

Hall-Konstante und Elektronenbeweglichkeit von InSb, InAs und $\text{In}(\text{As}_{0,8}\text{P}_{0,2})$ bei hohen Magnetfeldern

Von EBERHARDT BRAUNERSREUTHER

CERN Genf

FRIEDRICH KUHRT und HANS-JOACHIM LIPPMANN

Siemens-Schuckertwerke AG, Nürnberg, Laboratorium der Zentral-Werksverwaltung

(Z. Naturforschg. 15 a, 795—799 [1960]; eingegangen am 16. Juli 1960)

HALL-Konstante und Elektronenbeweglichkeit wurden an drei verschiedenen III—V-Halbleitern, die für die technische Anwendung der galvanomagnetischen Effekte von besonderem Interesse sind, bis zu Magnetfeldern von 180 kG gemessen. Die HALL-Konstante von InAs und $\text{In}(\text{As}_{0,8}\text{P}_{0,2})$ ist im Rahmen der Meßgenauigkeit feldunabhängig, während die HALL-Konstante von InSb bis 170 kG um 15% abfällt. HALL-Generatoren aus InAs und InAsP sind daher für die Messung höchster Magnetfelder geeignet. Da die Elektronenbeweglichkeit bei allen drei Materialien mit wachsendem Magnetfeld stark abnimmt, durchläuft der HALL-Winkel in Abhängigkeit vom Magnetfeld ein Maximum.

Die intermetallischen Verbindungshalbleiter aus Elementen der III. und V. Gruppe des periodischen Systems haben im Hinblick auf die technische Ausnutzung galvanomagnetischer Effekte in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen¹. Unter den galvanomagnetischen Effekten besitzt der HALL-Effekt besonderes Interesse, da die HALL-Spannung dem den Halbleiter durchsetzenden Magnetfeld weitgehend proportional ist. Die hohe Elektronenbeweglichkeit bei den III—V-Halbleitern, insbesondere bei Indiumantimonid, Indiumarsenid und dem Mischkristall Indiumarsenidphosphid, führte zur Entwicklung der HALL-Generatoren. HALL-Generatoren gestatten auf einfache Weise die Messung von Magnetfeldern. Die Proportionalität zwischen HALL-Spannung und Magnetfeld und damit die Feldunabhängigkeit der HALL-Konstante ist für InSb und InAsP bis 20 kG, für InAs bis ca. 40 kG nachgewiesen. Wesentlich höhere Felder treten z. B. bei Plasmaentladungen in der Kernfusionsforschung auf oder in den gepulsten Ablenk magneten bei Experimenten mit Teilchen hoher Energie. Um die vorteilhafte Anwendung der HALL-Generatoren bei der Messung solcher Magnetfelder zu ermöglichen, wurden die Halbleiter InSb, InAs, $\text{In}(\text{As}_{0,8}\text{P}_{0,2})$ im Hinblick auf HALL-Konstante und Elektronenbeweglichkeit bis zu Magnetfeldern von ca. 180 kG untersucht.

1. Meßanordnung

Die Messungen wurden in einem gepulsten Ablenk magneten der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN) Genf in der Zeit vom 25. 4. bis 15. 5. 1960 durchgeführt. Abb. 1 zeigt die nach Art einer HELMHOLTZ-Spule aufgebaute Wicklung des Magneten

im Schnitt. Jeder Ring der Spule besteht aus 20 elektrisch in Reihe geschalteten Kupferscheiben. In Abb. 2 ist der fertig montierte Magnet zu sehen. Die beiden Aufnehmerschalen für die Wicklung bestehen aus unmagnetischem Stahl. Die magnetische Achse verläuft in Abb. 2 horizontal von links vorn nach rechts hinten, zentral durch die zylindrische Öffnung des Plexiglas-einsatzes. Unter dieser Öffnung befindet sich der Anschlußstutzen für die Ölumlaufkühlung, während im Bild oben die beiden Anschlußblasen der Wicklung zu sehen sind. Der elektrische Teil der Stoßanlage besteht aus einer Kondensatorbatterie ($C=0,075\text{ F}$), die über einen Selengleichrichter und Widerstände auf maximal 2 kV aufgeladen wird (Ladezeit ca. 1 min). Nach Abtrennen des Ladekreises wird die Kondensatorbatterie mit Ignitrons über die Magnetspule entladen. Das negative Überspringen der Spannung wird ebenfalls durch Ignitrons auf ca. 10—15% begrenzt. Der maximale Spulenstrom beträgt ca. 30 kA bei einer Induktivität von $48 \cdot 10^{-6}\text{ Hy}$ und einem effektiven OHMSchen Kreiswiderstand von $8 \cdot 10^{-3}\text{ }\Omega$.

