

Zur Stoßionisation in Germanium-Einkristallen im Temperaturbereich von 4,2° K bis 10° K

Von GÜNTER FINKE und GÜNTER LAUTZ

Aus dem Institut für technische Physik der Technischen Hochschule Braunschweig
(Z. Naturforsch. 12 a, 223—225 [1957]; eingegangen am 19. Januar 1957)

Bei Temperaturen unterhalb 11° K zeigen Ge-Einkristalle schon bei Feldstärken von wenigen V/cm Durchschlagseffekte. Aus der Abnahme der HALL-Konstanten und der Zunahme der Durchschlagfeldstärke mit abnehmender Ladungsträgerbeweglichkeit folgt, daß der starke Stromanstieg auf eine Stoßionisation neutraler Störstellen zurückzuführen ist. Ein transversales Magnetfeld verschiebt die kritische Feldstärke zu höheren Werten. Im Stoßionisationsbereich erreicht die transversale magnetische Widerstandsänderung bei 4,2° K schon bei 250 Gauß die außergewöhnlich großen Werte von 2000%.

Bei hinreichend tiefen Temperaturen findet man beim Germanium, daß der elektrische Widerstand schon bei Feldstärken von wenigen V/cm nicht mehr dem OHMSchen Gesetz genügt. Diese Beobachtung von GERRITSEN¹ ist inzwischen von anderen Autoren^{2—7} an p- wie n-Germanium bestätigt worden. Der Effekt wurde insbesondere von BURSTEIN und Mitarbeitern als Stoßionisation der neutralen Störstellen durch schnelle freie Ladungsträger qualitativ gedeutet^{8—10}.

Im Rahmen einer umfangreichen Untersuchung über das elektrische und magnetische Verhalten von Germanium bei tiefen Temperaturen sollen in der vorliegenden Arbeit neue quantitative Angaben über die Abhängigkeit dieses Effektes von der Temperatur, dem Reinheitsgrad des Germaniums und der transversalen magnetischen Feldstärke mitgeteilt werden. Ferner wird über den HALL-Effekt in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke berichtet.

Die Messungen erfolgten in einem speziellen Heliumverflüssiger nach dem SIMONSCHEN Prinzip, der es gestattete, beliebige Temperaturen im Bereich von 2° K bis 11° K auf $\pm 5/100$ ° K genau einzustellen. Der Wärmekontakt zwischen der He-Druckbombe und der Probe wurde durch eine He-Atmosphäre hergestellt. Die Temperaturmessung erfolgte mit einem geeichten Kohlewiderstand mit exponentieller Widerstandscharakteristik.

Bei den elektrischen Messungen wird der Beginn der Stoßionisation durch ein starkes Ansteigen des Stromes bei einer bestimmten Feldstärke bemerkbar. Der Durchschlag führt nicht zur Zerstörung der Probe, sondern ist reversibel. Abb. 1 zeigt für einen sehr reinen n-Ge-Einkristall (Nr. 15) (bis 250° K eigenleitend; maximale Beweglichkeit $2,27 \cdot 10^5$ cm² pro Vs bei 12,5° K) den Widerstand R als Funktion der angelegten Feldstärke. Bemerkenswert ist, daß schon bei 1,3 V/cm die Stoßionisation einsetzt. Diese Feldstärke reicht hin, um Ladungsträger hoher Beweglichkeit so stark zu beschleunigen, daß sie beim Stoß mit einer neutralen Störstelle ionisierend wirken können. Durch ein Magnetfeld wird die kritische Feldstärke zu höheren Werten hin verschoben^{6,7} (Abb. 1). Diese Beobachtung ist verständlich, da die Beschleunigung der Ladungsträger im Magnetfeld bei gleicher freier Weglänge infolge der Bahnkrümmung zu einer geringeren Energieaufnahme führt als im feldfreien Fall. Aus dem gleichen Grunde muß auch die Abhängigkeit der Durchschlagsspannung vom Magnetfeld um so größer sein, je reiner die Probe, je größer also die freie Weglänge der Ladungsträger ist. Ebenso wird hieraus klar, daß bei Temperaturen, bei denen nahezu alle Störstellen neutral sind, die Durchschlagsspannung nicht mehr temperaturabhängig ist. In starken Magnetfeldern ist nach den eigenen Messungen der Zu-

¹ A. N. GERRITSEN, Physica 15, 427 [1949].

