



HAL
open science

Appareillages de mesure de la conductivité thermique des semi-conducteurs - I. généralités; Méthode des fluxmètres

G. Weill

► **To cite this version:**

G. Weill. Appareillages de mesure de la conductivité thermique des semi-conducteurs - I. généralités; Méthode des fluxmètres. J. Phys. Phys. Appl., 1962, 23 (S3), pp.15-20. 10.1051/jphysap:0196200230301500 . jpa-00212856

HAL Id: jpa-00212856

<https://hal.science/jpa-00212856>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

APPAREILLAGES DE MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS

I. GÉNÉRALITÉS ; MÉTHODE DES FLUXMÈTRES.

Par G. WEILL,

Laboratoire de Magnétisme et de Physique du Solide, C. N. R. S., Bellevue (Seine-et-Oise).

Résumé. — L'appareillage décrit permet des mesures rapides de la conductivité thermique, à la température ordinaire, de petits échantillons de matériau semi-conducteur. L'éprouvette en expérience joue le rôle de thermomètre différentiel, cette disposition élimine l'effet parasite des résistances thermiques de contact. Les gradients de température sont maintenus très faibles, de manière à réduire les pertes de chaleur. La méthode permet une évaluation expérimentale de ces pertes. L'appareil peut être étalonné de manière à donner des valeurs absolues.

Abstract. — The apparatus described is used to measure the room temperature thermal conductivity of small samples of semi-conductor materials. The sample under test plays the role of a differential thermocouple, so that errors due to stray thermal resistances are eliminated. The apparatus is operated with very small temperature gradients, in order to minimize radiation losses. These may be evaluated experimentally. A calibration method is described so that absolute measurements of thermal conductivity can be performed.

1. INTRODUCTION

1.1. La théorie du transport de la chaleur [1], [2] par conduction dans les solides est fondée sur l'hypothèse de Fourier selon laquelle la puissance calorifique ΔP qui traverse, à l'intérieur du solide, un élément de surface ΔS (de vecteur unitaire normal n) est proportionnelle au gradient de température dT/dn

$$\Delta P = kn \Delta S \frac{dT}{dn}.$$

Le coefficient de proportionnalité k est la conductivité thermique du solide. Pour un corps isotrope, k est une grandeur scalaire qui dépend seulement de la nature et de l'état physique du solide. Plus généralement (cristaux, solides à structure orientée) k est de nature tensorielle.

1.2. Dans le cas particulier des semi-conducteurs, les mesures de k ont un triple intérêt.

Les mécanismes du transport de la chaleur par le réseau cristallin des solides ont été analysés par de nombreux auteurs. Le rôle de chacun des nombreux mécanismes que la théorie envisage est encore loin d'être élucidé [3]. L'intérêt des vérifications expérimentales de ces différentes théories est évident.

Par ailleurs, la mesure précise de la conductivité thermique d'une série d'échantillons peut permettre la détermination expérimentale du coefficient L qui, selon la loi de Wiedeman-Franz-Lorenz,

$$k_p = L \sigma T$$

relie la conductivité électrique σ à k_p , contribution

des porteurs de charge électrique à la conductivité thermique. Pour les semi-conducteurs, la valeur de L est reliée à la nature des mécanismes limitant la mobilité des porteurs de charge.

Du point de vue pratique enfin, la conductivité thermique est une propriété importante des thermoéléments semi-conducteurs utilisés pour les transformations dans les deux sens d'énergie électrique en énergie calorifique.

1.3. Pour la mesure de la conductivité thermique, les méthodes les plus couramment employées font intervenir un écoulement de chaleur à une dimension, si bien qu'en dernière analyse le problème se réduit à la détermination : d'une puissance calorifique (ou d'un flux de chaleur) ; d'une différence de température ; des dimensions géométriques d'une éprouvette.

On suppose, en général, que la valeur de k est uniforme dans l'éprouvette ; on néglige notamment ses variations avec la température sur un petit intervalle.