Zur Messung von HALL-Konstante und Leitfähigkeit wurden die Halbleiterproben in den homogenen Feldbereich* im Zentrum der Spule gebracht. Die Absolutmessung des Magnetfeldes im Zentrum erfolgte mit einer kleinen Induktionsspule (Durchmesser 10 mm, Windungsfläche $4,08\text{ cm}^2$). Die Induktionsspannung dieser Spule wurde mit einem von der Auslösung des Entladungsstoßes getriggerten Kathodenstrahloszillographen aufgezeichnet. Den zeitlichen Verlauf der magnetischen Induktion erhält man durch Planimetrieren dieser Spannungskurve. Um für die weiteren Meßreihen den unständlichen Weg der Integration zu umgehen, wurde ein Halbleiterstreifen aus $\text{In}(\text{As}_{0,8}\text{P}_{0,2})$ (Länge 20 mm,

¹ H. WELKER, Neue Werkstoffe mit großem HALL-Effekt und großer Widerstandsänderung im Magnetfeld. ETZ-A 76, 513 [1955].

* Durch eine getrennte Meßreihe wurde der Innenraum der Magnetspule punktförmig vermessen. Dabei wurde festgestellt, daß das Magnetfeld in einem im Zentrum der Spule liegenden, zylindrischen Raum von 4 cm Länge und 2 cm Radius auf 1% homogen ist.



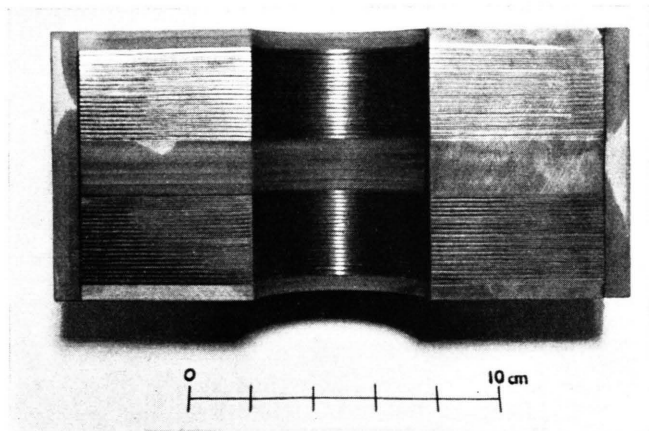


Abb. 1. Magnetspule im Schnitt.

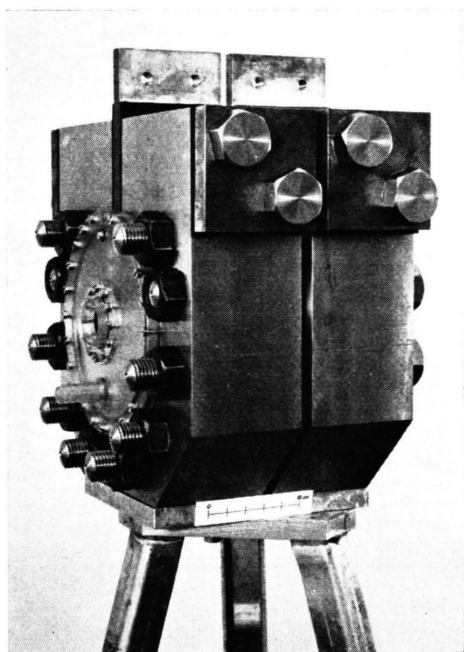


Abb. 2. Ansicht des Magneten.

