

# Elektrolumineszenz in ZnS:Cu-Einkristallen

## Teil I: Zusammenhang mit Kristallstruktur und Dotierung

H. HAUPT und H. NELKOWSKI

II. Physikalisches Institut der Technischen Universität Berlin

(Z. Naturforsch. **24 a**, 1904—1908 [1969]; eingegangen am 23. September 1969)

Electroluminescence (EL) in ZnS:Cu-crystals often occurs in the shape of comets and double-comets, which are orientated perpendicular to the pseudohexagonal *c*-axis, mostly within the  $\langle 10.0 \rangle$  directions. Crystals with strong stacking disorder (drawn from the melt) contain a great deal of luminescing lines. The EL of crystals with well built cubic structure (grown by iodine transport) however consists of few long double-comets (up to 2.3 mm). EL of crystals doped after growth and its comparison with photoluminescence, optical birefringence and the result of Cu-diffusion measurements confirm the assumption that EL occurs along Cu-decorated dislocation lines. It is shown that the local distribution of brightness essentially is not affected by a variable Cu-concentration along the dislocation lines but by the field distribution in the crystals.

Es ist bekannt, daß die durch Wechselfelder angeregte Elektrolumineszenz (EL) in Sulfidphosphoren (Destriau-Effekt) auf kleine Gebiete der Kristalle beschränkt ist<sup>1, 2</sup>, und zwar auch dann, wenn die Kristalle homogen photolumineszieren.

Durch mikroskopische Beobachtungen konnte FISCHER<sup>3</sup> bei Verwendung geeigneter Einbettungsmittel zeigen, daß die EL in den Kristalliten von Pulverphosphoren häufig in Form von Kometen und Doppel-Kometen auftritt. Die beiden Hälften eines Doppel-Kometen emittieren dabei gegenphasig, und zwar stets dann, wenn die einem Kometenkopf benachbarte Elektrode positiv gepolt ist. GILLSON und DARNELL<sup>4</sup> fanden für Einkristalle ähnliche Ergebnisse und bestimmten die Orientierung der Kometen im Kristallgitter.

Fast alle Autoren nehmen als Ursache für die linienförmige EL Cu-Abscheidungen längs linearer Gitterstörungen an. Dadurch entstehen Gebiete, die sich in Leitfähigkeit oder Leitungstyp vom umgebenden ZnS unterscheiden und eine Feldverzerrung im Kristall bewirken<sup>4–7</sup>. Bisher konnte jedoch lediglich bestätigt werden, daß eine Cu-Dotierung der Kristalle erforderlich ist. Ein direkter Beweis für den Zusammenhang der EL mit Cu-Ausscheidungen wurde dagegen noch nicht erbracht. Zwar wurden in verschiedenen Bereichen derselben Einkristalle EL-Linien und sichtbare Cu-Abscheidungen in par-

allelen Richtungen gefunden, jedoch fielen beide nie zusammen<sup>4, 7</sup>.

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluß der Cu-Dotierung auf die EL von ZnS-Einkristallen genauer untersucht und die Orientierung der EL-Linien für Kristalle mit unterschiedlich gut ausgebildeter Struktur bestimmt. Es gelang Kristalle zu präparieren, in denen die EL in der Form einiger weniger, aber mehrere mm langer Doppel-Kometen auftritt. Entlang dieser Objekte wurde erstmals systematisch die Abhängigkeit der integralen Lumineszenz und der Leuchtwellen von den Anregungsparametern untersucht. Über diese Ergebnisse wird im zweiten Teil der Arbeit in dieser Zeitschrift berichtet und ein Modell für den Mechanismus der EL abgeleitet werden.

## 1. Kristalle und Untersuchungsmethoden

Für die Untersuchungen wurden zwei Arten von Kristallen benutzt:

a) Aus der Schmelze gezogene ZnS-Kristalle (Fa. Eagle-Picher, Miami, Oklahoma). Sie wurden erst nachträglich durch Eindiffusion mit Cu dotiert.

b) ZnS:Cu-Kristalle, die in unserem Institut nach dem Jod-Transportverfahren gezüchtet wurden. Zur Dotierung wurde das Cu als CuCl<sub>2</sub> der Ausgangsstanz beigemengt.

