

Abb. 1. Die Kurve  $q^2 - z^2 = 0$  für  $z=4$ . Unabhängig von der speziellen Wahl von  $z$  geht die Kurve stets durch die Bereiche  $0 < k < 1$ ,  $\pi/2 < \Theta < \pi$  und  $1 < k < z$ ,  $0 < \Theta < \pi/2$ .

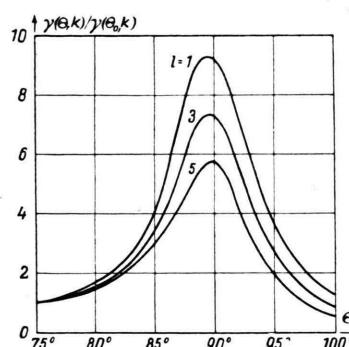


Abb. 2. Die aus  $d\Phi = \gamma(\Theta, k) \sin \Theta d\Theta dk$  folgende Winkelverteilung der Lichtquanten  $\gamma(\Theta, k)/\gamma(\Theta_0, k)$  für die speziellen Werte  $z=4$ ,  $\Theta_0=75^\circ$ ,  $k=1$  und  $Z/137=0,1$  bei magnetischen Übergängen der Ordnung  $l=1$ ,  $3$  und  $5$ .

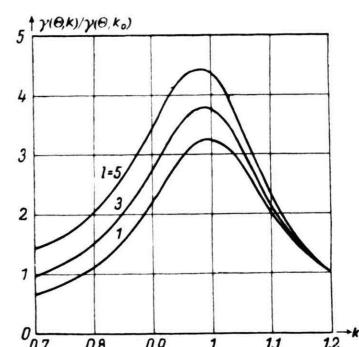


Abb. 3. Die aus  $d\Phi = \gamma(\Theta, k) \sin \Theta d\Theta dk$  folgende Energieverteilung der Lichtquanten  $\gamma(\Theta, k)/\gamma(\Theta_0, k_0)$  für die speziellen Werte  $z=4$ ,  $\Theta=90^\circ$ ,  $k_0=1,2$  und  $Z/137=0,1$  bei magnetischen Übergängen der Ordnung  $l=1$ ,  $3$  und  $5$ .

wobei die Energie der Lichtquanten etwa zwischen 0,1 und 0,4 lag. In diesem Fall besitzt der Impuls der gebundenen Elektronen im Anfangszustand die gleiche Größenordnung wie jener der beobachteten

Lichtquanten. Eine experimentelle Prüfung der vorliegenden Berechnungen würde sowohl eine kleinere Kernladungszahl, als auch die Beobachtung energiereicherer Lichtquanten erfordern.

## Über den Einfluß spezieller Gitterstörungen auf die elektrischen Eigenschaften von Germanium\*

Von K. BLANK, D. GEIST und K. SEILER

Aus dem Institut für theoretische und angewandte Physik der Technischen Hochschule Stuttgart und dem Standard-Laboratorium der Südd. Apparatefabrik Nürnberg

(Z. Naturforschg. 9a, 515—520 [1954]; eingegangen am 17. März 1954)

Unter *reinen* Bedingungen geglühtes bzw. geglühtes und verformtes Germanium zeigt nach dem Abschrecken keine Änderung seiner elektrischen Leitfähigkeit. Die Trägerlebensdauer wird zwar nicht durch Glühen, jedoch durch zusätzliche Verformung drastisch herabgesetzt.

**G**ermaniumeinkristalle, die geringe Mengen gewisser Fremdstoffe wie z. B. Indium oder Arsen enthalten, weichen in ihren elektrischen Eigenschaften in charakteristischer Weise von reinen Kristallen ab. Faßt man die ins Germaniumgitter eingebauten Fremdstoffe als Gitterstörungen auf, so wird man zu der Frage geführt, ob andersartige Gitterstörungen, z. B. einzelne fehlgeordnete Germaniatome, die elektrischen Eigenschaften von Germanium ebenfalls beeinflussen und in welcher

Weise. Das wesentliche Ergebnis der vorliegenden Untersuchungen ist, daß fast alle Effekte, die zunächst Gitterstörungen des reinen Germaniums zugeschrieben wurden, in Wirklichkeit auf den Einfluß von Fremdstoffen zurückgehen.

