

# Effet Hall dans du germanium dopé n et p (teslametre)



Physique

Physique moderne

Physique du solide



Niveau de difficulté

difficile



Taille du groupe

2



Temps de préparation

45+ procès-verbal



Délai d'exécution

45+ procès-verbal

This content can also be found online at:


<http://localhost:1337/c/65dc95a55f8e830002aac706>

PHYWE

# Informations générales

## Application

PHYWE



Fig. 1 : Montage expérimental

L'effet Hall est largement utilisé partout où des champs magnétiques apparaissent dans la matière solide. Une application particulièrement importante est son utilisation dans les détecteurs à semi-conducteurs.

Cette expérience offre la possibilité d'acquérir une première compréhension de l'effet Hall.

## Autres informations (1/3)

PHYWE

**Connaissances**

préalables

**Principe**

de base

Les connaissances préalables à cette expérience se trouvent dans la section Théorie.

La résistivité et la tension de Hall d'un échantillon rectangulaire de germanium sont mesurées en fonction de la température et du champ magnétique. L'espacement des bandes, la conductivité spécifique, le type de porteurs de charge et la mobilité des porteurs de charge sont déterminés à partir des mesures.

## Autres informations (2/3)

PHYWE

**Objectif**

d'apprentissage

**Tâches**

Le but de cette expérience est d'étudier l'effet Hall dans le n-germanium et le p-germanium.

Les tâches suivantes sont effectuées avec des spécimens dopés n et dopés p.

1. La tension du hall  $U_H$  est mesurée à température ambiante et à champ magnétique constant en fonction du courant de commande  $I_P$
2. La tension à travers l'échantillon  $U_P$  est mesurée à température ambiante et à courant de commande constant en fonction de l'induction magnétique B

## Autres informations (3/3)

PHYWE



### Tâches

3. La tension aux bornes de l'échantillon  $U_P$  est mesurée à courant de commande constant en fonction de la température T. L'espacement des bandes du p- et du n-germanium est calculé à partir des mesures.
4. La tension de Hall  $U_H$  est mesurée en fonction de l'induction magnétique B, à température ambiante. Le signe des porteurs de charge et la constante de Hall  $R_H$  ainsi que la mobilité du hall  $\mu_H$  et la concentration de porteurs p sont calculées à partir des mesures.
5. La tension de Hall  $U_H$  est mesurée en fonction de la température T à induction magnétique constante.

## Théorie (1/2)

PHYWE

Si un courant I circule dans une bande conductrice de section rectangulaire et si la bande est traversée par un champ magnétique perpendiculaire à la direction du courant, une tension - dite tension de Hall - est produite entre deux points superposés sur les côtés opposés de la bande.

Ce phénomène résulte de la force de Lorentz : les porteurs de charge à l'origine du courant qui traverse l'échantillon sont déviés dans le champ magnétique B en fonction de leur signe et de leur vitesse v :

$$\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B})$$

où F est la force agissant sur les porteurs de charge et e est la charge élémentaire.

Comme les porteurs de charge négatifs et positifs dans les semi-conducteurs se déplacent dans des directions opposées, ils sont également déviés dans des directions opposées.

## Théorie (2/2)

PHYWE

Le type de porteur de charge à l'origine du flux de courant peut donc être déterminé à partir de la polarité de la tension de Hall, en connaissant la direction du courant et celle du champ magnétique. Cela signifie que si la direction du courant et du champ magnétique est connue, la polarité de la tension de Hall nous indique si le courant est principalement dû à la dérive de chargeurs négatifs ou à la dérive de chargeurs positifs.

$$Z=R+i(\omega L-1/\omega C)$$

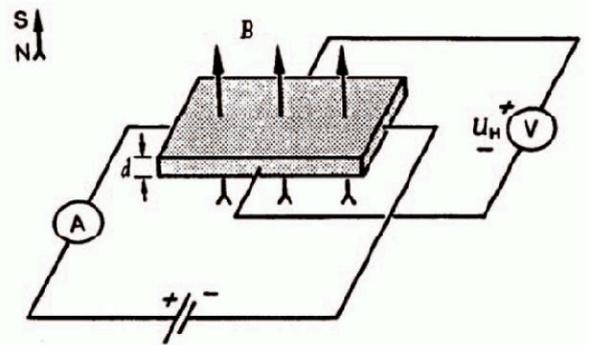


Fig. 2 : Effet Hall sur un spécimen rectangulaire. La polarité de la tension de Hall indiquée correspond à des porteurs de charge négatifs.