Breite 2 mm, Dicke 0,1 mm) unmittelbar vor die Induktionsspule gesetzt und die an diesem Halbleiterstreifen auftretende HALL-Spannung mit der Induktionsspule absolut geeicht. Die Anbringung von Induktionsspule und Halbleiterstreifen aus InAsP auf der Stirnfläche eines Plexiglastempels zeigt Abb. 3. Zur Vermeidung induktiver Störspannungen sind Steuerstromzuführung und HALL-Spannungsabnahme induktionsfrei geführt. Der Steuerstrom von 50 mA wurde einem Konstantspannungsgerät (500 V) über einen Vorwiderstand entnommen. Induktionsspannung und HALL-Spannung wurden von einem Kathodenstrahloszillographen mit Elektronenschalter gleichzeitig aufgezeichnet. Ein solches Eichoszillogramm bei einer Kondensatorspannung von 1,5 kV zeigt Abb. 4. Aus dem zeitlichen Verlauf der HALL-

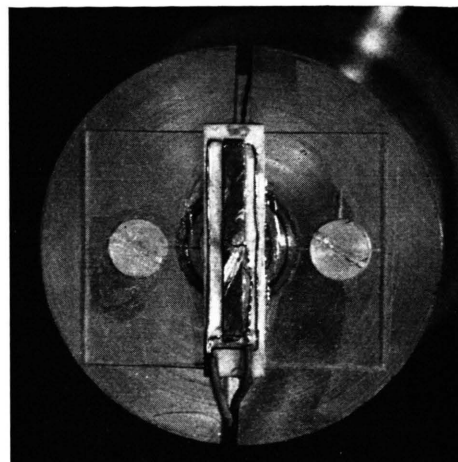
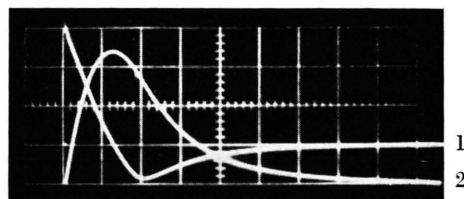
Abb. 3. Anordnung von Induktionsspule und streifenförmiger Feldsonde aus In(As_{0,8}P_{0,2}).

Abb. 4. Eichoszillogramm: 1 Induktionsspannung, 2 HALL-Spannung (Zeitablenkung 2 msec/cm).

Spannung ist zu ersehen, daß die Dauer des Magnetfeldimpulses ca. 8 msec beträgt. Die Auswertung in Abb. 5 läßt erkennen, daß die HALL-Spannung der HALL-Probe aus In(As_{0,8}P_{0,2}) bis 180 kG (maximal erreichte Induktion) im Rahmen der Meß- und Auswertegenauigkeit von ca. $\pm 3\%$ der magnetischen Induktion proportional ist.

Bei den Meßreihen, die zu den nachfolgend beschriebenen Ergebnissen führten, wurde die jeweilig zu untersuchende Halbleiterprobe im Zentrum der Magnetspule dem eingeeichten Halbleiterstreifen gegenübergestellt. Die Ausgangsspannung der zu vermessenden Halbleiterprobe und die der magnetischen Induktion proportionale HALL-Spannung der geeichten Halbleiterprobe aus In(As_{0,8}P_{0,2}) wurden gleichzeitig von einem Kathodenstrahloszillographen aufgezeichnet. Als Beispiel eines solchen Meßoszillogramms ist in Abb. 6 der Verlauf der magnetischen Induktion (Kurve mit positiver Zählrichtung der Ordinate) und die HALL-Spannung einer InAs-Probe (negative Zählrichtung der Ordinate) wiedergegeben.

2. Meßergebnisse

Die Meßproben bestanden aus polykristallinem, n-leitendem Halbleitermaterial. Die elektrischen Daten des untersuchten Indiumantimonids waren HALL-Konstante $R_h = 350 \text{ cm}^3/\text{Asec}$ und Leitfähigkeit