² I. ESTERMANN, A. FONER u. J. ZIMMERMANN, Phys. Rev. 75, 1631 [1949].

³ E. J. RYDER, Phys. Rev. 90, 766 [1953].

⁴ N. SCALAR, E. BURSTEIN, W. TURNER u. I. W. DAVISSON, Phys. Rev. 91, 215 [1953].

⁵ G. DRESSELHAUS, A. F. KIP u. F. KITTEL, Phys. Rev. 92, 827 [1953].

⁶ F. J. DARNELL u. S. A. FRIEDBERG, Phys. Rev. 98, 1860 [1955].

⁷ E. BURSTEIN, G. PICUS u. N. SCALAR, Photoconductive Conf. Nov. 1954, John Wiley, New York 1956, S. 392.

⁸ N. SCALAR, E. BURSTEIN u. I. W. DAVISSON, Phys. Rev. 92, 858 [1953].

⁹ E. M. CONWELL, Phys. Rev. 94, 1068 [1954].

¹⁰ E. J. RYDER, I. M. ROSS u. P. A. KLEINMAN, Phys. Rev. 95, 1342 [1954].



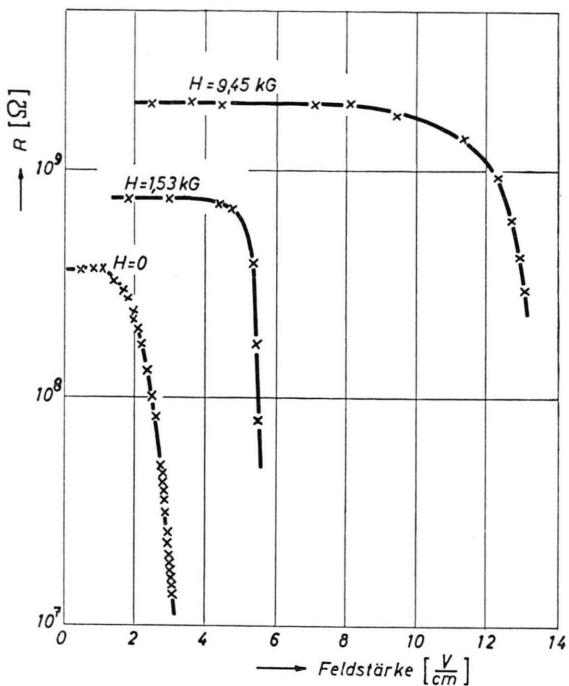


Abb. 1. Widerstand eines n-Ge-Einkristalls (Nr. 15) bei $4,2^\circ\text{K}$ in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke. Parameter: transversale magnetische Feldstärke.

sammenhang zwischen der kritischen Feldstärke und dem Magnetfeld nicht linear. Besonders bei höheren Temperaturen kann ein von Probe zu Probe verschiedener komplizierterer Verlauf auftreten. Bei einer p-n-kompensierten Probe (Nr. 17) (bis 260°K eigenleitend; maximale Beweglichkeit $7,25 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 \text{ pro Vs}$ bei 25°K) liegt die Durchschlagsfeldstärke bei $4,2^\circ\text{K}$ bei $7,7 \text{ V/cm}$.

Die Änderung der Ladungsträgerkonzentration durch die Stoßionisation in Abhängigkeit von der Feldstärke zeigt die Abb. 2 an der p-n-kompensierten Probe 17 bei $T = 8,5^\circ\text{K}$. Es ist ersichtlich, daß die HALL-Konstante und damit die Ladungsträgerkonzentration in gleicher Weise ab- bzw. zunehmen, wie der Widerstand abfällt. Die Änderung des Widerstandes wird also eindeutig durch Ladungsträgervervielfachung hervorgerufen und nicht durch eine Änderung der Beweglichkeit¹¹.

