



**OBJECTIF**

Calcul de l'énergie de gap (intervalle de bande) du germanium

**RESUME**

Les semi-conducteurs ne présentent une conductivité électrique mesurable qu'à des températures élevées. Cette dépendance de la température est due à la structure de bande des niveaux d'énergie électroniques avec une bande de valence, une bande de conduction et une zone intermédiaire qui, dans le cas d'un matériau semi-conducteur pur et non dopé, ne peut pas être occupée par des électrons. Au fur et à mesure que la température augmente, de plus en plus d'électrons sont agités thermiquement de la bande de valence vers la bande de

conduction et provoquent des « trous » en bande de valence. Sous l'effet d'un champ magnétique, les trous se comportent comme des particules de charge positive et contribuent comme les électrons à la densité de courant. Pour déterminer la conductivité du germanium pur et non dopé, l'expérience consiste à envoyer un courant constant à travers le cristal et à mesurer la baisse de tension en fonction de la température. Les données des mesures peuvent être considérés en première approximation comme une fonction exponentielle dans laquelle l'énergie de gap apparaît comme paramètre.

**EXERCICES**

- Mesurer la conductivité électrique du germanium non dopé en fonction de la température.
- Déterminer l'énergie de gap du germanium entre la bande de valence et la bande de conduction.

**NOTE**

Dans la pratique, la conductivité intrinsèque de semi-conducteurs purs non dopés joue un rôle secondaire. En règle générale, les cristaux présentent des défauts. Souvent, des cristaux très purs sont rendus conductibles par un dopage ciblé avec des atomes donneurs ou receveurs. Pour démontrer l'influence de ce dopage, il suffit de réaliser les études présentées ici sur du germanium dopé p et n. À température ambiante, la conductivité des cristaux dopés est nettement plus importante que celle du cristal pur, mais s'approche de la conductivité intrinsèque lorsque les températures sont élevée (voir fig. 4). La dépendance vis-à-vis de la température du coefficient Hall des cristaux de germanium utilisés sera étudiée en détail dans l'expérience UE6020200.



**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

Nombre	Appareil	Référence
1	Ge non dopé sur plaque à circuit imprimé	1008522
1	Appareil de base à effet Hall	1009934
1	Socle de serrage, 1000 g	1002834
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	Multimètre numérique P3340	1002785
1	Paire de cordons de sécurité, 75 cm	1002849
1	Paire de cordons de sécurité, 75cm, rouge/bleu	1017718
<b>En plus recommandé :</b>		
1	Ge dopé p sur plaque à circuit imprimé	1009810
1	Ge dopé n sur plaque à circuit imprimé	1009760
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540 ou
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	3B NETlab™	1000544

**GENERALITES**

La conductivité électrique est une grandeur qui dépend fortement de la nature du matériau. Par conséquent, il est courant de classer les matériaux en fonction de leur conductivité électrique. On appelle semi-conducteurs les corps solides qui ne présentent une conductivité électrique mesurable qu'à température élevée. Cette dépendance de la température est due à la structure de bande des niveaux d'énergie électronique comportant une bande de valence, une bande conduction et une zone intermédiaire qui, dans le cas des semi-conducteurs purs non dopés, ne peut pas être occupée par des électrons.

À l'état initial, la bande de valence est la bande la plus fortement occupée par les électrons et la bande de conduction est la bande immédiatement supérieure inoccupée. L'énergie de gap  $E_g$  est la différence

d'énergie entre la bande de valence et celle de conduction, c'est une grandeur qui dépend de la nature du matériau. Pour le germanium, le gap est d'environ 0,7 eV. Au fur et à mesure que la température augmente, de plus en plus d'électrons sont agités thermiquement de la bande de valence vers la bande de conduction, provoquant des « trous » dans la bande de valence. Ces trous – appelés aussi électrons défectueux ou absences d'électrons – se comportent comme des particules de charge positive sous l'effet du champ magnétique  $E$  et contribuent autant que les électrons à la densité de courant :

$$(1) \quad j = \sigma \cdot E$$

$\sigma$  : conductivité électrique du matériau semi-conducteur (voir Fig. 1). Les électrons et les trous se déplacent à des vitesses moyennes différentes telles que

$$(2) \quad v_n = -\mu_n \cdot E \quad \text{et} \quad v_p = \mu_p \cdot E$$

$\mu_n$  : mobilité des électrons  
 $\mu_p$  : mobilité des trous

Cette conductivité électrique rendue possible par agitation des électrons de la bande de valence de conduction est ce qu'on appelle la conductivité intrinsèque.

