

Instrument universel de mesure des effets galvanomagnétiques dans les semiconducteurs

Autor(en): **Fivaz, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **36 (1963)**

Heft VIII

PDF erstellt am: **06.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-113415>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Instrument Universel de Mesure des Effets galvanomagnétiques dans les Semiconducteurs.

par **R. Fivaz**

Cyanamid European Research Institute, Cologny-Genève

(22 VI 63)

Résumé: L'appareil consiste en un pont de mesure à basse impédance du type DAUPHINEE et MOOSER, complété par un transformateur d'impédance décrit en détail, comprenant des électromètres à très grande résistance d'entrée. La gamme de mesure du pont est ainsi étendue jusqu'à $10^{12} \Omega$, et les mobilités de HALL sont mesurables avec une précision constante sur toute la gamme.

Instrument Universel de Mesure des Effets galvanomagnétiques dans les Semiconducteurs.

1. Introduction

Pour répondre à tous les besoins d'un laboratoire de semiconducteurs on a construit un appareil de mesure d'effets galvanomagnétiques sous une forme très compacte et couvrant toute la gamme de résistivité d'intérêt pratique. Il consiste essentiellement en un pont de mesure à basse impédance, complété par un transformateur d'impédance à très haute résistance d'entrée. Il peut ainsi mesurer des résistances de $10^{-3} \Omega$ à $10^{12} \Omega$; la sensibilité aux tensions de HALL est suffisante pour mesurer des mobilités de l'ordre de $1 \text{ cm}^2/\text{V sec.}$ avec un champ magnétique de 10^4 œersteds. La partie haute impédance de l'appareil fait l'objet essentiel du présent article.

2. Principes de mesure

Deux circuits de mesure distincts sont utilisés suivant la valeur de l'impédance totale insérée: résistance propre de l'échantillon et résistances des contacts avec les sondes de mesure.

a) *Basse impédance:* Les effets galvanomagnétiques sont mesurés en courant pulsé par le comparateur de potentiel à choppers de DAUPHINEE et MOOSER¹), qui a l'avantage de fournir des mesures dénuées de tout effet parasite (tension thermiques, résistances de contact, etc.) et nécessitant une opération unique d'équilibrage de

tension sur un potentiomètre. La sensibilité est suffisante pour des impédances de mesure inférieures à $10^5 \Omega$. Ce circuit peut également comparer des tensions continues sous basse impédance²⁾, ce qui sera utilisé lors de la mesure d'échantillons de haute résistivité.

b) *Haute impédance*: Lorsque l'impédance totale à insérer dans un circuit de mesure augmente, les constantes de temps croissent de sorte que seules des mesures en courant continu sont possibles. Dans ce cas, on obtient la résistivité et l'effet HALL en alimentant en courant continu l'échantillon mis en série avec une résistance étalon, et en faisant le rapport de la tension mesurée entre des électrodes de potentiel convenablement placées sur l'échantillon et de la tension aux bornes de la résistance étalon. Les tensions recherchées doivent être mesurées à courant nul, en l'occurrence au moyen de 2 électromètres dont le courant d'entrée est inférieur à $10^{-14} A$. Les électromètres sont montés de façon à constituer un transformateur d'impédance, restituant la tension entre les électrodes de contact sous une impédance assez basse pour être mesurée par le circuit à choppers précédent, connecté comme comparateur de tensions continues. Cette mesure à courant nul n'a pas d'influence sur le transformateur et consiste à équilibrer le même potentiomètre que lors des mesures à basse impédance. Il y a également une seule opération d'équilibrage par mesure de tension.

3. Circuit à choppers

Comme ce circuit a déjà été décrit en détail^{1,2)} on n'indiquera ici que les 2 modes d'utilisation en basse (Fig. 1) et en haute impédance (Fig. 2, partie inférieure). Le montage est tel qu'on peut passer d'un mode à l'autre par simple commutation. Dans la réalisation présente, l'indicateur de zéro est constitué par un amplificateur électronique basse fréquence de gain variable dont la sortie est démodulée par un chopper synchrone avec les autres; la tension continue résultante est mesurée par un voltmètre ordinaire.