Les méthodes employées le plus souvent pour la mesure de la conductivité thermique des semi-conducteurs sont :

a) La méthode de « résistances en série » dans laquelle le même flux de chaleur traverse successivement un barreau de corps étudié et un barreau de référence ; les gradients de température sont alors (à un facteur géométrique près) inversement proportionnels aux conductivités thermiques. Parmi d'autres auteurs A. D. Stuckes [4] et J. Tavernier [5] ont employé cette méthode. Le second auteur a choisi comme barreau de référence du constantan et utilise le pouvoir thermoélectrique de cet alliage par rapport au cuivre pour mesurer les gradients de température. Les principaux incon-

vénients de la méthode des résistances en série proviennent :

— de la difficulté de tenir compte des pertes de chaleur par rayonnement ; cet inconvénient s'aggrave aux températures supérieures à la température ordinaire ; l'emploi d'écrans s'impose alors ;

— des erreurs introduites par les résistances thermiques de contact ;

— de la nécessité de disposer d'un matériau de référence de conductivité connue.

b) La méthode employée et décrite par A. V. et A. F. Ioffe [6] est une méthode absolue, en écoulement de chaleur permanent. Le flux de chaleur qui traverse l'échantillon étudié provient d'une masse calorimétrique dont on mesure la vitesse de refroidissement pendant un temps suffisamment court pour que cette vitesse puisse être considérée comme constante. Le procédé a l'avantage d'être simple et rapide. La précision évaluée par les auteurs est maximale pour des k de l'ordre de 20 mW/°cm ; elle reste meilleure que 5 % entre 8 et 10 mW/°cm. Elle est limitée du côté des fortes conductivités par les résistances thermiques de contact, et du côté des faibles conductivités par les flux de chaleur parasites (en parallèle sur l'échantillon). Cette méthode est susceptible, théoriquement, de donner k en valeur absolue ; en fait les auteurs étalonnent l'appareil en mesurant un corps de conductivité connue, donc procèdent à une mesure relative.

Une méthode analogue à celle de Ioffe est celle étudiée par E. Calvet [7] et P. Bourrelly [7 bis] : la masse calorimétrique est remplacée, pour la mesure du flux de chaleur, par la cellule de mesure d'un microcalorimètre Calvet [8], [8 bis].

c) La méthode d'Angström [9], [1], [2] permet de mesurer indirectement la conductivité thermique, par l'intermédiaire de la diffusivité : $D \times k / C\mu$ (C : chaleur spécifique, μ : masse spécifique).

Elle a été reprise par de nombreux auteurs avec divers perfectionnements et modifications [10], [11], [12], [16]. J. Oualid [13] emploie une variante en impulsions. L'avantage principal de cette méthode (dont la mise en œuvre dans notre laboratoire fera l'objet d'une prochaine communication) est de tenir compte de la chaleur traversant les faces latérales de l'échantillon. Elle est donc applicable avec une bonne précision aux températures élevées. Les problèmes de contact thermique sont moins critiques que dans d'autres méthodes. La précision est limitée essentiellement par les mesures de longueur lorsque la diffusivité à mesurer est faible. Il est avantageux de disposer d'échantillons d'assez grandes dimensions (quelques centimètres pour les semi-conducteurs, quelques décimètres pour les métaux).

d) Une méthode décrite par Harman et al. [14] est particulièrement adaptée à l'étude des thermoéléments semi-conducteurs : les flux de chaleur sont

produits par effet Peltier au sein de l'éprouvette, et les gradients de température mesurés par l'intermédiaire de l'effet thermoélectrique du corps étudié.

Les avantages de cette méthode proviennent du fait que seules sont mesurées des grandeurs électriques et géométriques ; le facteur de mérite des thermoéléments peut être obtenu notamment par le rapport de deux différences de potentiel. Les précautions nécessaires sont : la réalisation d'un bon vide autour de l'éprouvette en expérience ; la réalisation de contacts électriques ohmiques et peu résistants pour amener le courant dans l'éprouvette. La mesure est absolue ; Harman opère en régime permanent. Herincks [15] a décrit une variante utilisant un régime d'impulsions.

La précision de cette méthode est d'autant meilleure que le facteur de mérite thermoélectrique du matériau étudié est plus élevé.

