

Zu den üblichen phänomenologischen Gleichungen der Magnetohydrodynamik kommt man von dem hier angegebenen System auf einfache Weise. Zuerst wird die Zeitabhängigkeit der Transportgrößen fallen gelassen (relaxationsfreie Einstellung) und daraufhin macht man den bekannten linearen phänomenologischen Ansatz zwischen Kräften und Flüssen²⁰; zuletzt wird die Einwirkung der Viskosität auf die Wärmeleitung und umgekehrt vernachlässigt.

Ansätze zu einer Erweiterung wären mit einer näherungsweisen Behandlung der Wechselwirkung innerhalb der DEBYE-Sphäre zu beginnen. Bisher wurden hierfür die Stoßintegrale für Zweierstöße oder Entwicklungen von FOKKER-PLANCK-Termen verwendet. Es könnte möglich sein, über die FOKKER-PLANCK-Gleichung und einem Ansatz für eine Gruppendiffusionsmethode weiter zu kommen. Eine wei-

tere wesentliche Aufgabe wäre in einer sorgfältigen Ausdeutung der in den MAXWELL-Gleichungen für Plasma-Mikrofelder vorkommenden einzelnen Terme zu sehen.

Zuletzt dürfte es interessant sein, in Analogie zur Gasdynamik mit dem hier vorgelegten Differentialgleichungssystem ein Charakteristikenverfahren der Magnetohydrodynamik zu entwickeln.

Der Verfasser hat Herrn Prof. HÖCKER für förderndes Interesse und wertvolle Diskussionen zu danken. Eine Kurzfassung dieser Arbeit wurde anlässlich der Fusionsarbeitsstagung im MPI in München (9. Dezember 1958) vorgetragen. Für die dem Vortrag folgende Diskussion und die daraus hervorgehenden Anregungen ist der Verfasser Herrn Prof. SCHLÜTER zu Dank verpflichtet.

²⁰ J. O. HIRSCHFELDER et al., I. c.¹⁵, S. 495, 709.

NOTIZEN

Messung der Energie zur Bildung eines Gitterdefektes in verschiedenen A^{III}B^V-Verbindungen durch Elektronenbestrahlung

Von R. BÄUERLEIN

Forschungslaboratorium der Siemens-Schuckertwerke AG,
Erlangen
(Z. Naturforsch. 14 a, 1069—1071 [1959]; eingeg. am 26. Oktober 1959)

Beim Streuprozeß schneller Elektronen an Gitteratomen wird bei genügend hoher Elektronenergie gelegentlich auf ein Gitteratom eine so große Energie übertragen, daß dieses seinen Gitterplatz verlassen kann. Dabei entsteht im Gitter ein Fehlstellenpaar, nämlich ein Zwischengitteratom und eine Leerstelle. Neben der Zahl der pro einfallendes Elektron gebildeten Defekte interessiert hauptsächlich noch die Mindestenergie, die auf das Gitteratom übertragen werden muß, um diesen Prozeß auszulösen. Die Größe dieser Energie läßt Rückschlüsse auf die Bindungsfestigkeit der Gitteratome im Kristallverband zu.

Bei den Halbleitern der IV. Gruppe des Periodischen Systems, Si und Ge, ist dieser Energiewert bereits bekannt. Zu seiner Bestimmung sind zwei Methoden angewendet worden, die sich durch die Art, wie das Auftreten von Gitterfehlstellen beobachtet wird, unterscheiden. Aus der Änderung der Leitfähigkeit elektronenbestrahlter Ge-Proben haben KLONTZ und LARK HOROWITZ¹ für diese Energie 31 eV, VAVILOV u. a.² 22 eV und BROWN und AUGUSTYNIAK³ 14,4 eV erhalten. LOFERSKI und RAPPAPORT⁴ bestimmten die gleiche Energie

aus der Änderung der Diffusionslänge in elektronenbestrahlten p-n-Sperrschichtelementen für Ge zu 14,5 und Si zu 12,9 eV.

Unsere Arbeit befaßt sich mit der Bestimmung dieser Energie an den A^{III}B^V-Halbleitern InP, GaAs und InAs. Da wir von diesen Substanzen Sperrschichtelemente erhalten konnten, wählen wir die zweite der oben beschriebenen Meßmethoden, die sich gerade zur Bestimmung von Schwellwerten besonders eignet. Bei diffundierten p-n-Übergängen läßt sich die empfindliche Schicht nahe an die Oberfläche legen, in jene Zone also, in der bei der Bestrahlung mit Elektronen auch die hauptsächlichen Effekte stattfinden.

