

Caractérisation électrique d'un matériau semiconducteur par effet Hall

Vy YAM, Sylvie RETAILLEAU, Eric CASSAN

Université Paris-Sud-11, bâtiment 220 de l'UFR des Sciences, 91 405, Orsay Cédex

vy.yam@ief.u-psud.fr

Résumé :

L'enseignement de la physique des semiconducteurs et des composants microélectroniques au sein des formations de Licence et de première année de Master en Physique ou EEA fait traditionnellement appel à une organisation sous la forme de cours et TD. Nous rapportons dans cette communication une expérience menée à l'UFR des Sciences d'Orsay pour introduire en 3^e année de la Licence (L3) et en 1^e année de Master (M1) des travaux pratiques axés sur la caractérisation expérimentale de semiconducteurs. En complément avec une visite d'une salle blanche, les étudiants sont initiés à la caractérisation du dopage et de la mobilité de tranches de silicium par effet Hall.

L'effet Hall est fréquemment utilisé dans l'industrie comme dans la recherche pour caractériser les matériaux semiconducteurs. Il sert aussi de principe à un certain nombre de capteurs de champ magnétique ou de courant. Un TP sur l'effet Hall a été mis en place grâce à une aide financière du CNFM. Ce TP, d'une durée de 4 heures, s'adresse à des étudiants en 3^e année de licence de physique, de 1^{ère} année de Master ou des élèves ingénieurs 2^{ème} année. Ce TP s'intègre à des unités d'enseignement de physique des semiconducteurs et de micro-optoélectronique.

Les mesures sont réalisées dans une salle grise de la Centrale Technologique Universitaire de l'Institut d'Electronique Fondamentale à Orsay. Le TP débute par une brève description des différentes méthodes de caractérisation électrique (mesures 4 pointes, I(V), C(V)). Vient ensuite un rappel concernant les matériaux semiconducteurs intrinsèques et extrinsèques, ainsi que le principe de l'effet Hall. Les mesures sont réalisées sur des échantillons de silicium intrinsèques et dopés (n et p).

Dans le cas d'un semiconducteur intrinsèque, la dépendance en température de la résistivité $\rho = 1/qn\mu$ (et donc de la résistance) est principalement induite par la dépendance en température de la concentration de porteurs libres. Le remplissage de la bande de conduction suit une statistique de

Boltzmann selon $\exp\left(\frac{E_{gap}}{k_B T}\right)$, où $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ est la constante de Boltzmann et E_{gap} la largeur

de la bande d'énergie interdite. Pour extraire la valeur E_{gap} d'un semiconducteur intrinsèque, les étudiants réalisent une mesure de la résistance R d'un barreau de Si intrinsèque en fonction de la

température. Le tracé de la courbe de $\ln(R)$ en fonction de $1/T$ permet ainsi d'obtenir la valeur de E_{gap} .