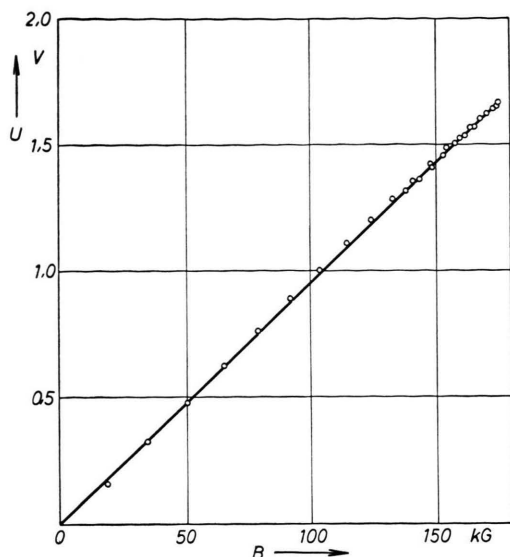


Abb. 5. HALL-Spannung der streifenförmigen Feldsonde aus $\text{In}(\text{As}_{0,8}\text{P}_{0,2})$ in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion.

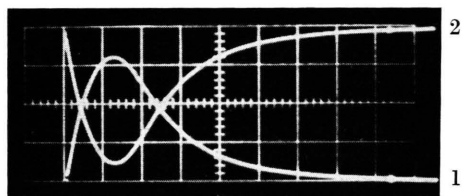


Abb. 6. Meßoszillogramm: 1 Verlauf der magnetischen Induktion, 2 HALL-Spannung einer InAs-Probe (Zeitablenkung 2 msec/cm).

$\sigma = 200 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ bei 20°C , des verwendeten Indiumarsenids $R_h = 100 \text{cm}^3/\text{Asec}$ und $\sigma = 240 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ und schließlich des Mischkristalls $\text{In}(\text{As}_{0,8}\text{P}_{0,2})$ $R_h = 200 \text{cm}^3/\text{Asec}$ und $\sigma = 70 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$. Der Steuerstrom (Probenstrom) wurde bei den einzelnen Meßproben so bemessen, daß die Temperaturerhöhung der Halbleiterschicht auch bei dem zu erwartenden maximalen Widerstandsanstieg im Magnetfeld unter 1°C lag. Die Umgebungstemperatur (Temperatur des umlaufenden Kühlöles), bei der die Messungen durchgeführt wurden, betrug 15°C .

2.1. Hall-Konstante als Funktion des Magnetfeldes

Zur Bestimmung der HALL-Konstante in Abhängigkeit vom Magnetfeld wurden streifenförmige Halbleiterproben (20 mm lang, 2 mm breit, Dicke 0,1 mm) verwendet, um den Geometrieinfluß auf die HALL-Spannung klein zu halten². Ferner wurde zur Vermeidung störender Induktionsspannungen

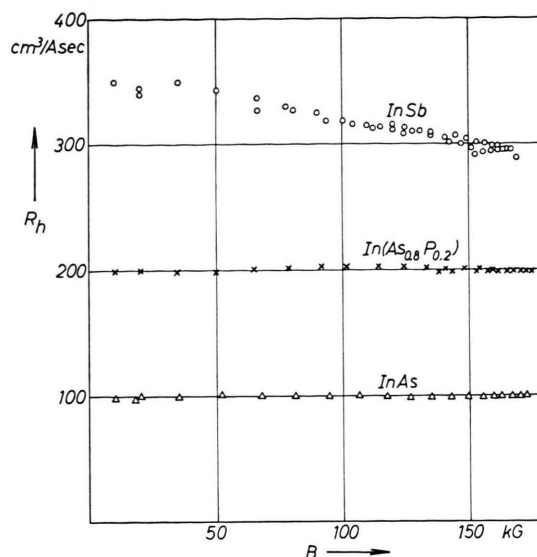


Abb. 7. HALL-Konstante von InAs, $\text{In}(\text{As}_{0,8}\text{P}_{0,2})$ und InSb als Funktion des Magnetfeldes.

die Leitungsführung zu den Steuerstrom- und HALL-Spannungselektroden gemäß Abb. 3 induktionsfrei verlegt. Bei der Anbringung der HALL-Spannungselektroden wurde auf eine möglichst punktförmige Ausführung der Kontakte geachtet (Breite 0,2 mm). Die Meßergebnisse zeigt Abb. 7. Die HALL-Konstante von InAs und $\text{In}(\text{As}_{0,8}\text{P}_{0,2})$ ist danach bis zu Induktionen von 175 kG im Rahmen der Meßgenauigkeit von ca. $\pm 3\%$ feldunabhängig*. Bei Indiumantimonid zeigt sich dagegen ein leichter Abfall der HALL-Konstante mit dem Magnetfeld von ca. 15% bei 170 kG.