Die für die Bestrahlungsexperimente benötigten schnellen Elektronen werden mit einer Hochspannungsanlage in GREINACHER-Schaltung beschleunigt, die es gestattet, die Hochspannung zwischen 50 und 500 kV kontinuierlich und genau einzustellen. Aus dem Elektronenstrahl wird ein $1/2 - 1 \text{ mm}^2$ großes Bündel ausgeblendet, das unmittelbar darauf das zu untersuchende Sperrschichtelement trifft. Die Bestrahlungsdichten variieren zwischen 10^{-5} und 10^{-4} A/cm^2 . Gleichzeitig werden bei der Bestrahlung der Elektronenstrom j_e als Ableitstrom gegen Erde und der Diffusionsstrom j_K des Sperrschichtelementes im kurzgeschlossenen Außenkreis gemessen. Für das Verhältnis dieser beiden Ströme und der Konzentration N_r der Rekombinationszentren besteht folgende Beziehung⁴:

$$N_r \sim (j_e/j_K)^2. \quad (1)$$

Diese Beziehung folgt aus der Theorie der Sperrschiichtelemente unter der Annahme, daß die Reichweite der

¹ E. E. KLONTZ u. K. LARK HOROWITZ, Phys. Rev. **86**, 643 [1952].
² V. S. VAVILOV, L. S. SMIRNOV, G. N. GALKIN, A. V. SPITSYN u. V. M. PATSKEVICH, J. Tech. Phys. USSR **26**, 1865 [1956].

³ W. L. BROWN u. W. M. AUGUSTYNIAK, J. Appl. Phys. **30**, 1300 [1959].

⁴ J. J. LOFERSKI u. P. RAPPAPORT, Phys. Rev. **111**, 432 [1958].



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

Elektronen groß ist gegen die Diffusionslänge der Minoritätsträger, einer Voraussetzung, die bei unseren Messungen erfüllt ist. Dann kann aber auch in der obigen Beziehung der weggelassene Proportionalitätsfaktor als im wesentlichen energieunabhängig angesehen werden. Im folgenden dient die Änderung der rechten Seite der obigen Formel als Maß für die bei der Bestrahlung neu gebildeten Gitterdefekte.

Das Ergebnis der Messungen an InP bei Zimmertemperatur zeigt Abb. 1. Hier ist die Erzeugungsrate der Rekombinationszentren, nämlich die Änderung des Verhältnisses $(j_e/j_K)^2$ pro Dosisseinheit, in Abhängigkeit von der Primärenergie der eingestrahlten Elektronen dargestellt. Der Fußpunkt der parabelförmig ver-

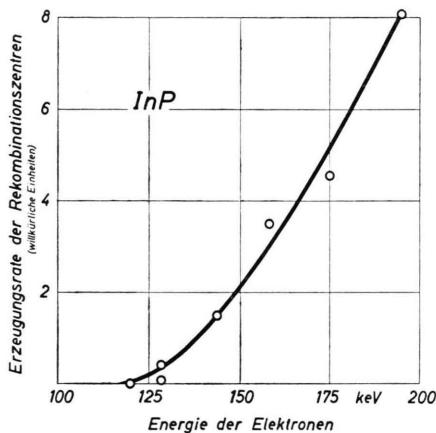


Abb. 1. Erzeugungsrate der Rekombinationszentren in InP bei Zimmertemperatur in Abhängigkeit von der Energie der eingestrahlten Elektronen.

laufenden Kurve gibt den Schwellwert für die Bildung von Defekten an, ist also die Energie, mit der Elektronen gerade noch in der Lage sind, Gitterdefekte zu bilden.

Nach theoretischen Berechnungen von SEITZ und KOEHLER⁵ steigt der Wirkungsquerschnitt für die Bildung eines FRENKEL-Defektes durch Elektronenstoß vom Schwellwert aus linear mit der Energie an. Es wäre deshalb auch ein linearer Anstieg der Erzeugungsrate mit der Elektronenenergie zu erwarten, wenn nicht die Elektronen beim Durchdringen der Materie laufend an Energie verlieren würden. Man kann deshalb bei der Berechnung der Erzeugungsrate nicht die Energie der einfallenden Elektronen in die Formel für den Wirkungsquerschnitt einsetzen, sondern muß die in der jeweiligen Schichtdicke vorherrschende mittlere Energie dazu verwenden. Anschließend ist dann über die gesamte Diffusionslänge aufzusummen. Die so berechnete Erzeugungsrate steigt dann, wenigstens in erster Näherung, vom Schwellwert aus quadratisch mit der primären Energie der Elektronen an.