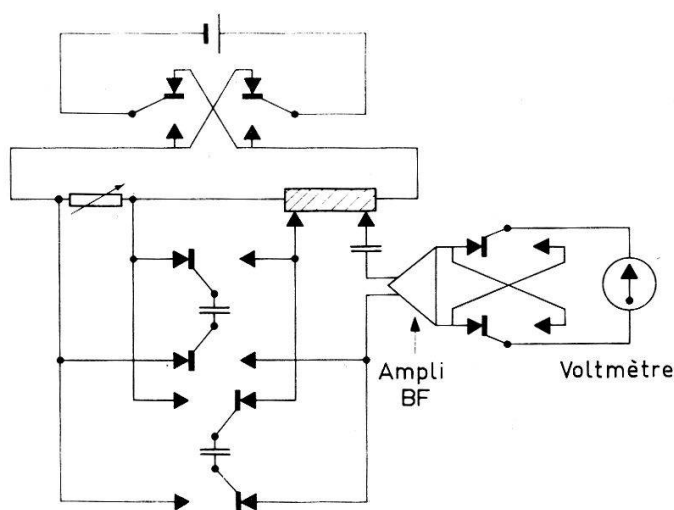


Figure 1

Pont de mesure à Choppers de DAUPHINEE et MOOSER.
 Connection en comparateur de résistances à courant pulsé