Le nombre d'électrons dans la bande de conduction correspond dans l'équilibre thermique au nombre de trous dans la bande de valence. La densité de courant pour la concentration intrinsèque s'exprime alors comme suit :

$$(3) \quad j_i = -e \cdot n_i \cdot v_n + e \cdot n_i \cdot v_p = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot E ;$$

c'est-à-dire que la conductivité intrinsèque est

$$(4) \quad \sigma_i = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) ,$$

où la dépendance de la température de la concentration de porteurs  $n_i$  pour les électrons ou les trous s'écrit :

$$(5) \quad n_i = 2 \cdot \left( \frac{2\pi}{h^2} \cdot \sqrt{m_n m_p} \cdot kT \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

$$k = 8,617 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} : \text{constante de Boltzmann,}$$

- $h$  : constante de Planck
- $m_n$  : masse effective des électrons
- $m_p$  : masse effective des trous
- $T$  : température de l'échantillon

Les mobilités  $\mu_n$  et  $\mu_p$  sont fonction de la température elles aussi. Dans la plage de température supérieure à la température ambiante, on a :

$$(6) \quad \mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$$

Dans ce cas cependant, le terme dominant pour la dépendance vis-à-vis de la température est donné par la fonction exponentielle. C'est pourquoi la conductivité intrinsèque pour des températures plus élevées peut être représentée sous la forme suivante :

$$(7) \quad \sigma_i = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) .$$

Pour déterminer la conductivité du germanium pur non dopé, l'expérience consiste à envoyer un courant constant  $I$  à travers le cristal et à mesurer la baisse de tension en fonction de la température. À partir des données de mesure et sur la base de la relation

$$(8) \quad U = a \cdot E \quad \text{ou} \quad I = b \cdot c \cdot j$$

$a, b, c$  : dimensions des cristaux,

on calcule la conductivité électrique  $\sigma$  avec l'équation

$$(9) \quad \sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{a}{b \cdot c}$$

**EVALUATION**

L'équation (7) peut être réécrite sous la forme :

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - E_g \cdot \frac{1}{2kT}$$

Par conséquent, on pose  $y = \ln \sigma$  en fonction de  $x = \frac{1}{2kT}$  et on détermine l'énergie du gap  $E_g$  à partir de la pente de la droite résultante.

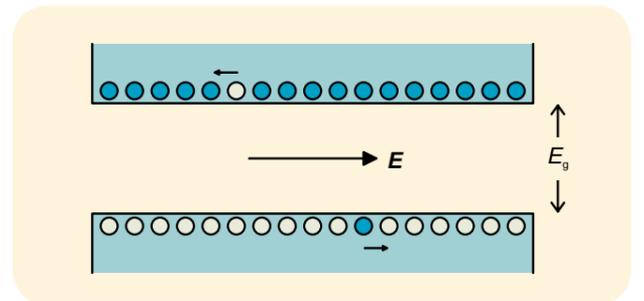


Fig. 1 Structure de bande du semi-conducteur avec un électron dans la bande de conduction et un trou dans la bande de valence qui se déplacent sous l'effet d'un champ électrique  $E$

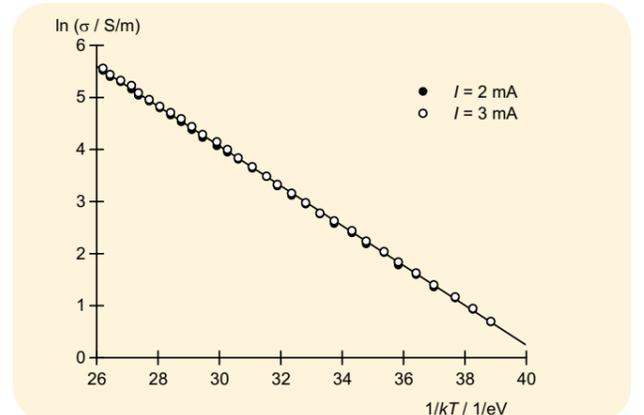


Fig. 3 Représentation pour déterminer l'écart de bande  $E_g$  dans le germanium

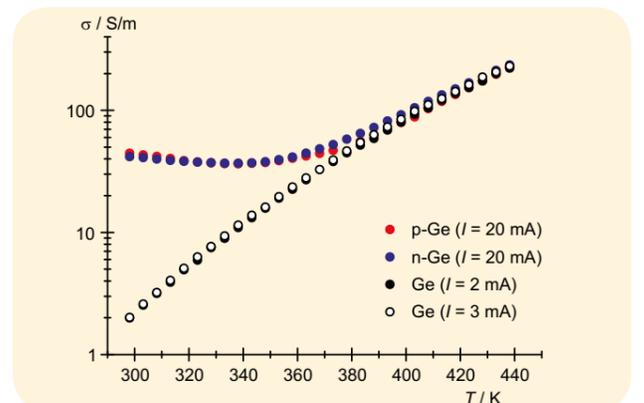


Fig. 4 Comparaison des conductivités du germanium et du germanium dopé