<sup>4</sup> J. L. GILLSON u. F. J. DARNELL, Phys. Rev. **125**, 149 [1962].  
<sup>5</sup> J. KUBATOVA u. K. PATEK, Czech. J. Phys. **13**, 157 [1963].

<sup>6</sup> A. G. FISCHER, J. Electrochem. Soc. **110**, 733 [1963].  
<sup>7</sup> E. LENDVAY u. P. KOVACS, Intern. Conf. on Luminescence, Budapest 1966.

Sonderdruckanforderungen: Dr. H. NELKOWSKI, II. Physikalisches Institut der Technischen Universität Berlin, D-1000 Berlin 12, Straße des 17. Juni 135.

<sup>1</sup> J. F. WAYMOUTH u. F. BITTER, Phys. Rev. **95**, 941 [1954].

<sup>2</sup> G. DIEMER, Philips Res. Rep. **10**, 194 [1955].

<sup>3</sup> A. G. FISCHER, J. Electrochem. Soc. **109**, 1043 [1962].



Die Strukturanalyse der Kristalle erfolgte nach der Präzessionsmethode (Goniometer der Fa. Stoe). Für die räumliche Beobachtung der Lumineszenzerscheinungen wurde ein Stereomikroskop der Fa. Leitz mit Vergrößerungen bis 200-fach verwendet. Für Aufnahmen wurde auf einen der beiden Okulartuben nach Entfernung des Okulars das Gehäuse einer Spiegelreflexkamera gesetzt. Stereoaufnahmen erhält man am einfachsten dadurch, daß man den Kristall nacheinander durch beide Tuben fotografiert. Die Ergebnisse derartiger Aufnahmen werden im Text zwar diskutiert, es werden jedoch keine Abbildungen gebracht.

## 2. Ergebnisse und Diskussion

### a) Kristallstruktur, Dotierung und Elektrolumineszenz

Die aus der Schmelze gezogenen Kristalle waren klar durchsichtig und zeigten weder Elektrolumineszenz (EL) noch Photolumineszenz (PL). Sie wurden in etwa 1 mm dicke Scheibchen von ca. 1 cm Durchmesser zersägt, diese einseitig mit Cu bedampft und getempert. Nach Abschleifen des überschüssigen Cu auf der Oberfläche wurden sie in etwa  $2 \times 1 \times 1$  mm große Stücke gespalten und durch Aufdampfen mit In kontaktiert.

Bei Wechselfeldanregung erhält man eine Vielzahl elektrolumineszierender Linien, bei welchen je nach Güte der Kristallstruktur bestimmte Vorzugsrichtungen mehr oder weniger deutlich hervortreten.

In Abb. 1 b \* ist ein solcher Kristall – aufgenommen im polarisierten Durchlicht – wiedergegeben. Blickrichtung ist die  $\langle 10.0 \rangle$ -Achse. Die Streifung wird durch unterschiedliche Doppelbrechung in parallel liegenden Kristallbereichen bewirkt. Sie zeigt an, daß in dichter Folge der Anteil an kubischen und hexagonalen Packungselementen wechselt; denn nur die hexagonalen Anteile tragen zur Doppelbrechung bei. Bei periodischer<sup>8</sup> und bei statistischer<sup>9</sup> Folge von kubischen und hexagonalen Packungselementen (Polytypen bzw. eindimensional fehlgeordnete Kristalle) ist der Doppelbrechungsgrad dem hexagonalen Anteil proportional. Senkrecht zu den Streifen liegt die Stapelachse, die mit der pseudohexagonalen  $c$ -Achse

identisch ist. Die Streifen liegen also parallel zu den Kanten der Basisebenen des Kristalls. Die Schnittflächen oben und unten sind willkürlich und stimmen mit keiner kristallographisch ausgezeichneten Richtung überein.

