

Détermination de l'intervalle de bande du germanium

Objectifs expérimentaux

- Mesure de la chute de tension sur un cristal de germanium non dopé pour un courant constant à travers le cristal en fonction de la température et calcul de la conductivité σ .
- Détermination de l'intervalle de bande ou largeur de bande interdite E_g du germanium.

Notions de base

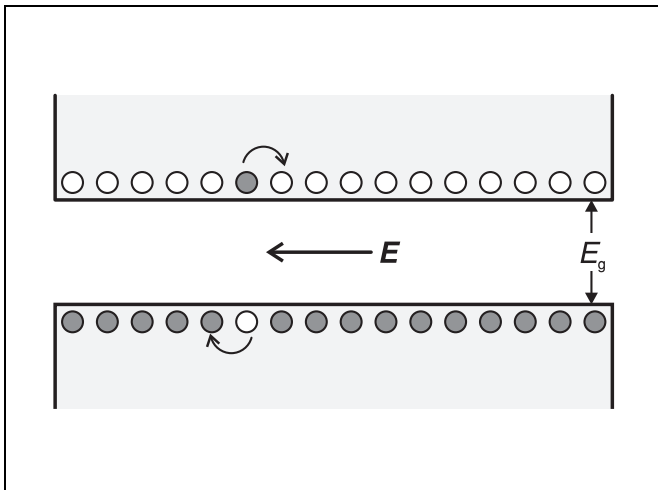
Pour la densité de courant j à travers un corps et l'influence d'un champ électrique E , on a la loi d'Ohm exprimée comme suit:

$$j = \sigma \cdot E \quad (I).$$

Le facteur de proportionnalité σ est caractérisé de conductivité électrique. Il est un facteur fortement dépendant du matériau, d'où l'usage qui consiste à classer les matériaux d'après leur conductivité. Les semi-conducteurs, par exemple, sont des solides qui ne conduisent pas de courant à basse température mais dont la conductivité électrique est mesurable à haute température. Cette subordination à la température de la conductivité découle de la structure de bande des niveaux d'énergie électroniques d'un semi-conducteur.

La bande de valence, soit la bande la plus haute totalement ou partiellement occupée par des électrons à l'état fondamental et la bande de conduction, soit la bande suivante inoccupée, sont séparées par l'intervalle de bande E_g (Ge: $E_g \approx 0,7$ eV).

Fig. 1 Représentation schématisée simplifiée de la conduction intrinsèque: semi-conducteurs avec un électron dans la bande de conduction et un trou dans la bande de valence sous l'action d'un champ électrique E .



La zone entre les deux bandes n'est pas occupée par des électrons dans le semi-conducteur intrinsèque pur et est qualifiée de «bande interdite». A température élevée, de plus en plus d'électrons sont excités thermiquement de la bande de valence à la bande de conduction. Ils laissent des «trous» ou manques d'électrons dans la bande de valence. Ces trous se déplacent sous l'influence d'un champ électrique tels des particules à charge positive et interviennent dans la densité de courant j , tout comme les électrons (voir fig. 1).

On caractérise de conduction intrinsèque (anglais: intrinsic conduction) la conduction électrique permise par l'excitation d'électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Etant donné qu'à l'équilibre thermique, il y a autant de trous dans la bande de valence que d'électrons dans la bande de conduction, la densité de courant est donnée dans le cas de la conduction intrinsèque par l'expression

$$j_i = (-e) \cdot n_i \cdot v_n + e \cdot n_i \cdot v_p \quad (II)$$

e : charge élémentaire,

n_i : concentration d'électrons ou de trous

Les vitesses v_n et v_p , les vitesses de déplacement moyennes des électrons et des trous, sont proportionnelles à l'intensité de champ E . On écrit

$$v_n = -\mu_n \cdot E \text{ et } v_p = \mu_p \cdot E \quad (III),$$

parce que les mobilités μ_n et μ_p doivent être des grandeurs positives et on obtient

$$j_i = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot E \quad (IV).$$

Une comparaison avec (I) donne la conductivité en cas de conduction intrinsèque

$$\sigma_i = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \quad (V)$$

Excepté la charge élémentaire e , toutes les grandeurs de l'expression (V) dépendent de la température T . Pour la concentration de conduction intrinsèque n_i , on a

$$n_i = (N \cdot P)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{2 \cdot kT}} \quad (VI),$$