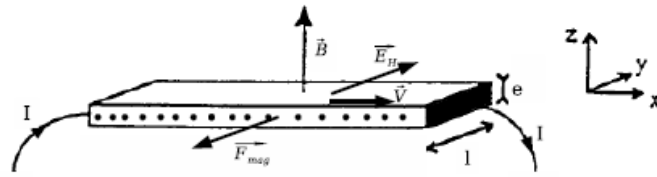


Figure 1 : Effet Hall dans un barreau

Le phénomène de l'effet Hall est décrit pour une géométrie simple (fig. 1) : un courant I parcourt suivant l'axe x un barreau rectangulaire de section $l \times e$. Un champ magnétique constant \vec{B} est appliqué perpendiculairement à la direction du transport (suivant l'axe z). Les porteurs de charges subissent donc une force de Lorentz $\vec{F}_{\text{mag}} = q\vec{V} \wedge \vec{B}$, où q et \vec{V} sont la charge et la vitesse d'un porteur de charge ($q = \pm 1,6 \cdot 10^{-19}$ C). Ainsi, si les sens de \vec{B} et de I sont réellement ceux indiqués sur la figure 1, cette force amène les porteurs sur la face avant du barreau rectangulaire, et ce quel que soit le signe de la charge des porteurs. Le signe de la tension de Hall va donc dépendre du signe de la charge des porteurs. Les lignes de courant sont de plus les mêmes avant et après l'application du champ magnétique \vec{B} (c'est-à-dire parallèles à l'axe x). C'est donc qu'il existe un champ électrostatique (champ de Hall $\vec{E}_H = -\vec{V} \wedge \vec{B}$) dont l'effet sur la trajectoire des porteurs compense exactement la force de Lorentz. Ce champ est créé par les charges qui se sont accumulées sur les côtés du barreau pendant l'application du champ magnétique. \vec{F}_{mag} étant parallèle à y , \vec{E}_H est lui-même orienté parallèlement à y . Et il est tel que $q\vec{V} \wedge \vec{B} + q\vec{E}_H = 0$. Ainsi on a $E_{Hy} = -V_x B_z$ (en notant A_x la coordonnée du vecteur \vec{A} sur l'axe x). Si on suppose une densité de courant J_x constante sur tout le barreau, alors on a $J_x = qnV_x$, ou encore $I = qnleV_x$ (avec n la densité volumique de porteurs et pour le sens du courant défini sur la figure). Ainsi le champ de Hall s'écrit :

$$E_{Hy} = - \frac{J_x B_z}{qn} = - \frac{IB_z}{qn}$$

On peut alors mesurer, entre les deux côtés du barreau, la tension de Hall : $V_H = - \frac{IB_z}{qne}$, où $R_H = 1/(qn)$ est appelé coefficient de Hall.

La caractérisation par effet Hall nécessite deux mesures distinctes. Une première mesure, où

l'échantillon n'est pas soumis au champ magnétique, permet de déterminer la résistivité de l'échantillon. Une seconde mesure, pendant laquelle l'échantillon est soumis à un champ magnétique, donne le constante de Hall. Dans ce TP, la mesure est effectuée selon la méthode de van der Pauw (1958) qui permet de déterminer la résistivité et la constante de Hall sur un échantillon de forme quelconque, sans tenir compte de la répartition des lignes de courant.

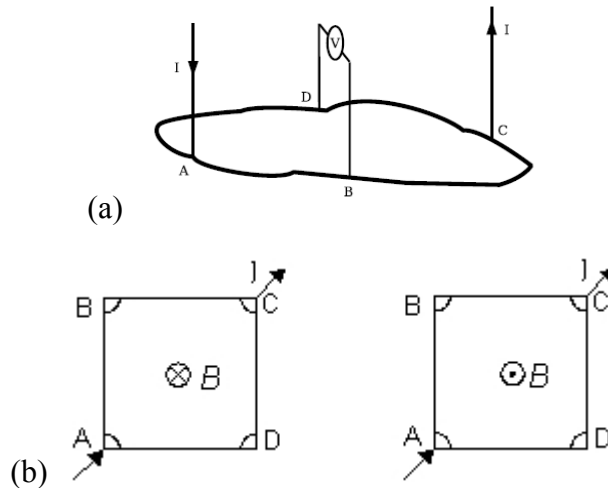


Figure 2 : Méthode van der Pauw pour la mesure du coefficient de Hall

Au bord de cet échantillon, on dispose arbitrairement quatre contacts A, B, C et D (fig. 2a). Les seules conditions restrictives sont que les quatre contacts ohmiques nécessaires à la mesure soient réalisés à la périphérie de l'échantillon et que celui-ci soit convexe. Si un courant parcourt l'échantillon de A vers B (I_{AB}) et si la tension est relevée entre C et D (V_{CD}), on définit une résistance $R_{AB,CD} = V_{CD}/I_{AB}$. De même on définit la résistance $R_{BC,DA} = V_{DA}/I_{BC}$. La résistivité, ρ , du

matériau est déterminée par la relation de van der Pauw : $\exp(-\pi e \frac{R_{ABCD}}{\rho}) + \exp(-\pi e \frac{R_{BCDA}}{\rho}) = 1$,

