

Rekombinationsleuchten und Elektronenmultiplikation in Silicium*

Von SIEGFRIED MÜLLER

AEG-Forschungsinstitut Belecke

(Z. Naturforschg. 13 a, 240—241 [1958]; eingeg. am 12. Februar 1958)

An Silicium-pn-Übergängen, die in Sperrichtung bis nahe an den Durchbruch belastet waren, beobachteten NEWMAN, DASH, HALL und BURCH¹ ein sichtbares Leuchten entlang der Linie, auf der die Sperrsicht an die Oberfläche stößt. CHYNOWETH und MCKAY² konnten zeigen, daß nicht nur von der Oberfläche, sondern von der ganzen Sperrsicht im Durchbruchsgebiet sichtbares Licht emittiert wird. Sie untersuchten Silicium-Scheiben, die auf einer Seite mit einer sehr dünnen Schicht kontropolarer Leitfähigkeit versehen waren, und beobachteten dort bei Rückströmen von 100 mA und mehr rötlich leuchtende Punkte, die statistisch über die Sperrsicht verteilt waren. Das Leuchten kommt im wesentlichen durch Rekombination von energiereichen Elektronen mit Löchern zustande. Die Verfasser nehmen an, daß an den leuchtenden Stellen ein örtlicher Durchbruch erfolgt, der von Elektronen- bzw. Defektelektronenlawinen getragen wird.

Es soll hier an Hand von Lichtsondenmessungen nachgewiesen werden, daß an den leuchtenden Stellen tatsächlich Trägervervielfachung stattfindet. Für die Proben wurden Scheiben aus n-Silicium von etwa $10 \Omega\text{cm}$ verwendet, auf deren eine Seite eine sehr dünne Schicht von Beryllium bzw. Aluminium aufgedampft und eingetempert wurde. So entstanden Elemente, die 50 bis 100 V sperren, dabei allerdings einen ziemlich hohen Sperrstrom aufweisen. Auch zeigt der Sperrstrom keine Sättigung, sondern steigt mit zunehmender Spannung stetig an. Die Sperrsichtfläche beträgt etwa $0,5 \text{ cm}^2$.

Bei Rückströmen von 10 mA und mehr beobachtet man weiß leuchtende Punkte an einzelnen Stellen der Sperrsicht. Mitunter finden sich auch Leuchtpunkte außerhalb der eigentlichen Sperrsichtfläche. In diesen Fällen konnte immer nachgewiesen werden, daß die Sperrsicht durch einen Channel vergrößert ist. Bei mikroskopischer Betrachtung zeigt sich oft, daß der Leuchtpunkt bzw. leuchtende Bereich aus einer Gruppe von kleinen Leuchtpunkten besteht. Bisweilen entdeckt man dort eine kleine Verunreinigung der Oberfläche. Der Durchmesser eines einzelnen Leuchtpunktes beträgt $0,5 \mu$ oder weniger.

Mit dem Vertikalilluminator eines Auflichtmikroskops wird auf der Kristalloberfläche ein Lichtfleck von 30μ Durchmesser erzeugt. Mit dieser „Lichtsonde“ wird die interessierende Oberfläche abgetastet und je-

weils der Photostrom gemessen. (Durch Verwendung von intermittierendem Licht und selektive Verstärkung des Photostroms wird dieser unabhängig vom Dunkelstrom gemessen³.) Abb. 1 zeigt das Ergebnis einer solchen Messung. Die Lichtsonde wurde hier in gerader Linie über eine Gruppe von Leuchtpunkten weggeführt. Bei einer Sperrspannung von 2 V ist der Photostrom über die ganze Strecke praktisch konstant. Erhöht man die Sperrspannung auf 12,5 V, so tritt am Ort der Leuchtpunkte ein stark ausgeprägtes Maximum auf.