### § 1. Die Beziehungen zwischen Gitterstörungen, elektrischer Leitfähigkeit und Trägerlebensdauer

Als Gitterstörungen ziehen wir hier einzelne fehlgeordnete Atome, Versetzungen und eingebaute Fremdatome in Betracht. Diese Aufzählung ist unvollständig, aber für uns als Ausgangspunkt ver-

\* Vortrag auf der Physikertagung Bad Dürkheim, April 1953 (ausgenommen Abschnitt 2 B und 2 D).



wendbar<sup>1</sup>. Fehlgeordnete Atome und Versetzungen sind bereits im *chemisch reinen* Kristall möglich, aber häufig mit *Fremdatomen* verknüpft. Fehlgeordnete Atome treten im thermodynamischen Gleichgewicht auf, während Versetzungen (fast) nur in Nichtgleichgewichtszuständen möglich sind. Durch Glühen und Abschrecken erhält man bei tiefen Temperaturen Fehlordnunggrade, die viel höheren Temperaturen als Gleichgewichtszustände zugehören. Versetzungen lassen sich durch plastische Verformung erzeugen. Sie stehen sowohl untereinander, als auch mit andern Gitterstörungen in enger Wechselwirkung. Schließlich ist bei jeder Glühung und Verformung damit zu rechnen, daß Fremdatome eindiffundieren und beim Abkühlen im Gitter verbleiben.

Da die beschriebenen Gitterstörungen nicht direkt (z. B. im Elektronenmikroskop) feststellbar sind, muß ihr Auftreten und ihr Verhalten indirekt erschlossen werden. Von Germanium weiß man, daß atomdispers eingebaute Elemente der fünften bzw. dritten Gruppe des periodischen Systems Leitfähigkeitselektronen bzw. Löcher liefern (in diesem Fall gerade einen Leitfähigkeitsträger pro Atom<sup>2,3</sup>). Man kann daher erwarten, daß andere Fremdstoffe die Trägerzahl in Germanium ähnlich beeinflussen. Letztere wurde in bekannter Weise<sup>4</sup> aus Hall-Effekt und Leitfähigkeit ermittelt. In den orientierenden Versuchen konnte die Beweglichkeit als Materialkonstante betrachtet und die Leitfähigkeit als Maß für die Trägerzahl benutzt werden. Als weitere Größe ist die Trägerlebensdauer  $\tau$  von Interesse<sup>4</sup>.  $\tau$  ist die Zeitkonstante, mit der eine Störung der Elektronen- bzw. Löcherdichte abklingt. Die mit verbesserten Methoden gezüchteten reinen und fehlerfreieren Kristalle zeigten vergrößerte Trägerlebensdauern<sup>5</sup>. Man muß deshalb annehmen, daß die Lebensdauer durch Rekombinationszentren in Form von Fremdatomen oder Gitterstörungen herabgesetzt wird. Zusammen mit der Diffusionskonstante  $D$  bestimmt  $\tau$  den mittleren Weg  $L = (D\tau)^{1/2}$ , den sog. Laufweg, den ein Träger durch Diffusion zurücklegen kann, ehe er rekombiniert. Der Lauf-

weg  $L$  ist nach der Methode von Goucher<sup>6</sup> direkt der Messung zugänglich. Deshalb benutzt man  $L$  bequemerweise als Maßgröße, um Aufschluß über den Zustand der Kristalle zu erhalten.

## § 2. Wärmebehandlung von Germanium

A. Leitfähigkeits- und Laufwegmessungen an geglühtem und abgeschrecktem reinem Germanium<sup>7,8</sup>

Glüht man im Widerstandsofen und Wasserstoffstrom den unteren Teil eines langen, im Quarzrohr freihängenden, bei Zimmertemperatur eigenleitenden Germaniumstabes, so zeigt er nach raschem Abkühlen (durch Entfernen des Ofens) eine ortsabhängige Leitfähigkeit nach Kurve B, Abb. 1. Die entstandenen Akzeptoren<sup>9</sup>, die für die starke p-Leitfähigkeit des geglühten Stabteils verantwortlich sind, wurden bisher den fehlgeordneten Atomen zugeschrieben, die durch die Wärmebehandlung entstanden sein sollen. Diese Annahme ließ sich durch folgenden Versuch wider-