k : constante de Boltzmann

E_g : intervalle de bande ou largeur de bande interdite du semi-conducteur

Matériel

1 germanium non dopé sur plaque conductrice	586 851
1 appareil de base pour l'étude de l'effet Hall	586 850
1 Sensor-CASSY	524010
1 CASSY Lab	524 200
1 alimentation régulée en courant, 15 V ₋ , 3 A, p.ex.	521 50
1 alimentation, 12 V ₋ , 50 mA p.ex.	521 54
1 pied en V, petit modèle	300 02
Câbles d'expérience	

avec

$$N = 2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot m_n \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ et } P = 2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot m_p \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{(VII)}$$

h : constante de Planck
 m_n : masse effective des électrons
 m_p : masse effective des trous

les densités des états effectives dans la bande de valence et dans la bande de conduction. Les mobilités μ_n et μ_p varient également avec la température. A basse température, on a en gros $\mu \sim T^{\frac{3}{2}}$ et à haute température, $\mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$.

Comme la fonction exponentielle (voir équation (VI)) exerce une influence dominante, la conductivité peut être représentée en bonne approximation comme suit:

$$\sigma_i = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_g}{2 \cdot kT}} \quad \text{(VIII)}$$

ou

$$\ln \sigma_i = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2 \cdot kT} \quad \text{(IX)}$$

Pour vérifier l'équation (VIII) et pour déterminer l'intervalle de bande E_g , on détermine dans l'expérience la conductivité du germanium non dopé en fonction de la température T . On mesure

la chute de tension

$$U = E \cdot a \quad \text{(X)}$$

a : longueur du cristal

sur un cristal de germanium non dopé avec un courant constant

$$I = j \cdot b \cdot c \quad \text{(XI)}$$

b : largeur du cristal, c : épaisseur du cristal

Pour la conductivité, on a compte tenu de (I), (X) et (XI)

$$\sigma = \frac{a}{b \cdot c} \cdot \frac{I}{U} \quad \text{(XII)}$$

Montage

Le montage expérimental est représenté sur la fig. 2.

Montage et câblage de la plaque conductrice:

N.B:

Le cristal de germanium est très fragile, il se casse facilement: manipuler la plaque conductrice avec soin et ne la soumettre à aucune sollicitation mécanique.

Du fait de sa résistance spécifique élevée, le cristal de Ge est chauffé par la simple application d'un courant transversal: ne pas dépasser le courant transversal maximal $I = 4 \text{ mA}$. Tourner le bouton de réglage pour le courant transversal de l'appareil de base pour l'étude de l'effet Hall jusqu'à la butée gauche.

- Monter la plaque conductrice avec cristal de Ge dans la douille multiple de l'appareil de base pour l'étude de l'effet Hall de manière à ce que les fiches de fixation enclenchent dans les perçages.
- Positionner sur la butée gauche le bouton de réglage de la limitation de courant de l'alimentation régulée en courant et relier l'alimentation à l'entrée pour le chauffage et l'électronique de l'appareil de base pour l'étude de l'effet Hall.
- Mettre en route l'alimentation régulée en courant, régler la limitation de tension sur 15 V et le courant sur 3 A (pour ce faire, temporairement court-circuiter la sortie de l'alimentation).
- Amener le bouton de réglage du courant transversal de l'appareil de base pour l'étude de l'effet Hall sur la butée gauche, brancher puis mettre en marche la deuxième alimentation pour l'alimentation de la source de courant, et régler la tension de sortie sur 12 V.

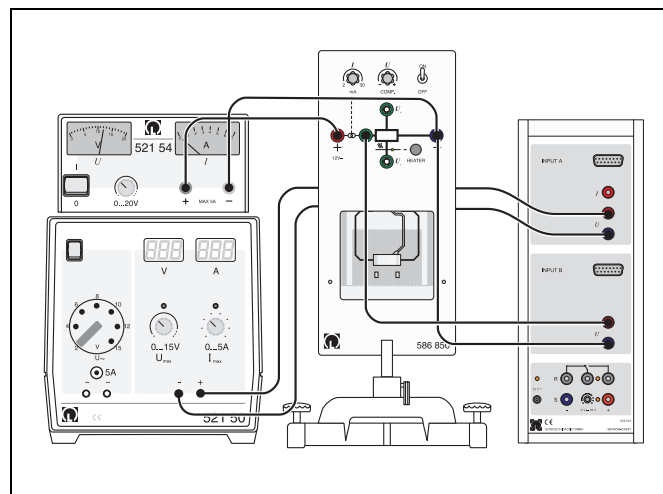





Fig. 2 Montage expérimental pour la détermination de l'intervalle de bande du germanium

Préparation de l'acquisition des valeurs mesurées:

- Brancher la sortie pour la mesure de la température à l'entrée A et la sortie pour la chute de tension à l'entrée B du Sensor-CASSY.
- Brancher le Sensor-CASSY au port série du PC (en principe COM1 ou COM 2) par l'intermédiaire du câble V24 à 9 pôles.
- Eventuellement installer le programme «CASSY Lab» sous Windows 95/98/NT et sélectionner la langue souhaitée.
- Lancer le programme «CASSY Lab», s'assurer que le Sensor-CASSY est connecté correctement.

