

which is not far from the original assessment, and the result  $Q^* \cong Q_D$  still applies.

Thus on a simple atomic model, which does not take into account the possible role of the heat carriers (about whose influence on thermotransport very little is known), a relaxed vacancy mechanism appears well compatible with the present results in Li.

This project has been supported by Statens Naturvetenskapliga Forskningsråd and by Statens Råd för Atomforskning. We are indebted to Prof. H. B. HUNTINGTON for helpful suggestions. Fil. mag. B. MALMBRATT and Miss CH. KÄRRQUIST have skilfully assisted us at several stages of the work.

## Elektrischer Widerstand von zonengeschmolzenem Kupfer bei 4,2 °K

F. PAWLEK und D. ROGALLA

Institut für Metallhüttenkunde der Techn. Universität Berlin  
(Z. Naturforsch. 21 a, 859 [1966]; eingegangen am 13. Mai 1966)

Für doppelt elektrolysiertes Kupfer, das unter schwach sauerstoffhaltiger Argonatmosphäre in einem Schiffchen aus spektralreinem Graphit zonengeschmolzen, danach zu Drähten gezogen, drei Tage bei 900 °C unter  $8 \cdot 10^{-4}$  torr Sauerstoff geglüht und mit 50 °/h abgekühlt wurde, konnten folgende Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes bei 4,2 °K mit einem Fehler von  $\pm 5\%$  gemessen werden:

Probendurchmesser:	2 mm	1 mm	0,5 mm
$\varrho_{4,2}$ in $10^{-10} \Omega \text{ cm}$ :	1,11	1,67	2,66
$\varrho_{273}/\varrho_{4,2}$ <sup>a</sup> :	13 900	9 220	5 790

<sup>a</sup> mit  $\varrho_{273} = 15\ 400\ 10^{-10} \Omega \text{ cm}$  berechnet.

Die Zunahme des elektrischen Widerstandes mit abfallendem Proben-Durchmesser legt den Schluß nahe,

dass die mittlere freie Weglänge der Elektronen in den untersuchten Proben infolge der geringen Konzentration an physikalischen und chemischen Gitterdefekten (Verunreinigungsgehalt  $< 6 \text{ ppm}$ ) in der Größenordnung des Probendurchmessers liegt.

Die für polykristallines Kupfer, verglichen mit den bisher bekannten Resultaten anderer Untersuchungen <sup>1-4</sup>, niedrigen  $\varrho_{4,2}$ -Werte konnten nur nach Glühen unter geringem Sauerstoffdruck erzielt werden. Nach Glühen in einem Hochvakuum von  $< 10^{-5}$  torr bei sonst gleichen Bedingungen wurden Werte, die drei bis dreißigmal größer waren, gemessen. Dieser Effekt stimmt mit den Beobachtungen anderer Autoren <sup>2, 3, 5-8</sup> und eigenen früheren Ergebnissen <sup>9</sup> überein.

Unser besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. WEVER und Herrn Dr. G. DRESSLER vom Institut für Metallphysik der Technischen Universität Berlin für die Bereitstellung der zur Durchführung der Tieftemperaturuntersuchungen notwendigen Apparaturen und Meßgeräte. Herr Dr. G. KLIPPING vom Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft stellte uns dankenswerterweise flüssiges Helium zur Verfügung.

<sup>1</sup> J. E. KUNZLER u. J. H. WERNICK, Trans. AIME **212**, 856 [1958].

<sup>2</sup> S. T. SEKULA, Phys. Rev. Letters **3**, 416 [1959].

<sup>3</sup> E. M. PORBANSKY, Trans. AIME **230**, 925 [1964].

<sup>4</sup> F. PAWLEK u. D. ROGALLA, Cryogenics **6**, 14 [1966].

<sup>5</sup> J. K. REDMAN, R. K. COLTMAN, T. H. BLEWITT u. C. F. KLA-BUNDE, Bull. Am. Phys. Soc. **4**, 150 [1959].

