

Abb. 2. Bestimmung der Kerntemperatur aus dem Protonenenergiespektrum.

Weise $\ln \frac{N(E_p)}{\sigma_c \cdot E_p}$ als Funktion von E_p aufgetragen. Dabei wurde σ_c der Tab. 4.1 von BLATT und WEISSKOPF⁴ (S. 352) entnommen. Wie man sieht, ist es nicht möglich, das gesamte Spektrum als Verdampfungsspektrum mit einer einzigen Kerntemperatur darzustellen. Es läßt sich aber sicherlich durch die Meßpunkte der Abb. 2 unterhalb 6 MeV eine Gerade legen, die einer Energieverteilung nach der statistischen Theorie mit

einer Kerntemperatur von 0,32 MeV entsprechen würde. Da nach der statistischen Theorie der Schwerpunkt der Protonenenergieverteilung gerade bei Energien von etwa 5 MeV zu erwarten ist, liegt es nahe, den unteren Teil des Spektrums als das Verdampfungsspektrum anzusehen. Auch die restlichen Meßpunkte liegen angenähert auf einer Geraden, die einer Kerntemperatur von 1,0 MeV entsprechen würde. Es ist aber wegen der schon recht hohen Ordnungszahlen von Cs und J wahrscheinlicher, daß die Protonen höherer Energie Prozessen mit direkter Wechselwirkung entstammen (siehe z. B. Anm.⁵). Eine solche Aufteilung des Spektrums ist z. B. für Ce^{140} und In^{115} von Toms et al.⁶ gemacht worden.

Mit allen Vorbehalten hinsichtlich der geringen Statistik unserer bisherigen Messungen und der Unsicherheit der theoretischen Aussagen ist eine sich gemäß Abb. 2 anbietende Aufteilung des Spektrums in Abb. 1 als mögliche Deutung eingetragen.

Herrn V. RIECH danken wir für seine Hilfe bei den Messungen mit dem Bandgenerator. Herrn Dipl.-Phys. LINDSTRÖM danken wir für zahlreiche Diskussionen. Die Geräte wurden uns freundlicherweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt.

⁵ D. H. WILKINSON, *Physica* **22**, 1039 [1956].

⁶ M. E. TOMS u. W. E. STEPHENS, *Phys. Rev.* **92**, 362 [1953].

Das Temperaturverhalten der magnetischen Suszeptibilität von InAs und InSb

Von G. RÖMELT, D. GEIST und W. SCHLABITZ

II. Physikalisches Institut der Universität Köln

(Z. Naturforsch. **14 a**, 923–924 [1959]; eingeg. am 7. September 1959)

Die diamagnetische Suszeptibilität von *n*-InAs zeigt eine charakteristische Abhängigkeit von der Trägerzahl, die durch den Verlauf des Energiebandes bedingt ist. In Abb. 1 ist die magnetische Volumesuszeptibilität von InAs bei 90 und 300 °K aufgetragen. Die zu einer Probe gehörenden Werte liegen übereinander, da die Annahme gleicher Elektronenzahl bei den beiden Temperaturen wegen der kleinen Aktivierungsenergien der Dotierungselemente gerechtfertigt ist. Je zwei Proben enthielten S, Se, Te, Si, Ge, Sn oder Cu, eine war undotiert und eine mit Fe dotiert. Die Werte für 90 bzw. 300 °K lassen sich zwanglos durch je eine Kurve miteinander verbinden. Beide Kurven haben bei $n = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ein Maximum und fallen dann sehr stark ab. Dieser Verlauf läßt sich erklären durch die Annahme einer konzentrationsabhängigen effektiven Elektronenmasse bzw. ein Abweichen vom parabolischen Zusammenhang zwischen Energie und Wellenzahl.

Auffällig ist dabei das *Temperaturverhalten*: Der Diamagnetismus der Proben ist stets bei 90° größer als bei 300°, aber der Unterschied nimmt von 3% bei

