

## Zum elektrischen Verhalten von CdS-Einkristallen bei Spannungsimpulsen im Durchschlagsbereich

Von K. W. BÖER, J. DZIESIATY und U. KÜMMEL

II. Physikalisches Institut der Humboldt-Universität zu Berlin  
und

Laboratorium für die Physik des elektrischen Durchschlags  
der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin  
(Z. Naturforschg. 13 a, 560–562 [1958]; eingegangen am 23. April 1958)

Bekanntlich hängt der Durchschlagsvorgang in vielen Fällen von der Art der Spannungsbeanspruchung, so auch von der Zeitdauer der Spannungseinwirkung ab. Eine Vielzahl von Untersuchungen deutet darauf hin, daß detailliertere Aussagen über den Felddurchschlag bei Beanspruchung mit kurzen Spannungsimpulsen gewonnen werden können<sup>1, 2, 3, 4</sup>. Hierbei werden Polarisationserscheinungen, die zu ihrem Aufbau längere Zeit benötigen, ausgeschaltet. Der Feldverlauf im Innern des Prüflings ist bei kurzzeitiger elektrischer Beanspruchung als homogen anzusehen.

Durch Messung der dielektrischen Nachwirkungen sowie der elektrostatischen Aufladungen haben wir in vorangegangenen Arbeiten<sup>5, 6, 7</sup> dargelegt, daß CdS-Einkristalle hinsichtlich ihres elektrischen Verhaltens nicht homogen sind und langzeitige Polarisationserscheinungen zeigen, die zu einer räumlich nicht konstanten Feldverteilung führen (auch optisch lassen sich Inhomogenitäten an CdS-Einkristallen nachweisen<sup>8</sup>). Es liegt daher nahe, die bislang an CdS-Einkristallen mit Gleichspannungen im Bereich der Durchschlagsfeldstärke ausgeführten Untersuchungen durch solche mit Spannungsimpulsen zu ergänzen.

Die im folgenden beschriebenen Meßergebnisse wurden mit Rechteckimpulsen variabler Amplitude  $U_i$  und Impulsdauer  $t$  gewonnen. Die Flankensteilheit der Impulse betrug etwa  $10^{-7}$  sec. Die Folgefrequenz  $\nu$  der Impulse war regelbar. Die Messung des Kristallstroms erfolgte nach Kompensation der Kristallkapazität oszilloskopisch (vgl. Abb. 1).

Abb. 2 zeigt den Strom durch einen CdS-Einkristall als Funktion der Impulsdauer bei festgehaltener Folgefrequenz und Impulsspannung. Es ist ein beträchtliches Absinken des Kristallstromes mit der Impulsdauer zu bemerken.

Abb. 3 zeigt den Einfluß der Folgefrequenz auf den Strom bei festgehaltener Impulsdauer und Spannung. Hier ist eine Abnahme des Kristallstromes mit wachsender Folgefrequenz festzustellen.

Qualitativ ergab sich für alle Kristalle ein ähnliches Verhalten. Es zeigte sich, daß mit zunehmender Impulsdauer und kürzer werdender Erholungszeit zwischen den

Impulsen der Kristallstrom abnimmt. Diese Abnahme erfolgte je nach Kristall mehr oder weniger rasch. Es scheint ein Zusammenhang zwischen der Steilheit dieser Abnahme und der Dunkelleitfähigkeit der Kristalle zu bestehen.

Abb. 4 zeigt, daß sich bei einem relativ gut leitenden Kristall der Strom von Impuls zu Impuls noch verringerte. Hier reichte offensichtlich die Erholungszeit zwischen

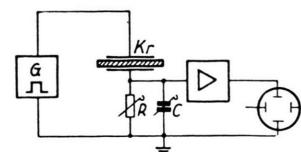


Abb. 1. Schema der Meßanordnung. ( $G$ =Impulsgenerator, Innenwiderstand =  $6\text{ k}\Omega$ ;  $Kr$  = CdS-Einkristall in Kondensatorzellenanordnung mit aufgedämpften Indiumkontakte; Kontaktfläche ca.  $1\text{ mm}^2$ , Kontaktabstand ca.  $100\text{ }\mu\text{m}$ )

