



Otto Fiedler

Forschungstransfer: Hochwertige Laserspiegel durch Ionenstrahlerstäubung

(Vortrag in der Sitzung der technikwissenschaftlichen Klasse am 15. Juli 1994)

In: Berichte und Abhandlungen / Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (vormals Preußische Akademie der Wissenschaften) ; 1.1995, S. 55-66

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:kobv:b4-opus-28475](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:b4-opus-28475)

Die vorliegende Datei wird Ihnen von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften unter einer Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Germany (cc by-nc-sa 3.0) Licence zur Verfügung gestellt.



Otto Fiedler

Forschungstransfer: Hochwertige Laserspiegel durch Ionenstrahlzerstäubung

(Vortrag in der Sitzung der technikwissenschaftlichen Klasse am 15. Juli 1994)

Die Aktualität des Themas Innovationsförderung durch Forschungstransfer (Teilprojekt der Arbeitsgruppe „Optionen zukünftiger industrieller Produktionssysteme“ der BBAW) ist der Anlaß für mich, ein Beispiel des Transfers von Ergebnissen der Grundlagenforschung aus einem Hochschul-Forschungsfeld in die industrielle Anwendung vorzustellen. Es handelt sich um die Entwicklung der Technik der Ionenstrahlzerstäubung und ihre Anwendung zur Herstellung optischer Schichten für Lasermeßsysteme.

Die Entwicklungsarbeiten zur Strahlzerstäubung profitierten von den eigenen Erfahrungen im Bau von Ionenquellen und in der Formierung von Ionenstrahlen zur Erzeugung von Fusionsreaktionen und Messung von Wirkungsquerschnitten der Reaktionen $\text{Li}^6(p, \alpha)\text{He}^3$ und $\text{Li}^7(p, \alpha)\text{He}^4$ bei kleinsten Protonenenergien.

Aus der Ionen-Einstrahltechnik (single aperture source) entwickelte sich die Ionen-Vielstrahltechnik mit vielen Emissionsöffnungen in einem Extraktionssystem (multi aperture source). Damit konnten der Strahlstrom und die Produktivität des Verfahrens erhöht werden, so daß ein wesentlicher Nachteil gegenüber den hochproduktiven Dioden- und Trioden-Plasmazerstäubungsverfahren entfiel. Die Verringerung der Ionenenergie auf 1 keV brachte einen weiteren Vorteil, nämlich eine Verbesserung der Homogenität der aufgestäubten Schichten, was besonders das Interesse der Hersteller optischer Bauelemente weckte. Antireflexbeschichtungen, Interferenzfilter und Laserspiegel verlangen homogene Schichten mit möglichst wenig Streuzentren.

Als Besonderheit ist die Fertigung von Laserspiegeln mit einer Vielzahl bestimmter dielektrischer Schichten zu nennen, die durch Anwendung der Ionenbreitstrahlzerstäubung hervorragende optische Eigenschaften erhielten und damit den Laserkreisel in der Navigationssystemtechnik einen Innovationsschub brachten.

Über das Verfahren und über die genannte spezielle Anwendung wird nachfolgend berichtet.

Ionenstrahlzerstäubung zur Herstellung dünner Schichten

Verfahren zur Ionenstrahlzerstäubung gehören zur Gruppe der „kalten“ Vakuumbeschichtungsverfahren. Gegenüber der Verdampfung im Vakuum zeichnen sie sich durch folgende Vorteile aus:

- universell anwendbar zur Herstellung von Metall-Halbleiter- und Isolatorschichten,
- höhere Haftfestigkeit auf dem Substrat,
- Erhaltung der Stöchiometrie bei Legierungen und Verbindungen.

Die Verfahren der Ionenzerstäubung teilt man in zwei Gruppen ein, in Plasmazerstäubungen und in Ionenstrahlzerstäubungen.

Im ersten Fall wird in verdünnter Edelgasatmosphäre eine Entladung gezündet und die Ionen aus dem Plasma von einem Target extrahiert, was dabei zerstäubt wird. Im zweiten Fall werden die Ionen in einer Ionenquelle erzeugt, beschleunigt und als Ionenstrahl auf das im Hochvakuum befindliche Target geschossen.

