point de convergence sur la fente d'entrée du monochromateur. L'échantillon de semi-conducteur est placé dans un support contre la fente de sortie. Placez un écran blanc une vingtaine de cm plus loin. Éliminez les lumières parasites avec des écrans ou des tissus noirs (si vous recouvrez la lampe, ne le faites que le temps de l'observation pour éviter qu'elle surchauffe).

Faire défiler à la main les longueurs d'onde avec et sans le semi-conducteur (s'arrêter à quelques longueurs d'onde et comparer alternativement avec ou sans). Observez que le rouge est transmis  $\approx$  sans absorption, le jaune et le vert sont transmis avec une certaine atténuation, puis l'échantillon devient opaque aux longueurs d'onde plus courtes.

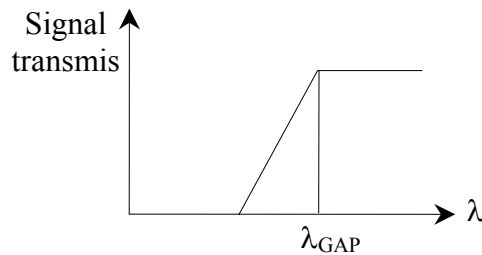
Déduire du seuil de l'absorption fondamentale ainsi mise en évidence une estimation de la valeur du gap de l'échantillon.

#### Remarque :

On obtient ainsi qu'une estimation car on ne passe pas brusquement d'une absorption nulle à une absorption totale. On ne tient en effet pas compte de la réponse spectrale de l'œil et du spectromètre.

#### 5.1.2 Manipulation avec photo détecteur

Même montage ; utilisez comme détecteur une photodiode polarisée en inverse pour détecteur. Placez l'échantillon contre la fente de sortie, immédiatement suivi par la photodiode au silicium (réf. OSD5T), polarisée en inverse. Le signal étant faible, prendre une résistance de 1 M $\Omega$ . Ajustez au mieux la position de la lampe et de la photodiode pour avoir un signal le plus fort possible. On peut se contenter d'observer "à la main" le signal transmis. Son évolution est "grossièrement" la suivante :



Repérez le maximum de signal. Déduire de la lecture du vernier le seuil fondamental d'absorption du semi-conducteur. Calculez la valeur de la largeur de bande interdite du semi-conducteur.

### 5.1.3 Manipulation avec enregistrement

La manipulation précédente est critiquable dans le sens où on ne tient pas compte de la fonction d'appareil de l'ensemble lampe + monochromateur et de la réponse spectrale de la photodiode. Pour s'en affranchir, il faudrait faire un enregistrement avec et sans échantillon.

#### Manipulation :

Branchez **directement** à la place de la résistance la voie Y ( $\approx 50 \text{ mV/div}$ ) de la table traçante jaune IF3400 (son impédance d'entrée vaut  $\approx 1 \text{ M}\Omega$ ).

Pour obtenir en X un signal proportionnel à la longueur d'onde, on dispose d'un potentiomètre résistif multitour linéaire situé à l'arrière du monochromateur qui suit les mouvements du vernier. Branchez entre le noir et le rouge une alimentation stabilisée **avec réglage fin** de la tension. La tension variable (entre noir et blanc) est nulle lorsque le vernier affiche 200 (le vérifier). Se placer à la graduation 400 et ajuster l'alimentation du potentiomètre de façon à avoir précisément deux volts entre noir et blanc. Vous pouvez vérifier la linéarité en vous plaçant sur 300 ; vous devez avoir 1 V. Envoyez ce signal sur la voie X ( $0.1 \text{ V/div}$ ) de la table traçante.

Ajustez les origines. Faire **dans le noir** un enregistrement avec (courbe 1) et sans SC (courbe 2). En divisant  $C_2$  par  $C_1$  pour quelques valeurs on obtient la fonction de transmission de l'échantillon.

#### Remarque :

Pour une présentation en montage, on conseille de faire l'enregistrement de la fonction d'appareil en préparation. On repère alors quelques valeurs du signal transmis (par exemple tous les cm sur la feuille) et les longueurs d'ondes correspondantes **sans enlever la feuille de l'enregistreur**. L'enregistrement avec SC s'effectue alors en présentation.