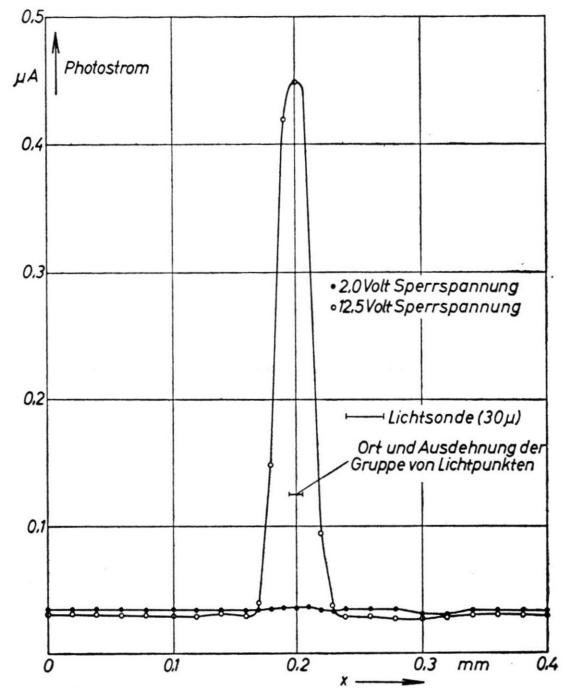


Abb. 1.

Die Breite des Maximums wird im wesentlichen vom Durchmesser der Lichtsonde bestimmt. Das Maximum wird höher mit zunehmender Spannung, während außerhalb des Maximums der Photostrom nahezu unabhängig von der Spannung ist. Diese örtliche Verstärkung des Photostroms wird erklärt durch Elektronen- bzw. Defektelektronenmultiplikation im Feld der Sperrsicht. Das Verhältnis des Photostroms im Maximum zu dem ortsunabhängigen, bei kleinen Spannungen gemessenen Wert des Photostroms ist der Multiplikations-

* Vorgetragen auf der Physikertagung in Heidelberg 1957.

¹ R. NEWMAN, W. C. DASH, R. N. HALL u. W. E. BURCH, Phys. Rev. **98**, 1536 [1955] u. R. NEWMAN, Phys. Rev. **100**, 700 [1955].

² A. G. CHYNOWETH u. K. G. MCKAY, Phys. Rev. **102**, 369 [1956].

³ Ähnliche Messungen wurden von GARRETT und BRATTAIN an legierten Germanium-npn-Transistoren vorgenommen (C. G. B. GARRETT u. W. H. BRATTAIN, J. Appl. Phys. **27**, 299 [1956]). Die dort verwendete experimentelle Anordnung ist der unseren ähnlich.



faktor⁴, der in Abb. 2 über der angelegten Spannung aufgetragen ist. Auffallend ist, daß die Multiplikation schon bei 4 V einsetzt, während das betreffende Element etwa 50 V sperrt⁵. Es scheint, daß die „weiche Sperrkennlinie“ dieser Übergänge dadurch zustande kommt, daß einzelne Stellen schon weit unterhalb des

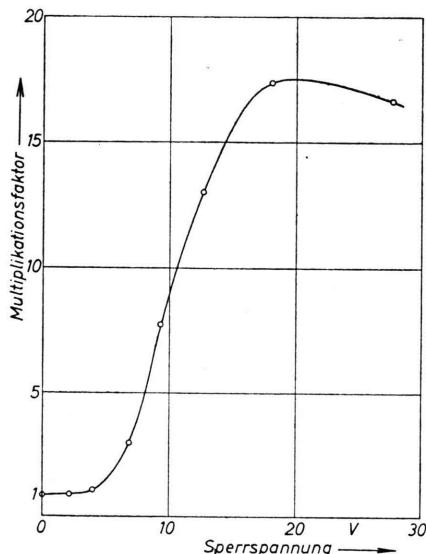


Abb. 2.

⁴ Dieser Multiplikationsfaktor ist kleiner als das Verhältnis der innerhalb des Multiplikationsgebiets erzeugten Trägerpaare zur Zahl der dort vom Licht injizierten Träger, wenn man annimmt, daß — bei den verhältnismäßig niedrigen Spannungen — nur an den leuchtenden Stellen eine Trägervervielfachung stattfindet. Denn die von der Lichtsonde beleuchtete Fläche besteht nur zu einem kleinen Teil aus (selbstleuchtenden) Multiplikationsgebieten.

eigentlichen Durchbruchsgebiets einen Multiplikationseffekt zeigen. Dies kann durch oberflächliche Verunreinigung oder ungleichmäßige Dotierung bedingt sein. Für das Abbiegen der Multiplikationskurve bei hohen Spannungen, das allerdings nur in einem Teil der Fälle beobachtet wurde, konnte bis jetzt keine Erklärung gefunden werden⁶. Es wurden Multiplikationsfaktoren von 100 und mehr gemessen.