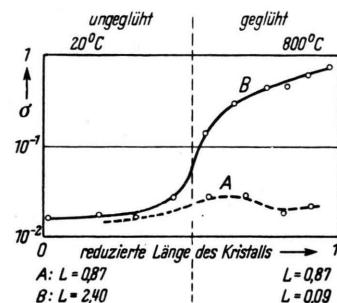


Abb. 1. Elektrische Leitfähigkeit  $\sigma [\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}]$  und Trägerlaufweg  $L [\text{mm}]$  von einseitig geglühten und abgeschreckten Germaniumeinkristallen. A: Erhitzung mit Hochfrequenz, B: Erhitzung mit Widerstandsofen.

legen: Man züchtet einen Germaniumeinkristall und glüht den unteren Teil des freihängenden Kristalls (in derselben Apparatur) mittels Hochfrequenzheizung im Wasserstoffstrom (vgl. Abb. 3 links) in einem Quarzrohr, das seinerseits keine nennenswerte Temperaturerhöhung erfährt. Nach dem Abkühlen binnent ca. 20 sec (durch Abschalten der Hochfrequenzheizung) findet man eine praktisch konstante Leitfähigkeit (Kurve A Abb. 1). Abb. 1 zeigt auch das Verhalten der Laufwege  $L$  bei den beiden Glühmethoden. Beim Glühen mit Hochfrequenz findet praktisch keine Änderung

<sup>1</sup> F. Seitz, „Imperfections in nearly perfect crystals. A synthesis“ in „Imperfections in nearly perfect crystals“. J. Wiley & Sons, New York 1952, p. 3–76.

<sup>2</sup> W. Dürr, J. Jaumann u. K. Seiler, Phys. Verh. **2**, 138 [1951]; Z. Naturforschg. **8a**, 39 [1953].

<sup>3</sup> G. L. Pearson, J. D. Struthers u. H. C. Theurer, Phys. Rev. **77**, 809 [1950].

<sup>4</sup> W. Shockley, Electrons and holes in semiconductors. D. van Nostrand. New York, 1950.

<sup>5</sup> G. K. Teal u. J. B. Little, Phys. Rev. **78**, 647 [1950].

<sup>6</sup> F. S. Goucher, Phys. Rev. **81**, 475 [1951].

<sup>7</sup> K. Seiler (D. Geist), Phys. Verh. **4**, 7 [1953].

<sup>8</sup> K. Seiler, D. Geist, K. Keller u. K. Blank, Naturwiss. **40**, 56 [1953].

<sup>9</sup> H. C. Theurer u. J. H. Scaff, Trans. Amer. Inst. Min. Metall. Engrs **191**, 59 [1951].

statt, beim Glühen im Widerstandsofen tritt eine ausgeprägte Verringerung auf.

Es erhebt sich die Frage, wie die Leitfähigkeits erhöhung bei den älteren Versuchen und das Fehlen derselben bei den neueren zu erklären ist. Daß die Leitfähigkeitserhöhung auf Fremdstoffe zurückgeht, die entweder von der Oberfläche des Germaniums oder aus der heißen Ofenwand stammen, zeigten u. a. Versuche an Einkristallstücken<sup>10</sup>, die vor dem Glühen von einem langen Kristall ohne zu sägen abgebrochen und *nicht* geätzt wurden (selbstverständlich wurde der Ausgangskristall von der Herstellung bis zum Versuch sorgfältig vor oberflächlicher Verunreinigung geschützt). Das Glühen erfolgte zwar im Widerstandsofen, aber in einem Quarzohr, das zuvor (bei hoher Temperatur) mit Chlor behandelt worden war. Die in dieser Apparatur gegläuteten Kristalle zeigten praktisch keine Leitfähigkeitsänderung: durch die spezielle Versuchsführung war die sonst im Widerstandsofen eintretende Verunreinigung vermieden worden. Diese Methode wurde angewandt, um nach Stoffen zu suchen, die für die Leitfähigkeitsänderungen verantwortlich sind; untersucht wurden Kupfer und Silber.

