

bedingt durch unterschiedliche Scharfstellung liegt bei  $0,1 \mu$ .

Anders verhält es sich mit dem Einstellfehler, den die Einstellung auf Fadenpaarmitte bzw. Koinzidenz der Linienzüge im Oszillographen und die Skalenablesung verursacht. Er hing bei optischen Ablesungen auf der Mattscheibe stark ab von der Art der Massenlinie, war kleiner für kräftige und gerade, größer für gekrümmte Massenlinien. Die hierbei beobachtete Schwankung des Meßwertes von Beobachter zu Beobachter wurde damit erklärt, daß verschiedene Beobachter in verschiedener Weise mit den Augen die Integration vornehmen, welche die Einstellung schwach gekrümmter Linien auf Fadenpaarmitte notwendig macht. Die photoelektronische Einstellung nimmt diese Integration über den Bildausschnitt automatisch vor und schließt den persönlichen Fehler aus. Der mittlere Fehler einer Einzelmessung betrug bei unseren Meßreihen  $0,01$  bis  $0,04 \mu$ , wenn man den Skalenablesfehler einschließt.

Das Verfahren zur Ausmessung massenspektrographischer Dublettstände konnte bei einigem Mehraufwand durch den Aufbau dieses photoelektronischen Einstellmikroskopes erleichtert und verbessert werden. Gegenüber der früheren Meßmetho-

dik brachte schon die Mattscheibenablesung einen Fortschritt, während die photoelektronische Einstellung den vorhandenen Einstellmechanismus voll ausnutzt und weniger Einzelmessungen erfordert. Sie strengt die Augen des Beobachters kaum noch an und führt auch bei schwachen, gekrümmten und asymmetrischen Linien zu guten Ergebnissen. Die Grenze der Meßgenauigkeit ist nunmehr allein durch die Güte der Objektivscharfstellung gegeben. Um sie zu überschreiten, müßte die photoelektronische Einstellung entweder auf eine ganz andere Meßmethode angewandt oder ein besseres Scharfstellkriterium gefunden werden. Zur Absoluteichung wurde von der Société Genevoise d'Instruments ein Glasmaßstab bezogen, der wie die Photoplatte unter das Mikroskop gelegt werden kann und dessen Skala nach einem anderen Verfahren<sup>4</sup> elektronisch ausgemessen wurde.

An den Vorarbeiten zu dem beschriebenen Gerät war Dr. R. BIERI, jetzt University of Minnesota, Minneapolis, maßgeblich beteiligt. Insbesondere sind ihm der Entwurf des Mikroskop-Plattenhalters und ein großer Teil der Entwicklungsarbeit zum Zeitablenkgerät zu verdanken.

Herrn Prof. Dr. J. MATTAUCH habe ich für die Anregung dieser Arbeit, seine vielfältige Unterstützung und großzügige Förderung zu danken.

## Elektronenbestrahlung von p-n-Sperrschichten in GaAs

Von H. PFISTER

Aus dem Forschungslaboratorium der Siemens-Schuckertwerke AG., Erlangen

(Z. Naturforsch. **12 a**, 217–222 [1957]; eingegangen am 22. Dezember 1956)

Es wird der Einfluß einer Elektronenbestrahlung auf p-n-Sperrschichten in Gallium-Arsenid untersucht und der Kurzschlußstrom bzw. die EMK in Abhängigkeit von der Strahlintensität gemessen. Bei Bestrahlung mit 45 kV-Elektronen ist der Kurzschlußstrom um den Faktor 7200 größer als der auffallende Elektronenstrom. Dem entspricht ein mittlerer Energiebedarf pro Ladungsträgerpaar von 6,3 eV. Die bei optimaler Anpassung abgegebene Leistung beträgt 8% der auffallenden Strahlintensität. Als Anwendung wird die Messung der Intensität von Elektronenbeugungs-Diagrammen beschrieben.