2. LA MÉTHODE DES FLUXMÈTRES

2.1. En nous inspirant des méthodes ci-dessus, tout en gardant le souci d'éviter leurs inconvénients les plus graves, nous avons mis au point un appareil de mesure de la conductivité thermique adapté aux besoins particuliers de notre laboratoire, que l'on peut caractériser comme suit :

— la gamme des conductivités thermiques à mesurer s'étend de quelques unités à quelques centaines de mW.deg⁻¹.cm⁻¹, et il est nécessaire notamment d'obtenir une bonne précision sur les faibles conductivités ;

— les échantillons disponibles sont de dimensions réduites : quelques centimètres dans le meilleur des cas ;

— il s'agit de semi-conducteurs, donc de corps doués en général d'un pouvoir thermoélectrique important ;

— enfin il est important que la méthode de mesure adoptée soit, autant que possible, simple à mettre en œuvre et rapide.

2.2. LA MÉTHODE DES FLUXMÈTRES dérive de la méthode des résistances en série. Elle utilise la propriété suivante : si on établit une différence de température $T_1 - T_0$ entre les extrémités d'un barreau semi-conducteur (supposé homogène, isotrope, et par ailleurs thermiquement et électriquement isolé du milieu environnant) :

1) Il s'établit un régime permanent dans lequel un courant de chaleur transporte de l'extrémité chaude vers l'extrémité froide une puissance calorifique :

$$P = k \frac{S}{l} (T_1 - T_0) \quad (1)$$

(S : section, l : longueur du barreau).

2) Il apparaît entre les extrémités du barreau une différence de potentiel thermoélectrique

$$V = \alpha(T_1 - T_0) \quad (2)$$

α : coefficient de Seebeck du matériau.

La puissance calorifique P qui traverse le barreau est donc mesurée directement par :

$$P = \frac{kS}{\alpha l} V. \quad (3)$$

Nous utiliserons cette formule de deux façons.

Un barreau semi-conducteur de k et α connus, associé à un dispositif potentiométrique (ou autre millivoltmètre d'impédance élevée) permettant de mesurer V sans débit de courant électrique, constitue ainsi un fluxmètre thermique qui traduit un flux de chaleur en d. d. p. électrique sans aucune mesure de température (*). Tavernier [5] met en pratique ce principe puisqu'il utilise comme référence un barreau de constantan, mais ce métal est mal adapté pour exploiter les avantages de la méthode (k élevé, α faible). Calvet a également réalisé des fluxmètres, constitués d'un grand nombre de thermocouples métalliques connectés en série. Le flux de chaleur les traverse en parallèle. Le dispositif est étalonné dans un microcalorimètre [8].

Par ailleurs, l'expression (3), au lieu d'être utilisée à mesurer P , peut servir à mesurer k si P et α sont connus.

Le principe de notre méthode de mesure est le suivant : on place en série le semi-conducteur S_2 de conductivité inconnue et un semi-conducteur auxiliaire S_1 étalonné en fluxmètre ; on applique deux fois la formule (3) : une fois à S_1 pour connaître le flux de chaleur P , une fois à S_2 pour obtenir k , connaissant P .

La même puissance calorifique doit traverser l'éprouvette étudiée et le thermoélément de référence. Cette condition peut être remplie ici avec une approximation meilleure que dans la méthode classique des résistances en série, en profitant de plusieurs éléments favorables :

a) La valeur élevée du rapport α/k , pour la plupart des matériaux semi-conducteurs, permet d'obtenir, sans développer de gradients de température importants, des d. d. p. assez grandes pour être mesurées avec une bonne précision. Les pertes par rayonnement sont alors réduites au minimum. Pratiquement il sera suffisant d'établir une différence de température totale de 3° entre le point le plus chaud et le point le plus froid de la colonne de mesure.

b) Il n'est pas nécessaire de placer des thermocouples, qui constituent des conductances thermiques de fuite en parallèle sur la conductance à

(*) Il est évident que cette méthode ne supprime pas complètement les mesures de températures, elle les reporte simplement à une autre phase, au moment où on mesure α et k .

mesurer. La conductance thermique des fils de cuivre destinés à prélever la tension thermoélectrique, peut être prise en considération au cours de l'étalonnage.