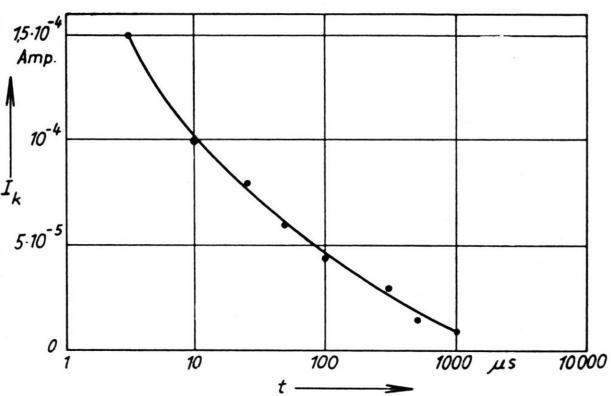


Abb. 2. Kristallstrom  $I_k$  als Funktion der Impulsdauer  $t$   $CdS(V 124/1)$ ;  $\nu=50\text{ Hz}$ ;  $U_i=150\text{ V}_{ss}$ ;  $T=20^\circ\text{C}$ .

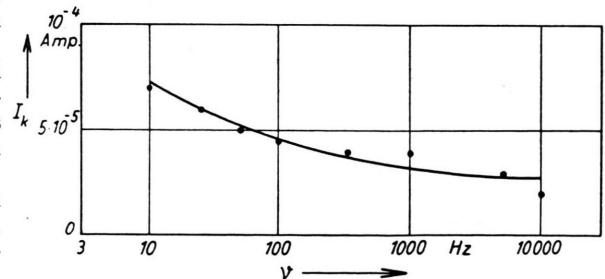


Abb. 3. Kristallstrom als Funktion der Folgefrequenz bei festgehaltener Impulsdauer.  $CdS(Ag 35/3)$ ;  $U_i=250\text{ V}_{ss}$ ;  $t=3 \cdot 10^{-6}\text{ sec}$ ;  $T=20^\circ\text{C}$ .

<sup>1</sup> A. v. HIPPEL u. R. S. ALGER, Phys. Rev. **76**, 127 [1949].

<sup>2</sup> W. FRANZ, Handbuch der Physik XVII, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 19??.

<sup>3</sup> H. KAWAMURA, H. OKURA u. T. KIKUCHI, J. Phys. Soc., Japan **9**, 541 [1954].

<sup>4</sup> S. WHITEHEAD, Dielectric Breakdown of Solids, Oxford University Press 1951.

<sup>5</sup> K. W. BÖER u. U. KÜMMEL, Ann. Phys., Lpz. **20**, 303 [1957].

<sup>6</sup> K. W. BÖER u. U. KÜMMEL, Ann. Phys., Lpz., im Druck.

<sup>7</sup> K. W. BÖER u. U. KÜMMEL, Z. Naturforschg. **12 a**, 667 [1957].

<sup>8</sup> E. F. GROSS, B. S. RASBIRIN u. M. A. JAKOBSON, Z. Techn. Phys. USSR **27**, 1147 [1957].



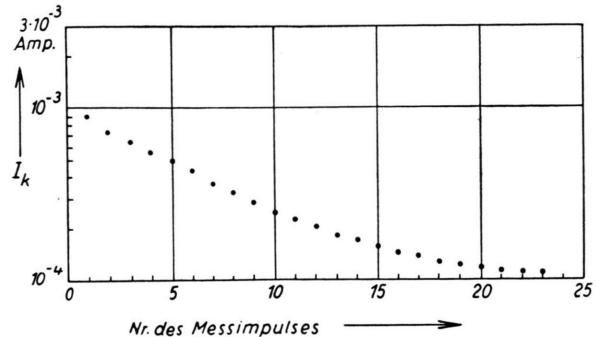


Abb. 4. Abnahme des Kristallstroms mit der Zahl der wirkenden Impulse (Folgefrequenz 2 Hz). CdS (V 15/12);  $U_i = 150 \text{ V}_{ss}$ ;  $t = 3 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$ ;  $T = 20^\circ\text{C}$ .