Die p-n-Übergangszone eines Halbleiterkristalls, d. h. der Bereich, in dem der Leitungstyp von der Überschuß-Leitung zur Defekt-Leitung wechselt, hat die Eigenschaften eines Photo-Elements. Werden durch Bestrahlung des Kristalls in der Zone des p-n-Übergangs oder in dessen Nähe Elektron – Loch-

Paare erzeugt, so werden diese in dem elektrischen Feld des p-n-Übergangs getrennt und es entsteht zwischen dem p- und dem n-Bereich eine Photo-EMK. Über die Bestrahlung von p-n-Sperrschichten mit Licht<sup>1</sup>, RÖNTGEN-Strahlen<sup>2</sup> und Korpuskulaturstrahlen<sup>3</sup> ist verschiedentlich berichtet worden. Be-

<sup>1</sup> M. BECKER u. H. Y. FAN, Phys. Rev. **75**, 1631 [1949]; **78**, 301 [1950]. — W. J. PIETENPOL, Phys. Rev. **82**, 120 [1951]. — D. C. REYNOLDS, G. LEYES, L. L. ANTES u. R. E. MARBURGER, Phys. Rev. **96**, 533 [1954].

<sup>2</sup> J. BACKOVSKY, M. MALKOVSKA u. J. TAUC, Letter in Czech. J. Phys. **4**, 98 [1954]. — J. BRAUNBECK u. J. ZABOVSKY, Naturwiss. **42**, 602 [1955]. — H. PFISTER, Z. Naturforsch. **11 a**, 434 [1956].

<sup>3</sup> C. ORMAN, H. Y. FAN, B. J. GOLDSMITH u. K. LARK-HOROVITZ, Phys. Rev. **78**, 646 [1950]. — P. RAPPAPORT, Phys. Rev. **93**, 246 [1954]. — K. G. MCKAY, Phys. Rev. **84**, 829 [1951]. — R. GREMMELMAIER u. H. WELKER, Z. Naturforsch. **11 a**, 420 [1956].



sonderes Interesse galt dabei der Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie<sup>4</sup> und der Ausnutzung von radioaktiver Strahlung in einem solchen Sperrschicht-Element<sup>5</sup>.

Im folgenden wird über die Bestrahlung von p-n-Sperrschichten in GaAs mit mittelschnellen Elektronen berichtet. Die Versuche wurden im Hinblick darauf durchgeführt, mit Hilfe eines solchen Sperrschicht-Elements die Intensität von Elektronenstrahlen zu messen. Für ein p-n-Sperrschicht-Element stehen verschiedene Halbleiterkörper zur Auswahl. Die von WELKER<sup>6</sup> angegebene halbleitende III-V-Verbindung GaAs ist infolge ihres großen Bandabstandes von 1,35 eV<sup>7</sup> besonders geeignet, da der Wirkungsgrad, mit dem diese Strahlung in einem Sperrschichtelement in elektrische Leistung umgesetzt wird, um so höher liegt, je größer der Bandabstand in dem bestrahlten Halbleiterkristall ist. Außerdem hat GaAs gegenüber Si, das ebenfalls einen relativ großen Bandabstand von 1,1 eV aufweist, noch den Vorteil, daß es gegen Strahlschäden (*radiation damage*) weniger empfindlich ist. Während in einem Si-Kristall bereits Elektronen mit einer Energie von 145 keV Gitterdefekte hervorrufen können, liegt bei GaAs die dazu nötige Elektronenenergie doppelt so hoch.

### 1. Charakteristik und Wirkungsgrad eines GaAs-Sperrschicht-Elements bei Elektronenbestrahlung

Treffen schnelle Elektronen auf einen Halbleiterkristall auf, so geben sie auf relativ kurzen Wegstrecken ihre gesamte Energie ab. Ein Großteil dieser Energie wird dazu verwendet, Sekundärelektronen zu erzeugen, die ihrerseits im Kristall wiederum tertiäre Elektronen (und so weiter) bilden. Dabei wird aber auch ein beträchtlicher Energieanteil an das Gitter abgegeben, während dagegen die Emission von Licht bzw. RÖNTGEN-Strahlen und die Emission von Sekundärelektronen aus dem Kristall heraus eine untergeordnete Rolle spielen. Die Erzeugung von sekundären bzw. tertiären Elektronen führt zur Bildung von Elektron-Loch-Paaren, d. h., je

nach der Energie der auftreffenden Elektronen werden eine mehr oder weniger große Zahl von Valenzelektronen aus der Gitterbindung befreit, wobei gleichzeitig durch die Bindungslücken eine entsprechende Anzahl von Defektelektronen mit entstehen. In einem homogenen Halbleiter führt dies lediglich zu einer Erhöhung der Ladungsträgerdichte und damit zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit. Werden dagegen die Elektron-Loch-Paare in einer p-n-Übergangszone erzeugt, so werden diese durch das dort bestehende elektrische Feld getrennt. Die Elektronen werden zum n-Bereich, die Löcher zum p-Bereich getrieben, es bildet sich zwischen dem n-Bereich und dem p-Bereich eine EMK aus und in einem äußeren Kreis fließt ein Strom (Abb. 1).

