



EXERCICES

- Démonstration de l'effet Hall dans le germanium dopé.
- Mesure de la tension de Hall en fonction du courant et du champ magnétique à température ambiante.
- Détermination du signe, de la densité et de la mobilité des porteurs de charge à température ambiante.
- Mesure de la tension Hall en fonction de la température d'échantillon.
- Détermination de la température d'inversion et distinction entre la conduction extrinsèque et intrinsèque avec le germanium dopé p.

NOTE

La dépendance de la conductivité électrique des cristaux de germanium utilisés vis-à-vis de la température est étudiée dans l'expérience UE6020100.



OBJECTIF

Étude des mécanismes de la conduction électrique dans le germanium dopé avec effet Hall

RESUME

L'effet Hall intervient dans des matériaux conducteurs se trouvant dans un champ magnétique B. Le signe de la tension de Hall change selon que le même courant I est porté par des porteurs de charge positifs ou négatifs. Leur valeur dépend de la densité des porteurs. C'est pourquoi l'effet Hall constitue un instrument important pour déterminer les mécanismes du transport de charge dans les semi-conducteurs dopés. Au cours de l'expérience, nous étudions des cristaux de germanium dopés à des températures variant entre 300 et 450 K, afin de distinguer la conduction électrique rendue possible par le dopage et la propre conduction rendue possible par l'activation thermique d'électrons de la bande de valence dans la bande de conduction.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Appareil de base à effet Hall	1009934
1	Ge dopé n sur plaque à circuit imprimé	1009760
1	Ge dopé p sur plaque à circuit imprimé	1009810
1	Capteur de champ magnétique ±2000 mT	1009941
1	Bobine D à 600 spires	1000988
1	Noyau en U	1000979
1	Paire de cosses et étrier élastique pour effet Hall	1009935
1	Transformateur avec redresseur 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz)	1003316 ou
	Transformateur avec redresseur 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz)	1003315
1	Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 ou
	Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Multimètre numérique P3340	1002785
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540 ou
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm	1002843
<b>En plus recommandé :</b>		
1	3B NETlab™	1000544

GENERALITES

L'effet Hall intervient dans des matériaux conducteurs se trouvant dans un champ magnétique B. Il est causé par la force de Lorentz qui dévie les porteurs de charge participant au courant électrique I par un échantillon de matériau, perpendiculairement au champ magnétique et au sens du courant. La séparation des charges engendre un champ électrique E<sub>H</sub> perpendiculaire au sens du courant, qui est compensé par la force de Lorentz, et génère une tension de Hall U<sub>H</sub> dans l'échantillon. Le signe de la tension de hall change selon que le même courant I est porté par des porteurs de charge positifs ou négatifs. Leur valeur dépend de la densité des porteurs. C'est pourquoi l'effet Hall constitue un instrument important pour déterminer les mécanismes du transport de charge dans les matériaux conducteurs, souvent utilisé pour étudier les semi-conducteurs dopés.

Au cours de l'expérience, nous étudions des cristaux de germanium dopés à des températures variant entre 300 et 450 K. Les cristaux sont des échantillons plats de longueur a, de largeur b et d'épaisseur d, traversés dans le sens longitudinal par le courant I. Le champ magnétique B traverse l'échantillon perpendiculairement au courant. Il en résulte la tension de Hall

$$(1) \quad U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}$$

avec les coefficients de Hall

$$(2) \quad R_H = \frac{1}{e} \cdot \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{(n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n)^2}$$

$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  A.s: charge élémentaire

Les densités n<sub>n</sub> des électrons dans la bande de conduction et n<sub>p</sub> des trous dans la bande de valence ainsi que les mobilités μ<sub>n</sub> des électrons et μ<sub>p</sub> des trous sont des grandeurs du matériau qui dépendent de la température d'échantillon T.