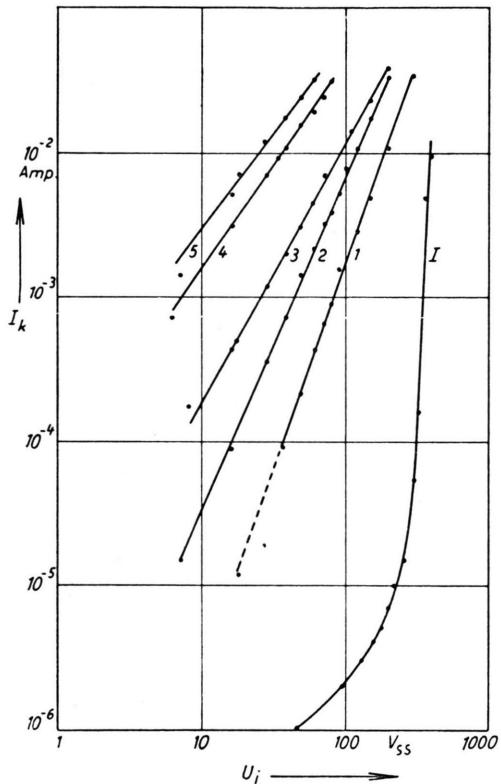


Abb. 5. Kristallstrom als Funktion der angelegten Spannung ( $I$  = Gleichstromkurve, 1 bis 5 Impulsstromkurven, Einzelimpulse, Erholungszeit 2 min). CdS (Au 80/14);  $t = 3 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$ ;  $T = 20^\circ\text{C}$ .

den einzelnen Impulsen nicht aus. Beim Einsatz des zweiten Impulses war der Kristall durch den vorangegangenen noch vorpolarisiert. Erst nach einer größeren Anzahl von Impulsen stellte sich ein stationärer Wert der Polarisation am Anfang jedes weiteren Impulses ein.

Aus diesen Untersuchungen kann entnommen werden, daß zur Vermeidung solcher „langzeitigen“ Polarisationseffekte mit möglichst kurzzeitigen Impulsen bei

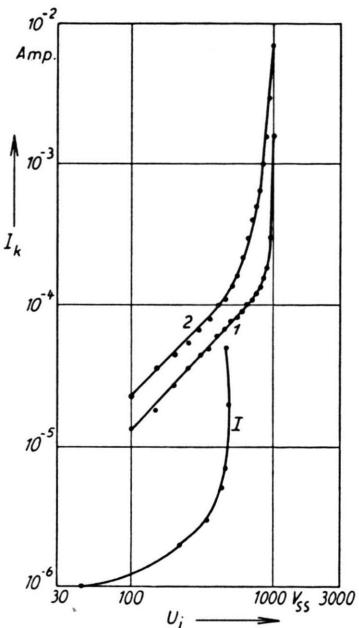


Abb. 6. Kristallstrom als Funktion der angelegten Spannung ( $I$  = Gleichstromkurve, 1 und 2 Impulsstromkurven [1 im Dunkeln, 2 bei schwacher Belichtung], Einzelimpulse, Erholungszeit 2 min). CdS (Co 113/9);  $t = 3 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$ ;  $T = 20^\circ\text{C}$ .

großer Erholungszeit zwischen den Impulsen gearbeitet werden muß.

Daher sind die im folgenden aufgeführten Meßergebnisse so gewonnen, daß für jeden Meßpunkt nur ein einzelner Impuls verwandt wurde. Bis zur Aufnahme des nächsten Meßpunktes wurde etwa eine Minute gewartet. Die Impulsdauer betrug stets  $3 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$ .