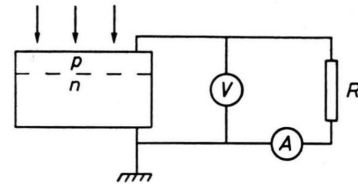


Abb. 1. Anordnung eines p-n-Sperrschicht-Elements.

Im Kurzschlußfall ( $R=0$ ) ist dieser Strom durch die Zahl der bei der Bestrahlung zusätzlich erzeugten Elektronen im p-Bereich und Defektelektronen im n-Bereich bestimmt, die durch Diffusion in die p-n-Übergangszone gelangen. Daraus ergibt sich die Forderung, daß die Diffusionslänge der Ladungsträger im Kristall im Vergleich zur Eindringtiefe der Strahlung möglichst groß und der Abstand des p-n-Übergangs von der Kristalloberfläche kleiner als die Eindringtiefe sein soll.

Liegt im äußeren Stromkreis ein Widerstand  $R$ , so wird der Potentialsprung im p-n-Übergang um die dabei auftretende Klemmenspannung verringert. Dies führt zu einem Durchlaßstrom  $I_{Du}$  in entgegengesetzter Richtung zum Kurzschlußstrom  $I_K$ , ganz entsprechend, als ob an diesen p-n-Übergang im unbestrahlten Zustand eine äußere Spannung von derselben Größe in Durchlaßrichtung angelegt wird. Für den im äußeren Kreis fließenden Strom gilt

$$I = I_K - I_{Du}. \quad (1)$$

<sup>4</sup> D. M. CHAPIN, C. S. FULLER u. G. L. PEARSON, J. Appl. Phys. **25**, 676 [1954]. — R. L. CUMMEROW, Phys. Rev. **95**, 561 [1954]. — E. S. RITTNER, Phys. Rev. **96**, 1708 [1954]. — M. B. PRINCE, J. Appl. Phys. **26**, 534 [1955]. — R. GREMELMAIER, Z. Naturforsch. **10a**, 501 [1955].

<sup>5</sup> W. G. PFANN u. W. VAN ROOSBROECK, J. Appl. Phys. **25**, 1422 [1954].

<sup>6</sup> H. WELKER, Z. Naturforsch. **7a**, 744 [1952].

<sup>7</sup> F. OSWALD u. R. SCHADE, Z. Naturforsch. **9a**, 611 [1954].

Die Charakteristik eines Sperrschicht-Elements ist demnach im wesentlichen durch seine Gleichrichtercharakteristik in Durchlaßrichtung bestimmt, von der deshalb zunächst ausgegangen werden soll.

In Abb. 2 ist die Gleichrichterkennlinie eines GaAs-Gleichrichters wiedergegeben. Der etwa  $10 \mu$  tief liegende p-n-Übergang wurde durch Eindiffusion von Zink in n-leitendes Grundmaterial hergestellt.

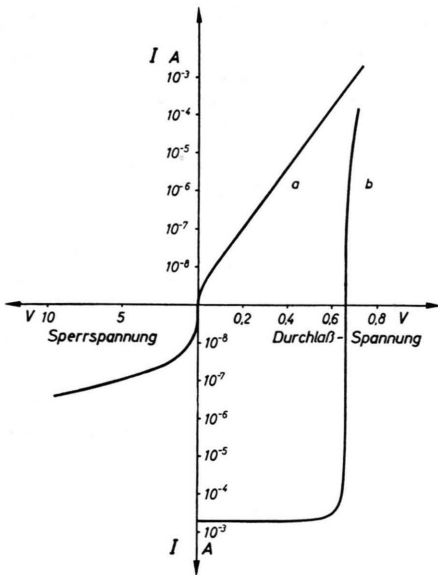


Abb. 2. Gleichrichterkennlinie (a) eines p-n-GaAs-Kristalls und Kennlinie dieses Kristalls bei Bestrahlung mit 45,2 kV-Elektronen (b).