## Équipement

Position	Matériel	No. d'article	Quantité
1	Module de base pour effet Hall, USB	11801-01	1
2	Plaque pour effet Hall, Germanium dopé p	11805-01	1
3	Plaque pour effet Hall, Germanium dopé n	11802-01	1
4	PHYWE Teslamètre numérique	13610-93	1
5	Sonde Hall, tangentielle, capuchon de protection	13610-02	1
6	PHYWE Alimentation 0...12 V CC, 2 A / 6 V, 12 V CA, 5 A	13506-93	1
7	Multimètre digital 3 1/2 digit avec thermocouple NiCr-Ni	07122-00	1
8	Bobine, 600 spires	06514-01	2
9	Noyau en U, tôle magnétique laminé	06501-00	1
10	Paire de pièces polaires, planes, 30 x 30 x 48 mm	06489-00	1
11	Trépied PHYWE	02002-55	1
12	Noix double expert	02054-00	1
13	Tige en acier inox 18/8, l = 250 mm, d = 10 mm	02031-00	1
14	Fil de connexion, 32 A, 500 mm, rouge	07361-01	3
15	Fil de connexion, 32 A, 500 mm, bleu	07361-04	2
16	Fil de connexion, 32 A, 750 mm, noir	07362-05	2

PHYWE



# Configuration et procédure

## Configuration

PHYWE

Le montage expérimental est présenté à la figure 1. L'échantillon d'essai doit être placé dans le module à effet Hall par la rainure de guidage. Le module est directement connecté à l'alimentation 12 V ~ de l'unité de puissance sur l'entrée c.a. à l'arrière du module.

La plaque doit être approchée de l'aimant avec beaucoup de précautions, pour ne pas endommager le cristal, et surtout pour éviter de plier la plaque. Elle doit être placée au centre, entre les pièces polaires.

La tension de Hall et la tension aux bornes de l'échantillon sont mesurées avec un multimètre. Pour cela, on utilise les prises situées sur la face avant du module. Le courant et la température peuvent être facilement lus sur l'écran intégré du module.

Le champ magnétique doit être mesuré avec le teslamètre par l'intermédiaire d'une sonde de Hall, qui peut être directement placée dans la rainure du module comme indiqué sur la figure 1. Ainsi, vous pouvez être sûr que le flux magnétique est mesuré directement sur l'échantillon Ge.

## Procédure (1/3)

PHYWE

- Connectez le multimètre aux prises de la tension de Hall.  $U_H$  sur la face avant du module. Mettez l'écran du module en mode "courant". Réglez le courant  $I_P$  à zéro et calibrer la tension de Hall  $U_H$ . Réglez le champ magnétique à une valeur de 250 mT en modifiant la tension et le courant de l'alimentation. Déterminez la tension de Hall  $U_H$  en fonction du courant  $I_P$  de -30 mA à 30 mA par pas de 5 mA. Vous obtiendrez une mesure typique comme celle de la figure 3 (a) et (b) pour le germanium n et p, respectivement.
- Connecter le multimètre aux prises de l'échantillon de tension  $U_P$  sur la face avant du module. Réglez le courant de commande  $I_P$  à 30 mA. Déterminer la tension de l'échantillon  $U_P$  en fonction de l'induction magnétique positive B jusqu'à 300 mT. Calculez le changement de résistance des spécimens à partir des mesures et tracez les résultats sur des graphiques comme indiqué sur la Fig. 4.