#### B. Der Einfluß von Kupfer und Silber auf die Defektelektronen-Dichte in gegläutetem und abgeschrecktem Germanium<sup>10</sup>

Die Versuche wurden nach der im vorhergehenden Absatz beschriebenen Methode ausgeführt. Nur mußten jetzt die Proben mit Kupfer (bzw. Silber) versehen werden. Zu dem Zweck wurden die abgebrochenen Einkristallstücke in stark verdünnte Kupfersulfatlösungen bekannten Kupfergehalts gelegt, die durch Verdünnen einer Stammlösung erhalten wurden. Da Kupfer edler ist als Germanium, geht letzteres in Lösung und das Kupfer scheidet sich auf der Probe ab.

Die durch Glühen ( $\frac{1}{4}$  Stunde bei 920 bis 930°C) erhaltene p-Leitfähigkeit  $\sigma$  in Abhängigkeit von der Zahl der pro  $\text{cm}^3$  Germanium in die Lösung eingebrachten und auf dem Germanium niedergeschlagenen Kupferatome (bzw. -Ionen) zeigt Kurve B, Abb. 2. Beginnend bei etwa  $10^{14}$  Kupferatomen pro  $\text{cm}^3$  Germanium (ca.  $10^{-6}$  Atom-Proz.!) überschreitet  $\sigma$  die Leitfähigkeit\*  $\sigma_0$  und steigt bis auf maximal  $7.2 (\Omega \text{ cm})^{-1}$ . Dieser Wert entspricht einer Kupferkonzentration von  $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , die offenbar

die Löslichkeitsgrenze von Kupfer in Germanium bei  $920^\circ\text{C}$  angibt. Zu bemerken ist, daß die Akzeptorenzahl im Germanium kleiner gefunden wurde als die Zahl der Kupferatome in der zugehörigen Lösung. Da die Ionisierbarkeit des Kupfers im Germanium eins ist<sup>11</sup>, ist entweder ein Teil des Kupfers beim Glühen weggedampft, oder es wurden nicht alle Kupferatome aus der Lösung auf dem Germanium abgeschieden. Proben, die sich statt 40 Std. (Kurve B, Abb. 2) nur eine halbe Stunde (Kurve A) in der Kupfersalzlösung befanden, zeigten eine etwas kleinere Leitfähigkeit.

Analoge Versuche mit Silber ergaben keine Leitfähigkeitsänderung. Die Unwirksamkeit des Silbers

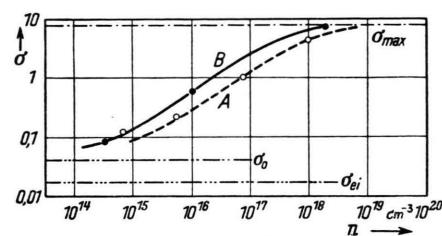


Abb. 2. Elektrische Leitfähigkeit  $\sigma [\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}]$  von oberflächlich mit Kupfer versehenen, gegläuteten und abgeschreckten Germanium-Einkristallen ( $n$  Zahl der Kupferatome in der Lösung pro  $\text{cm}^3$  Germanium).

in diesen Experimenten beruht auf seiner geringen Diffusionsgeschwindigkeit. Spektrographische Untersuchungen zeigten, daß das auf der Oberfläche des Germaniums aus der Silbernitratlösung niedergeschlagene Silber sich auch nach  $\frac{1}{4}$ -ständigem Glühen bei  $920^\circ\text{C}$  noch auf der Oberfläche und nicht im Innern der Probe befand: wurde die Probe abgeschmiegelt und geätzt, so erwies sie sich bei der Spektralanalyse als silberfrei. Das dem Kupfer chemisch nah verwandte Silber ist also bereits nicht mehr in der Lage, den bekannten Glüheffekt<sup>12,9</sup> herzubringen. (Allerdings ist damit nicht gesagt, daß Silber elektrisch nicht wirksam ist, wenn es in das Gitter eingebaut wird.)

#### C. Wärmebehandlung von dotiertem Germanium

Diese Versuche werden unten (Abschn. 3 C) im Zusammenhang mit der plastischen Verformung beschrieben.

verunreinigungen etwas höher als die Eigenleitfähigkeit  $\sigma_{ei}$  (Abb. 2).