Malgré ces conditions favorables, la conservation de la puissance calorifique n'est jamais rigoureuse. Il est possible d'évaluer la grandeur des pertes en disposant l'échantillon S_2 entre deux fluxmètres S_1 et S_3 l'un de ces derniers mesure la chaleur entrant dans S_2 , l'autre la chaleur sortant de S_2 .

Le principal avantage de la méthode des fluxmètres, ainsi conçue, est d'éliminer l'erreur due aux résistances thermiques de contact. L'éprouvette elle-même joue le rôle de thermomètre différentiel. Il reste indispensable toutefois de réduire autant que possible les résistances de contact si l'on veut bénéficier du facteur favorable α (**).

2.3. L'appareil de mesure réalisé comporte essentiellement un « circuit thermique » où l'on s'efforce d'établir un écoulement de chaleur unidimensionnel. Dans ce circuit, l'éprouvette du matériau étudié est placée entre deux fluxmètres. On mesure, en régime permanent, trois forces électro-motrices : celles des deux fluxmètres, soit V_1 et V_3 , mesurent le flux de chaleur qui parcourt le circuit ; celle de l'échantillon, V_2 , permet de calculer k/α . Le coefficient de Seebeck, α , est déterminé par une mesure séparée.

La f. e. m. thermoélectrique des fluxmètres est proportionnelle à la puissance calorifique qui les traverse :

$$P_1 = A_1 V_1 \text{ pour le premier fluxmètre.}$$

$$P_3 = A_3 V_3 \text{ pour le second.}$$

Si l'appareil était parfait, on aurait :

$$P_1 = P_3 : \text{pas de pertes de chaleur.}$$

$$A_1 = A_3 : \text{identité des fluxmètres au point de vue thermique et électrique.}$$

On aurait, par conséquent :

$$V_1 = V_3.$$

Or l'expérience montre que, dans toutes les mesures effectuées, $V_1 > V_3$; la différence relative :

$$\epsilon = 2(V_1 - V_3)/(V_1 + V_3)$$

dépend de l'éprouvette en expérience, elle est de 15 % dans les cas les plus défavorables.

Cette différence peut être attribuée à $P_1 \neq P_3$ (pertes) ou $A_1 \neq A_3$. L'effet de cette deuxième cause peut être évalué soit en permutant la position des deux fluxmètres dans l'appareil, soit par une méthode sur laquelle nous reviendrons à propos de l'étalonnage des fluxmètres (section 3.4).

La puissance qui traverse l'éprouvette est évaluée par :

$$P = A(V_1 + V_3)/2.$$

(**) Le procédé qui consiste à fixer des thermocouples sur l'éprouvette elle-même supprime bien l'influence des résistances de contact mais aggrave la cause d'erreur signalée en b).

Si V_2 est la f. e. m. mesurée aux bornes de l'éprouvette, l et S sa longueur et sa section, sa conductivité thermique est donnée par :

$$k = P(\alpha/V_2) (l/S)$$

de sorte que :

$$k = A \frac{V_1 + V_3}{2} \frac{\alpha}{V_2} \frac{l}{S} \quad (4)$$

A est le coefficient d'étalonnage global de l'appareil. Il peut être déterminé : soit en plaçant dans l'appareil une éprouvette taillée dans un matériau connu (les mesures sont alors relatives à cet étalon) soit par un artifice, décrit à la section 3.4, qui permet d'obtenir un étalonnage en valeur absolue.

2.4. Nous pouvons évaluer la limite supérieure de l'incertitude sur les valeurs de k obtenues par cette méthode.

La principale cause d'erreur réside dans les pertes de chaleur à travers les surfaces des fluxmètres et de l'éprouvette, parallèles à la direction de l'écoulement principal. La limite supérieure de l'erreur ainsi introduite, qui n'apparaîtrait pas en différenciant la formule (4), peut être évaluée en comparant les indications V_1 et V_3 des deux fluxmètres. Elle est égale à

$$(\varepsilon/2) (V_1 - V_3)/(V_1 + V_3).$$

Dans la pratique nous pouvons mesurer les conductivités thermiques avec une marge de reproductibilité de 5 % ; il convient d'ajouter à cette erreur :

— l'erreur relative sur les dimensions géométriques de l'éprouvette (3 mesures de longueur).