## Procédure (2/3)

PHYWE

- Au début, définissez la valeur actuelle  $I_P$  à une valeur de 30 mA. Le champ magnétique est désactivé. Le courant  $I_P$  reste presque constant pendant la mesure, mais la tension change  $U_P$  en fonction d'un changement de température T. Réglez l'écran en mode température et assurez-vous que l'écran fonctionne en mode température pendant la mesure. Démarrez la mesure en activant la bobine de chauffage à l'aide du bouton "on/off" situé à l'arrière du module. L'échantillon est chauffé jusqu'à une température maximale d'environ 10°C. 145 – 150 °C et le module arrêtera automatiquement le chauffage. Déterminer la courbe de refroidissement de la variation de la tension  $U_P$  en fonction de la variation de la température T pour une plage de température allant de 140 °C à la température ambiante. Tracez les résultats comme suit  $\frac{1}{U_p} \left[ \frac{1}{V} \right]$  vs.  $\frac{1000}{T+273} \left[ \frac{1}{1000 K} \right]$  et vous obtiendrez des courbes typiques comme celles de la Fig. 5.

## Procédure (3/3)

PHYWE

- Connectez le multimètre aux prises de la tension de Hall.  $U_H$  sur la face avant du module. Réglez la valeur actuelle de l'option  $I_P$  à une valeur de zéro et calibrez la tension de Hall  $U_H$ . Maintenant, réglez le courant à une valeur de 30 mA. Déterminez la tension de Hall  $U_H$  en fonction de l'induction magnétique B. Commencez par -300 mT en changeant la polarité du courant de la bobine sur l'alimentation et augmentez l'induction magnétique par pas de près de 20 mT. Au point zéro, il faut à nouveau changer la polarité. Une mesure typique est présentée à la figure 6.
- Définir la valeur actuelle  $I_P$  à 30 mA et l'induction magnétique B à 300 mT. Réglez l'affichage en mode température et assurez-vous que l'affichage fonctionne en mode température pendant la mesure. En suivant la même procédure que pour la tâche 3 ci-dessus, déterminez la tension de Hall  $U_H$  en fonction de la température T. Vous obtiendrez des courbes comme celles de la Fig. 7.

PHYWE



## Évaluation

## Tâche 1 (1/2)

PHYWE

La figure 3 montre que, pour le germanium n et le germanium p, il existe une relation linéaire entre la tension de Hall  $U_H$  et le courant de commande  $I_P$ :

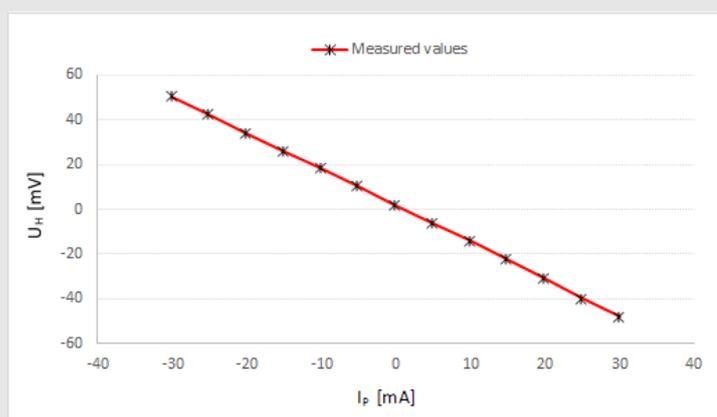
$$U_H = \alpha \cdot I_P$$

où  $\alpha$  est le facteur de proportionnalité.

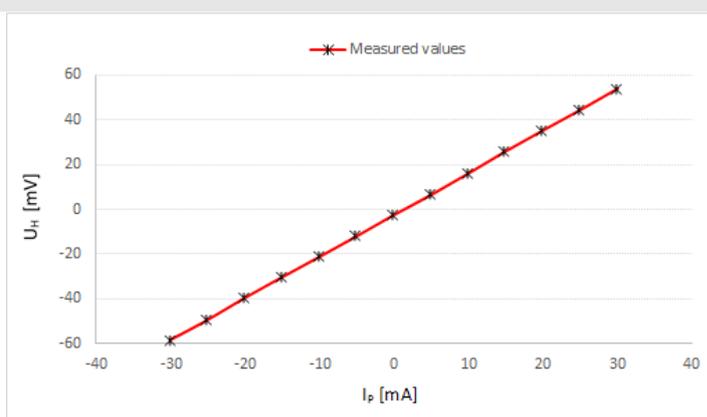
Comme les porteurs de charge dans le germanium n et p sont différents, la tendance de la relation linéaire entre  $U_H$  et  $I_P$  est inversé, comme le montre la figure 3 (a) et (b).