<sup>11</sup> C. S. Fuller u. J. D. Struthers, Phys. Rev. **87**, 526 [1952].

<sup>12</sup> C. S. Fuller, H. C. Theurer u. W. van Roosbroeck, Phys. Rev. **85**, 678 [1952].

<sup>10</sup> K. Blank, Diplomarbeit, Technische Hochschule Stuttgart 1953.

\*  $\sigma_0$  ist die bei einem Glüh- und Abschreckversuch ohne absichtlichen Kupferzusatz erreichte Leitfähigkeit; diese liegt infolge der Wirksamkeit von Rest-

#### D) Glüh- und Abschreckversuche an reinem Germanium mit erhöhter Abschreckgeschwindigkeit

Bei den oben beschriebenen Glüh- und Abschreckversuchen unter reinen Bedingungen, bei denen keine Leitfähigkeitsänderungen auftraten, betrug die Abkühlzeit von ca. 800°C bis unter sichtbare Glut ungefähr 20 sec. Man muß fragen, ob diese Zeit nicht schon so lang ist, daß sich der Gleichgewichtszustand (annähernd) einstellt. Wir führten daher Versuche mit gesteigerter Abkühlgeschwindigkeit aus.

Die Probe wurde nach ihrer Herstellung in derselben Apparatur ½ Stde. lang bei mindestens 800°C mittels Hochfrequenzheizung gegläut und anschließend durch Abschneiden der Aufhängung in ein Ölbad von Zimmertemperatur fallen gelassen.

Trotzdem war die Probe im Rahmen der Meßgenauigkeit in allen Teilen bei Zimmertemperatur eigenleitend. Demnach war das Fehlen einer Leitfähigkeitsänderung nicht einfach auf zu geringe Abschreckgeschwindigkeit zurückzuführen (vgl. § 4).

### § 3. Wärmebehandlung und Verformung von Germanium

#### A. Leitfähigkeits- und Laufwegmessungen an geglühtem, verformtem und abgeschrücktem Germanium

Bekanntlich<sup>13,14</sup> läßt sich Germanium unter geeigneten Bedingungen plastisch verformen. Die Untersuchungen mit der Methode des Glühens unter reinen Bedingungen wurden auf das Verhalten von Germanium bei einer zusätzlichen Verformung ausgedehnt. Zu den Versuchen dienten eigens in besonderer Gestalt hergestellte Germaniumeinkristalle (Abb. 3, rechts).

Nach der Züchtung verblieb jeder Kristall in der Apparatur, deren oberer Teil für eine Zugbeanspruchung eingerichtet war (Abb. 3, links). Die Stellen c, e und g hatten einen hinreichend großen Querschnitt, um durch das Hochfrequenzfeld der Glühspule geheizt zu werden; die dünnen Zwischenstücke d und f wurden durch Wärmeleitung miterhitzt und durch die Zugbeanspruchung gedehnt, wie die auftretenden Gleitlinien zeigten. Messungen mit dem Pyrometer ergaben, daß alle Teile des Kristalls, ausgenommen die Stellen a und b, die kalt blieben, eine Temperatur von mindestens 800°C aufwiesen. Das Glühen und die Belastung (3 kg) dauerte 15 min, die Abkühlung (unter Last) erfolgte in ca. 20 sec.

<sup>13</sup> C. J. Gallagher, Phys. Rev. 88, 721 [1952].

Das bemerkenswerte Ergebnis findet sich in Abb. 4, Probe A: weder durch Glühen noch durch zusätzliche Verformung wird eine merkliche Leitfähigkeitsänderung verursacht. Dagegen tritt durch