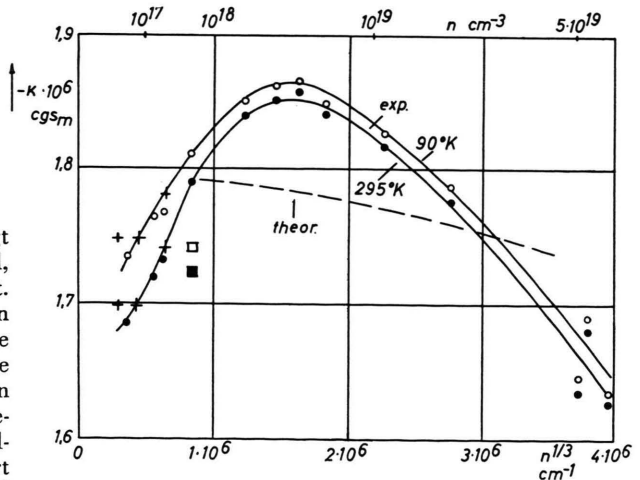


Abb. 1. Magnetische Volumesuszeptibilität von *n*-InAs in magnetischen cgs-Einheiten als Funktion der Elektronendichte. Die Kreise bezeichnen mit Se, S, Te, Sn, Si bzw. Ge dotierte Proben, die Kreuze solche mit Cu bzw. Fe. Außerdem ist ein Meßwert von BUSCH¹ angegeben (Quadrat). Die vollen Zeichen gelten für 300, die hohlen für 90 °K. Der gestrichelten Kurve liegen Überlegungen von STERN² zugrunde.

¹ G. BUSCH, *Halbleiter und Phosphore*, S. 154 (Tagung 1956), Vieweg, Braunschweig.

² F. STERN, *Bull. Amer. Phys. Soc.* **2**, 347 [1957]. — D. GEIST, *Z. Naturforsch.* **13 a**, 699 [1958].



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitalized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

$n = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ab auf 0,5% bei $3 \cdot 10^{18}$ und bleibt dann bis zu $n = 6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ praktisch konstant.

In diesem Bereich sind die Elektronen aber sicher entartet, daher muß nach der FERMI-Statistik in erster Näherung die magnetische *Elektronens*uszeptibilität temperaturunabhängig sein. Man kann daher die gefundene Veränderung der magnetischen Suszeptibilität deuten als Veränderung der reinen *Gitters*uszeptibilität, über deren Temperaturverhalten man ja sonst nichts aussagen kann, da die reinsten Proben bereits zu viele Elektronen enthalten, als daß man ihre Suszeptibilität als die des reinen Gitters ansehen könnte.

Qualitativ verhält sich demnach das InAs-Gitter ebenso wie die Elementhalbleiter Ge und Si¹.

Messungen der magnetischen Suszeptibilität von InSb wurden bisher an vier voneinander unabhängigen Stellen durchgeführt. Die Zielsetzung der einzelnen Autoren war jedoch verschieden, so daß die gewonnenen Ergebnisse sich ergänzen und nur wenig überschneiden. Die eigenen Meßwerte für 90 und 300 °K und die entsprechenden Angaben anderer Autoren haben wir in Abb. 2 aufgetragen. Sie sollen im folgenden diskutiert werden.

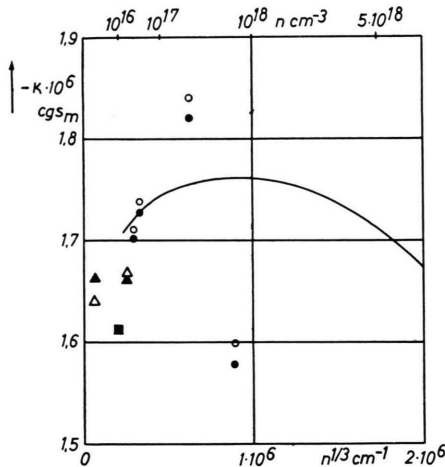


Abb. 2. Magnetische Volumsuszeptibilität von n-InSb. Die Dreiecke bezeichnen Meßwerte von STEVENS und CRAWFORD; der Wert von BUSCH gilt sowohl für 90 als auch für 300 °K. Die durchgezogene Kurve erhält man aus Meßwerten der Elektronenssuszeptibilität von BOWERS durch Addition des Wertes von BUSCH (als Gittersuszeptibilität). Die vollen Zeichen gelten für 300, die hohlen für 90 °K.

BOWERS³ legte Wert auf den Zusammenhang zwischen magnetischer Suszeptibilität und Elektronenkonzentration. Er untersuchte zwölf Proben mit Trägerdichten zwischen 10^{16} und $7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ bei Zimmertemperatur. Seiner Arbeit kann man den Anteil entnehmen, den die Elektronen allein liefern, nicht aber den Absolutwert der magnetischen Suszeptibilität von InSb.

