

gend viele Metallatome nachgeliefert werden, so daß der Verlust durch Dissoziation des Komplexes immer wieder reichlich ersetzt wird. FRITSCHÉ et al. schreiben der Auftreffrate den Einfluß zu, daß eine große Auf-

dampfgeschwindigkeit die Verschwärzung begünstigt. Dies ist sicher wichtig bei Pb, Zn und wahrscheinlich Ba, wo der Komplex im dynamischen Gleichgewicht entsteht.

## Zur Defektelektronenleitung in aufgedampften Germanium-Schichten

VON HERBERT PAGNIA

Physikalisches Institut der Technischen Hochschule Darmstadt  
(Z. Naturforsch. 16 a, 1261—1262 [1961]; eingeg. am 4. September 1961)

Electrical conductivity and HALL-effect measurements were made with Germanium films, vacuum evaporated on fused quartz plates having temperatures of about 450 °K. Film thicknesses range from 400 to 2000 Å. Mean hole concentration was of the order  $3,5 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3$  with a weak dependency on film thickness. Mobility changes stronger. The concentration of the light and heavy holes were determined from the dependency of HALL-coefficient on magnetic force. The quotient of these concentrations was 0,045. Qualitatively there was satisfactory agreement with p-type monocrystalline Germanium values.

Das Bändermodell des Germaniums ist heute sehr gut bekannt<sup>1</sup>. Während das Leitungsband eine komplizierte anisotrope Struktur aufweist, können die beiden zur Leitfähigkeit beitragenden Valenzbänder in erster Näherung als isotrop angesehen werden. Daher sollten Effekte, die im wesentlichen nur von den beiden Defektelektronenarten mit verschiedenen effektiven Massen bewirkt werden, bei ein- und polykristallinen Materialien qualitativ die gleichen Abhängigkeiten zeigen.

Für einen solchen Vergleich schienen dünne Germanium-Aufdampfschichten geeignet, da sie bei der Herstellung auf nichtkristalliner Unterlage in einem bestimmten Temperaturbereich des Trägers polykristallin aufwachsen<sup>2</sup> und ausnahmslos eine große Defektelektronenkonzentration haben<sup>3-5</sup>.

Zur Untersuchung wurden Germanium-Schichten im Vakuum bei etwa  $10^{-5}$  Torr auf geheizte Quarzglas-träger mit Temperaturen zwischen 410 und 450 °K aus einer Wolframwendel aufgedampft. Als Aufdampfmaterial diente durch Zonenschmelzen gereinigtes Germanium. Elektronenbeugungsaufnahmen von Vergleichsschichten auf SiO-Häuten zeigten scharfe Germaniumringe; die elektronenmikroskopische Untersuchung ergab mittlere Kristallitabmessungen von etwa 500 Å, d. h. von der Größenordnung der Schichtdicke.

Die Schichten hatten einen über zwei Zehnerpotenzen kleineren spezifischen elektrischen Widerstand als das Ausgangsmaterial. Dies deutet bei sicherlich kleinerer Beweglichkeit auf eine wesentlich höhere Trägerkonzentration hin. Dementsprechend sind die HALL-Konstanten dieser Schichten kleiner als bei massivem einkristallinem Material, jedoch von der gleichen Größe wie bei dünnen einkristallinen Schichten<sup>4</sup> (etwa  $3 \text{ cm}^3/\text{As}$ ). Der Einfluß der Schichtdicke auf die im Vakuum gemessene HALL-Konstante ist nur gering (Abb. 1). Ebenso erwies sich der Einfluß der Unterlagentemperatur bei der Herstellung in einem Bereich von 410 bis 450 °K als unmeßbar klein.

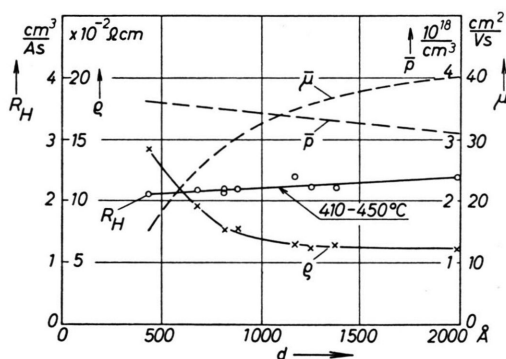


Abb. 1. Abhängigkeit der HALL-Konstanten  $R_H$  und des spezifischen elektrischen Widerstandes  $\rho$  sowie der daraus berechneten mittleren Defektelektronen-Konzentrationen  $\bar{p}$  und -Beweglichkeiten  $\bar{\mu}$  von der Schichtdicke  $d$  (Kondensations-temperatur 410 bis 450 °C).