2.2. Elektrische Leitfähigkeit als Funktion des Magnetfeldes

Die Proben für die Leitfähigkeitsmessungen an den genannten Halbleitermaterialien hatten ebenfalls eine Länge von 20 mm, eine Breite von 2 mm und eine Dicke von 0,1 mm. Die Meßkontakte zur Bestimmung der Leitfähigkeit waren in der Mitte einer Längskante des Halbleiterstreifens im Abstand von 4 mm angebracht. Auf diese Weise wurde die Leitfähigkeitsänderung im Magnetfeld unabhängig vom Geometrieanteil der magnetischen Widerstandsänderung gemessen^{3,4}. Die Abnahme der Meßspannung

² H. J. LIPPmann u. F. KUHRt, Z. Naturforsch. **13 a**, 474 [1958].

* Nach Fertigstellung des Manuskripts erfuhren wir durch eine persönliche Mitteilung des Herrn Dr. WEISS, daß er für InAs bis 120 kG ebenfalls eine Feldunabhängigkeit der HALL-Konstante feststellen konnte.

³ H. WEISS, Z. Naturforsch. **12 a**, 80 [1957].

⁴ H. J. LIPPmann u. F. KUHRt, Z. Naturforsch. **13 a**, 462 [1958].

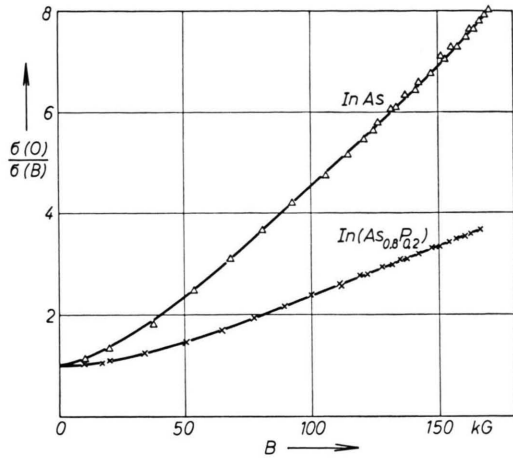


Abb. 8. $\sigma(0)/\sigma(B)$ von InAs und In(As_{0,8}P_{0,2}) als Funktion des Magnetfeldes.

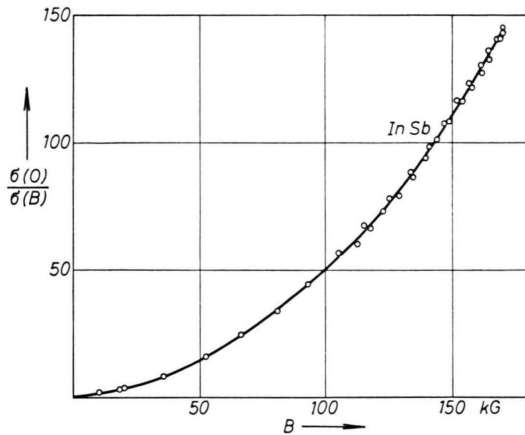


Abb. 9. $\sigma(0)/\sigma(B)$ von InSb als Funktion des Magnetfeldes.

und die Zuführung des konstanten Erregerstromes der Probe erfolgte induktionsfrei. In Abb. 8 ist das Verhältnis der Leitfähigkeit beim Magnetfeld Null zur Leitfähigkeit beim Magnetfeld B bis ca. 170 kG für In(As_{0,8}P_{0,2}) und InAs dargestellt. Die Leitfähigkeit sinkt danach bei In(As_{0,8}P_{0,2}) um den Faktor 3,8 und bei InAs um den Faktor 8 ab. Bei InSb (Abb. 9) ist dagegen die Abnahme der Leitfähigkeit mit dem Magnetfeld um eine Größenordnung stärker, und zwar beträgt die Leitfähigkeit bei 170 kG nur noch 1/145 des Wertes beim Magnetfeld Null. In Abb. 10 ist die Größe $\frac{\sigma(0)}{\sigma(B)} - 1$ über der magnetischen Induktion B in doppeltlogarithmischem Maßstab für die drei Halbleitermaterialien aufgetragen. Die Leitfähigkeit als Funktion des Magnetfeldes B läßt sich danach näherungsweise durch den Ausdruck