Unterstellt man diese Deutung als richtig, so müßte die Durchschlagsspannung mit abnehmender Trägerbeweglichkeit ansteigen. Diese Folgerung wird durch die eigenen Versuche bestätigt (Abb. 3). Mit steigender Temperatur sollten die Werte der kriti-

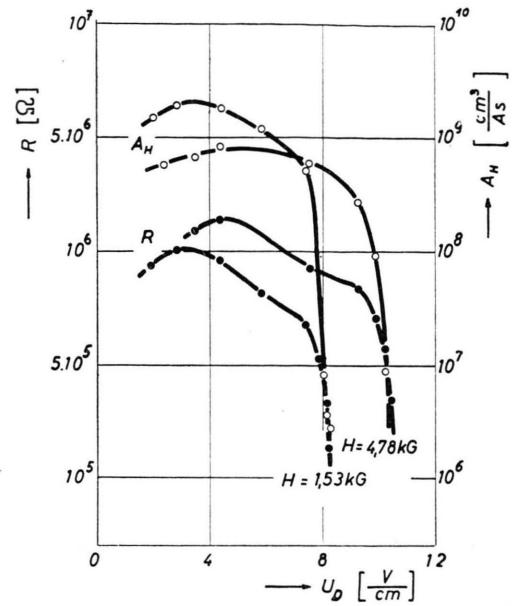


Abb. 2. Widerstand und HALL-Konstante als Funktion der elektrischen Feldstärke bei einem p-n-kompensierten n-Ge-Einkristall (Nr. 17) bei $8,5^\circ\text{K}$.

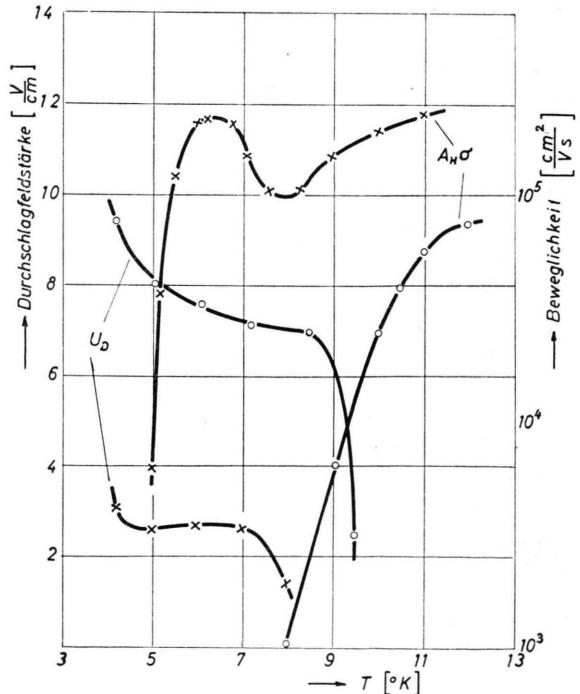


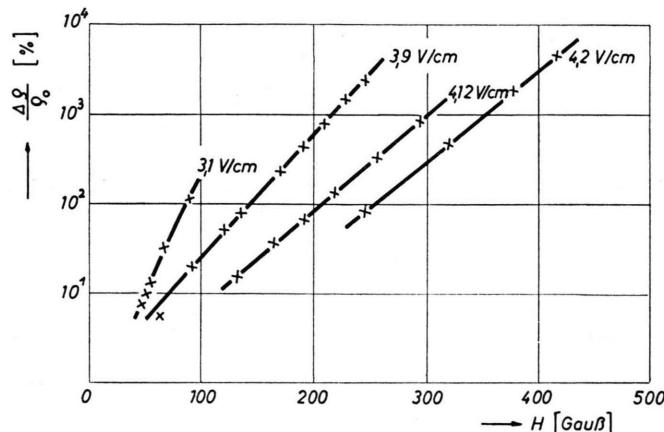
Abb. 3. Durchschlagsfeldstärke und Ladungsträgerbeweglichkeit der Ge-Einkristalle Nr. 15 (hochrein) \times und Nr. 17 (p-n-kompensiert) \circ zwischen $4,2^\circ\text{K}$ und 11°K .