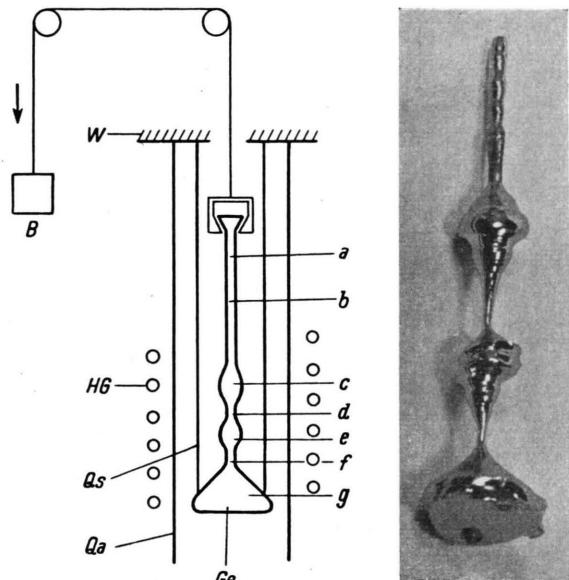


Abb. 3. Glühung und Verformung von Germaniumekristallen unter reinen Bedingungen, links Zugapparatur (schematisch), rechts Einkristall für Zugverformung. B Belastung, W Widerlager, HG Hochfrequenz-Glühspule, Qs Quarzstützrohr, Qa Quarzaußenrohr, Ge Germanium-Einkristall.

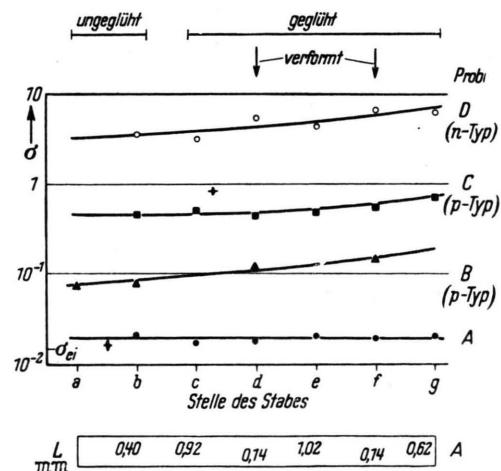


Abb. 4. Elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  [ $\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ ] und Trägerlaufweg  $L$  [mm] von unter reinen Bedingungen gegläuteten, verformten und abgeschreckten Germanium-Einkristallen.

<sup>14</sup> L. Graf, H.-R. Lacour u. K. Seiler, Z. Metallkunde 44, 113 [1953].

die Verformung, und nur durch diese, eine kräftige Verkürzung der Laufwege ein (Abb. 4, Probe A). Da die Lebensdauer dem Quadrat des Laufwegs proportional ist, findet man im verformten reinen Germanium eine Trägerlebensdauer, die um eine bis zwei Größenordnungen kleiner ist, als im unverformten Material. Es ist zu vermuten, daß die bei der Verformung entstehenden Störungen des Gitters (speziell in den Gleitebenen) Anlaß zu erhöhter Rekombination geben.

### B. Einfluß von Fremdstoffen auf die Leitfähigkeit von geglühtem, verformtem und abgeschrecktem Germanium

Über diese Versuche wurde an anderer Stelle berichtet<sup>14</sup>: Der bekannte<sup>12,9</sup> Glüheffekt wird durch die plastische Verformung *verringert*: d. h. die Leitfähigkeitszunahme (in p-leitendem Ge) in den geglühten und verformten Teilen ist kleiner als in den nur geglühten.

### C. Die Leitfähigkeit von geglühtem, verformten und abgeschrecktem, dotiertem Germanium

Aus der Unveränderlichkeit der Zimmertemperaturleitfähigkeit von eigenleitendem Germanium kann noch nicht der zwingende Schluß gezogen werden, daß keine elektrisch wirksamen Fehlstellen beim Glühen und Verformen geschaffen werden. Es ist denkbar, daß die Aktivierungsenergie dieser Fehlstellen so hoch ist, daß sie bei Zimmertemperatur praktisch nicht ionisiert sind und keine Leitfähigkeitsträger liefern. Um Aufschluß zu erhalten, kann man die Temperaturabhängigkeit der Hall-Konstanten messen oder wie in den vorliegenden Messungen Versuche an dotiertem Germanium ausführen. Nehmen wir z. B. an, daß Donatoren hoher Aktivierungsenergie gebildet werden. Diese vermögen zwar in eigenleitendem Germanium bei Zimmertemperatur keine Elektronen ins Leitfähigkeitsband abzugeben; dagegen bewirken sie eine Leitfähigkeitsverminderung in löcherleitendem, p-dotiertem Germanium, indem Elektronen ins Valenzband übergehen und dort die Zahl der von den Akzeptoren bewirkten Löcher verringern. Die Ausführung der Versuche erfolgte wie oben (§ 3 A)