Zum Einfluß des Beschußwinkels bei der Festkörperzerstäubung im niederenergetischen Bereich

H. OECHSNER

Physikalisches Institut der Universität Würzburg  
(Z. Naturforsch. 21 a, 859—861 [1966]; eingegangen am 18. Mai 1966)

Im Rahmen der Untersuchungen über Strahlungsschäden in festen Stoffen ist der Zerstäubungsprozeß an Festkörpern beim Beschuß mit Atomen oder Ionen wieder in stärkerem Maße Gegenstand experimenteller und theoretischer Arbeiten geworden. Während für den Fall des senkrechten Auftreffens der Beschußteilchen auf die Targetoberfläche zahlreiche Meßergebnisse vor-

liegen <sup>1</sup>, ist der Zerstäubungseffekt bei schrägem Teilcheneinfall bisher nur in geringem Umfang untersucht worden. So liegen im Bereich von Beschußenergien unterhalb 1 keV lediglich Untersuchungen von WEHNER <sup>2, 3</sup> über die Zerstäubung von Metallkugelchen in einem parallelen Ionenstrahl vor, bei denen aus der über die Kugeloberfläche unterschiedlich verteilten Materialabtragung die Zerstäubungsrate als Funktion des vom Ort auf der Kugel abhängenden Auftreffwinkels der Ionen ermittelt wurde.

### I. Meßmethode

Eine einfache Methode, die es gestattet, qualitative Aussagen über den Einfluß des Einfallwinkels der Beschußteilchen zu gewinnen, wurde zuerst von FETZ <sup>4</sup> im Zusammenhang mit Zerstäubungsmessungen an dünnen

<sup>1</sup> R. BEHRISCH, Ergebni. exakt. Naturwiss. **35**, 295 [1964].

<sup>2</sup> G. WEHNER, J. Appl. Phys. **30**, 1762 [1959].

<sup>3</sup> G. WEHNER, Gen. Mills Res. Dept., Ann. Rep. 1960, Nr. 2136, 35—44.

<sup>4</sup> H. FETZ, Z. Phys. **119**, 590 [1942].



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.

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.

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.

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.

nen Drähten nach der sogenannten Sondenmethode vorgeschlagen: Erteilt man einer nach Art einer LANGMUIR-Sonde in ein Gasentladungsplasma eintauchenden Beschußprobe ein negatives Potential gegen das Plasma, so bildet sich um die Probe eine Raumladungsschicht aus, in der die ganze Spannung zwischen Beschußprobe und Plasma abfällt. Im Falle einer zylinderförmigen Probe greift das beschleunigende elektrische Feld in der zylindrischen LANGMUIR-Schicht an den aus dem Plasma in die Schicht eintretenden Ionen wie eine Zentralkraft an. Daraus ergibt sich, daß die Tangentialkomponente  $v_p^t$  der Ionengeschwindigkeit beim Auftreffen auf die Probe nach der Beziehung

$$v_p^t = (r_L/r_P) \cdot v_L^t$$

( $r_L$  Radius der Raumladungsschicht,  $r_P$  Probenradius) beträchtlich größer sein kann als die tangentiale Geschwindigkeit  $v_L^t$  der Ionen beim Eintritt in die Raumladungsschicht. Der mittlere Einfallsinkel der Ionen, gemessen gegen die Normale zur Targetoberfläche, wird also um so größer, je größer das Radienverhältnis  $r_L/r_P$  wird, d. h. je niedriger die Plasmadichte und je höher die Beschußspannung gewählt werden und je kleiner der Durchmesser der drahtförmigen Zerstäubungsprobe ist.

Für Zerstäubungsmessungen nach der Sondenmethode weist die elektrodenlose HF-Niederdruckentladung wegen ihres hohen Reinheitsgrades gegenüber dem Gleichstromplasma erhebliche Vorteile auf. Bei den nachstehend beschriebenen Untersuchungen wurde daher eine durch induktive Ankopplung erzeugte HF-Ringentladung benutzt, die es überdies bei Überlagerung eines statischen Quermagnetfeldes geeigneter Größe gestattet, bei Gasdrücken von einigen  $10^{-4}$  Torr die Trägerdichte in weiten Grenzen zu variieren. Als Bezugselektrode zum Anlegen der Beschleunigungsspannung zwischen Plasma und Target diente eine flächenveränderliche Sonde, die unmittelbar auf Plasmapotential gebracht werden konnte<sup>5</sup>.

Die Bestimmung der Zerstäubungsrate, d. h. der Zahl  $N$  der pro Beschußteilchen das Target verlassenden Festkörperatome, erfolgte aus dem Gewichtsverlust der Proben, der unmittelbar nach dem Beschuß im Vakuum mit einer elektrischen Mikrowaage (Meßgenauigkeit  $3 \cdot 10^{-6}$  g) ermittelt wurde. Die Zerstäubungsproben lagen für den Fall des senkrechten Auf treffens der Beschußteilchen in Gestalt dünner Blechscheiben vor, für Messungen bei Radienverhältnissen  $r_L/r_P > 1$  in Form von Hohlzylindern bzw. Drähten verschiedenen Durchmessers.