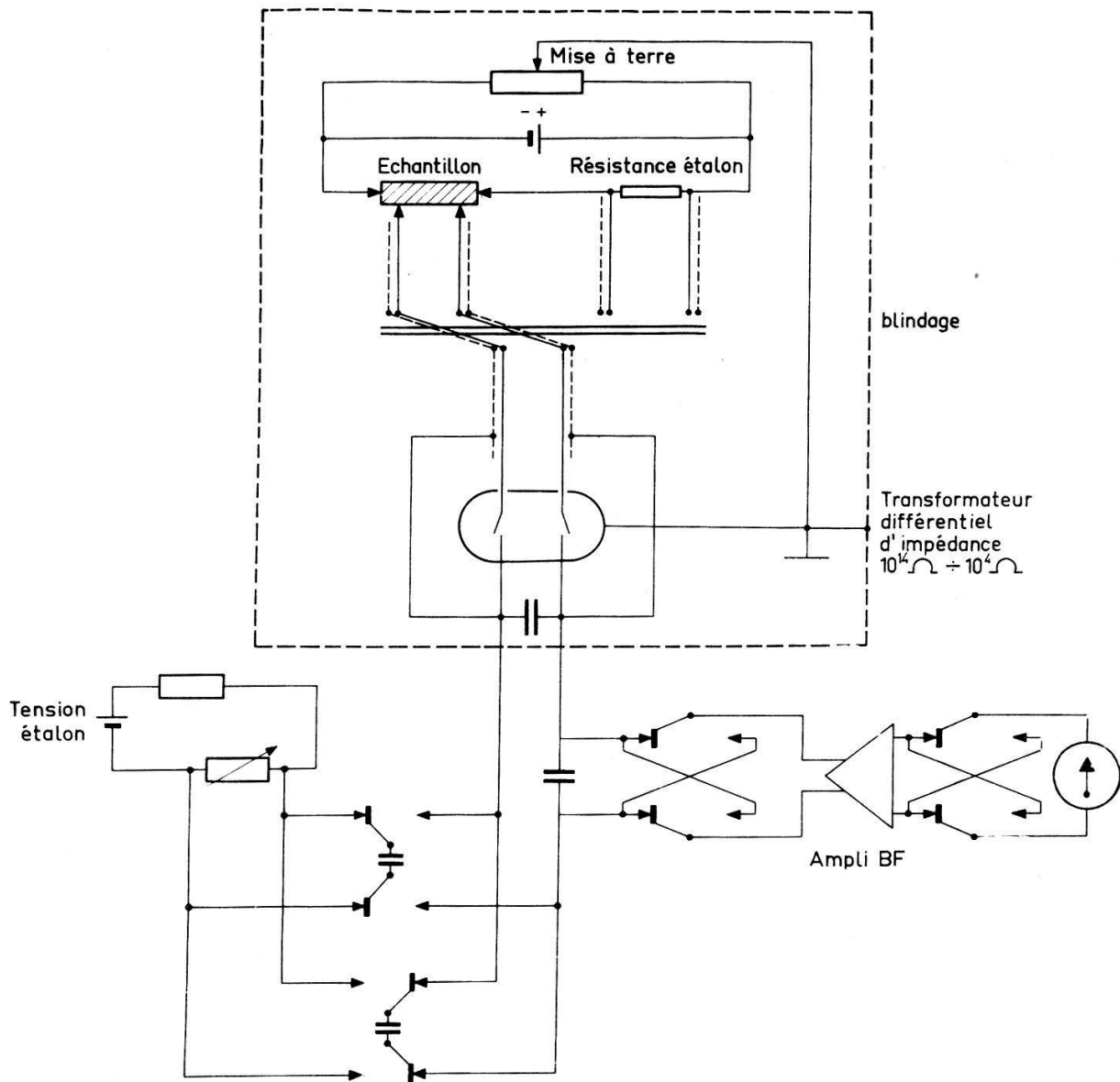


Figure 2

Circuit de mesure en haute impédance.

Le pont de mesure à chopper est connecté en comparateur de tensions continues

4. Circuit de mesure en haute impédance

La mesure de faibles tensions continues (particulièrement pour l'effet HALL) sous haute impédance pose des problèmes de stabilité bien connus; il s'agit particulièrement d'éliminer tous signaux parasites provenant de champs extérieurs ou des alimentations des électromètres, ou encore de contacts peu stables qui ont tendance à fournir de grandes composantes de bruit dans les très basses fréquences. Il importe que les circuits électroniques eux-mêmes contribuent à remédier à ces diverses origines de bruit si l'on désire atteindre les limites naturelles de stabilité inhérentes aux seuls électromètres.

Comme les électrodes de mesure sont *symétriques* du point de vue électrique, la conservation de cette symétrie le long de toute la chaîne de mesure est un facteur de stabilité essentiel, particulièrement vis-à-vis des fluctuations des tensions d'alimenta-

tion et des influences thermiques sur les caractéristiques électriques des composants des circuits. Cette contrainte suggère l'idée d'un appareil *différentiel* à deux entrées symétriques à haute impédance, détectant directement la différence de potentiel entre les électrodes et insensible à la valeur absolue de leur potentiel par rapport à la terre. Le circuit d'alimentation de l'échantillon peut alors être mis à terre en un point quelconque. La partie haute impédance de la figure 2 est établie d'après ces principes. On voit en outre que les tensions de sortie commandent un premier écran autour des sondes de potentiel, ce qui découple les capacités à terre de ces connections et supprime les influences parasites provenant de champs extérieurs. Enfin le circuit haute impédance est mis à terre par un potentiomètre à régler de façon que les sondes gardent un potentiel voisin de la terre, point où l'impédance d'entrée est maximum, comme on le verra plus loin.

5. Electromètres suiveurs

Les deux parties symétriques du transformateur d'impédance sont en fait des amplificateurs électroniques continus dont le gain est fixe et approche l'unité à quelques pourmilles près. Le suiveur de cathode ordinaire est loin d'atteindre ces caractéristiques, mais il peut être corrigé en contrôlant la plaque du tube de manière à en maintenir le point de fonctionnement rigoureusement fixe³). Il en résulte une notable augmentation de l'impédance d'entrée et le gain tend vers l'unité.

L'application de cette méthode a conduit au schéma de la figure 3 représentant une des moitiés du transformateur d'impédance. L'électromètre d'entrée V_1 est monté en suiveur de cathode dans un circuit BALDWIN-FARMER, qui garantit en première approximation que son point de fonctionnement est indépendant du potentiel de grille. Une deuxième approximation est obtenue en agissant sur la plaque de V_2 proportionnellement au signal d'entrée, de sorte que ce tube garde aussi un point de fonctionnement constant. Cette action est assurée par l'amplificateur non déphasé $V_3 - V_4 - V_5$ en contre-réaction. On reconnaît là un montage classique en stabilisateur de tension qui assure une très bonne stabilité vis-à-vis des variations de la haute tension d'alimentation.