angegeben. Die Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen an drei zugverformten Einkristallen, die elektronen- bzw. löcherleitend waren, zeigt Abb. 4, Proben B, C und D. Daß die Leitfähigkeit nach dem Stabende hin systematisch zunimmt (von a nach g), ist durch das Herstellungsverfahren bedingt (Segregation von Fremdstoffen<sup>2</sup>). Wenn man diesen Effekt berücksichtigt, erkennt man, daß sich die Leitfähigkeit auch bei diesem legierten Germanium trotz Glühung und Verformung nicht ändert, jedenfalls nicht um Größenordnungen, wie es bei der Glühung mit Fremdstoffeinfluß der Fall ist (vgl. die von Abb. 1 übertragenen Werte (Kreuze) in Abb. 4).

### § 4. Vergleich mit andern Arbeiten

Neuere Messungen<sup>15,16</sup> der Akzeptorendichte in geglühtem, abgeschreckten Germanium sind mit unserem Befund verträglich. Auf Grund seiner empfindlicheren Messungen findet Logan<sup>15</sup> nach dem Glühen bei 800°C und rascher Abkühlung ca.  $4 \cdot 10^{13}$  cm<sup>-3</sup> Akzeptoren, ohne schlüssig sagen zu können, ob Fremdatome mitverantwortlich sind oder nicht. Die berichtete Herabsetzung der Lebensdauer<sup>15</sup> tritt bei unseren Versuchen *nicht* auf.

Als ein weiterer Stoff mit hoher Diffusionskonstante in Germanium wurde Lithium aufgefunden<sup>17</sup>, das allerdings den Wert für Kupfer nicht erreicht. Überdies ist das Verhalten des Lithiums im Germaniumgitter von dem des Kupfers etwas verschieden<sup>17</sup>.

Verformungsversuche<sup>18,19</sup> (bei denen ein Fremdstoffeinfluß nicht ausdrücklich vermieden wurde) unter 500°C ergaben eine Zunahme der Löcherleitfähigkeit im Gegensatz zu dem bei hoher Verformungstemperatur von uns (Abschn. 3 B) gefundenen Ergebnis. Die Trägerlebensdauer wurde in Übereinstimmung mit unseren Resultaten nach einer Verformung verringert gefunden.

Zu den Verformungsversuchen unter reinen Bedingungen und den Versuchen mit dotiertem Germanium ist kein vergleichbares Material vorhanden.

### § 5. Zusammenstellung der Resultate

Die ausgeführten Messungen ergaben, daß bei Zimmertemperatur eigenleitendes Germanium nach

<sup>15</sup> R. A. Logan, Phys. Rev. **91**, 757 [1953].

<sup>16</sup> S. Mayburg u. L. Rotondi, Phys. Rev. **91**, 1015 [1953].

<sup>17</sup> C. S. Fuller u. J. A. Ditzenberger, Phys. Rev. **92**, 1015 [1953].

<sup>18</sup> W. C. Ellis u. E. S. Greiner, Phys. Rev. **92**, 1061 [1953].

<sup>19</sup> C. J. Gallagher, Phys. Rev. **92**, 846 [1953].

15 min Glühen bei  $800^{\circ}\text{C}$  und anschließendem Abschrecken mit ca.  $400^{\circ}\text{C/sec}$  Abschreckgeschwindigkeit weniger als  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  bei Zimmertemperatur ionisierte Akzeptoren oder Donatoren aufweist, falls keine Fremdstoffe einwirken können. Dasselbe gilt (für ca.  $40^{\circ}\text{C/sec}$  Abschreckgeschwindigkeit), wenn zugleich so weit plastisch verformt wird, daß deutlich sichtbare Gleitlinien auftreten.

Unter denselben Versuchsbedingungen werden die Trägerlebensdauern bei reinem Glühen nicht geändert, bei gleichzeitiger Verformung jedoch um ein bis zwei Größenordnungen verringert.