Die undotierten Kristalle waren weder photo- noch elektrolumineszent. Nach Eindiffusion von Cu von der oberen Kristallfläche her zeigte ein Teil des Volumens grüne PL (Abb. 1 c). Eine schmale Zone nahe der Oberfläche luminesziert nicht, vermutlich infolge von Konzentrationslöschung. Parallel zur Oberfläche folgt dann eine Schicht mit günstiger Dotierung für die PL; weiter im Kristallinnern ist die Cu-Dotierung zu gering. Dieses Erscheinungsbild entspricht dem, welches AVEN und HALSTED<sup>10</sup> an ZnSe-Kristallen gefunden haben.

Die Dotierung mit Cu führt auch zu EL, die knapp bis zur Mitte des Kristalls reicht (Abb. 1 d). Die In-Elektroden befinden sich rechts und links am Kristall. Die EL-Kometen liegen nicht in Feldrichtung sondern parallel zu den Polarisationsstreifen, d. h. sie befinden sich in den Basisebenen der Kristalle. Die wenigen Kometen nahe der unteren Seite wurden offenbar von Cu verursacht, das bei der Temperung von der bedampften Seite her entlang der Oberfläche um das Kristallscheibchen gewandert ist.

In Abb. 1 f ist das EL-Bild desselben Kristalls wiedergegeben, hier jedoch bei einer Betrachtungsrichtung ungefähr parallel zur  $c$ -Achse. Man blickt also auf die Basisebenen. Die Kristallflächen oben und unten im Bild sind Spaltflächen und identisch mit  $(10.0)$ -Ebenen. In den Basisebenen bilden die Kometen im allgemeinen drei Scharen von Geraden, die jeweils einen Winkel von  $60^\circ$  einschließen. Bei der hier gewählten Kontaktierung werden allerdings nur zwei davon angeregt, da die dritte senkrecht zur Feldrichtung steht. Sie wird jedoch bei anderer Kontaktierung ebenfalls sichtbar. Die Kometen liegen in den  $\langle 10.0 \rangle$ -Richtungen der Kristalle, wie dies auch GILLSON und DARNELL<sup>4</sup> sowie LENDVAY und KOVACS<sup>7</sup> beobachtet haben. In diesen Richtungen hat GOLDBERG<sup>11</sup> bei Ätzversuchen Stufenversetzungen im ZnS nachgewiesen. LENDVAY und KOVACS<sup>7</sup> fanden außerdem in anderen Bereichen ihrer Einkristalle sichtbare Cu-Abscheidungen, die parallel zu den Richtungen der Kometen waren. In keinem Falle

\* Abb. 1 a–f, 2 und 4 auf Tafel S. a, b.

<sup>8</sup> O. BRAFMAN u. J. T. STEINBERGER, Phys. Rev. **143**, 501 [1966].

<sup>9</sup> O. PFÜTZNER, Diplomarbeit, II. Physikalisches Institut der Technischen Universität Berlin, 1969.

<sup>10</sup> M. H. AVEN u. R. E. HALSTED, Phys. Rev. **137A**, 228 [1965].

<sup>11</sup> P. GOLDBERG, J. Appl. Phys. **32**, 1520 [1961].

beobachteten sie jedoch EL entlang solcher sichtbaren Abscheidungen. Dennoch legen diese Beobachtungen den Schluß nahe, daß die Kometen an Cu-dekorierte Versetzungen gebunden sind, die wegen ihrer geringen Dicke im Lichtmikroskop nicht mehr auflösbar sind.

Bei stärker gestörten Kristallen sind die EL-Linien gekrümmmt. Wie aus Stereoaufnahmen sowie Beobachtungen der Kristalle aus verschiedenen Richtungen deutlich hervorgeht, liegen sie dann nicht ausschließlich in den Basisebenen – wie im Fall des oben abgebildeten Kristalls –, sondern sie haben auch Komponenten in Stapelrichtung. Das bedeutet, daß diese dekorierten Linien dann keine reinen Stufenversetzungen sind, sondern daß auch Schraubenversetzungen mit einem Burgers-Vektor parallel zur c-Achse beteiligt sind.