- Effacer les données mesurées et les paramétrages existants avec le bouton  ou la touche F4.
- Ouvrir la fenêtre de dialogue «Paramétrages» avec le bouton  ou la touche F5 et cliquez sur «Actualiser la disposition».
- Cliquer sur le canal A et sélectionner la grandeur «UA1», zéro «à gauche» ainsi que gamme de mesure «0 V .. 3 V»; procéder aux mêmes réglages pour le canal B.
- Dans le registre «Représentation», effectuer les réglages suivants:
axe des x UA1 x
axe des y UB1 y
- Cliquer sur «Afficher les paramètres de mesure» et régler les paramètres de mesure sur «Relevé automatique» et «Interv. de mes.: 2s».

Réalisation

- Appuyer sur le bouton-poussoir Heater de l'appareil de base pour l'étude de l'effet Hall et lancer le relevé des valeurs mesurées avec la touche F9 ou le bouton .
- Vérifier dans la fenêtre «Tension UA1» si la tension UA1 proportionnelle à la température du cristal augmente.

Dès que la tension UB1 est descendue en dessous de la valeur 1 V:

- cliquer avec le bouton droit de la souris sur la fenêtre «Tension UB1» et passer à la plage de mesure «0 V .. 1 V».

Dès que la tension UB1 est descendue en dessous de la valeur 0,3 V:

- passer à la plage de mesure «0 V .. 0,3 V».

Lorsque la LED de l'appareil de base pour l'étude de l'effet Hall s'éteint:

- arrêter l'enregistrement des valeurs mesurées avec la touche F9 ou le bouton .

Pour l'exploitation ultérieure:

- Définir les grandeurs suivantes comme nouvelles grandeurs dans le registre «Paramètre/Formule/FFT»:

Grandeur	Température	Conductivité
Formule	UA1*100+273,15	4/UB1
Symbole	T	&s
Unité	K	1/&Wm
de	290	0
jusqu'à	440	200
Décimales	1	2

- Sélectionner la représentation suivante comme nouvelle représentation dans le registre «Représentation»:

axe des x	T	1/x
axe des y	σ	log y

- Après avoir cliqué dans la fenêtre du graphe avec le bouton droit de la souris, activer le point de menu «Fonction de modélisation» → «Droite de régression» puis marquer avec la souris la zone souhaitée qui doit être modélisée.