— l'erreur sur le k/α du corps qui sert d'étalon ou, dans le cas d'étalonnage absolu, l'erreur sur la détermination de A ;

— l'erreur relative sur la mesure du coefficient de Seebeck du matériau étudié. Cette dernière peut être abaissée à moins de 1 % ; toutefois la mesure précise de α sur des échantillons larges et courts de forte conductivité thermique demande beaucoup de soins.

3. DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

3.1. LES FLUXMÈTRES PROPREMENTS DITS SONT constitués par une embase filetée en cuivre A sur laquelle est soudé un petit barreau B de matériau thermoélectrique (fig. 1). Un fil de cuivre fin, F1 est soudé à l'extrémité opposée du barreau. L'ensemble est surmonté d'une plaquette de cuivre C, isolée électriquement de B, sur laquelle viendra prendre appui une extrémité de l'éprouvette en expérience.

Un fil de cuivre fin F2 est soudé à C. F1 et F2, isolés, sont disposés le long de B et traversent l'embase A. Un enrobage de résine « Araldite » pro-

tège et consolide l'ensemble tout en assurant les isollements électriques nécessaires.

La face supérieure de C est travaillée par rodage

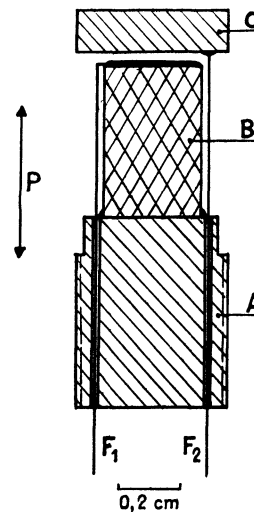


FIG. 1.

de manière à ce que sa surface soit sensiblement perpendiculaire à l'axe du système, et à ce que le cuivre soit mis à nu. Sur la figure 1 la double flèche P indique la direction de l'écoulement de chaleur.

La différence de potentiel qui apparaît aux bornes de B est mesurée entre le fil F1 et l'embase. F2 et son homologue du second fluxmètre (voir fig. 2) servent à prélever la d. d. p. aux bornes de l'éprouvette.

3.2. LE CHOIX DU MATÉRIAU CONSTITUTIF DU FLUXMÈTRE est déterminé d'après la formule (4), de façon à ce que le rapport $(V_1 + V_3)/2V_2$ soit de l'ordre de l'unité. Autrement dit, le matériau utilisé comme fluxmètre doit présenter un k/α voisin de celui du matériau étudié. Cette condition n'est d'ailleurs pas très stricte. Il est possible, en effet, d'adapter la longueur de l'éprouvette en fonction de son k/α (il est moins intéressant de modifier sa section qui doit être choisie, autant que possible, identique à celle de la plaquette C).

3.3. LA DISPOSITION DE L'APPAREIL, est schématisée sur la figure 2.

Les fluxmètres M_1 et M_2 sont vissés, par leurs embases, sur des barres de cuivre R et S.

R contient une chaufferette H (enroulement de fil résistant de 20 ohms environ, alimenté par une batterie d'accumulateurs).

La barre S canalise la chaleur et son support la dissipe, essentiellement par rayonnement. Un ressort tend à appuyer S contre R, l'éprouvette E est ainsi maintenue entre les fluxmètres M_1 et M_2

Un thermocouple est soudé en C. A partir de l'indication qu'il délivre, et des f. e. m. thermo-électrique des fluxmètres et de l'éprouvette, on peut déterminer, si nécessaire, les températures en différents points de la colonne.

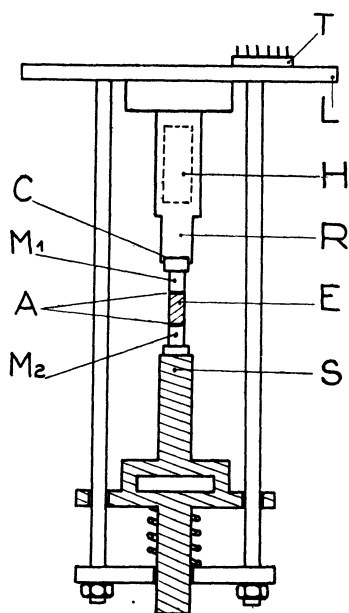


FIG. 2.