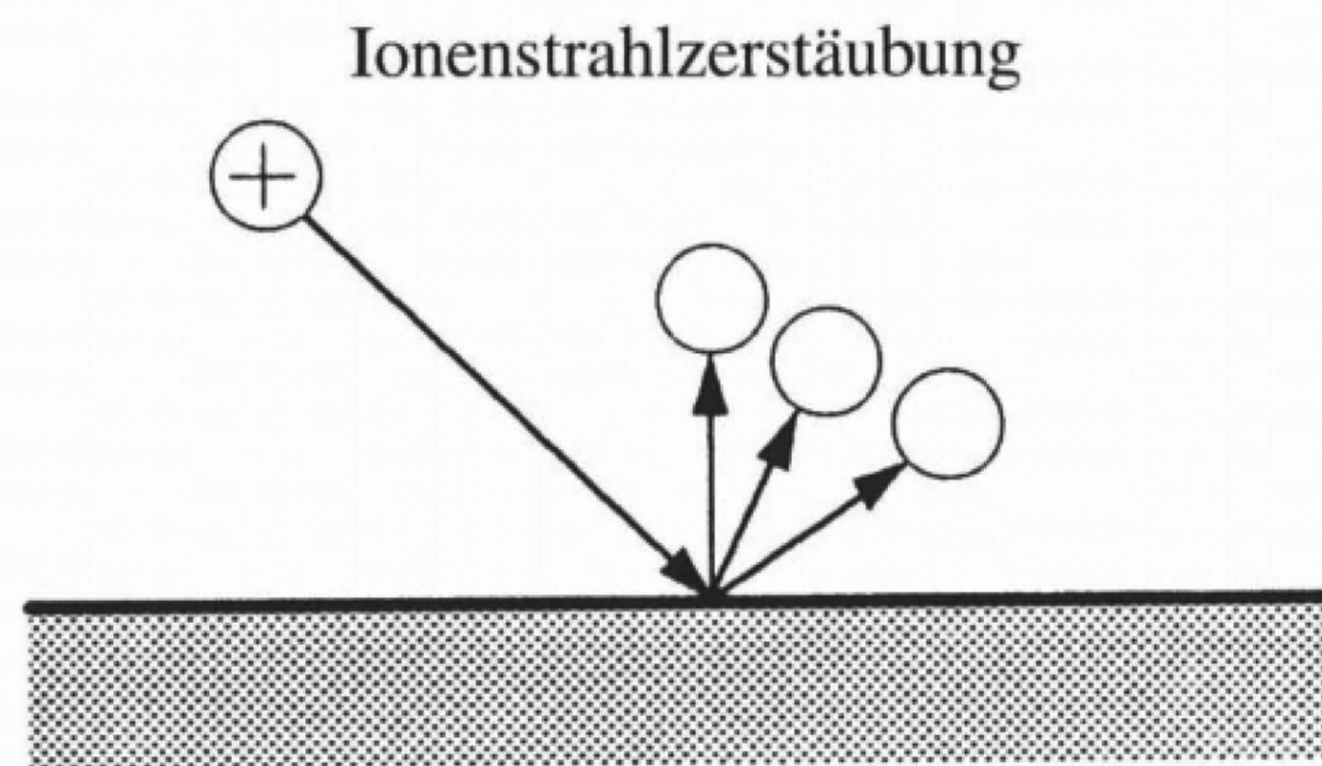


Abb. 1

Herstellung dünner Metall-Halbleiter-Isolator-Schichten durch Ionenstrahlzerstäubung
 Strukturätzung durch Ionenstrahlzerstäubung
 Hochtechnologie zur Herstellung optischer Schichtsysteme

Ein charakteristischer Unterschied beider Arten besteht in den Wachstumsbedingungen der aufgestäubten Schichten. Bei Plasmazerstäubungen wachsen die Schichten

- bei höherem Druck
- unter Elektronenbeschuß (am Target ausgelöste γ -Elektronen)
- unter UV-Bestrahlung auf.