En plus de la tension de Hall, l'expérience permet de mesurer la chute de tension U dans le sens longitudinal de l'échantillon, afin de déterminer la conductivité électrique

$$(3) \quad \sigma = e \cdot (n_n \cdot \mu_n + n_p \cdot \mu_p)$$

et la mobilité de Hall

$$(4) \quad \mu_H = R_H \cdot \sigma = \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n}$$

Les densités n<sub>n</sub> et n<sub>p</sub> des porteurs de charge sont influencées par le dopage, donc de l'intégration d'atomes étrangers dans le cristal. En cas de dopage p, des atomes accepteurs lient les électrons de la bande de valence et engendrent ainsi des « trous » dans celle-ci. En cas de dopage n, des atomes donneurs cèdent chacun un électron dans la bande de conduction. Les cristaux dopés sont électriquement neutres, les charges négatives et positives se compensent donc. Par conséquent,

$$(5) \quad n_n + n_A = n_p + n_D$$

n<sub>A</sub> : concentration des receveurs ; n<sub>D</sub> : concentration des donneurs  
En outre, n<sub>n</sub> et n<sub>p</sub> sont corrélés par une loi d'effet de masse, car, en cas d'équilibre dépendant de la température, il se forme à chaque unité de temps le même nombre de paires d'électrons et de trous qu'il ne s'en recombine. Dans ce cas :

$$(6) \quad n_n \cdot n_p = n_i^2$$

n<sub>i</sub> densité des porteurs de charge en cas de pure conduction propre (voir l'expérience UE6020100)

Au total, on a donc

$$(7) \quad n_n = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_D - n_A}{2}$$

$$(8) \quad n_p = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_A - n_D}{2}$$

À température ambiante, les concentrations n<sub>A</sub> et n<sub>D</sub> sont sensiblement supérieures à la densité des porteurs de charge en cas de pure conduction n<sub>i</sub>. Aussi

$$(9) \quad R_H = -\frac{1}{n_D \cdot e} \quad \mu_H = -\mu_n$$

pour dopage n et 300 K

$$(10) \quad R_H = \frac{1}{n_A \cdot e} \quad \mu_H = \mu_p$$

pour dopage p et 300 K

Le signe et la densité des porteurs de charge peuvent donc être déduits directement depuis les coefficients de Hall. La mobilité des porteurs de charge correspond à celle de Hall.

EVALUATION

Comme la quantité de porteurs de charge pour transporter le courant augmente au fur et à mesure que la température monte, la tension de Hall diminue, jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur zéro.

Pour le germanium dopé p, le signe de la tension de Hall change, car au fur et à mesure que la conduction propre augmente, l'influence des électrons, dont la propre mobilité μ<sub>n</sub> est supérieure, domine. Au-dessous de la température appelée d'inversion, c'est la conduction électrique rendue par le dopage qui domine, au-dessus de cette température, c'est la conduction propre qui domine.

À températures élevées, le cristal dopé n ne se distingue plus du cristal dopé p, car

$$n_n = n_p = n_i, \quad R_H = -\frac{1}{n_i \cdot e} \cdot \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}, \quad \mu_H = -(\mu_n - \mu_p)$$

La dépendance des mobilités μ<sub>n</sub> et μ<sub>p</sub> vis-à-vis de la température n'exerce aucune influence sur les coefficients de Hall, car pour les deux cas on a :

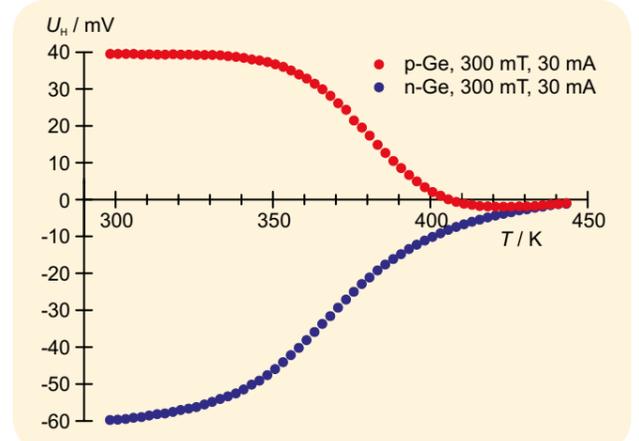
$$\mu \sim T^{-\frac{3}{2}} \text{ (voir aussi l'expérience UE6020100)}$$


Fig. 4 Tension de Hall dans le germanium dopé p et n en fonction de la température T