¹¹ E. M. CONWELL, Phys. Rev. **90**, 769 [1953].

schnen Feldstärke sinken und im Bereich von 8° bis 10° K bei unseren Proben ein Minimum durchlaufen. Bei Temperaturen oberhalb 12° K liegen die Durchschlagsfeldstärken oberhalb 25 V/cm. Das Minimum der kritischen Feldstärke konnte nicht genau bestimmt werden, da die Stromwärme in der benutzten Apparatur keine hinreichende Temperaturkonstanz zuließ.

Ergebnisse ausführlicher Messungen der transversalen magnetischen Widerstandsänderung $\Delta\varrho/\varrho_0$

von einer Änderung der Orientierung von elektrischem und magnetischem Feld, sofern nur die Transversalität gewahrt bleibt. Sicher ist diese starke Abhängigkeit von der Feldstärke zum Teil durch eine Aufhebung der Stoßionisation zu verstehen. Eine quantitativ theoretische Deutung der Stoßionisation und der durch sie bedingten anomal großen $\Delta\varrho/\varrho_0$ -Werte kann erst erfolgen, wenn weitere Messungen genauere Aufschlüsse über die Wechselwirkung der schnellen Ladungsträger mit den neutralen und ionisierenden Störstellen und den Gitterschwingungen ergeben haben.



bei $4,2^\circ$ K an der reinen Probe 15 zeigt die Abb. 4. Die Messung erfolgte im Durchschlagsgebiet und läßt ein exponentielles Anwachsen der magnetischen Widerstandsänderung bis zu einigen 1000% bei Feldstärken unter 300 Gauß erkennen.

Diese hier erstmalig publizierten Werte liegen weit über den bisher gemessenen Widerstandsänderungen an Elektronenleitern. Mit wachsender elektrischer Feldstärke wird der Einfluß des Magnetfeldes auf die Widerstandsänderung geringer, die Steigung der $\ln \Delta\varrho/\varrho_0$ -Geraden also kleiner. Die beobachteten Effekte erweisen sich zudem unabhängig

Abb. 4. Transversale magnetische Widerstandsänderung eines reinen n-Ge-Einkristalls (Nr. 16) bei $4,2^\circ$ K in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke. Parameter: Elektrische Feldstärke.

der Orientierung von elektrischem und magnetischem Feld, sofern nur die Transversalität gewahrt bleibt. Sicher ist diese starke Abhängigkeit von der Feldstärke zum Teil durch eine Aufhebung der Stoßionisation zu verstehen. Eine quantitativ theoretische Deutung der Stoßionisation und der durch sie bedingten anomal großen $\Delta\varrho/\varrho_0$ -Werte kann erst erfolgen, wenn weitere Messungen genauere Aufschlüsse über die Wechselwirkung der schnellen Ladungsträger mit den neutralen und ionisierenden Störstellen und den Gitterschwingungen ergeben haben.

Abschließend danken wir Herrn Prof. Dr. E. Justi für die Möglichkeit zur experimentellen Durchführung dieser Arbeit in seinem Institut für technische Physik. Die Ge-Einkristalle wurden durch die freundliche Vermittlung von Herrn Prof. Dr. MALSCH von der Fa. Telefunken zur Verfügung gestellt. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat die Versuche durch Leihgaben und Sachbeihilfen im Rahmen ihres Schwerpunktprogrammes „Festkörperphysik“ in großzügiger Weise unterstützt, wofür wir an dieser Stelle danken möchten.