Aus Vergleich der Abbildungen 1 c und d sieht man, daß die EL weiter in den Kristall hineinreicht als die PL. Dies wird noch deutlicher in Abb. 1 e, die den Kristall bei gleichzeitiger UV- und Feldanregung zeigt. Das läßt sich auf Grund von Untersuchungen der Cu-Diffusion<sup>12</sup> an gleichartigen Kristallen deuten. Dabei wurde gefunden, daß neben der Diffusion durch das Volumen eine andere mit höherer Wanderungsgeschwindigkeit auftritt, welche der Diffusion von Cu entlang von Kristallgitterstörungen (z. B. Versetzungslien) zugeschrieben wird. Weiter im Innern der Kristalle ist außerhalb dieser Linien die Cu-Konzentration zu gering für die PL. – Die EL ist also offensichtlich an Versetzungslien gebunden, die ausreichend mit Cu dekoriert sind, jedoch nicht so hoch, daß die Ausscheidungen sichtbar werden.

### b) Fehlordnung und EL-Liniendichte

Die aus der Schmelze gezogenen Kristalle, die bisher beschrieben wurden, zeichnen sich sowohl durch ausgeprägte Fehlordnung aus (d. h. durch eine statistische Folge kubischer und hexagonaler Packungselemente in Stapelrichtung) als auch durch eine große Anzahl von EL-Linien, zumindest in den Gebieten der Kristalle, die ausreichend mit Cu dotiert sind. Über eine starke Häufung der EL in fehlgeordneten Kristallbereichen war mehrfach berichtet worden<sup>13–15</sup>. Außerdem stellte GOLDBERG<sup>11</sup> bei seinen

Ätzversuchen fest, daß Stufenversetzungen fast ausschließlich in diesen Bereichen zu finden sind.

### c) Kristalle mit gut ausgebildeten Doppel-Kometen

Für genauere Untersuchungen der EL einzelner Leuchtgebiete benötigt man Kristalle mit einzelnen, möglichst großen Leuchtgebieten. Da als gesichert angenommen werden kann, daß die EL an Versetzungslien gebunden ist, ist man daher an Kristallen mit einer geringen Fehlordnung interessiert. Ihre Züchtung gelang durch das Jodtransportverfahren bei 700–850 °C. Die Kristalle besitzen eine nahezu ungestörte kubische Struktur. Der hexagonale Anteil liegt unterhalb der Nachweisgrenze des Röntgen-Goniometers (ca. 2%). Die Kristalle wurden während des Wachstums dotiert, wobei für die EL ein Zusatz von  $5 \cdot 10^{-4}$  Atome Cu/Atom Zn am günstigsten war. Sie sind klar durchsichtig und schwach grau gefärbt. Der relativ hohe Cu-Zusatz ist notwendig, um neben der Volumendotierung die für die EL notwendige Dekoration von Versetzungslien mit Cu zu erhalten. Die Kristalle sind gut photolumineszent. Bei Einwirkung eines Wechselfeldes elektrolumineszieren sie überwiegend in Form weniger, gut ausgebildeter Doppel-Kometen.

Abb. 2 zeigt einen solchen Kristall. Blickrichtung ist die  $\langle 111 \rangle$ -Stapelachse (Wachstumsrichtung). Die Kometen liegen wiederum senkrecht zur Stapelachse. Der helle Doppel-Komet ist mit 2,3 mm der längste von uns beobachtete, der völlig linear ist. Die Helligkeit nimmt in seinen beiden Teilen monoton vom Kopf zum Schwanz hin ab, wobei in der Mitte eine dunkle Zone verbleibt. Dieser Doppel-Komet liegt in  $[1\bar{1}0]$ -Richtung. Sie entspricht der hexagonalen  $[10.0]$ -Richtung, in der auch bisher Kometen beobachtet worden waren (vgl. 3 a). Neben kleineren Doppel-Kometen, die ebenfalls  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ -Richtungen haben, kommen in diesem kubischen Kristall auch solche mit  $\langle 1\bar{2}1 \rangle$ - und  $\langle 31\bar{4} \rangle$ -Orientierungen vor.

GILLSON und DARNELL<sup>4</sup> nehmen als Ursache für das Entstehen eines Kometen an, daß ein p–n-Ubergang eine Versetzungslien schneidet, welche mit einer großen Zahl von Löcherhaftstellen besetzt ist. Die Löcher sollen auf der n-Seite des Überganges durch Stoßionisation erzeugt werden und im Volu-

<sup>12</sup> H. NELKOWSKI u. P. BOLLMANN, Z. Naturforsch. **24a**, 1302 [1969].