L'ensemble de l'appareil est supporté par la platine L.

Les fils de mesure des diverses tensions thermo-électriques (qui passent dans un canal ménagé dans S et R) ainsi que les amenées de courant de H, traversent la platine L par le culot T comportant 9 passages isolés étanches.

La platine L constitue le couvercle d'une enceinte où se trouve placé l'appareil pour la mesure. La pression dans l'enceinte est abaissée en dessous de 10^{-4} mm de mercure afin d'annuler le transport de chaleur par convection. Les pertes par rayonnement restent les seules causes d'erreur. C'est dans le but d'en réduire l'importance qu'on a donné à l'appareil une forme allongée ; si bien que dans la portion de la colonne où les flux de chaleur sont mesurés, deux surfaces portées à des températures différentes ne se trouvent pas placées vis-à-vis. Ainsi, la chaleur transportée par le rayonnement se propage dans les directions perpendiculaires à celles de l'écoulement principal.

Pour que le contact thermique soit correct malgré le vide, il est indispensable d'enduire de graisse silicone les faces A de l'éprouvette en contact avec les fluxmètres. Cette précaution ne gêne en aucune façon la mesure de la f. e. m. thermoélectrique de l'éprouvette. Le contact électrique reste bon malgré les propriétés isolantes de la graisse silicone.

Les d. d. p. thermoélectriques V_1 , V_2 , V_3 sont

enregistrées sur un potentiomètre automatique. M. E. C. I. (type Speedomax) à 6 directions, ainsi que, à titre indicatif, la f. e. m. du thermocouple C. Quelques dizaines de minutes sont nécessaires pour obtenir le régime permanent (V_1 , V_2 , V_3 constants) à partir du moment où l'échantillon a été mis en place et le vide établi dans l'enceinte. Nous avons vérifié expérimentalement que la précision de la mesure n'est pas sensiblement diminuée si le pointé de l'enregistrement est effectuée à un instant où le régime est encore lentement variable (variations des tensions V inférieures à 1 % par minute).

3.4. L'ÉTALONNAGE EN VALEUR ABSOLUE des fluxmètres est réalisé de la façon suivante : l'éprouvette E est remplacée par une « éprouvette factice » (fig. 3) constituée d'un fil résistant U bobiné sur un

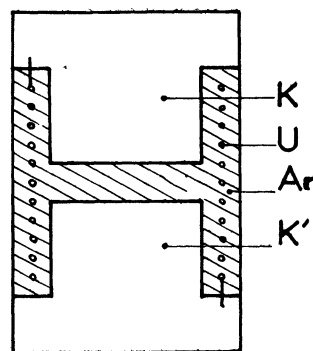


FIG. 3.

petit mandrin en cuivre. Ce mandrin est coupé en deux parties K et K' isolées électriquement l'une de l'autre et constituant les bornes de la résistance. Un enrobage d'« Araldite », Ar, lui donne la forme d'une éprouvette normale.

Pour l'opération d'étalonnage on fait passer un courant électrique dans le fil résistant. On mesure la puissance produite par effet Joule dans ce fil. Cette puissance est évacuée à travers les deux fluxmètres, et accessoirement par rayonnement des faces latérales. On ajuste alors le courant dans la chaufferette H de manière à annuler le flux de chaleur qui traverse M_1 (l'indication V_1 de M_1 est alors nulle). On sait alors que toute la chaleur produite dans l'éprouvette factice traverse (au rayonnement près) le fluxmètre M_2 qui se trouve dès lors étalonné. L'opération est répétée pour plusieurs valeurs de la puissance dissipée dans l'éprouvette factice ; on extrapole le coefficient d'étalonnage pour la valeur 0 de cette puissance, afin de tenir compte des pertes par rayonnement.