## 5.2 Création de porteurs par un rayonnement lumineux

Lorsqu'on éclaire un échantillon de semi-conducteur, l'absorption des photons d'énergie supérieure au gap génère des paires électron-trou. L'apparition de ces porteurs excédentaires provoque l'augmentation de la conductivité du matériau (photoconductivité). Lorsque l'éclairement s'interrompt, les concentrations de porteurs retournent vers leur valeur à l'équilibre avec une constante de temps caractéristique qui est le temps de vie des porteurs photocréés. Dans le domaine visible, on utilise les photo résistances (ou cellules photoconductrices) au CdS.

#### Mise en évidence de la photoconductivité :

Le domaine de variation des résistances des cellules photoconductrices est important : de quelques  $\text{M}\Omega$  pour la résistance d'obscurité à

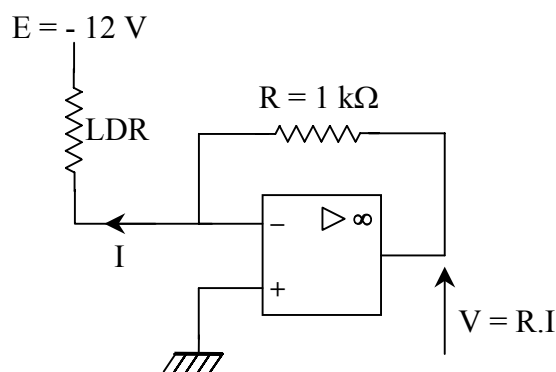
quelques  $k\Omega$  pour les niveaux d'éclairement usuels.

Elargir un faisceau laser (Melles-Griot + objectif de microscope  $\times 10$ ) pour éclairer entièrement la photo résistance. Interposez des filtres de densité variable. Mesurez au noir la résistance pour différentes valeurs de l'atténuation ( $\Phi_T = \Phi_I 10^{-ND}$  - utiliser un minimum de filtre pour une atténuation donnée afin de minimiser l'incertitude sur l'atténuation totale). On remarquera que les mesures fluctuent car le capteur est sensible  $\rightarrow$  il détecte la moindre lumière parasite. De plus, la puissance émise par le laser n'est pas parfaitement stable. On notera la non linéarité de la résistance pour les faibles éclairissements.

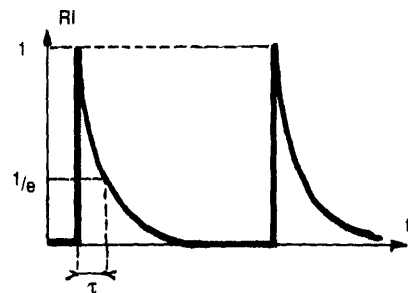
#### Temps de réponse :

On utilise un montage imposant une ddp constante aux bornes de la cellule et permettant de mesurer directement le courant la traversant :

LDR : Photo résistance Phy 9  
boîtier bleu



Eclairez la photo résistance à l'aide du stroboscope électronique à une fréquence de l'ordre de 10 Hz. Le placer à une distance suffisamment grande de façon à ne pas saturer l'ampli op. La fréquence étant basse, observez le signal de sortie V avec un oscilloscope à mémoire en mode rafraîchi. On obtient le signal suivant :



La création de porteurs s'effectue très rapidement. Par contre, la recombinaison électron-trou n'est pas immédiate (décroissance exponentielle). La constante de temps  $\tau$  du phénomène est appelée temps de recombinaison. On obtient un temps de réponse de l'ordre de 10 ms. Il n'est pas ici nécessaire de mesurer précisément ce temps de réponse, car il dépend du niveau d'éclairement (cf. Sextant p. 70).

#### Réponse spectrale (facultatif) :

Reprendre le montage précédent. Mettre la photo résistance derrière la fente de sortie du monochromateur. Déterminez à la main la longueur d'onde correspondant au maximum de la photoconductivité. En déduire le gap de CdS.

#### Interprétation de la courbe en cloche observée :

- du côté des grands  $\lambda$ , le signal chute quand le cristal devient transparent ( $\lambda > \lambda_G$ , seuil de l'absorption fondamentale).
- du côté des petits  $\lambda$ , le coefficient d'absorption devient très grand. La lumière est absorbée en surface, là où les porteurs photo créés ont une durée de vie trop faible pour contribuer efficacement à la conduction.