Verzichtet man zur Abschätzung der Trägerkonzentration zunächst auf die Unterscheidung der beiden Defektelektronenarten, so erhält man für die mittlere Defektelektronenkonzentration  $\bar{p}$  nach

$$R_H = (U_H d) / (B_z I_x) = f / (e \bar{p}) \quad (1)$$

( $R_H$ =HALL-Konstante,  $U_H$ =HALL-Spannung,  $d$ =(interferometrisch<sup>6</sup> gemessene) Schichtdicke,  $B_z$ =magnetische Kraftflußdichte in Richtung der Schichtnormalen,  $I_x$ =Schichtstrom und  $f$ =Strefaktor, hier zu  $3 \pi/8$  angenommen).

<sup>1</sup> O. MADELUNG, Handb. f. Physik 20, 1 [1957].

<sup>2</sup> J. E. DAVEY, J. Appl. Phys. 52, 877 [1961].

<sup>3</sup> J. W. THORNHILL u. K. LARK-HOROWITZ, Phys. Rev. 82, 762 [1951].

<sup>4</sup> G. A. KUROY, S. A. SEMILETOV u. Z. G. PINSKER, Dokl. Akad.

Nauk SSSR 110, 970 [1956] (engl. Übers. Soviet Phys. Dokl. 1, 604 [1956]).

<sup>5</sup> F. ECKART u. G. JUNGK, Ann. Phys., Lpz. 7, 210 [1961].

<sup>6</sup> S. TOLANSKY, Multiple Beam Interferometry, Oxford University Press, London 1948.



einen Wert von etwa  $3,5 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3$ , der mit wachsender Schichtdicke nur schwach abnimmt. Für die stärkere Abnahme des spezifischen Widerstandes mit wachsender Schichtdicke gibt es zwei Erklärungen: einmal wird der einen hohen Widerstand und damit eine kleine Beweglichkeit vortäuschende Einfluß der Korngrenzen abnehmen, zum anderen wird der Anteil der Oberflächenstörungen an der die Beweglichkeit bestimmenden Trägerstreuung kleiner. Die Beweglichkeit  $\mu$  innerhalb der Kristallite wird vermutlich wesentlich größer sein als die gemessene mittlere Beweglichkeit  $\bar{\mu} = R_H/\rho$ .

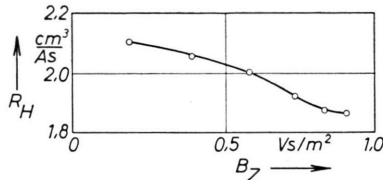


Abb. 2. Abhängigkeit der HALL-Konstanten  $R_H$  einer Germanium-Aufdampfschicht ( $d=1360 \text{ \AA}$ ) von der magnetischen Kraftflußdichte  $B_z$ .

Über diese grobe Abschätzung hinaus läßt sich die in Abb. 2 wiedergegebene Abhängigkeit der HALL-Konstanten von der Kraftflußdichte nur durch die Annahme zweier Defektelektronenarten erklären<sup>7</sup>. Dieser Verlauf, der auch bei defektleitenden ein- und polykristallinen Massivproben auftritt, wurde ausnahmslos an allen untersuchten Proben gefunden. Man kann ihn in den Grenzfällen kleiner und großer Kraftflußdichten ohne Schwierigkeiten auswerten; denn die Lösung der Transportintegrale<sup>8,9</sup> liefert für diese Grenzfälle einfache Näherungen.

Mit der Bedingung, daß die Querstromdichte

$$i_y = e(p_1 \mu_1 + p_2 \mu_2) E_y \quad (2)$$

( $p_1, p_2$  sind die Konzentrationen und  $\mu_1, \mu_2$  die Beweglichkeiten der beiden Defektelektronenarten; der elektronische Anteil wurde vernachlässigt,  $E_y$ =Querfeldstärke)

verschwindet, ergibt sich für die HALL-Konstante in der Näherung für schwache Felder und kleine Beweglichkeiten der nichtartierten Ladungsträger

$$R_H = \frac{E_y}{i_x B_z} = \frac{f_1 p_1 + f_2 p_2 b^2}{e(p_1 + p_2 b)^2} \quad (3)$$

( $b = \mu_2/\mu_1$ =Beweglichkeitsverhältnis; die Streufaktoren  $f_i$  wurden wieder gleich  $3\pi/8$  gesetzt, da der Anteil der Streuung an ionisierten Störstellen nicht bekannt ist).