Ainsi conditionné, l'électromètre suiveur fonctionne à courant constant. On peut alors trouver sur le diviseur P_1 un point qui aura sous basse impédance un potentiel identique à celui de la grille. C'est le point de sortie, dont on peut régler le gain par rapport à l'entrée autour de l'unité en agissant sur les résistances de contre-réaction. Les potentiomètres P_1 et P_2 sont réglés de manière à compenser d'éventuelles dissymétries entre les deux amplificateurs et à amener la sortie à la même tension que l'entrée. Si le gain ne dépasse pas l'unité, l'amplificateur reste stable lorsqu'on ramène aux points de sortie les impédances de charge des grilles des électromètres. Ce rétrocouplage a plusieurs effets avantageux :

- augmentation de l'impédance d'entrée dans le rapport inverse du défaut de gain par rapport à l'unité: la résistance de grille peut être choisie notablement plus petite que l'impédance recherchée et elle court-circuite les résistances de fuite de la grille et de sa connection qui ont tendance à être peu stables.
- diminution dans le même rapport de la capacité à terre de la grille; on peut donc envisager des connections longues entre sondes de mesures et électromètres en gardant une constante de temps raisonnable.

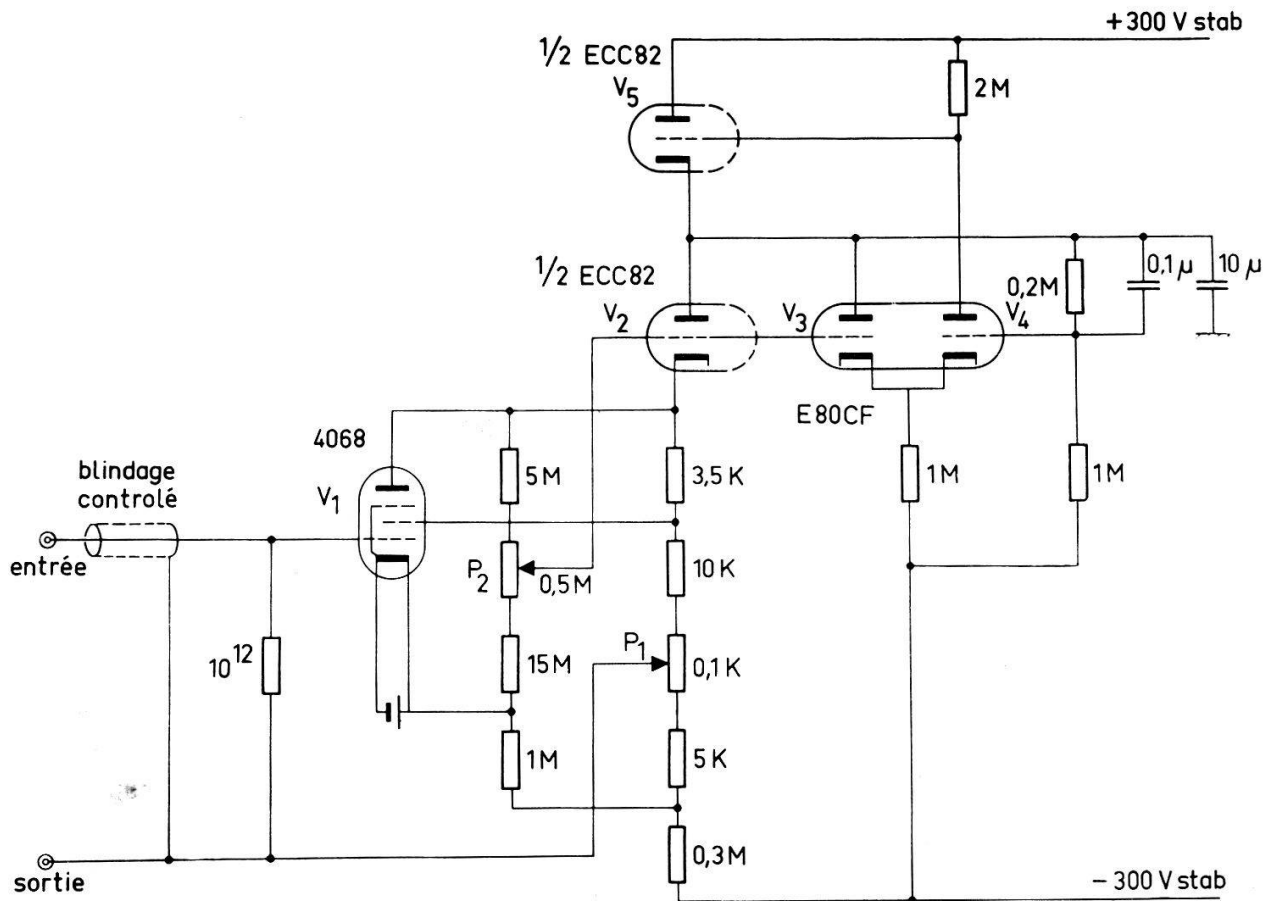


Figure 3

*Circuit électronique du transformateur d'impédance.
Une seule moitié est représentée*