An Stelle der von SHOCKLEY<sup>8</sup> angegebenen Beziehung für den Durchlaßstrom

$$I_{Du} = I_s [\exp(eU/kT) - 1], \quad (2)$$

in der  $U$  die angelegte Spannung,  $I_s$  den Sättigungsstrom in Sperrichtung,  $k$  die BOLTZMANN-Konstante,  $T$  die absolute Temperatur und  $e$  die Elementarladung bedeutet, gilt für den Durchlaßstrom der in Abb. 2 wiedergegebenen Gleichrichterkennlinie eine Beziehung von der Art

$$I_{Du} = I_0 [\exp(U/U_0) - 1] \quad (3)$$

mit  $I_0 = 3,0 \cdot 10^{-9}$  A und  $U_0 = 0,055$  V =  $2,1 kT/e$ . Derartige Abweichungen gegenüber einem Gleichrichter vom SHOCKLEYSchen Typ wurden bereits im Zusammenhang mit dem RÖNTGEN-Photo-Effekt in p-n-Sperrschichten von GaAs festgestellt<sup>9</sup>. Ein ähn-

licher Tatbestand ist schon früher eingehend an Si diskutiert worden<sup>10</sup>.

In Abb. 2 ist neben der Gleichrichtercharakteristik noch die Kennlinie bei Bestrahlung mit 45,2 kV-Elektronen wiedergegeben. Der auf die Kristalloberfläche von  $0,51 \text{ cm}^2$  auftreffende Elektronenstrom beträgt dabei  $6,9 \cdot 10^{-8}$  A. Die Kennlinie dieses Sperrschichtelementes läßt sich durch die Gleichung

$$I = I_K - I_{Du} = I_K - I_0 [\exp(U/U_0) - 1] \quad (4)$$

vollständig beschreiben. Sie ist um den Kurzschlußstrom  $I_K$  gegen die Gleichrichterkennlinie verschoben. Das Element liefert bei dieser Bestrahlung einen Kurzschlußstrom von 0,50 mA und eine EMK von 0,66 Volt. Bei optimaler Anpassung beträgt die abgegebene Leistung

$$\begin{aligned} E &= 0,46 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 0,53 \text{ V} \\ &= 0,244 \cdot 10^{-3} \text{ Watt.} \end{aligned}$$

Vergleicht man damit die auf die Kristalloberfläche auftreffende Leistung, die

$$6,9 \cdot 10^{-8} \text{ A} \cdot 45,2 \cdot 10^3 \text{ V} = 3,12 \cdot 10^{-3} \text{ Watt},$$

beträgt, so ergibt sich als Wirkungsgrad dieses GaAs-Elements

$$\frac{0,244 \cdot 10^{-3}}{3,12 \cdot 10^{-3}} \approx 8\%.$$

Abgesehen davon, daß bei der Absorption der Elektronenstrahlen in dem Kristall die Energie der Strahlung nicht ausschließlich zur Bildung von Ladungsträgern verbraucht wird, fällt auch ein Teil der bei der Bestrahlung erzeugten Elektron-Loch-Paare durch Oberflächen- und Volumen-Rekombination wieder aus. Außerdem wird der Wirkungsgrad des Elements noch durch Leckstellen im p-n-Übergang beeinträchtigt.

## 2. Abhängigkeit des Kurzschlußstromes und der EMK eines GaAs-Sperrschicht-Elements von der Elektronenstrahlintensität

Eine Bestimmung der Intensität von Elektronenstrahlen kann, wie im folgenden ausgeführt wird, entweder durch Messung des Kurzschlußstromes oder durch Messung der EMK eines Sperrschicht-Elements erfolgen. Für die EMK besteht nach (4) eine Beziehung von der Art

$$U_L = U_0 \ln[1 + (I_K/I_0)]. \quad (5)$$

<sup>8</sup> W. SHOCKLEY, *Electrons and Holes in Semiconductors*, New York 1950.

<sup>9</sup> H. PFISTER, *Z. Naturforsch.* **11 a**, 434 [1956].

<sup>10</sup> H. KLEINKNECHT u. K. SEILER, *Z. Phys.* **139**, 599 [1954].