Auf Grund dieser Überlegungen ist also zu erwarten, daß ein linearer Zusammenhang zwischen der Wurzel aus der jeweiligen Erzeugungsrate der Defekte und

der Primärenergie der Elektronen besteht. Reduziert man den Ordinatenmaßstab der Abb. 1 in diesem Sinne, d. h. durch Einführung einer quadratischen Skala (vgl. Abb. 2), so ergibt sich in der Tat ein solcher linearer Zusammenhang. Man erhält bei linearer Extrapolation der Meßpunkte als Mindestenergie für die Erzeugung eines Strahlungsdefektes in InP 118 keV.

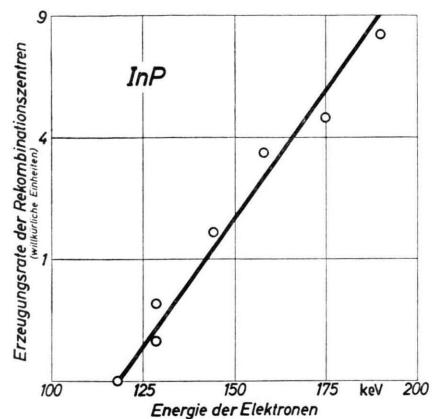


Abb. 2. Erzeugungsrate der Rekombinationszentren in InP bei Zimmertemperatur in Abhängigkeit von der Energie der eingestrahlten Elektronen. (Der Ordinatenmaßstab ist quadratisch geteilt.)

Die auf das Gitteratom beim Stoß übertragene Energie läßt sich aus Impuls- und Energiesatz berechnen⁵:

$$E_d = 2 \frac{m}{M} E_s (2 + E_s/m c^2). \quad (2)$$

Die verwendeten Größen sind: m Elektronenmasse, M die Masse des Gitteratoms, E_s die Energie des Elektrons und c die Lichtgeschwindigkeit. Setzt man die Masse für Phosphor in obige Formel ein, so erhält man als Mindestenergie zur Bildung eines Phosphor-Zwischengitterleerstellen-Paares in InP 9,25 eV.

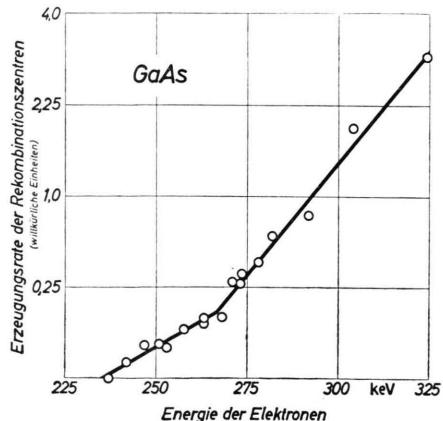


Abb. 3. Erzeugungsrate der Rekombinationszentren in GaAs bei Zimmertemperatur in Abhängigkeit von der Energie der eingestrahlten Elektronen.

⁵ F. SEITZ u. J. S. KOEHLER, Solid State Phys. 2, 305 [1956].

In gleicher Weise werden auch die Messungen an GaAs durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 3 dargestellt. Im Gegensatz zu Abb. 2 lassen sich die Meßpunkte bei GaAs nicht durch eine Gerade, sondern nur durch zwei in einem Knick zusammenstoßende Geradenstücke verbinden. Dieser Effekt kann durch die Annahme zweier verschiedener Arten von Gitterdefekten gedeutet werden, von denen die eine Art ab 236 keV, die andere durch den Knick angedeutet ab 267 keV auftritt.

Bei den $\text{Al}^{\text{III}}\text{BV}$ -Halbleitern sind zwei verschiedene Arten von FRENKEL-Fehlstellen im Gitter möglich, je nachdem, ob ein Gitteratom der III. oder der V. Gruppe die Fehlstelle bildet. Da sich die Atommassen von Ga

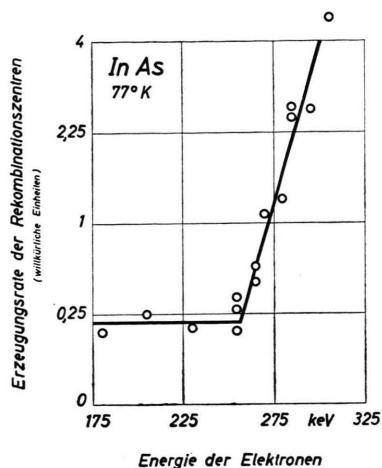


Abb. 4. Erzeugungsrate der Rekombinationszentren in InAs bei 77°K in Abhängigkeit von der Energie der eingestrahlten Elektronen.