## II. Ergebnisse

Mit Hilfe der beschriebenen Meßmethode wurde in Argon-, zum Teil auch in Xenon-Niederdruckplasmen bei Beschußenergien zwischen 150 und 600 eV der Einfluß des schrägen Auf treffens der Beschußteilchen auf den Zerstäubungsprozeß an einer Reihe von Metallen untersucht.

<sup>5</sup> H. FETZ u. H. OECHSNER, Z. Angew. Phys. 12, 250 [1960].

Als typische Beispiele für die Art der entstehenden Meßkurven sind in Abb. 1 die Zerstäubungsraten  $N$  von Molybdän beim Beschuß mit  $A^+$ -Ionen von 150 und 300 eV in Abhängigkeit vom Radienverhältnis  $r_L/r_P$  aufgetragen. Jeder Meßpunkt ist das Mittel aus mehreren Einzelmessungen, deren Abweichungen voneinander

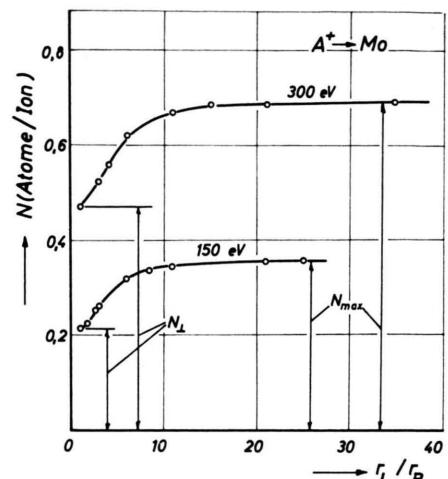


Abb. 1. Zerstäubungsrate  $N$  von Mo beim Beschuß mit  $A^+$ -Ionen von 150 und 300 eV in Abhängigkeit vom Radienverhältnis  $r_L/r_P$ .

bei  $\pm 5\%$  lagen. Vom Wert  $N_\perp$  beim Radienverhältnis 1 für den Fall des senkrechten Auf treffens der Beschußteilchen beginnend, steigt die Zerstäubungsrate mit wachsendem  $r_L/r_P$  zunächst rasch an und erreicht bald einen Maximalwert  $N_{\max}$ . Von der Meßmethode her ist auch bei sehr großen Radienverhältnissen noch ein schwacher Anstieg von  $N$  zu erwarten, da auch dort stets ein geringer, mit wachsendem  $r_L/r_P$  noch weiter abnehmender Anteil von Beschußteilchen vorhanden ist, deren Einfallsrichtungen der Normalen auf die Probenoberfläche benachbart sind. Wie die Meßkurven zeigen, ist jedoch die noch verbleibende Anhebung der Zerstäubungsrate vernachlässigbar und daher ohne merklichen Einfluß auf die Bestimmung von  $N_{\max}$ .

Für die Gestalt der Meßkurven ist es bedeutungslos, ob große  $r_L/r_P$ -Werte durch Benutzung sehr dünner Drähte als Zerstäubungsproben oder durch Einstellen großer LANGMUIR-Schichtdicken erreicht wurden. Da sich bei wechselweiser Benutzung von Drähten verschiedenen Durchmessers sowie dünner Blehzylinder keine systematischen Unterschiede in den Meßwerten ergaben, scheint die Oberflächenstruktur der Beschußproben bei den vorliegenden Messungen nur von geringem Einfluß zu sein.

Als Maß für den Auf treffwinkel effekt bei der Zerstäubung eines bestimmten Materials läßt sich anhand der Meßkurven das Verhältnis zwischen der maximalen Zerstäubungsrate  $N_{\max}$  bei großen mittleren Einfallswinkeln und dem Wert  $N_\perp$  für senkrechten Teilchen-einfall definieren. In Tab. I sind für den Beschuß mit  $A^+$ -Ionen von 300 eV das Verhältnis  $N_{\max}/N_\perp$  sowie

die Zerstäubungsrate  $N_{\perp}$  für eine Anzahl von Targetmaterialien eingetragen. Für Ti, Mo und Au können die Werte  $N_{\max}/N_{\perp}$  mit entsprechenden Meßergebnissen von WEHNER<sup>3</sup> bei einer Beschußenergie von 400 eV verglichen werden. Dabei ergibt sich trotz der Verschiedenheit der Meßmethoden Übereinstimmung innerhalb der Fehlergrenzen.