Vorausgesetzt, daß die Diffusionslängen im Vergleich zur Eindringtiefe der Strahlung genügend groß sind, ist zu erwarten, daß der Kurzschlußstrom  $I_K$  proportional zur Leistung des auffallenden Elektronenstrahls ist. Dies vorausgesetzt, besteht nach (5) für die EMK, solange  $I_K/I_0 > 1$  ist, eine logarithmische Abhängigkeit und für geringe Bestrahlung, solange  $I_K/I_0 < 1$  ist, eine lineare Abhängigkeit von der Elektronenstrahl-Leistung. In Abb. 3 ist die

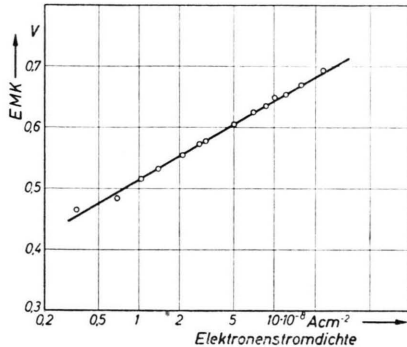


Abb. 3. Intensitätsabhängigkeit der EMK eines GaAs-Elements bei Bestrahlung mit 45,2 kV-Elektronen.

EMK eines GaAs-Elements bei Bestrahlung mit 45,2 kV-Elektronen in Abhängigkeit von der Stromdichte des Elektronenstrahls aufgetragen. Die auf den Kristall auftreffende Elektronenstromdichte wurde mit einem FARADAY-Käfig gemessen, der gleichzeitig mit dem GaAs-Element in einem divergenten Elektronenbündel bestrahlt wurde<sup>11</sup>. Man findet die zu erwartende logarithmische Beziehung und aus der Steigung der Meßgeraden einen Wert  $U_0$ , der mit dem aus der Gleichrichtercharakteristik in Abb. 2 bestimmten Wert von 55 mV übereinstimmt. Abgesehen von der Messung sehr kleiner Strahlintensitäten, für die die EMK noch proportional zur auffallenden Intensität ist, empfiehlt es sich, an Stelle der EMK die Kurzschlußstromstärke zur Messung von Elektronenstrahl-Intensitäten heranzuziehen. Abb. 4 gibt die Intensitätsbeziehung des Kurzschlußstromes bei Strahlspannungen von 45,2 kV, 65,7 kV, 86,9 kV und 111 kV wieder. Man findet eine streng lineare Beziehung zwischen dem Kurzschlußstrom

und der Elektronenstrahlstärke<sup>12</sup>. Aus der Meßgeraden für die Strahlspannung von 45,2 kV ist zu entnehmen, daß der Kurzschlußstrom des Elements um den Faktor 7200 größer ist als der auf den Kristall auffallende Elektronenstrom. Das heißt, im Mittel erzeugt jedes auf den Kristall auftreffende Elektron 7200 Ladungsträgerpaare, die einen Beitrag zum Kurzschlußstrom liefern. Tatsächlich werden noch mehr Ladungsträgerpaare gebildet, da ja ein Teil davon wieder rekombiniert und im Kurzschlußstrom nicht erfaßt wird. Der Energiebedarf pro wirksames Ladungsträgerpaar beträgt im Mittel

$$\frac{45,2 \cdot 10^3 \text{ eV}}{7200} = 6,3 \text{ eV}.$$

Dieses GaAs-Element ist somit 5-mal empfindlicher als eine Ionisationskammer, bei der zur Bildung eines Ladungsträgerpaares eine Energie von 32 eV erforderlich ist. In Tab. 1 ist der Faktor der Stromverstärkung und der Energiebedarf pro Ladungsträgerpaar für die Strahlspannungen der Meßgeraden in Abb. 4 zusammengestellt. In der zweiten Spalte ist die praktische Reichweite der Elektronen<sup>13</sup> in GaAs angegeben. Während bei einer Erhöhung der Strahlspannung von 45 kV auf 65 kV der Ener-