und As, im Gegensatz zu In und P, nur geringfügig unterscheiden, ist zu vermuten, daß die Elektronenergien zur Bildung dieser beiden Defektkarten ebenfalls nahe beieinanderliegen. Die beiden an GaAs gemessenen Energiewerte lassen sich wohl auf diese Weise deuten, und zwar kann der niedere dem Ga- und der

höhere dem As-Zwischengitter-Leerstellen-Paar zugeschrieben werden. Entsprechend dieser Überlegung ist auch zu erwarten, daß sich die Steigung der Geraden oberhalb des Knickpunktes etwa verdoppelt. Die nach Formel (2) berechneten Bildungsenergien von FRENKEL-Fehlstellen in GaAs durch Elektronenstoß betragen für Ga 9,1 eV, für As 9,8 eV.

Die Messungen an InAs mußten bei Stickstofftemperatur durchgeführt werden, da sich wegen der schmalen verbotenen Zone eine Sperrsicht erst unterhalb Zimmertemperatur ausbildet. Abb. 4 zeigt diese Meßergebnisse. Hier wird ebenfalls ein scharfer Schwellwert bei 256 keV erhalten. Auch bereits unterhalb dieses Wertes ist anscheinend eine konstante Erzeugungsrate von Rekombinationszentren zu beobachten. Mit der Untersuchung dieses Effektes sind wir noch beschäftigt. Führt man den beobachteten Schwellwert auf die Bildung eines As-FRENKEL-Defektes zurück, so erhält man nach Formel (2) als Bildungsenergie 9,35 eV.

In Tab. 1 sind die von LOFERSKI und RAPPAPORT an Si und Ge gemessenen Bildungsenergien von FRENKEL-Defekten durch Elektronenstoß und die von uns an InP, InAs und GaAs bestimmten Energiewerte zusammengestellt. Ein Vergleich zeigt, daß erstens diese Energiewerte bei den $\text{Al}^{\text{III}}\text{BV}$ -Verbindungen durchwegs niedriger liegen als die der Elemente der IV. Gruppe, zweitens, wie man am Beispiel des GaAs erkennt, daß wahrscheinlich ganz allgemein in der gleichen Verbindung die Elemente der III. Gruppe eine geringere Energie zur Bildung eines FRENKEL-Defektes benötigen als ihre Partneratome aus der V. Gruppe. Dieses Ergebnis stimmt überein mit Meßergebnissen von EISEN und BIRCHENALL⁶, die für die Aktivierungsenergie der Selbstdiffusion in Ga- und InSb ebenfalls für die Elemente der III. Gruppe niedrigere Werte erhalten als für die Elemente der V. Gruppe in der gleichen Substanz. Hier liegt wohl eine gewisse Analogie zu den Verhältnissen bei Ionenkristallen vor. In diesen sind nämlich ebenfalls die Selbstdiffusionsenergie und andere Energiewerte, die auf Ionenbewegung beruhen, wegen der unterschiedlichen Polarisierbarkeit der einzelnen Ionenarten für Kationen niedriger als für Anionen.

Substanz	Si	Ge	InP	InAs	GaAs		InSb *		
Gitteratom	Si	Ge	P	As	Ga	As	In	Sb	
Mindestenergie der Elektronen zur Bildung eines Gitterdefektes	145	360	118	256	236	267	250	300	keV
Bildungsenergie eines Gitterdefektes durch Elektronenstoß	12,9	14,5	9,25	9,35	9,1	9,8	6,0	7,0	eV

Tab. 1.

* A n m. b. d. K o r r.: In einer neuesten Arbeit von F. H. EISEN u. P. W. BICKEL, Phys. Rev. 115, 345 [1959] sind Leitfähigkeitsmessungen an elektronenbestrahlten InSb-Proben in der Nähe des Schwellwertes dargestellt. Eine genaue Untersuchung der dort veröffentlichten Kurven läßt erkennen, daß bei InSb ähnlich wie bei GaAs zwei Schwellwerte existieren, die wir auch in gleicher Weise wie bei GaAs deuten wollen. Die entsprechenden Energiewerte sind in Tab. 1 eingefügt.

⁶ F. H. EISEN u. C. E. BIRCHENALL, Acta Metall. 5, 265 [1957].

Herrn Dr. GREMMELMAIER und Herrn Dr. HENKEL bin ich für die Überlassung der Proben zu Dank verpflichtet.