Die Messungen wurden an verschiedenen Proben und einer großen Zahl von Leuchtpunkten durchgeführt. In fast allen Fällen konnte ein Maximum des Photostroms am Ort des Leuchtpunktes festgestellt werden. In den wenigen Fällen, in denen kein solches Maximum gefunden wurde, mag dies durch die begrenzte Empfindlichkeit der Anordnung bedingt sein, insbesondere durch das ungünstige Verhältnis des Lichtsondendurchmessers zur Ausdehnung der Leuchtpunkte.

Ebenso wie die vom Licht injizierten Träger unterliegen auch die thermisch erzeugten Elektronen und Löcher, welche durch Diffusion aus den Nachbargebieten in die Sperrsicht gelangen, der Vervielfachung. Deshalb sind die vorliegenden Ergebnisse im Einklang mit der Annahme von CHYNOWETH und MCKAY², daß der erhöhte Sperrstrom im Gebiet vor dem Durchbruch und auch im Durchbruch selbst zum größten Teil von diesen Mikroplasmen⁷ getragen wird, von denen das Leuchten ausgeht.

Herrn Dr. W. Koch danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit.

⁵ Bei anderen Leuchtpunkten derselben Sperrsicht tritt die Multiplikation erst bei höheren Spannungen ein.

⁶ Ähnliche Kurven wurden von KIKUCHI an Germanium-Indium-Gleichrichtern gemessen. (M. KIKUCHI, J. Phys. Soc., Japan **12**, 133 [1957], Fig. 10.)

⁷ Die Bezeichnung „Mikroplasma“ wurde von ROSE vorgeschlagen (D. J. ROSE, Phys. Rev. **105**, 413 [1957]).

Die Kernquadrupolresonanzspektren des Brombenzols und des 1,2-Dibromäthans

Von WERNER ZEIL und ALBRECHT SCHMITT

Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie der
Technischen Hochschule Karlsruhe

(Z. Naturforschg. **13 a**, 241—243 [1958]; eingegangen am 25. Januar 1958)

In der Literatur wird beschrieben, daß bei manchen Substanzen schon geringste Verunreinigungen die Signale der Kernquadrupolresonanz zum Verschwinden bringen und daß aus diesem Grunde extreme Reinheitsanforderungen zu stellen sind. Da wir Untersuchungen an Komplexen planen, die nur in Lösung beständig sind, untersuchten wir die Abhängigkeit der Kern-

quadrupolresonanzspektren von Brombenzol und 1,2-Dibromäthan von der Konzentration in Benzol als Lösungsmittel, wobei die Lösungen zur Untersuchung eingefroren wurden.

Die Messungen wurden durchgeführt mit Hilfe eines Kernquadrupolresonanzspektrometers, das im Prinzip der von DEHMELT und KRÜGER angegebenen Anordnung entspricht. Als Oszillatroröhre wurden zwei Röhren EC 93 verwandt. Das Spektrometer überstreckt einen Frequenzbereich von 100 bis 450 MHz. Die Spektren wurden oszillographisch registriert und die Frequenzen mit Hilfe eines Frequenzmessers, Typ WID, der Firma Rohde & Schwarz vermessen. Die Genauigkeit des Frequenzmessers beträgt 10^{-5} , die Meßgenauigkeit der Quadrupolresonanzfrequenzen ist etwas geringer. Zur Erprobung der Anlage wurde die Resonanz des Br⁸¹ im p-Brombenzolsulfonylchlorid bei der Temperatur der flüssigen Luft vermessen. Es ergab sich ein Meßwert

¹ P. J. BRAY, J. Chem. Phys. **22**, 950/51 [1954].