Target	Ti	Al	Ni	Mo	Pt	Au
$N_{\max}/N_{\perp}$	1,76	1,67	1,52	1,49	1,26	1,0
$N_{\perp}$ (Atome/Ion)	0,33	0,65	0,75	0,47	0,78	1,25

Tab. 1. Zum Auftreffwinkeleffekt für verschiedene Targetmaterialien beim Beschuß mit A<sup>+</sup>-Ionen von 300 eV.

Die in der Tab. 1 zusammengestellten Ergebnisse bestätigen die Vermutung, daß bei schwächer zerstäubenden Elementen im allgemeinen eine kräftigere Anhebung der Zerstäubungsrate beim Übergang vom senkrechten zum schrägen Einfall der Beschußteilchen zu verzeichnen ist als bei Elementen mit hohen Zerstäubungsraten, die nur einen geringen Auftreffwinkel-Effekt zeigen.

Aussagen über die Abhängigkeit des Auftreffwinkel-Effektes von den beiden anderen neben den Targeteigenschaften wesentlichen Parametern beim Zerstäubungsprozeß, nämlich der Beschußenergie und der Art der Beschußteilchen, lassen sich anhand von Abb. 2 machen. Dort ist für das Targetmaterial Molybdän beim Beschuß mit verschiedenen Ionenarten das Verhältnis  $N_{\max}/N_{\perp}$  über der Beschußenergie aufgetragen. Die miteingezeichneten Werte für Hg<sup>+</sup>-Ionen sind Arbeiten von FETZ<sup>4</sup> und SCHIEFER<sup>6</sup> über die Zerstäubung von Mo in Hg-Gleichstromentladungen entnommen. Aus den Kurven geht hervor, daß bei Beschußenergien von einigen hundert eV keine merkliche Abhängigkeit des Auftreffwinkel-Effektes von der Energie der einfallenden Teilchen besteht. Mit abnehmender Beschußenergie ist jedoch ein deutliches Anwachsen des Auftreffwinkel-Effektes zu verzeichnen, wobei diese Zunahme bei den schwereren Beschußteilchen bereits bei einer höheren Energie einsetzt als bei den leichteren.

<sup>6</sup> K. SCHIEFER, Diplomarbeit, Würzburg 1953.

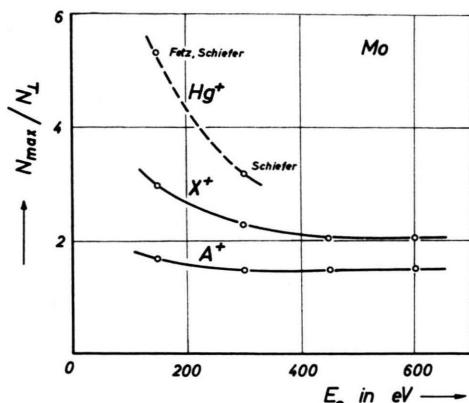


Abb. 2. Zur Abhängigkeit des Auftreffwinkel-Effektes von der Beschußenergie  $E_0$  und der Art der Beschußteilchen für das Targetmaterial Molybdän.

Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit der Vorstellung, daß die Festkörperzerstäubung im niedriger energetischen Bereich auf stoßmechanischen Wechselwirkungen zwischen den einfallenden Beschußteilchen und Targetatomen beruht. Die von der Targetoberfläche weg in den Außenraum gerichtete Impulskomponente, die einem Festkörperatom bei der Wechselwirkung mit einem Beschußteilchen übertragen wird, nimmt mit größer werdendem Einfallsinkel zu. Dies wird sich besonders im Bereich kleiner Beschußenergien bemerkbar machen, wo vor allem die primäre Wechselwirkung zwischen dem Beschußteilchen und einem Targetatom für die Zerstäubung verantwortlich ist.

Weiterhin zeigen die in Abb. 2 dargestellten Meßergebnisse, daß beim Übergang von leichteren zu schwereren Beschußteilchen, d. h. bei einer Vergrößerung des Massenverhältnisses zwischen Beschußteilchen und Targetatomen, der Einfluß des Auftreffwinkels auf die Zerstäubungsrate deutlich zunimmt.

Dem em. Vorstand des Physikalischen Instituts der Universität Würzburg, Herrn Professor Dr. H. KULENKAMPFF, danke ich für sein förderndes Interesse, Herrn Professor Dr. H. FETZ für wertvolle Anregungen und Hinweise.