Le fluxmètre M_1 est étalonné en arrêtant le chauffage dans H. La puissance produite dans l'éprouvette factice se répartit entre M_1 et M_2 , on connaît alors, par différence, la fraction qui traverse M_1 .

Pour vérifier cet étalonnage, nous avons mesuré

la conductibilité thermique de plusieurs matériaux étudiés par d'autres auteurs ; nous avons obtenu les résultats suivants, en bon accord avec les mesures les plus récentes :

Ge : 510 mW/°.cm
 InSb : 170 mW/°.cm
 Bi₂Te₃ (conductivité électrique 500 (Ω × cm)⁻¹ :
 22 mW/°.cm.

3.5. L'appareillage décrit ci-dessus a été utilisé jusqu'à présent à la température ordinaire. Son adaptation pour les plus basses températures (entre l'azote liquide et la température ordinaire) ne doit pas présenter de difficultés majeures. Aux températures supérieures, les problèmes de pertes par rayonnement se poseront de façon plus aiguë. Toutefois, étant donné que notre appareillage permet d'évaluer ces pertes avec une bonne précision, on pourra vraisemblablement utiliser encore cette

méthode en se contentant d'une protection grossière contre ces pertes, par exemple par des écrans.

4. CONCLUSION

La méthode des fluxmètres nous a permis de mesurer rapidement la conductivité thermique de petits échantillons de matériaux semi-conducteurs, avec une marge de reproductibilité de 5 % et une erreur de l'ordre de 10 % sur la valeur absolue.

Ses avantages sont : l'élimination de l'effet parasite des résistances de contact, obtenue sans souder les échantillons ; la réduction des pertes thermiques grâce à l'emploi de gradients de température très faibles ; la possibilité de tenir compte exactement de ces pertes.

Un prochain article sera consacré à un appareillage utilisant la méthode d'Angström.

Manuscrit reçu le 26 octobre 1961.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] FOCH (A.), Cours de thermodynamique à l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique, Paris, 1951.
 [2] CARSLAW (F. S.) et JAEGER (J. C.), Conduction of heat in solids, 2nd ed., Oxford Univ. Press, 1959.
 [3] KLEMENS (P. G.), Solid State Physics, vol. 7, Seitz et Turnbull, édit. Academic Press, New York, 1958.
 [4] STUCKES (A. D.), *Phys. Rev.*, 1957, **107**, 427.
 [5] TAVERNIER (J.), Contribution à l'étude de la conductivité thermique de réseau dans les solides. *Thèse*, Paris, 1959.
 [6] IOFFE (A. V.) et IOFFE (A. F.), *Z. Tekh. Fiz.*, 1958, **28**, 2357.
 [7] CALVET (E.) et PRAT (H.), Récents progrès en microcalorimétrie, Dunod, éditeur, p. 61-64.
 [7 bis] BOURRELY (P.), Thèse de 3^e cycle. Éditions de la Faculté d'Aix-en-Provence, 1959.
 [8] CALVET (E.) et PRAT (H.), Microcalorimétrie, Masson éditeur, Paris, 1956.
 [8 bis] CALVET (E.) et PRAT (H.), Récents progrès en microcalorimétrie, Dunod éditeur, Paris, 1958.
 [9] ANGSTROM (A. J.), *Ann. Physik*, 1861, **114**, 513 ; *Phil. Mag.*, 1863, **25**, 130 et **26**, 161.
 [10] SIDLES (P. H.) et DANIELSON (G. C.), *J. Appl. Physics*, 1954, **25**, 58.
 [11] KANAI (Y.) et NII (R.), *J. Phys. Chem. Solids*, 1958, **8**, 338.
 [12] ABELÈS (B.), CODY (G. D.) et BEERS (D. S.), *J. Appl. Physics*, 1960, **31**, 1585.
 [13] OUALID (J.), *J. Physique Rad.*, 1961, **22**, 124.
 [14] HARMAN (T. C.), CAHN (J. H.) et LOGAN (M. J.), *J. Appl. Physics*, 1959, **30**, 1351.
 [15] HERINGKS (G.) et MONFILS (A.), *Brit. J. Appl. Physics*,
 [16] MARTINET (J.), *J. Physique Rad.*, 1961, **22**, 115 A.