<sup>13</sup> M. A. SHORT, E. G. STEWARD u. T. B. TOMLINSON, Nature **177**, 240 [1956].

<sup>14</sup> D. W. G. BALLENTYNE, J. Electrochem. Soc. **107**, 801 [1960].

<sup>15</sup> J. F. BAUM u. F. J. DARNELL, J. Electrochem. Soc. **109**, 165 [1962].

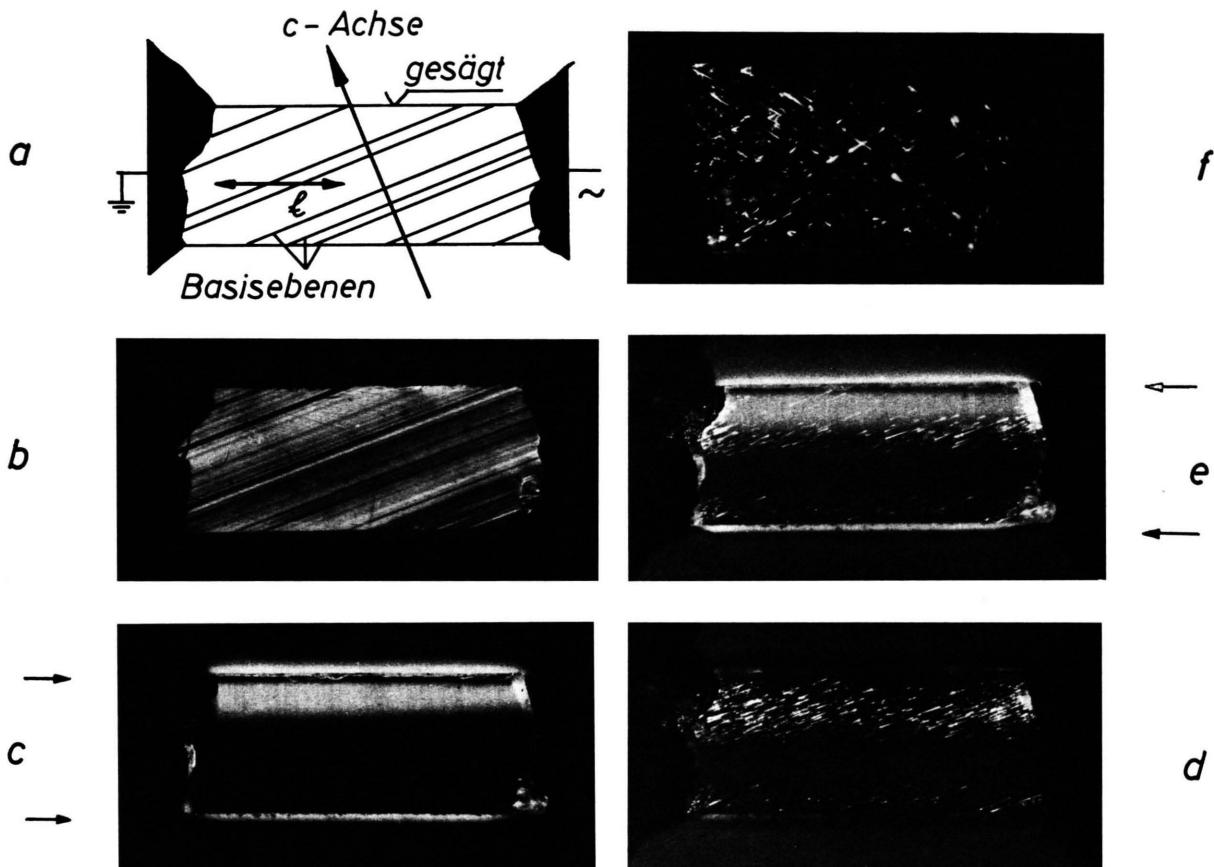


Abb. 1. EL und PL eines ZnS:Cu-Einkristalls mit starker Fehlordnung. a) Kristallorientierung und Kontaktierung für Abb. b—e, b) Kristall im polarisierten Durchlicht, c) PL (→ Fluoreszenz des Klebers), d) EL (mit schwacher Untergrundbeleuchtung), e) EL und PL, f) EL bei Blickrichtung etwa parallel zur *c*-Achse. Die Abb. c—e wurden gleich belichtet. Einige Kometen erscheinen wegen der zu geringen Tiefenschärfe des Mikroskopes verwaschen.