## Tâche 1 (2/2)

PHYWE



(a) n-Germanium



(b) p-Germanium

Fig. 3 : Tension de Hall  $U_H$  en fonction du courant  $I_P$  avec  $B = 250$  mT et  $T = 300$  K.

## Tâche 2 (1/2)

PHYWE

La modification de la résistance de l'échantillon due au champ magnétique  $B$  est associée à une réduction du libre parcours moyen des porteurs de charge. Comme le courant  $I_P$  est constante pendant la mesure, le changement de résistance est calculé comme suit

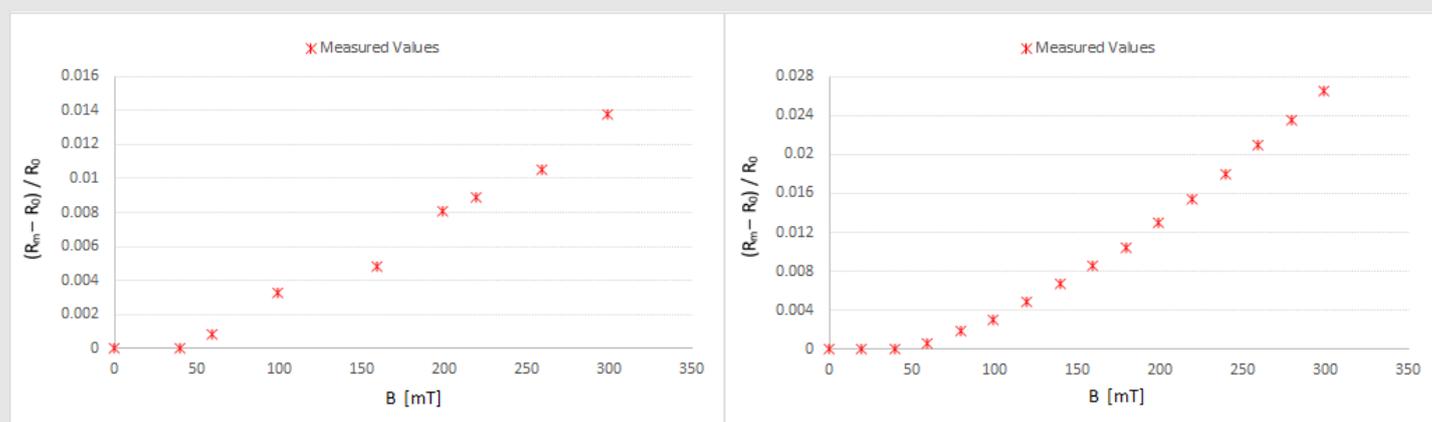
$$\frac{R_m - R_0}{R_0} = \frac{U_m - U_0}{U_0}$$

où  $R_m, U_m$  sont la résistance et le voltage de l'échantillon avec l'existence d'un champ magnétique et  $R_0, U_0$  sont la résistance et la tension de l'échantillon lorsque le champ magnétique  $B = 0$ .

Les figures 4 (a) et (b) montrent le changement non linéaire de la résistance lorsque l'intensité du champ augmente pour le germanium n et p, respectivement.

## Tâche 2 (2/2)

PHYWE



(a) n-Germanium (b) p-Germanium  
Fig. 4 : Modification de la résistance en fonction du flux magnétique  $B$  avec  $I_P = 30$  mA et  $T = 300$  K.