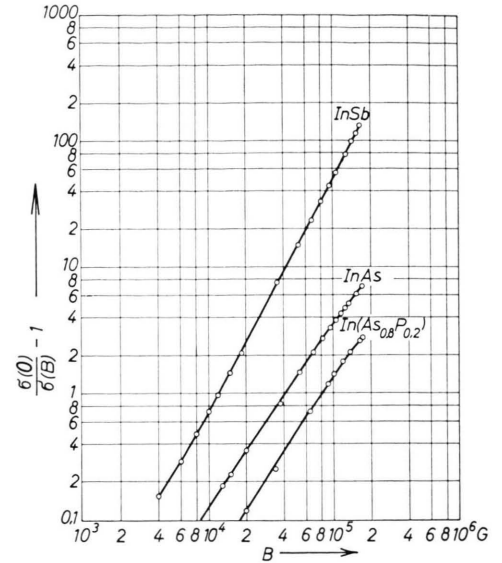


Abb. 10. $\sigma(0)/\sigma(B) - 1$ als Funktion des Magnetfeldes in doppeltlogarithmischer Darstellung.

$$\frac{\sigma(0)}{\sigma(B)} = 1 + a B^n$$

beschreiben. Dabei beträgt der Exponent im Bereich von 10 bis 100 kG für Indiumarsenidphosphid und Indiumarsenid $n=1,5$ und für Indiumantimonid $n=1,85$.

2.3 Beweglichkeit und Hall-Winkel

Aus den Messungen von HALL-Konstante und Leitfähigkeit folgt für die Magnetfeldabhängigkeit der Elektronenbeweglichkeit

$$\mu_n = \frac{8}{3\pi} R_h \sigma$$

der in Abb. 11 in doppeltlogarithmischem Maßstab dargestellte Verlauf. Die Elektronenbeweglichkeit fällt mit wachsendem Magnetfeld. Die stärkste Änderung tritt bei InSb auf; die Beweglichkeit fällt von ca. 60 000 cm²/Vsec beim Magnetfeld Null auf 340 cm²/Vsec bei 170 kG ab.

Da die Elektronenbeweglichkeit für die untersuchten Halbleitermaterialien stark mit dem Magnetfeld abnimmt, wächst der HALL-Winkel Θ entsprechend dem Zusammenhang

$$\tan \Theta = \frac{3\pi}{8} \mu_n B$$

mit B nicht beliebig an, sondern durchläuft ein Maximum. Dieses Maximum wird nach Abb. 12 bei InSb bereits bei ca. 15 kG mit einem Maximalwert

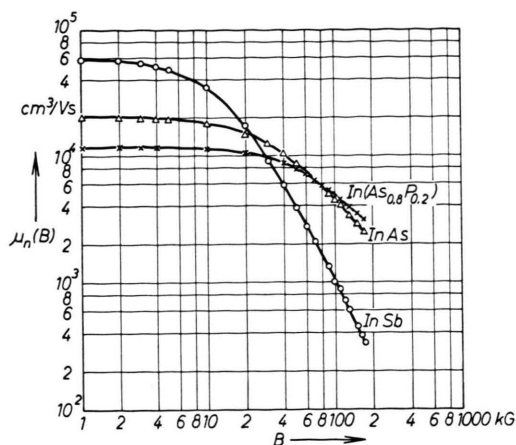


Abb. 11. Elektronenbeweglichkeit als Funktion des Magnetfeldes.

von $\text{tg } \Theta = 4,2$ erreicht, bei InAs bei ca. 80 kG mit $\text{tg } \Theta = 5,3$, während der Maximalwert von $\text{tg } \Theta$ für $\text{In}(\text{As}_{0,8}\text{P}_{0,2})$ noch höher liegt, jedoch im untersuchten Feldbereich nicht erreicht wird.