Bei Ionenstrahlzerstäubungen entfallen diese Einflüsse, so daß Strukturunterschiede gegenüber plasmagestäubten Schichten typisch werden. Im Falle optischer Schichten zeichnen sich ionenstrahlgestäubte Schichten durch hohe Homogenität und geringe Defektdichte aus. Zu ihrer Herstellung werden heute Breitstrahlquel-

len eingesetzt, wie sie bereits in den 60er Jahren von uns zur Herstellung dünner Schichten für elektronische Bauelemente und von H. R. Kaufmann für Antrieb im Weltraum entwickelt wurden. Besonderheiten dieser Quellen sind siebförmige Absaugelektroden mit einer Vielzahl von Emissionsöffnungen (multi aperture systems) und hohen Ionenströmen. Elektroden mit einigen hundert Lochpaaren liefern Strahlströme von Argonionen bis zu 500 mA bei Strahlspannungen von 1 kV.

Zur Kompensation der Raumladung im Strahl werden Elektronen aus äußeren Quellen oder auch aus der gleichen Quelle durch periodisches Umschalten der Extraktionselektrode eingestrahlt. Berechnungen zur Feldverteilung im Raum zwischen Quelle und Target weisen darauf hin, daß die im Strahl eingefangenen Elektronen, wozu auch die β -Elektronen (Elektronen aus Restgasstoßprozessen) gehören, wesentlich an der Kompensation beteiligt sein können.

Die Zerstäubung des Targets erfolgt in einem Energiebereich, der weit ab von der Energie der maximalen Zerstäubungsrate liegt. Man verschenkt zwar Zerstäubungsleistung, gewinnt jedoch eine bessere Homogenität der aufwachsenden Schichten. Letztere ist unter anderem der Tatsache zu verdanken, daß bei den niedrigeren Ionenenergien die Anzahl und Größe von abgestäubten Clustern (größere Atomkomplexe) geringer ist und auf dem Substrat weniger Störzentren entstehen.

Abb. 2 zeigt ein Ionenstrahl-Zerstäubungssystem im geöffneten Rezipienten mit einer Breitstrahl-Ionenquelle als kompakte anflanschbare Einheit und einem Wechseltarget mit zwei Targetplatten, die wahlweise in den Ionenstrahl geschoben werden können.

In Abb. 3 ist schematisch das Funktionsprinzip der Vorrichtung mit einem Wechseltarget z. B. aus TiO_2 und SiO_2 dargestellt.

Mit dieser Apparatur wurden von uns bereits 1968 Mehrschichtsysteme Metall- SiO_2 -Metall und SiO_2 - Si_3N_4 für elektronische Bauelemente als Gate-Isolierschichten sowie als Passivierungsschichten hergestellt.

Abb. 4 zeigt das Extraktionssystem einer vergrößerten Ionenquelle mit vier Absaugsieben, deren Ionenemissionen getrennt steuerbar sind. Mit dieser Quelle kann man vorteilhaft Ionenstrahl-Cosputtering betreiben und verschiedene Materialien gesteuert kombinieren.

Im Handbook of Thin Film Technology (von Maissel, L. I. und Glang, R. 1970 herausgegeben) wurden diese Arbeiten von G. Wehner und G. Anderson als neue Wege zur Herstellung beliebiger Schichtsysteme gekennzeichnet.

Als universell einsetzbares Verfahren wurde die Ionenzerstäubung bereits 1970 zur Entwicklung von Mehrschichtinterferenzfiltern mit neuen dielektrischen Materialien sowie für Antireflexbeschichtungen mit hitzebeständigen Metallverbindungen wie Titanoxid, Zirkonoxid und Aluminiumoxid empfohlen.