Abb. 2. EL eines kubischen ZnS:Cu-Einkristalls (mit schwacher Untergrundbeleuchtung). Länge des großen Doppelkometen 2,3 mm. Elektroden oben und unten.

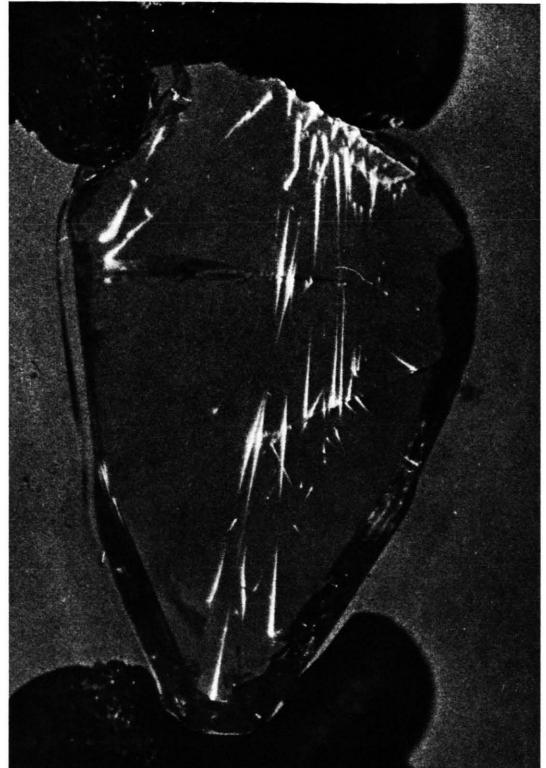


Abb. 4. EL in Kristall mit zwei Sprüngen (siehe Text).

men eine genügend große Beweglichkeit haben, um in einer Halbperiode des anregenden Feldes vom p-n-Übergang zur Versetzungslinie zu gelangen. Diesem Modell entsprechend müßte der Komet verschwinden, wenn durch Entfernung des p-n-Überganges die Erzeugung von Ladungsträgerpaaren verhindert wird. Um dies nachzuprüfen, wurde ein Kristall mit einem Doppel-Kometen schichtweise abgeschliffen (Abb. 3). Der obere Komet, der zunächst im Kristall lag, erlosch nicht, als die Schleiffläche

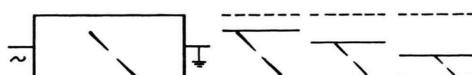


Abb. 3. Schleifversuch. Links: ursprüngliche Lage des Doppelkometen im Kristall. Nach rechts fortschreitendes Abschleifen der oberen Kristallfläche.

dessen Kopf erreichte. Durch weiteres Abschleifen wurde der Doppel-Komet verkürzt, wobei sich die Länge beider Teile gleichmäßig verringerte. Der Doppel-Komet blieb also symmetrisch. Daraus folgt, daß entlang der ganzen Versetzungslinie die Cu-Konzentration für die EL ausreichend ist, die Helligkeitsverteilung längs der Kometen jedoch von der Feldverteilung abhängt. Diese wird durch den Einschluß selbst wesentlich mitbestimmt. Weitere Kristallinhomogenitäten wie z. B. die von GILLSON und DARRELL<sup>4</sup> angenommenen p-n-Übergänge sind offenbar nicht erforderlich.