## Tâche 3 (1/3)

PHYWE

Dans la région de la conductivité intrinsèque, nous avons

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right)$$

où  $\sigma$  = conductivité,  $E_g$  = énergie de la bande interdite,  $k$  = constante de Boltzmann,  $T$  = température absolue. En prenant le logarithme des deux côtés de l'équation ci-dessus, on obtient

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 + \frac{E_g}{2k} \cdot T^{-1}$$

Si le logarithme de la conductivité  $\ln \sigma$  est tracé en fonction de l'inverse de la température  $1/T$ , une relation linéaire est obtenue avec une pente à partir de laquelle  $E_g$  peuvent être déterminés.

## Tâche 3 (2/3)

PHYWE

D'après les valeurs mesurées indiquées à la figure 5, les pentes des lignes de régression sont les suivantes

$$b = -\frac{E_g}{2k} = -2.87 \cdot 10^3 \text{ K avec un écart-type } s_b = \pm 0.3 \cdot 10^3 \text{ K pour le n-Germanium, et}$$

$$b = -\frac{E_g}{2k} = -4.18 \cdot 10^3 \text{ K avec un écart-type } s_b = \pm 0.07 \cdot 10^3 \text{ K pour le p-Germanium.}$$

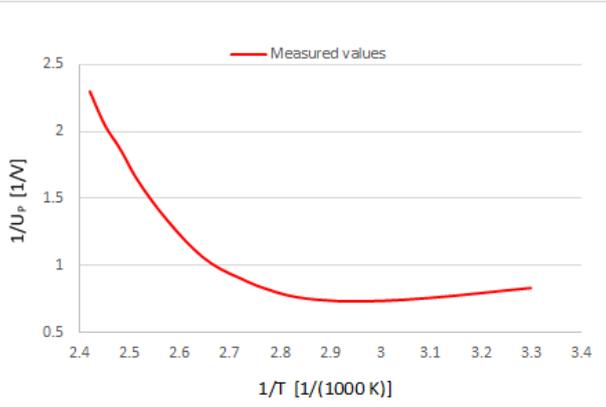
Depuis

$$k = 8.625 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} \text{ on obtient } E_g = b \cdot 2k = (0.50 \pm 0.04) \text{ eV pour le n-Germanium, et}$$

$$E_g = b \cdot 2k = (0.72 \pm 0.03) \text{ eV pour le p-Germanium.}$$

## Tâche 3 (3/3)

PHYWE



(a) n-Germanium

(b) p-Germanium

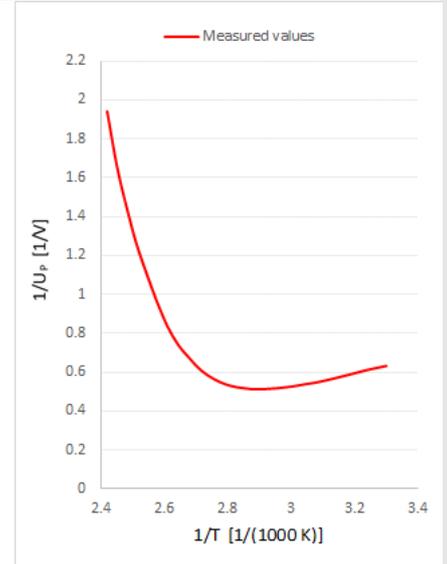


Fig. 5 : Tension d'échantillon réciproque  $1/U_P$  tracé en fonction de la température absolue réciproque  $1/T$  avec  $I_P = 30$  mA et aucun flux magnétique.

## Tâche 4 (1/5)

PHYWE

Avec les directions du courant de commande et du champ magnétique indiquées à la figure 2, les porteurs de charge donnant naissance au courant dans l'échantillon sont déviés vers le bord avant de l'échantillon. Par conséquent, si (dans une sonde dopée n) les électrons sont les porteurs de charge prédominants, le bord avant deviendra négatif, et, avec la conduction des trous dans un échantillon dopé p, positif. La conductivité  $\sigma_0$  la mobilité de la charge et du porteur  $\mu_H$  et la concentration de porteurs de charge  $p$  sont liées par la constante de Hall  $R_H$ :

$$R_H = \frac{U_H}{B} \cdot \frac{d}{I}$$

$$\mu_H = R_H \cdot \sigma_0$$

$$p = \frac{1}{e} \cdot R_H$$

La figure 6 montre une connexion linéaire entre la tension de Hall  $U_H$  et le champ magnétique  $B$ . Avec les valeurs utilisées dans la Fig. 6, la ligne de régression avec la formule