2.4. Prüfung eines serienmäßigen Hall-Generators

Abschließend wurde ein serienmäßiger Siemens-HALL-Generator der Type FC 33 (Halbleitermaterial $\text{In}(\text{As}_{0,8}\text{P}_{0,2})$, Abmessungen des elektrischen Systems $8 \times 3,5 \times 0,08 \text{ mm}^3$) auf seine Verwendbarkeit zur Messung hoher Magnetfelder geprüft. Wie nach den eben beschriebenen Messungen zu erwarten

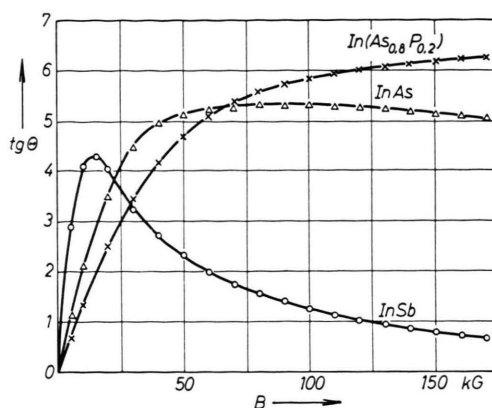


Abb. 12. $\text{tg } \Theta$ als Funktion von der magnetischen Induktion.

ten war, waren Leerlauf-HALL-Spannung und magnetische Induktion bis zu der maximal erreichten Induktion von 179 kG im Rahmen der Meßgenauigkeit von $\pm 3\%$ einander proportional. Nach den vorliegenden Meßergebnissen an InAs darf erwartet werden, daß auch serienmäßige HALL-Generatoren aus diesem Halbleitermaterial zur Ausmessung höchster Magnetfelder geeignet sind. Bei der Messung hoher gepulster Magnetfelder mit HALL-Generatoren aus InAs oder InAsP ist jedoch darauf zu achten, daß vor allem die HALL-Spannungsabnahme induktionsfrei erfolgt.

Den Herren Dr. L. HOFFMANN und Dr. M. MORPURGO von der CERN Genf möchten wir für die Unterstützung bei der Durchführung unserer Untersuchungen danken.

Lumineszenz- und Photoleitungseigenschaften von dotiertem GaN

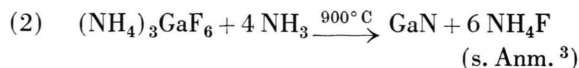
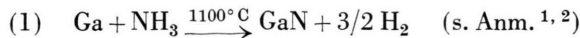
Von H. G. GRIMMEISS, R. GROTH und J. MAAK

Aus dem Zentrallaboratorium, Laboratorium Aachen, der Allgemeinen Deutschen Philips Industrie GmbH.

(Z. Naturforschg. **15 a**, 799—806 [1960]; eingegangen am 18. Juli 1960)

Es wird eine Darstellungsmethode für GaN beschrieben, die den Vorteil niedriger Arbeitstemperatur hat und mannigfache Dotierungen ermöglicht. Die Lumineszenzeigenschaften solcher GaN-Präparate werden in Abhängigkeit von den Herstellungsbedingungen untersucht und die durch Dotierung hervorgerufenen Emissionsbanden bestimmt. Löschung der Fluoreszenz durch Ultrarot ermöglicht bei Zn-, Cd- und Li-Dotierung zusammen mit den Emissionsbanden die Angabe eines Termschemas, Glow-Kurven eine Deutung der kurzwelligen Emissionen (sog. Satelliten) des nicht bewußt dotierten GaN als Trapemission. Ferner wird eine Darstellungsmethode für GaN-Einkristalle angegeben und deren Photoleitung untersucht.

Die Lumineszenzfähigkeit von Galliumnitrid wird u. a. wesentlich durch die Herstellung der Präparate bestimmt. Von den 4 bekannten Darstellungsmethoden



¹ W. C. JOHNSON, J. B. PARSONS u. M. CREW, J. Phys. Chem. **36**, 2651 [1932].

² R. JUZA u. H. HAHN, Z. anorg. Chem. **244**, 133 [1940].

³ H. HAHN u. R. JUZA, Z. anorg. Chem. **244**, 111 [1940].