- les entrées deviennent pratiquement indépendantes du potentiel de terre et on peut mesurer des différences de potentiel entre des points de potentiel non nul. La seule limite est donnée par le courant d'entrée des sondes, comprenant le courant de grille et le courant de fuite dans la résistance de grille. Le courant de fuite reste inférieur au courant grille naturel des électromètres (env. 10^{-14} A) sur un domaine de quelques volts, de sorte qu'on évitera de mesurer des différences de tension plus élevées lorsque l'impédance de l'échantillon est de l'ordre de $10^{12} \Omega$. Au dessous de $10^{11} \Omega$ ce courant introduit une erreur négligeable.

Comme il s'agit d'un rétrocouplage positif, l'impédance de sortie augmente en même temps que l'impédance d'entrée lorsque le gain tend vers 1 et l'amplificateur devient instable⁴). C'est pourquoi il est nécessaire d'introduire un défaut de gain d'au moins quelques pourmilles. L'impédance de sortie reste alors assez basse pour l'utilisation du pont de mesure à choppers et d'autre part les limites de stabilité sont suffisantes pour faire des mesures à la limite de bruit des électromètres. Un défaut de gain de 5⁰/₁₀₀ est satisfaisant : l'erreur introduite n'est pas significative dans les mesures en haute impédance où on tolère des incertitudes de plusieurs ⁰/₁₀₀. D'ailleurs l'amplificateur est strictement linéaire de sorte qu'une correction peut facilement être apportée aux valeurs de mesures. Avec un défaut de gain de 5⁰/₁₀₀, on obtient une impédance

d'entrée supérieure à $10^{14} \Omega$ avec $10^{12} \Omega$ de résistance de grille et une constante de temps de l'ordre de la seconde avec 100 pf de capacité, soit environ 2 mètres de câble blindé du type haute fréquence. L'impédance de sortie est alors de l'ordre de $10^4 \Omega$. Comme le courant d'entrée reste inférieur à $10^{-14} A$ sur un domaine de 2 volts par rapport à la terre, il suffit de régler la mise à terre du circuit haute impédance à 1 volt près autour du potentiel de terre. Ce réglage est donc exécuté très rapidement et peut même être négligé lorsque l'impédance de mesure est inférieure à $10^{10} \Omega$.

6. Construction

Toutes les précautions constructives doivent être prises pour assurer une bonne stabilité: symétrie rigoureuse entre les deux amplificateurs, éléments de haute qualité, isolation au Teflon du circuit à haute impédance, y compris 6 sondes de contact et le commutateur les connectant par paires aux grilles des électromètres, le tout étant enfermé dans un blindage d'acier doublé de cuivre isolé.

Afin de réduire l'influence thermique du chauffage des tubes $V_2 - V_5$, ces derniers sont montés sur un châssis séparé. Ils sont chauffés en courant continu stabilisé par transistors à 1^o/₁₀₀ près.

Les électromètres (Philips 4068) sont chauffés par des accumulateurs alcalins et les hautes tensions sont fournies par des stabilisations électroniques à 10 mV près.

Lorsque les entrées sont court-circuitées à terre, on atteint la stabilité habituelle des circuits à électromètres, soit un glissement à long terme du zéro à raison de 0,5 mV/h., sur lequel se superposent des oscillations basse fréquence erratiques (FLICKER noise) de 0,1 mV d'amplitude.

7. Méthode de mesure

La mise à zéro de l'appareil s'effectue avec les deux entrées court-circuitées à terre et les potentiels des deux sorties sont annulés au moyen des potentiomètres. L'échantillon est mis en circuit et s'il présente une très haute résistance, une des sorties est amenée à terre, en agissant sur la mise à terre du circuit haute impédance de façon à minimiser les courants d'entrées. Enfin, le comparateur est équilibré ce qui fournit la valeur de la tension présente entre les entrées. Le courant est ensuite mesuré par la tension aux bornes de la résistance étalon. Les mesures sont répétées dans les deux sens du courant pour éliminer d'éventuelles tensions parasites aux contacts sur l'échantillon.