Exemple de mesure

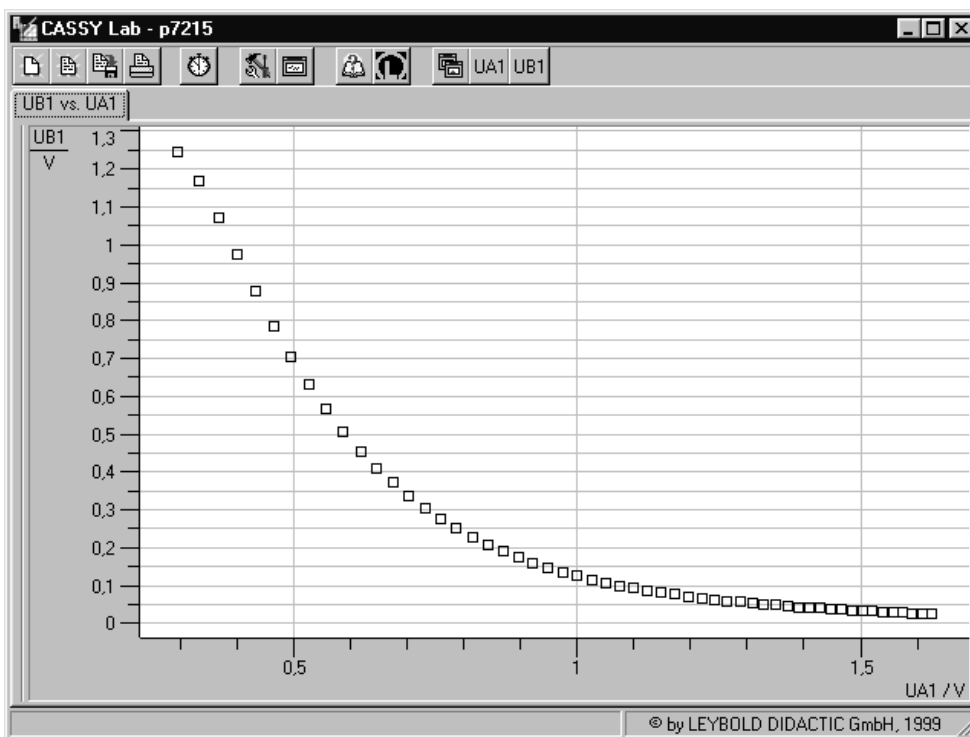


Fig. 3 Représentation des valeurs mesurées sous la forme $UB1 = f(UA1)$
 UA1: tension à la sortie pour la mesure de la température
 UB1: chute de tension sur le cristal de Ge pour un courant transversal de 2 mA

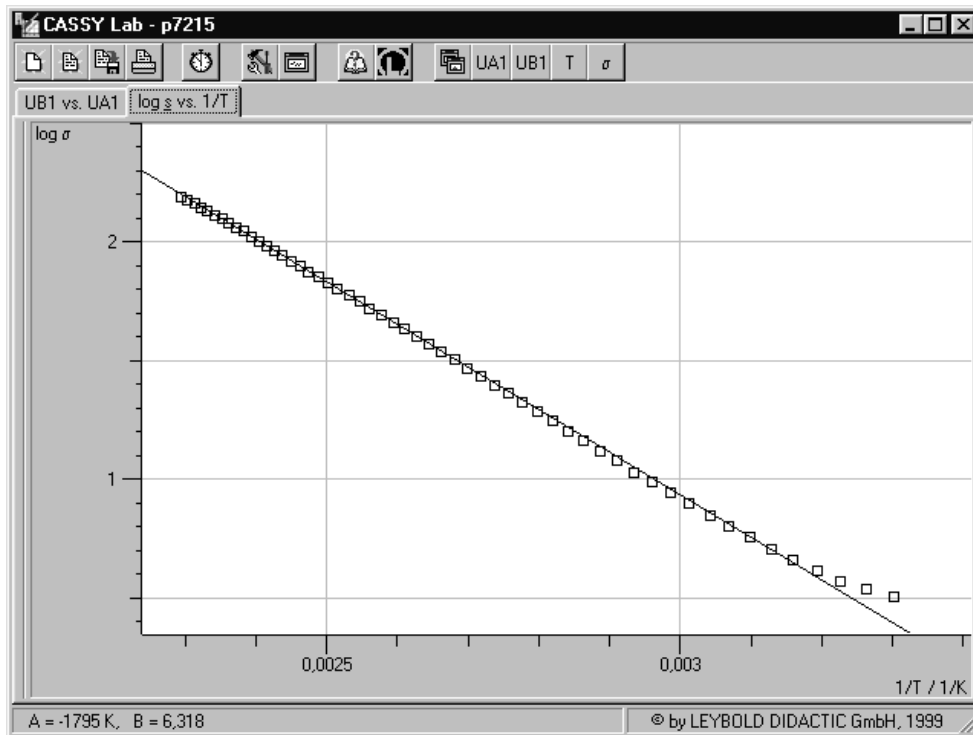


Fig. 4 Représentation des valeurs mesurées sous la forme $\log \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$

$$\sigma = \frac{2\text{mA}}{\text{UB1}} \cdot \frac{20\text{mm}}{10\text{mm} \times 1\text{mm}} \quad (\text{conductivité, cf. (XII)})$$

$$T = 100\text{K} \cdot \frac{\text{UA1}}{\text{V}} + 273,15\text{K} \quad (\text{température})$$

Exploitation et résultat

Dans le cas de la représentation $\log \sigma = f\left(\frac{1}{T}\right)$, les points de mesure sont en bonne approximation sur une droite de pente $A = -1795 \text{ K}$ (voir fig. 4)

D'après l'expression (IX), on a pour la pente de la droite

$$A = -\frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{E_g}{2 \cdot k} \quad (\text{XIII}).$$

avec $k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

C'est à partir de cette équation que l'on calcule pour l'intervalle de bande:

$$E_g = 1,149 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 0,71 \text{ eV}.$$

Valeurs littéraires:

$$E_g(0 \text{ K}) = 0,74 \text{ eV}, E_g(300 \text{ K}) = 0,67 \text{ eV}$$

Information supplémentaire

A basse température, des effets d'hystérésis se manifestent lors de la mesure de la température. Les points de mesure correspondants sont par conséquent sur la fig. 4 systématiquement au-dessus de la droite tracée.