BUSCH¹ gibt den Suszeptibilitätsverlauf einer InSb-Probe mit $8 \cdot 10^{15}$ Elektronen/cm³ in Abhängigkeit von

der Temperatur an. Die Werte bei 90 und 300 °K unterscheiden sich kaum. Addiert man hierzu die Werte von BOWERS, so erhält man die in Abb. 2 durchgezogene Kurve, die qualitativ den gleichen Verlauf zeigt wie die entsprechende für InAs. Das Maximum wird hier bereits bei $n = 8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ erreicht.

STEVENS und CRAWFORD⁴ untersuchten den Temperaturverlauf von zwei InSb-Proben mit $n = 4 \cdot 10^{14}$ und $1,6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Unsere Proben schließlich hatten $2,2 \cdot 10^{16}$, $2,9 \cdot 10^{16}$, $2,7 \cdot 10^{17}$ und $8,4 \cdot 10^{17}$ Elektronen/cm³. Die Suszeptibilitätswerte der beiden hochdotierten Proben fallen dabei aus dem Rahmen der anderen Meßwerte^{3, 5} heraus, der eine in diamagnetischer, der andere in paramagnetischer Richtung. Der Unterschied ließe sich durch ein Abweichen von der stöchiometrischen Zusammensetzung in Höhe von +1,8 Gew.-% Sb bzw. +19,7 Gew.-% In erklären

$$\begin{aligned} (\chi_{\text{InSb}} &= -1,63 \cdot 10^{-6}, & \chi_{\text{In}} &= -0,73 \cdot 10^{-6}, \\ \chi_{\text{Sb}} &= -6,3 \cdot 10^{-6} \text{ cgs}_m). \end{aligned}$$

(Nach Angaben der Hersteller ist ein so starkes Abweichen von der Stöchiometrie unwahrscheinlich.)

Bei der zweiten Probe ist allerdings ein Einbau von Eisen wahrscheinlicher, und zwar in der Art, wie sie von GEIST und HEHNEN für Ge⁶ berichtet wurde, wo ebenfalls durch (bewußten) Einbau von Eisen die magnetische Suszeptibilität in paramagnetischer Richtung abwich, trotzdem aber keinerlei Feldstärkeabhängigkeit bis zu 15 000 Gauß zeigte.

Aus dem Temperaturverhalten der beiden hochdotierten Proben kann man schließen, daß die Gittersuszeptibilität von InSb beim Übergang von 300 auf 90 °K um $-0,017 \cdot 10^{-6} \text{ cgs}_m$ (etwa 1%) steigt, wobei aber wegen der übrigen Mängel dieser Proben einige Vorsicht angebracht ist. Das umgekehrte Temperaturverhalten bei der schwach dotierten Probe von STEVENS und CRAWFORD ist durch das Einsetzen der Eigenleitung bedingt.

Unsere Messungen wurden im Vakuum nach der FARADAY-Methode ausgeführt. Die Eichung erfolgte bei Zimmertemperatur durch den magnetischen Auftrieb in Reinstsauerstoff. Die Fehlergrenzen für die Absolutwerte der magnetischen Suszeptibilität von InAs und InSb liegen wegen dieser Eichung bei $\pm 3\%$, da das Verhältnis der Suszeptibilitäten dieser Substanzen zu der von Sauerstoff recht ungünstig ist. Die aus der Reproduzierbarkeit erschlossene relative Genauigkeit liegt bei $\pm 1\%$. Sehr genau ist die Abhängigkeit von der Temperatur feststellbar. Der Fehler beträgt höchstens $\pm 0,1\%$ der Gesamtsuszeptibilität.

Unser Dank gilt Herrn Prof. Dr. J. JAUMANN, Direktor des II. Physikalischen Instituts der Universität Köln, für die stete Förderung dieser Arbeit. Ferner danken wir den Laboratorien der Fa. Siemens-Schuckertwerke A.G., insbesondere den Herren Prof. Dr. H. WELKER, Dr. A. SCHELL und Dr. E. SCHILLMANN, für die zur Verfügung gestellten Halbleitermaterialien.

³ R. BOWERS, Scientific Papers 8-1038-P 48, Westinghouse Res. Lab.

⁴ D. K. STEVENS u. J. R. CRAWFORD, Phys. Rev. **99**, 487 [1955].

⁵ G. BUSCH u. R. KERN, Helv. Phys. Acta **32**, 24 [1959].

⁶ D. GEIST u. J. HEHNEN, Halbleiter und Phosphore, S. 491 (Tagung 1956), Vieweg, Braunschweig.