L'effet HALL est mesuré entre deux électrodes placées perpendiculairement au courant; la tension résiduelle à champ magnétique nul est compensée à la sortie par une source réglable incorporée dans le comparateur à choppers. Il est également possible d'utiliser la mise à terre du circuit à haute impédance comme électrode fictive à terre et de mesurer la tension HALL sur une seule sonde. Dans ce cas, la tension mesurée est la moitié seulement de celle obtenue avec deux électrodes.

8. Performances

Les références citées ont déjà démontré les performances du circuit à choppers dans la mesure de semiconducteurs de basse résistivité. En ce qui concerne la partie haute impédance de l'appareil, la sensibilité dépend naturellement fortement de la

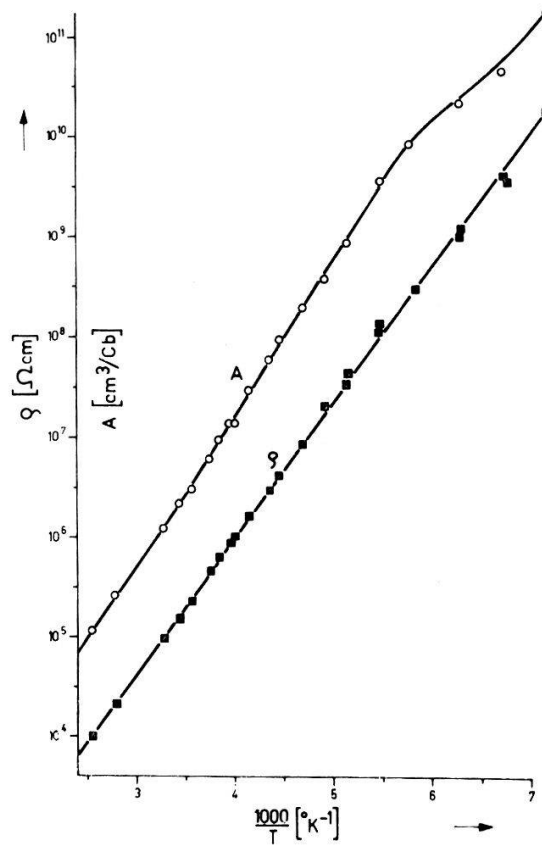


Figure 4

Résistivité et coefficient HALL d'un échantillon de GaSe
Mesurés par l'appareil décrit dans cet article

qualité des contacts des sondes sur l'échantillon et du bruit généré dans le circuit de mesure. Lorsque ces facteurs ne sont pas limitatifs, la sensibilité en tension atteint une fraction de millivolt, de sorte que la mesure de résistance peut atteindre le $\frac{0}{100}$ si nécessaire; les plus petites mobilités détectables sont de l'ordre de $0,1 \text{ cm}^2/\text{volt}\cdot\text{sec}$, lorsque l'échantillon est alimenté sous 100 volts et placé dans un champ magnétique de 10000 œrsteds. En pratique, une telle sensibilité sera exceptionnellement réalisée en raison des bruits supplémentaires introduit par le semiconducteur, et surtout par les contacts avec les sondes qui créent les plus grandes difficultés de mesure. A titre d'exemple, une série de mesures de la résistance et du coefficient de HALL d'un échantillon de GaSe a été reportée dans la figure 4 en fonction de l'inverse de la température. La résistance totale de l'échantillon avec ses contacts a varié entre 10^6 et $5 \cdot 10^{12}$ ohm, sans affecter sensiblement la cohérence des résultats.

Références

- 1) T. M. DAUPHINEE and E. MOOSER: Apparatus for Measuring Resistivity and Hall Coefficient of Semiconductors. *Rev. Sc. Instr.* 26, No. 7, 660–664 (July 1955).
- 2) T. M. DAUPHINEE and H. PRESTON THOMAS: A.D.C. and square Wave A.C. Resistance and Voltage Comparator, *J. Sc. Instr.* 35, pp 21–23 (January 1958).
- 3) P. L. READ: Ultralinear Cathode Follower. *Rev. Sc. Instr.* 31, 9, 979–982 (September 1960).
- 4) J. R. MACDONALD: An A.C. Cathode-Follower of Very High Input-Impedance. *Rev. Sc. Instr.* 25, 2, 144–147 (February 1954).