Aus Versuchen an dotiertem Germanium ergab sich, daß nach 15 min Glühen bei  $800^{\circ}\text{C}$  bzw. Glühen und Verformen und anschließendem Abschrecken

mit ca.  $40^{\circ}\text{C/sec}$  Abschreckgeschwindigkeit weniger als einige  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  Akzeptoren und einige  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  Donatoren gebildet werden, die bei Zimmertemperatur *nicht* ionisiert sind.

Die Widerstandsänderungen bei Fremdstoffeinfluß gehen bevorzugt auf Kupfer zurück. Im Gegensatz zum chemisch nahe verwandten Silber hat es eine so hohe Diffusionsgeschwindigkeit, daß es bereits in den meist angewandten kurzen Glühzeiten (15 min) vollkommen ins Germanium eindringt.

Herrn Professor Fues danken wir für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und die überlassenen Institutsmittel. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danken wir für die zur Verfügung gestellten Geräte und Meßinstrumente, Herrn Keller (SAF) für die Ausführung der erforderlichen Spektralanalysen.

## Magnetfelder in turbulent strömenden Plasmen

Von P. O. SCHILLING und W. LOCHTE-HOLTGREVEN

Aus dem Physikalischen Institut der Universität Kiel

(Z. Naturforsch. 9a, 520—526 [1954]; eingegangen am 9. April 1954)

Läßt man auf ein Plasma, bestehend aus Ionen und Elektronen, Kräfte wirken, die eine gegenseitige Diffusion hervorrufen, so kommt es bei konservativen Kräften zu einer Ladungstrennung. Die dabei auftretenden Coulomb-Kräfte verhindern eine merkliche Verschiebung der Elektronen gegen die Ionen. Sind die Kräfte nicht konservativ, was bei turbulenter Bewegung des Plasmas möglich ist, so fließen Diffusionsströme, die Magnetfelder hervorrufen. Es wird gezeigt, daß sich diese Magnetfelder *experimentell* nachweisen lassen, wenn man die Flammengase eines mit Sauerstoff und Propan betriebenen Brenners mechanisch in Rotation versetzt.

**S**pektroskopische Beobachtungen haben gezeigt, daß in den Sonnenflecken und auf einigen vermutlich rasch rotierenden Sternen Magnetfelder der Größenordnung  $10^3$  Gauß auftreten.

In allen Fällen, in denen solche Magnetfelder nachgewiesen werden konnten, befinden sich heiße, ionisierte Gase, sogenannte Plasmen, in turbulenter Bewegung. Ein Zusammenhang zwischen rotierenden Plasmen und Magnetfeldern wird nicht nur durch die Beobachtung von Sternen nahegelegt; man kann auch das interstellare Gas der Milchstraße als rotierendes Plasma sehr geringer Dichte auffassen. Ein möglicherweise damit verbundenes Magnetfeld würde das Fehlen des Sternzeitganges sowie die große Dichte der Ultrastrahlung erklären. Bewegen sich nämlich die elektrisch geladenen Ultrastrahlungsteilchen in diesem Feld auf Larmor-Kreisen, deren Durchmesser kleiner als der der Milchstraße ist, so braucht einerseits trotz der ex-

zentrischen Stellung der Erde innerhalb der Milchstraße kein Gang der Ultrastrahlung mit der Sternzeit aufzutreten, andererseits würde dieses Feld die Ultrastrahlung am Verlassen der Milchstraße hindern und die Strahlungsdichte erhöhen<sup>1</sup>. Hierzu würden schon Felder von  $10^{-4}$  Gauß ausreichend sein. Überdies würde dieses Feld auch die Polarisation des Lichtes einiger Sterne verständlich machen.

Während Magnetfelder, die durch Bewegung von Ladungsträgern eines Vorzeichens entstehen, zu den fundamentalen Erscheinungen der Elektrodynamik gehören, liegen über Felder, die bei der Rotation von quasineutralen Gasen auftreten, d. h., von solchen Gasmassen, die in jedem Volumelement die gleiche Anzahl positiver und negativer Ladungsträger enthalten, bisher keine Experimente vor.

<sup>1</sup> A. Schlüter u. L. Biermann, Z. Naturforsch. 5a, 237 [1950].