Abb. 5 zeigt eine Schar von Strom-Spannungs-Charakteristiken. Kurve I ist die zum Vergleich eingezeichnete Charakteristik für Gleichspannungsbelaßung. Die Kurven 1 bis 5 sind Charakteristiken bei Spannungs-impulsen mit verschiedener optischer Anregung (Belichtung im Ausläufer). Die Lichtanregung nimmt von 1 nach 5 zu (Kurve 1 ist im Dunkeln aufgenommen). Es ist ersichtlich, daß der Strom um viele Größenordnungen über dem mit Gleichspannung gemessenen Strom liegt. Dieses Ergebnis stimmt mit dem von ROSE und SMITH<sup>9</sup> gefundenen Verhalten überein. Es zeigte sich, daß die Charakteristiken in dem untersuchten Bereich recht gut Potenzgesetze befolgen. Der Exponent wächst mit abnehmender Belichtung und nimmt in unserem Beispiel Werte zwischen 1,3 und 2,8 an (ROSE und SMITH geben nur den Exponenten 2 an, den sie bei geringerer Belichtung gemessen haben).

An anderen Kristallen wurden Werte des Exponenten zwischen 1 und 5 gemessen. Ein weiteres Beispiel ist in Abb. 6 dargestellt. Hier nahm der Strom zunächst etwa linear mit der Impulsspannung zu. Die kritische Spannung  $U_{krit}$  für Gleichstrombelastung konnte mit Impulsspannungen überschritten werden, ohne daß der

<sup>9</sup> R. W. SMITH u. A. ROSE, Phys. Rev. 97, 1531 [1955].

Kristall durchschlug. Erst bei Impulsspannungen, die hier mehr als das Doppelte der Durchschlagsspannung bei Gleichspannungsbelastung betrugen, stieg der Strom dann äußerst steil an, bis schließlich bei diesem Beispiel der Kristall bei etwa 1000 V<sub>ss</sub> durch den Felddurchschlag zerstört wurde.

Eine Erhöhung der Durchschlagsfeldstärke bei Impulsbeanspruchung gegenüber der Gleichspannungsbeanspruchung wurde allgemein festgestellt. Das Verhältnis beider Werte der Durchschlagsfeldstärken ist von Kristall zu Kristall verschieden; es wurden bei den bisherigen Untersuchungen Werte zwischen 1,5 und 3 beobachtet.

Die angeführten Meßergebnisse lassen sich einfach deuten, wenn man annimmt, daß der Kristall elektrisch nicht homogen ist, d. h. aus Bereichen höherer und geringerer Leitfähigkeit besteht. An den Grenzflächen zwischen diesen Bereichen werden sich dann durch den Einfluß eines äußeren Feldes Ladungen ansammeln, die den Feldverlauf beeinflussen und eine langsame Abnahme des Stromflusses durch den Kristall bewirken.

Kurz nach dem Anlegen der Spannung dürfte der Feldverlauf im Kristall noch weitgehend homogen sein (die Dielektrizitätskonstanten verschiedener Kristallbereiche sollten sich nicht wesentlich voneinander unterscheiden). Der Strom durch den Kristall ist relativ groß und bewirkt zunächst zum großen Teil die Aufladung der Grenzschichten zwischen den Gebieten unterschiedlicher Leitfähigkeit.

Mit fortschreitender Zeit baut sich diese Polarisation immer mehr und mehr auf, die Feldstärke nimmt in Gebieten höherer Leitfähigkeit ab und steigt in Gebieten geringerer Leitfähigkeit an. Der Gesamtstrom durch den Kristall nimmt ab, bis er schließlich bei Beendigung dieses Polarisationsvorganges den stationären Gleichstromwert annimmt.

Bei Zunahme der angelegten Spannung wird die Durchschlagsfeldstärke zuerst in den schlechter leitenden Gebieten erreicht. In diesen Gebieten muß dann

eine durch das Feld bedingte Elektronenvermehrung einsetzen.