Diese Folgerungen werden durch eine weitere Beobachtung unterstützt. Der in Abb. 4 gezeigte, stärker gestörte Kristall hatte zunächst mehrere Doppelkometen, deren Köpfe jeweils in der Nähe der Elektroden (oben und unten im Bild) lagen. In der mittleren Hälfte des Kristalls war nahezu keine EL erkennbar. Beim Schleifen der zur Bildecke parallelen Fläche bekam der Kristall zwei Sprünge etwa senkrecht zur Richtung der Doppelkometen. An diesen Sprungflächen entstanden ohne weitere Behandlung neue Kometen-Köpfe. Die vorher vorhandenen Doppelkometen wurden dadurch in je drei neu zerteilt. Ihre beiden Teile emittieren in der üblichen Weise gegenphasig, also jeweils in der Halbperiode des anregenden Feldes, in welcher die dem Kopf benachbarte Elektrode positiv ist. Entsprechend leuchten auch die an einem Sprung zusammenstoßenden neuen Kometen gegenphasig. Daraus ergibt sich ebenfalls, daß die zu einem Doppel-Kometen gehörige Versetzungslinie offenbar hinreichend gleichmäßig mit Cu dekoriert ist und die Helligkeitsver-

teilung längs dieser nur von der Feldverteilung abhängt. Diese wurde hier durch die Sprünge verändert.

Eine Änderung der Feldverteilung im Kristall kann auch durch zusätzliche Anregung mit UV-Licht bewirkt werden. Mit zunehmender UV-Intensität verblassen die Kometen im Innern der Kristalle immer mehr und erlöschen schließlich völlig (in Abb. 1 e sind in der PL-Zone kaum noch Kometen zu erkennen, obwohl die elektrische Anregung und die Belichtungszeit dieselben sind wie in Abb. 1 d). Nahe den Elektroden werden dagegen neue Kometen sichtbar; dort bereits ohne UV-Belichtung vorhandene werden heller. Diese Beobachtungen lassen sich folgendermaßen deuten: Die UV-Anregung erzeugt im Volumen Ladungsträgerpaare, die eine Erhöhung der Leitfähigkeit des Kristalls bewirken. Dadurch konzentriert sich das Feld mehr auf die Gebiete nahe den Elektroden. Bei hinreichend hoher UV-Intensität wird das Kristallinnere nahezu feldfrei, so daß dort die Feldstärke an den Cu-Einschlüssen nicht mehr zur Anregung der EL ausreicht.

### 3. Zusammenfassung

Die EL tritt in Cu-dotierten ZnS-Kristallen in Gestalt von kometenförmigen Linien auf, die senkrecht zur Stapelachse vorwiegend in den  $\langle 10.0 \rangle$ - bzw.  $\langle T10 \rangle$ -Richtungen liegen. In diesen Richtungen sind nach GOLDBERG<sup>11</sup> sowie LENDVAY und KOVACS<sup>7</sup> auch Stufenversetzungen vorhanden. In stark gestörten Kristallen sind die EL-Linien gekrümmt und haben auch Komponenten in Richtung der [001]-Stapelachse. Bei ihnen werden die dekorierten Gitterstörungen vermutlich durch Stufen- und Schraubenversetzungen bewirkt.

Bei ZnS-Kristallen, die nachträglich von einer Oberfläche her mit Cu dotiert wurden, reicht die Elektrolumineszenz weiter in den Kristall hinein als die Photolumineszenz. Die Deutung, daß die EL an Cu-dekorierte Versetzungslinien gebunden ist, steht in Übereinstimmung mit Diffusionsversuchen, die eine schnellere Einwanderung von Cu entlang solcher Gitterstörungen als durch das Volumen der Kristalle ergeben.

Nach dem Jodtransportverfahren hergestellte, Cu-dotierte ZnS-Kristalle mit sehr gut kubischer Struktur zeigen EL in der Form von wenigen, gut ausgebildeten Doppelkometen (bis 2,3 mm Länge). Die Annahme von GILLSON und DARRELL<sup>4</sup>, daß ein

Kometenkopf dort liegt, wo ein p – n-Übergang die Versetzungsline schneidet, wird durch schichtweises Abschleifen der Kristalle widerlegt. Dieses bewirkt lediglich eine Verkürzung der Doppel-Kometen, die jedoch stets symmetrisch bleiben. Daraus folgt, daß die Helligkeitsverteilung nicht durch eine veränderliche Cu-Konzentration längs einer Versetzungsline sondern durch die sich an ihr einstellende Feldver-

teilung bestimmt wird. Diese Annahme wird bestätigt durch das Auftreten neuer Kometen oder das Verschwinden vorhandener, wenn die Feldverteilung im Kristall durch mechanisch erzeugte Sprünge oder durch zusätzliche UV-Anregung verändert wird.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danken wir für die Förderung dieser Arbeit durch Gewährung einer Sachbeihilfe.