Übersichtlich wird auch die Näherung für starke Felder mit

$$R_{H\infty} = [e(p_1 + p_2)]^{-1}, \quad (4)$$

<sup>7</sup> Kürzlich wurde über Germanium-Aufdampfschichten berichtet<sup>5</sup>, bei denen eine mit wachsender magnetischer Feldstärke zunehmende HALL-Konstante beobachtet wurde. Insbesondere wurde gefolgert, daß eine Übereinstimmung mit theoretischen Werten<sup>10</sup> dann vorliegt, wenn der Ein-

fluß der Defektelektronen mit der kleineren effektiven Masse vernachlässigt wird.

bei der also nur noch die Summe der Ladungsträger ohne Einfluß der Streumechanismen eingeht. Obwohl hier (Abb. 2) der zweite Grenzfall sicher nicht erreicht wird, führt die Auswertung zu einem sinnvollen Ergebnis, da erfahrungsgemäß bei höheren Kraftflußdichten keine starken Änderungen mehr zu erwarten sind<sup>10</sup>. Auch die Tatsache, daß das die Grenzfälle bestimmende Produkt  $\mu B$  hier noch klein ist, sollte nicht bedenklich sein, da die abgeschätzten Beweglichkeiten aus den oben angeführten Gründen sicherlich zu klein sind. Mit Gln. (3) und (4) erhält man für die in Abb. 2 angegebenen Daten

$$p_1 = 3,4 \cdot 10^{18}/\text{cm}^3 \quad \text{und} \quad p_2 = 1,5 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3.$$

Das hieraus resultierende Konzentrationsverhältnis  $p_2/p_1 = 0,045$  weicht nur wenig von den von Einkristallen her bekannten Ergebnissen ab<sup>10</sup> und stimmt zumindest in der Größenordnung mit dem aus dem Verhältnis der effektiven Massen berechneten Konzentrationsverhältnis von 0,062 überein.

Auch die verfeinerte Rechnung liefert sicherlich nur Näherungswerte, im wesentlichen aus zwei Gründen:

a) Der Einfluß der Streuung an ionisierten Störstellen, der die Abhängigkeit der HALL-Konstanten von der Kraftflußdichte u. U. erheblich modifiziert<sup>10</sup>, wurde vollständig vernachlässigt.

b) Der Auswertung wurde ohne genauere Kenntnis der Trägerbeweglichkeiten in den untersuchten Schichten das von Einkristallen her bekannte Beweglichkeitsverhältnis  $\mu_2/\mu_1 = 8$  zugrunde gelegt. Zumindest qualitativ stimmt jedoch die Änderung der HALL-Konstanten

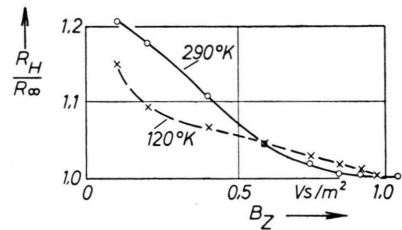


Abb. 3. Verhältnis der HALL-Konstanten  $R_H/R_{H\infty}$  ( $R_{H\infty}$  angenähert durch die Meßwerte bei der größten Kraftflußdichte  $B_z$ ) einer anderen Germanium-Aufdampfschicht ( $d=680 \text{ \AA}$ ) als Funktion der Kraftflußdichte  $B_z$  bei zwei verschiedenen Meßtemperaturen.

mit der Kraftflußdichte und auch die Verschiebung des steilen Abfalls bei Änderung der Meßtemperatur (Abb. 3) mit den an Germanium-Einkristallen gewonnenen Ergebnissen überein.

fluß der Defektelektronen mit der kleineren effektiven Masse vernachlässigt wird.

<sup>8</sup> O. MADELUNG, Z. Naturforschg. **8 a**, 791 [1953].

<sup>9</sup> R. K. WILLARDSON, T. C. HARMAN u. A. C. BEER, Phys. Rev. **96**, 1512 [1954].

<sup>10</sup> A. C. BEER u. R. K. WILLARDSON, Phys. Rev. **110**, 1286 [1958].