## Tâche 4 (2/5)

PHYWE

$$U_H = U_0 + b \cdot B$$

a une pente  $b = 0.144 \text{ VT}^{-1}$  avec un écart-type  $s_b \pm 0.004 \text{ VT}^{-1}$  pour le p-Germanium, et  $b = 0.125 \text{ VT}^{-1}$  avec un écart-type  $s_b \pm 0.003 \text{ VT}^{-1}$  pour le n-Germanium.

La constante de Hall  $R_H$  devient donc, selon

$$R_H = \frac{U_H}{B} \cdot \frac{d}{I} = b \cdot \frac{d}{I}$$

où l'épaisseur de l'échantillon  $d = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  et  $I = 30 \text{ mA}$ .

$$R_H = 4.8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{As}}$$

avec l'écart-type

$$S_{RH} = 0.2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{As}} \text{ pour le n-Germanium, et}$$

$$R_H = 4.17 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{As}}$$

avec l'écart-type

$$S_{RH} = 0.08 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{As}} \text{ pour le p-Germanium}$$

## Tâche 4 (3/5)

PHYWE

La conductivité à température ambiante est calculée à partir de la longueur  $l$  de l'échantillon, de la section  $A$  de l'échantillon et de la résistance  $R$  de l'échantillon comme suit :

$$\sigma_0 = \frac{l}{R \cdot A}$$

Avec les valeurs mesurées

$$l = 0.02 \text{ m}, R = 37.3 \Omega \text{ pour n-Ge}, R = 35.5 \Omega \text{ pour p-Ge}, A = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

nous avons  $\sigma_0 = 53.6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  pour le n-Germanium, et

$$\sigma_0 = 57.14 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \text{ pour le p-Germanium}$$

La mobilité du hall  $\mu_H$  des porteurs de charge peut maintenant être déterminée à partir de

$$\mu_H = R_H \cdot \sigma_0$$

En utilisant les mesures données ci-dessus, nous obtenons

$$\mu_H = 0.257 \pm 0.005 \text{ m}^2/\text{Vs} \text{ pour le n-Germanium, et}$$

$$\mu_H = 0.238 \pm 0.005 \text{ m}^2/\text{Vs} \text{ pour le p-Germanium}$$

## Tâche 4 (4/5)

PHYWE

La concentration de trous  $p$  de l'échantillon dopé  $p$  est calculée à partir de

$$p = \frac{1}{e} \cdot R_H$$

En utilisant la valeur de la charge élémentaire  $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

nous obtenons  $p = 14.9 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ .

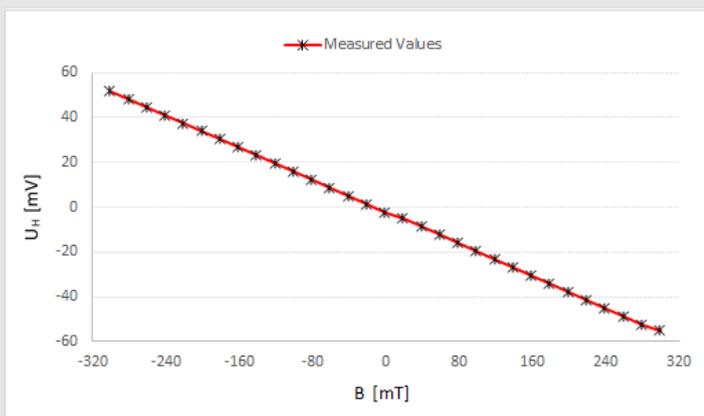
La concentration d'électrons  $n$  de l'échantillon dopé  $n$  est donnée par