où e est l'épaisseur de l'échantillon. La solution de l'équation est donnée par

$$\rho = \frac{\pi e}{\ln 2} \frac{R_{ABCD} + R_{BCDA}}{2} \cdot f\left(\frac{R_{ABCD}}{R_{BCDA}}\right),$$

où f est le facteur de forme qui tient compte de la symétrie du dispositif et est donné par un abaque (f en fonction de R_{ABCD}/R_{BCDA}). En pratique, les contacts ne sont ni idéalement ponctuels ni parfaitement à la périphérie de l'échantillon. Pour minimiser l'influence de la position et de la dimension des contacts, la méthode de van der Pauw préconise une forme d'échantillon la plus symétrique possible comme un carré avec des contacts aux quatre coins ou encore un trèfle. Dans cette condition, $f=1$. Dans ce TP, nous utilisons des échantillons de forme carrée (fig. 2b). Afin d'éliminer les dissymétries du montage, on effectue quatre mesures de

différence de potentiel (ddp) entre B et D, suivant le sens injecté entre A et C et de l'induction magnétique \vec{B} ($-\vec{B}$). L'inversion du champ magnétique permet d'éliminer la ddp due au mauvais alignement des contacts BD (V_{RC}) ($V_{BD}=0$ pour $B=0$). Quant à l'inversion du courant I, elle permet d'éliminer la ddp due aux effets électromagnétiques autres que l'effet Hall : effet dus au gradient de température qui génère la ddp parasite V_P qui est indépendante du sens de courant. Si V_H est la tension de Hall, V_{RC} la tension due décalage des contacts BD et V_P celle des autres effets, on peut écrire algébriquement : $V_{\otimes}^+ = V_H + V_{RC} + V_P$, $V_0^+ = -V_H + V_{RC} - V_P$, $V_{\otimes}^- = -V_H - V_{RC} + V_P$,

$V_0^- = V_H - V_{RC} - V_P$ et finalement la tension de Hall s'écrit : $V_H = \frac{1}{4}((V_{\otimes}^+ - V_0^+) - (V_{\otimes}^- - V_0^-))$. Soit :

$$\Delta R_{BD.AC} = \frac{V_H}{I} = \frac{R_H B}{e}$$

La mesure du coefficient de Hall $R_H = 1/qn$, permet ainsi, connaissant la résistivité, de déduire la valeur de la concentration de porteurs n et de la mobilité. Tout ceci sous réserve qu'il n'y ait qu'un seul type de porteurs de charge, ce qu'on peut considérer comme valable pour un semiconducteur dopé.

L'appareil utilisé dans ce TP est équipé d'une source de courant constant, d'un aimant permanent de 0,5 Tesla, ainsi que d'un logiciel d'exploitation donnant les propriétés physiques des matériaux (type de dopage, concentration des porteurs libres, résistivité, mobilité). La préparation des échantillons, réalisée à l'avance en salle blanche, est expliquée aux étudiants durant le TP. Les contacts sont réalisés par une évaporation de 5 nm de titane et de 200 nm d'or sur les coins des échantillons carrés de silicium. La couche de titane sert de couche d'accroche pour l'or. Un recuit est ensuite réalisée à 600°C, température supérieure à la température de l'eutectique du mélange Au/Si (360°C), afin de faire diffuser l'or dans le silicium pour la réalisation de contacts ohmiques. Les échantillons sont ensuite soit montés sur des cartes PCB par des microsoudures de fils d'or, soit montés par les étudiants sur un support à pointes réglables.

Les mesures sont réalisées à température ambiante et à $T = 77$ K grâce à un système de refroidissement à l'azote liquide. La mesure à basse température est délicate car le refroidissement brutal des échantillons peut altérer la qualité des contacts électriques. Les étudiants sont sensibilisés à la qualité des prises de contact électriques pour réaliser des mesures correctes.

Des perspectives d'enrichissement du TP sont envisagées par un contrôle en température des échantillons par le biais d'un système un peu plus perfectionné.