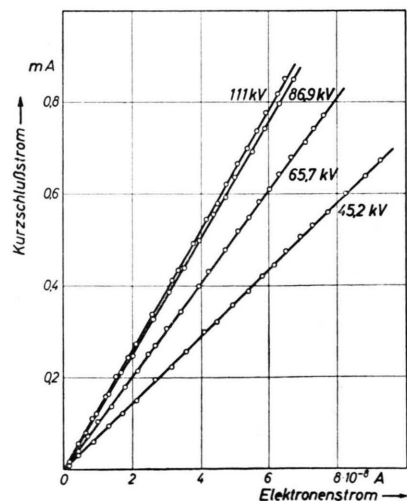


Abb. 4. Intensitätsbeziehung des Kurzschlußstroms eines GaAs-Elements bei Bestrahlung mit 45,2 kV- bzw. 65,7 kV- bzw. 86,9 kV- bzw. 111 kV-Elektronen.

<sup>11</sup> Die Versuche sind an einem Siemens-Elektronenmikroskop durchgeführt worden.

<sup>12</sup> Da von der Oberfläche des GaAs-Kristalls Sekundärelektronen emittiert werden, ist, um dies zu verhindern, noch eine Gegenspannung zwischen Kristall und einer vorgeschalteten Elektrode angelegt worden. Dabei zeigte sich, daß eine solche Gegenspannung keinen meßbaren Einfluß

auf den Kurzschlußstrom ausübt. Das heißt, die Sekundärelektronenemission macht sich infolge der geringen Energie dieser Sekundärelektronen im Kurzschlußstrom nicht bemerkbar.

<sup>13</sup> GEIGER-SCHEEL, Handbuch der Physik, Verlag Springer, Berlin 1927, S. 32.



Strahlspannung in kV	Praktische Reichweite der Elektronen in GaAs	Strom- verstär- kung	Energiebedarf pro Ladungs- trägerpaar in eV
45,2	7 $\mu$	7 200	6,3
65,7	12 $\mu$	10 250	6,4
86,9	19 $\mu$	12 600	6,9
111,0	26 $\mu$	13 000	8,5

Tab. 1.

giebedarf pro Ladungsträgerpaar noch annähernd konstant bleibt und demgemäß der Kurzschlußstrom proportional mit der Strahlspannung ansteigt, ist dies bei den höheren Spannungen nicht mehr der Fall. Dies ist durch die sehr geringen Diffusionslängen der Ladungsträger in dem bestrahlten GaAs-Kristall bedingt<sup>14</sup>. Bei den höheren Strahlspannungen ist die Eindringtiefe der Elektronenstrahlung bereits größer als die Diffusionslänge, so daß die erzeugten Ladungsträgerpaare in zunehmendem Maße rekombinieren. Durch Verbesserung der Präparation dürfte es aber sicherlich möglich sein, wesentlich größere Diffusionslängen zu erreichen, so daß dann auch in einem weiten Strahlspannungsbereich der Kurzschlußstrom linear mit der Strahlspannung anwächst.

Zu erwähnen wäre noch, daß der Kurzschlußstrom temperaturunempfindlich ist und sich ohne bemerkenswerte Trägheit — mit einer Zeitkonstanten von wenigen msec — ausbildet<sup>9</sup>. Weiter ist hervorzuheben, daß der Kristall keinerlei Ermüdungserscheinungen, d. h. keinerlei Änderungen des Stroms mit der Dauer der Bestrahlung zeigt.

Es ist allerdings zu beachten, daß bei Bestrahlung mit sehr energiereichen Elektronen strukturelle Fehlernordnungen in dem Kristall entstehen dadurch, daß Atome unter Zurücklassung einer Gitterlücke aus dem regulären Gitterplatz herausgeschlagen werden und einen Zwischengitterplatz einnehmen. Dies führt zu einer Abnahme der Lebensdauer und damit der Diffusionslänge der Ladungsträger und demzufolge zu einer Verringerung des Kurzschlußstroms eines Sperrschicht-Elements. Um solche FRENKEL-Fehl-

stellen zu erzeugen, muß auf ein Kristallatom eine gewisse Mindestenergie  $E_d$  übertragen werden. Nach einer Abschätzung von SEITZ<sup>15</sup> hat diese Energie  $E_d$  bei Kristallen großer Bindungsfestigkeit, wie z. B. Ge, einen Wert von 25 eV, während KOHN<sup>16</sup>  $E_d < 15$  eV angibt. Die Mindestenergie  $E_{\min}$ , die ein Elektron haben muß, damit es an ein Atom der Masse  $M$  die Energie  $E_d$  übertragen kann, ist durch die Beziehung<sup>17</sup>