Die in Abb. 7 gezeigten Oszilloskopbilder des Stromverlaufes bestätigen diese Vorstellung. Bei Abb. 7 a lag

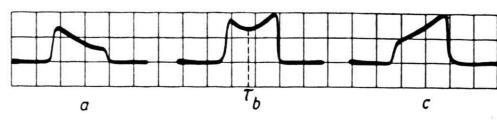


Abb. 7. Stromoszilloscopie.  
a)  $U_i = 0,5 U_{krit}$ , b)  $U_i = 0,9 U_{krit}$ , c)  $U_i = 0,95 U_{krit}$ .

die Spannung weit unterhalb der Durchbruchsspannung. Das Abnehmen des Stromes mit der Zeit deutet auf die sich ausbildende Polarisation. Bei Abb. 7 b betrug die Spannung etwa 9/10 der Durchbruchsspannung. Zunächst fällt auch hier der Strom mit der Zeit, die Polarisation beginnt sich auszubilden, die Feldstärke an schlechterleitenden Gebieten wächst. Zur Zeit  $\tau^*$  hat die Feldstärke vermutlich in einem dieser Gebiete den für die Elektronenproduktion (elektrische Anregung, vgl. Anm. 10, 11) kritischen Wert überschritten, es werden hier Leitungselektronen durch das Feld erzeugt, die Leitfähigkeit dieses Gebietes nimmt zu und damit auch der durch den Kristall fließende Strom.

Beträgt die angelegte Spannung etwa 95% der Durchschlagsspannung (Abb. 7 c), so ist der erste abfallende Teil des Stromes schließlich nicht mehr zu erkennen. Der Strom nimmt mit der Dauer der angelegten Spannung laufend zu.

Detailliertere Untersuchungen sollen einer in Vorbereitung befindlichen ausführlichen Veröffentlichung vorbehalten bleiben.

\*  $\tau$  ist der Zeitpunkt des Stromminimums.

<sup>10</sup> K.W. BÖER u. U. KÜMMEL, Ann. Phys., Lpz. **14**, 391 [1954].

<sup>11</sup> K.W. BÖER u. U. KÜMMEL, Ann. Phys., Lpz. **16**, 181 [1955].

## Excitonenbanden von Mischkristallen

Von GEORG MAIER und WILHELM WADELICH

Physikalisches Institut der Technischen Hochschule München  
(Z. Naturforsch. **13 a**, 562—564 [1958]; eingegangen am 14. April 1958)

GROSS und KARRYEFF<sup>1</sup> entdeckten bei 20 °K erstaunlich scharfe Absorptionslinien von Halbleitern, die einem Absorptionskontinuum vorgelagert sind. Diese Linien, die sich durch wasserstoffähnliche Serien mit zwei empirischen Konstanten darstellen lassen, werden einem wasserstoffähnlichen Gebilde Elektron-Loch („Exciton“) zugeschrieben. Zwischen den Linien und dem

Kontinuum liegt in vielen Fällen, z. B. bei CuJ, eine Bande oder Doppelbande, die bei Verringerung der Schichtdicke schließlich allein übrig bleibt und daher von NIKITINE und Mitarb.<sup>2</sup> Oberflächentermen zugeordnet wird. Ihre Lage fällt nahezu zusammen mit der aus den Wasserstoffserien berechneten Grenze der Linien. Da nach allen Theorien der Excitonen diese bei hohen Quantenzahlen einen größeren Kristallbereich ( $\approx 100 \text{ \AA}$  und mehr!) umfassen<sup>3</sup>, sollte die Frage untersucht werden, wie sich die Excitonenspektren in ungeordneten Mischkristallen verhalten. Die Schichten wurden durch Aufdampfen von Gemischen aus CuJ und CuCl bzw. CuJ und AgJ hergestellt. Wegen des verschiedenen

<sup>1</sup> E. F. GROSS u. S. KARRYEFF, Dokl. Akad. Nauk SSSR **84**, 261 [1957]. — Weitere zusammenfassende Literatur im Handb. d. Phys., Springer-Verlag, Berlin 1957, Bd. XXVIII, S. 292.

<sup>2</sup> S. NIKITINE u. R. REISS, C. R. Acad. Sci., Paris **244**, 2788 [1957].

<sup>3</sup> S. NIKITINE u. R. REISS, C. R. Acad. Sci., Paris **244**, 1481 [1957].