## Untersuchungen zur Auftreffwinkelabhängigkeit des Emissionskoeffizienten für Sekundärelektronen und der Zerstäubungsausbeute beim Ionenbeschuß zylindrischer Proben im Plasma

H. OECHSNER und W. R. GESANG

Physikalisches Institut der Universität Würzburg

(Z. Naturforsch. **24 a**, 1908–1914 [1969] ; eingegangen am 26. September 1969)

*Investigation of the Angular Dependence of the Secondary Electron Emission Coefficient  
and the Sputtering Yield by Ion Bombardment of Cylindrical Targets in a Plasma*

The influence of the angle of incidence of low energy ions on the emission of secondary particles from solid surfaces can be investigated by using cylindrical targets in a low pressure plasma. It is shown that the distribution of the angle of incidence of the impinging ions becomes independent of plasma conditions and bombarding parameters, when the diameter of the Langmuir sheath around the target is sufficiently large compared with that of the cylindrical target. Experimental results on the influence of the angle of ion incidence on the secondary electron emission coefficient and the sputtering yield are reported for polycrystalline Mo bombarded with A<sup>+</sup>-ions from 300 to 900 eV.

Beim Ionenbeschuß von Festkörperoberflächen kommt es zu einer Reihe von Wechselwirkungsprozessen, die zur Emission von neutralen oder elektrisch geladenen Sekundärteilchen führen. Diese Vorgänge sind in einer Anzahl von Arbeiten in Abhängigkeit von der Beschußenergie sowie von der Target- und der Beschußteilchenart untersucht worden<sup>1</sup>. Einen weiteren, für das Verständnis der ablaufenden Wechselwirkungsprozesse aufschlußreichen Parameter bildet der Auftreffwinkel der Beschußteilchen, dessen Einfluß bis jetzt jedoch wenig geklärt ist.

Im Bereich niederer Beschußenergien bis etwa 2 keV bietet es sich an, den Ionenbeschuß nach der sogenannten Sondenmethode vorzunehmen, wobei das Target nach Art einer negativ gepolten Sonde in ein hochreines Niederdruckplasma eintaucht. Bei der Sondenmethode ist zwar ein Beschuß unter einheitlichem schiefem Winkel nicht möglich, trotzdem kön-

nen bei bestimmten experimentellen Anordnungen mit ihrer Hilfe Aussagen über Auftreffwinkeleffekte erhalten werden. Dies ergibt sich aus der Tatsache, daß beim Ionenbeschuß von zylindrischen Proben je nach Beschußstrom und Probenradius unterschiedliche Zerstäubungsausbeuten gemessen werden<sup>2,3</sup>. Unter Ausnutzung dieses Effektes lassen sich Angaben darüber machen, in welchem Maße die Wechselwirkungsprozesse niederenergetischer Beschußteilchen mit Festkörperoberflächen vom Auftreffwinkel abhängig sind.

### I. Variation des Auftreffwinkels beim Beschuß zylindrischer Proben

In einem quasineutralen Gasentladungsplasma bildet sich um eine nicht auf Plasmapotential befindliche Probe eine Raumladungsschicht aus, die das

Sonderdruckanforderungen an Dr. H. OECHSNER, Physikalisches Institut der Universität Würzburg, D-8700 Würzburg, Röntgenring 8.

<sup>1</sup> Vgl. z. B. M. KAMINSKY, Atomic and Ionic Impact Phenomena on Metal Surfaces, Springer-Verlag, Berlin 1965;

G. CARTER u. J. S. COLLIGON, Ion Bombardment of Solids, Heinemann Educational Books Ltd., London 1968.

<sup>2</sup> H. FETZ, Ann. Phys. **41**, 590 [1942].

<sup>3</sup> H. OECHSNER, Z. Naturforsch. **21 a**, 859 [1966].