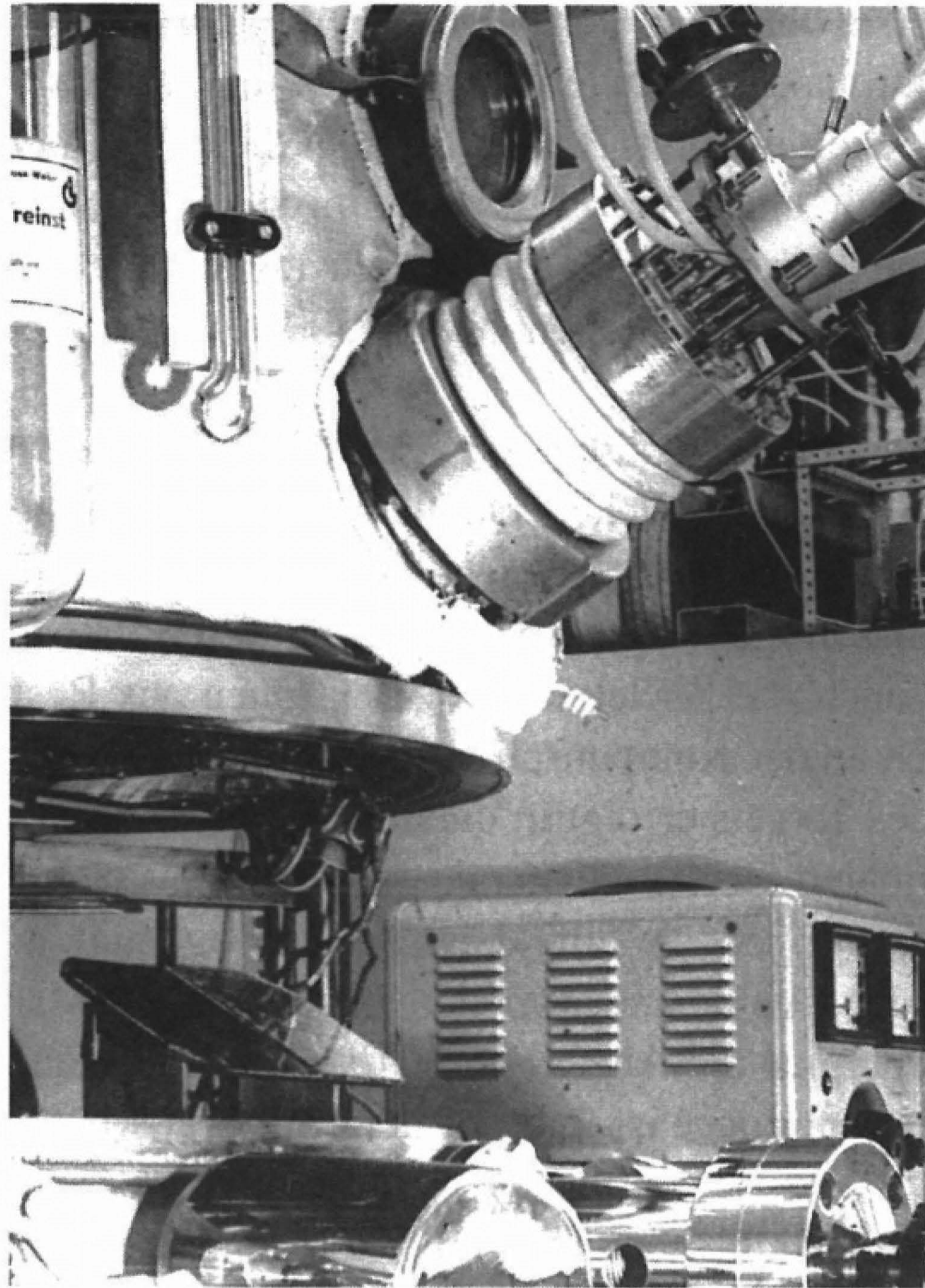


Abb. 2

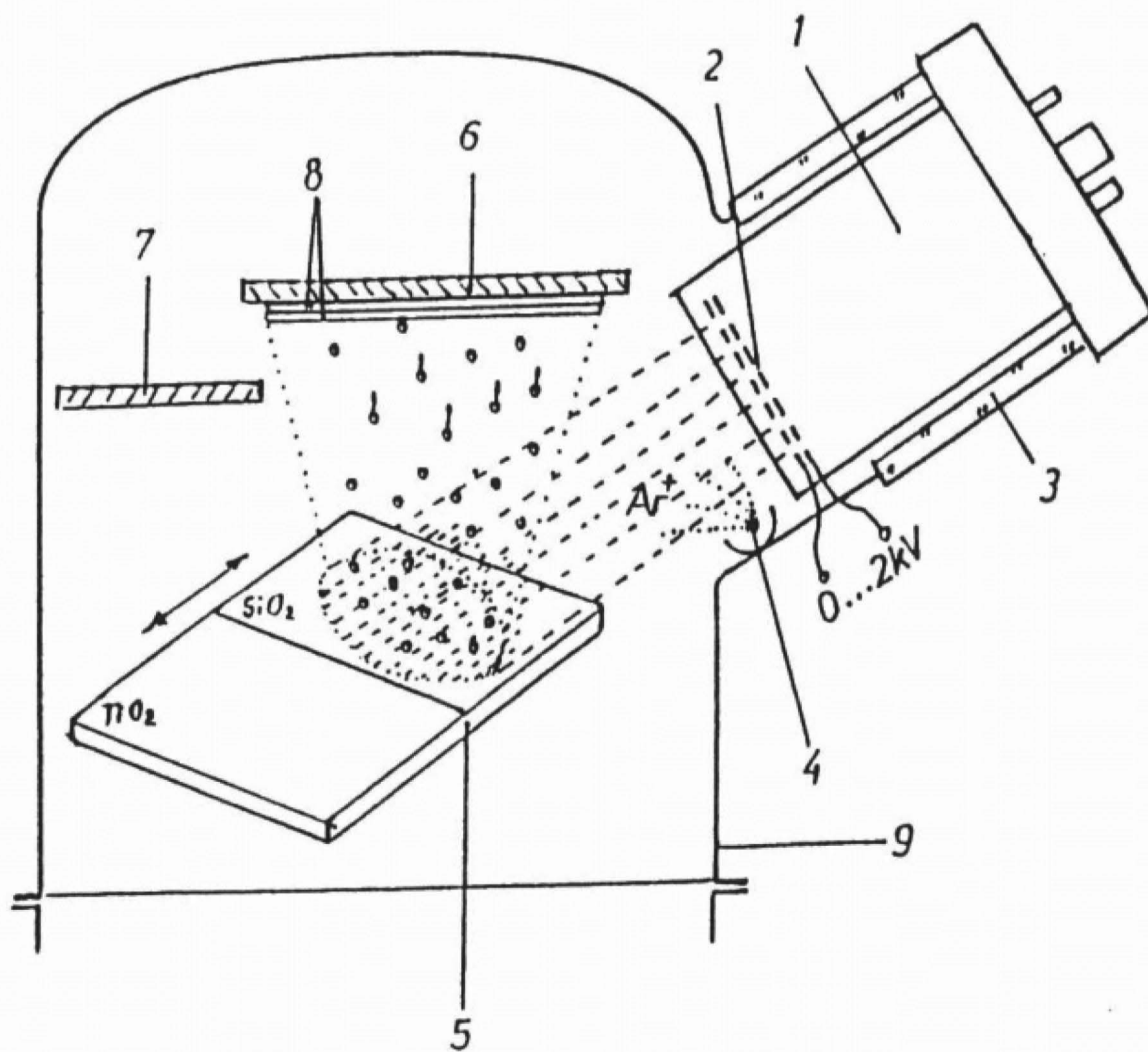


Abb. 3
 Schematische Anordnung
 des Ionenstrahlensystems
 1 Ionenquelle, 2 siebför-
 mige Ionenextraktionselek-
 troden, 3 Isolator, 4 Elek-
 tronquelle, 5 Wechseltar-
 get, 6 Substrat, 7 Blende,
 8 aufwachsende Schichten
 TiO_2 , SiO_2