$$n = \frac{1}{e \cdot R_H}$$

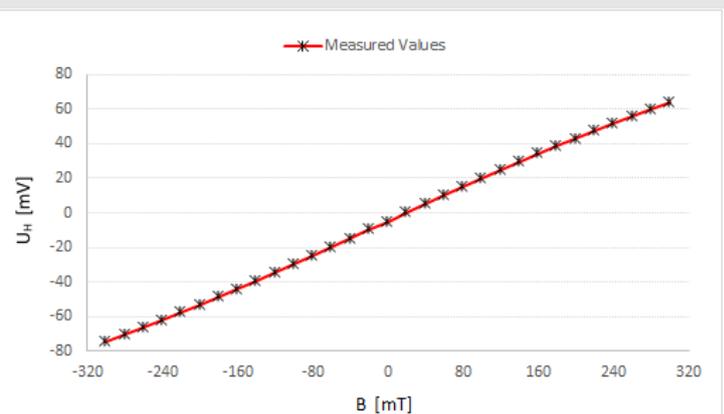
En prenant la charge élémentaire  $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$  nous obtenons  $n = 13.0 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$

## Tâche 4 (5/5)

PHYWE



(a) n-Germanium



(b) p-Germanium

Fig. 6 : Tension de Hall  $U_H$  en fonction du flux magnétique  $B$  avec  $I_P = 30 \text{ mA}$  et  $T = 300 \text{ K}$ .

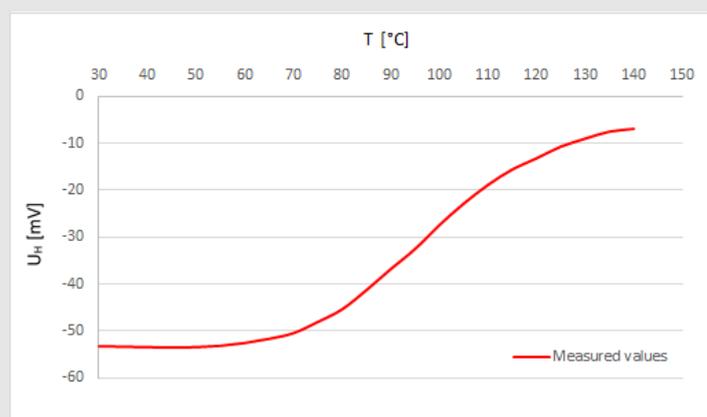
## Tâche 5 (1/2)

PHYWE

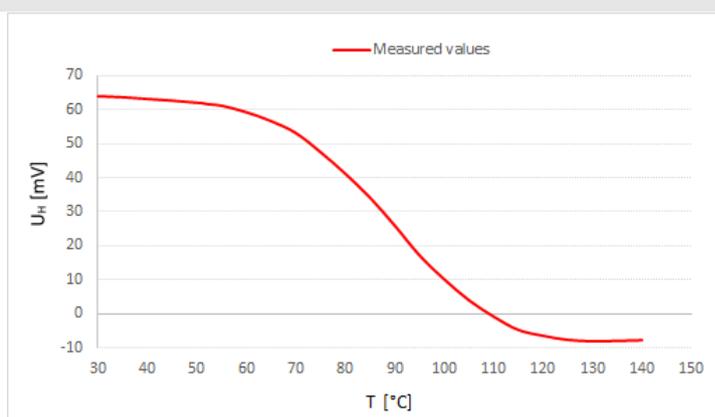
La Fig. 7 montre que la tension de Hall diminue avec l'augmentation de la température pour le germanium n et le germanium p. Comme l'expérience a été réalisée avec un courant constant, on peut supposer que l'augmentation du nombre de porteurs de charge (transition de la conduction extrinsèque à la conduction intrinsèque) avec la réduction associée de la vitesse de dérive  $v$  est responsable de ce phénomène. (Le même courant pour un nombre plus élevé de porteurs de charge signifie une vitesse de dérive plus faible). La vitesse de dérive est à son tour liée à la tension de Hall par la force de Lorentz.

## Tâche 5 (2/2)

PHYWE



(a) n-Germanium



(b) p-Germanium

Fig. 7 : Tension de Hall  $U_H$  en fonction de la température  $T$  avec  $I_P = 30$  mA et  $B = 300$  mT.