$$E_d = \frac{2 E_{\min} \cdot m}{M} \left( \frac{E_{\min}}{m c^2} + 2 \right) \quad (6)$$

festgelegt, in der  $m$  die Elektronenmasse und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Durch Messung der Änderung des Kurzschlußstroms eines Ge- bzw. Si-Sperrschicht-Elements unter dem Einfluß einer Bestrahlung mit Elektronen verschiedener Strahlspannungen fanden RAPPAPORT und LOFERSKI<sup>18</sup> als Mindestenergie  $E_{\min}$  für das Auftreten von Strahlschäden in Si bzw. Ge einen Wert von 145 bzw. 325 keV. Nach (6) ergibt sich daraus für die Bildung einer FRENKEL-Fehlstelle in Si und in Ge dieselbe Energie  $E_d = 12,9$  eV. Bei GaAs (d. h. dem leichteren Ga-Atom) ist diesem  $E_d$ -Wert nach (6) eine Elektronenenergie  $E_{\min} = 315$  keV zugeordnet. Während ein Si-Sperrschicht-Element zur Intensitätsmessung auf Elektronenenergien bis 145 keV beschränkt ist, kann ein GaAs-Element bis zu Elektronenenergien von 315 keV eingesetzt werden. In der III-IV-Verbindung GaAs ist günstigerweise eine große Breite der verbotenen Zone — die entscheidend ist für den Wirkungsgrad eines Sperrschicht-Elements — mit einer relativ großen Atommasse, die die Resistenz gegen Strahlschäden bestimmt, gepaart.

### 3. Registrierung der Elektronenbeugungsintensität mit einem GaAs-Sperrschicht-Element

Als eine praktische Anwendung des Sperrschicht-Elements soll im folgenden die Registrierung der Intensitäten von Elektronenbeugungs-Diagrammen besprochen werden. Normalerweise wird diese Intensität aus der Plattenschwärzung einer Elektronenbeugungsaufnahme ermittelt. Dieses übliche Verfah-

<sup>14</sup> Das hier benutzte GaAs-Element besitzt eine etwa 10  $\mu$  dicke p-leitende Oberflächenschicht. Die Diffusionslänge der Elektronen im p-Bereich ist nach freundlicher Mitteilung von Herrn Dr. WEISSHAAR ebenfalls etwa 10  $\mu$ , die der Löcher im anschließenden n-Bereich nur wenige  $\mu$  groß.

<sup>15</sup> F. SEITZ, Disc. Faraday Soc. 5, 271 [1949].

<sup>16</sup> W. KOHN, Phys. Rev. 94, 1409 [1954].

<sup>17</sup> Siehe z. B. K. LARK-HOROVITZ in H. K. HENISCH, Semiconducting Materials; Butterworths Scientific Publ., London 1951, S. 47.

<sup>18</sup> J. J. LOFERSKI u. P. RAPPAPORT, Phys. Rev. 98, 1861 [1953]. — P. RAPPAPORT u. J. J. LOFERSKI, Phys. Rev. 100, 1261 [1955].

ren erfordert jedoch einen großen Zeitaufwand und ist dazu nicht sehr genau, da sowohl bei der Messung der Plattenschwärzung mit dem Photometer als auch bei der Ermittlung der Schwärzungs-Intensitäts-Beziehung die verschiedensten Fehler auftreten können. Vor allem der große Arbeitsaufwand begründet den Wunsch nach einer direkten Intensitätsmessung, die nicht von der Schwärzung der photographischen Platte ausgeht. TAKAGI und SUZUKI<sup>19</sup> berichten über eine Anordnung, bei der die Widerstandsabnahme von CdS-Kristallen durch Elektronenbestrahlung zur Messung der Elektronenbeugungsintensität verwandt wird. Bezüglich der Genauigkeit wirken sich allerdings die sehr großen Zeitkonstanten von mehreren Minuten, mit denen sich die Widerstandsabnahme in dem CdS-Kristall einstellt und evtl. Ermüdungserscheinungen des Kristalls nachteilig aus. Durch Infrarot-Bestrahlung des Kristalls während der Messung konnten diese störenden Einflüsse jedoch in erträglichen Grenzen gehalten werden.

Demgegenüber ist bei der Verwendung eines Sperrschicht-Elements eine sehr genaue Intensitätsmessung möglich. Wie die Meßergebnisse in Abb. 4 zeigen, ist der Kurzschlußstrom eines GaAs-Elements streng proportional zu der auffallenden Elektronenstrahl-Intensität. Der Kristall zeigt keinerlei Ermüdungserscheinungen, und der Kurzschlußstrom folgt Intensitätsänderungen innerhalb von wenigen msec. Der Kristall kann daher relativ rasch über das Beugungsdiagramm hinweggefahren werden, wobei sich der Kurzschlußstrom direkt mit einem Schreiber registrieren läßt. In Abb. 5 ist ein Schema der benutzten Versuchsanordnung wiedergegeben. Das

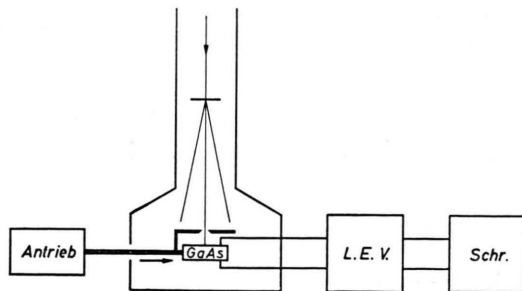


Abb. 5. Anordnung zur Messung von Elektronenbeugungsintensitäten.

GaAs-Element war in einem Siemens-Elektronenmikroskop in einem Abstand von etwa 55 cm vom Präparat angebracht und konnte von außen über eine für den Plattentransport bereits vorhandene Welle mit einem Antriebsmotor senkrecht zur Primärstrahlrichtung verschoben werden. Der Kurzschlußstrom wurde mit einem lichtelektrischen Verstärker verstärkt und mit einem Tintenschreiber registriert. In Abb. 6 ist ein derart aufgenommenes Beugungsdiagramm von Ag wiedergegeben. Der bestrahlte Bereich des Kristalls hatte eine Fläche von  $0,2 \times 2 \text{ mm}^2$ . Die Registrierzeit betrug etwa 7 Minuten. Die Registriergeschwindigkeit ist dabei durch die Einstellzeit des benutzten Schreibers begrenzt<sup>20</sup>.

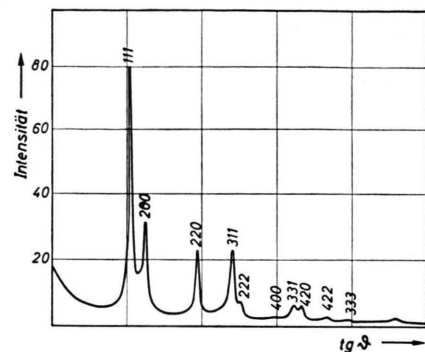


Abb. 6. Elektronenbeugungsdiagramm von Ag. Strahlspannung 87 kV.

Mit der beschriebenen Anordnung ist es somit möglich, das gesamte Beugungsdiagramm in wenigen Minuten zu registrieren. Dies entspricht einem ganz erheblichen Zeitgewinn gegenüber der Intensitätsbestimmung aus der Plattenschwärzung. Auch dann, wenn nur die Lage der Reflexe interessiert, ist eine solche Registrierung — die bei einem synchronen Antrieb von Kristall und dem Papiervorschub des Schreibers eine genaue Vermessung der Ringdurchmesser erlaubt — von Vorteil, da man sich dabei das Ein- und Aus-Schleusen der photographischen Platten in die Beugungsapparatur und die ganze Dunkelkammerarbeit erspart.

Herr Dr. R. GREMMELMAIER hat die GaAs-Sperrschicht-Kristalle hergestellt, für deren Überlassung ich zu besonderem Dank verpflichtet bin. Herrn Dr. KIMMEL danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche an dem Elektronenmikroskop.

diese mit einem zweiten feststehenden GaAs-Element mitzuregistrieren.

<sup>19</sup> S. TAKAGI u. T. SUZUKI, Acta Cryst. **8**, 441 [1955].

<sup>20</sup> Falls damit zu rechnen ist, daß sich die Primärstrahlintensität während der Messung ändert, so empfiehlt es sich,