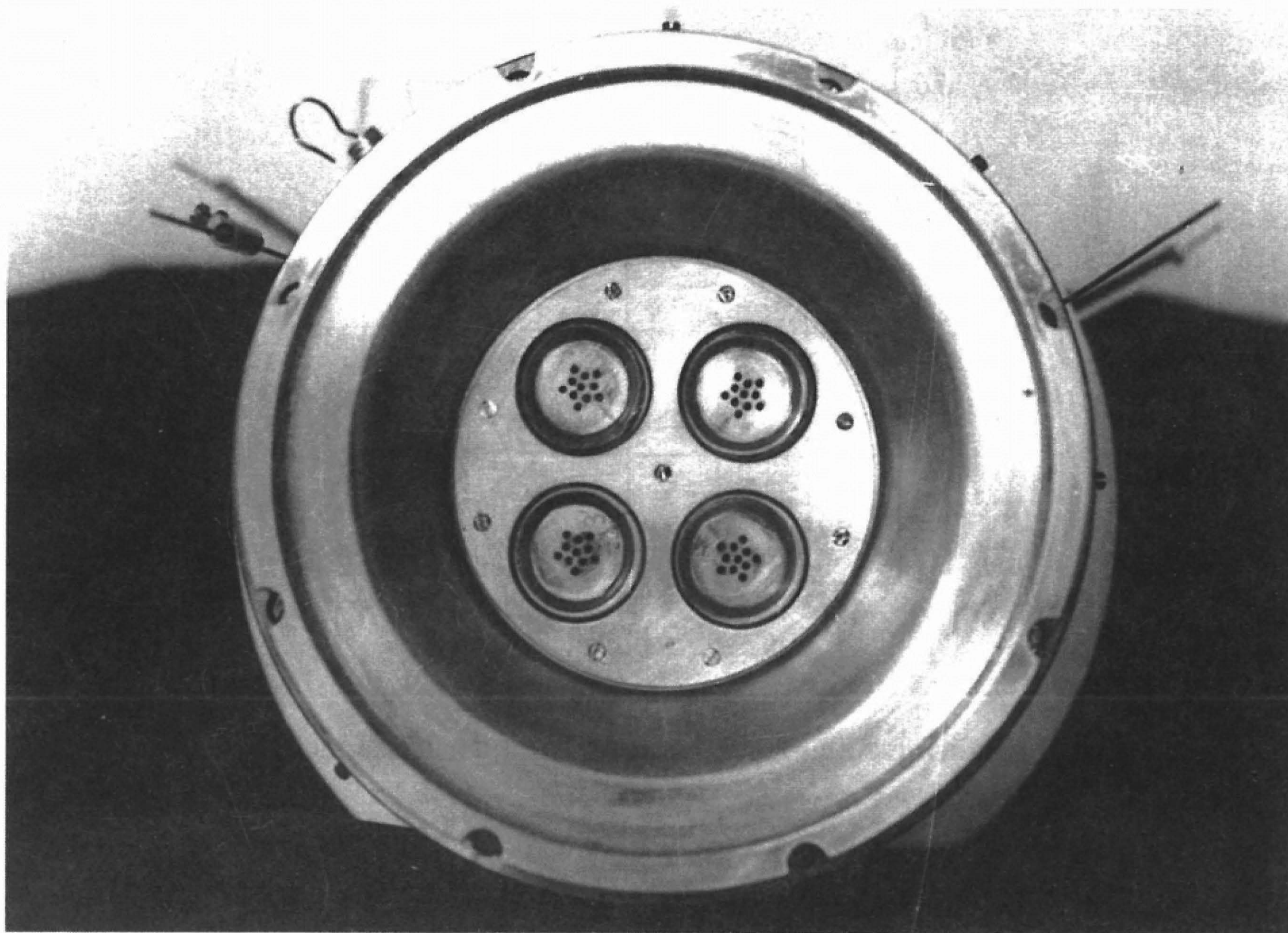


Abb. 4

Die genannten Materialien sind mit thermischen Verfahren nur schwer auftragbar. Sie dissoziieren teilweise, wobei optische Absorption und Streuung zunehmen. Mit Hilfe der niederenergetischen Ionenbreitstrahl-Zerstäubung lassen sich derartige Störungen weitgehend unterdrücken, völlig auszuschließen sind sie jedoch nicht.

Nicht nur die Dissoziation, sondern auch der Eintrag von Fremdatomen und -molekülen in die aufwachsende Schicht kann zur Bildung optischer Inhomogenitäten führen. Als Fremdstoffe kommen z. B. Materialien der Ionenquelle in Betracht, denn Verschmutzungen der Edelgasentladung durch Quellenmaterial sind unvermeidlich. Sie gelangen mit dem Ionenstrahl auf das Target und von dort in die aufwachsenden Schichten. Die Hauptursache für die Verschmutzung ist der Zerstäubungsprozeß in der Quelle selbst. Er findet statt, wenn die Schwellspannung für Zerstäubung überschritten wird. Für Argonentladungen beträgt sie etwa 20 Volt. Ionenquellen arbeiten in der Regel mit höheren Entladungsspannungen. Um den Grad der Verschmutzung abschätzen zu können, wurde von uns die Heizkatode in einer Breitstrahlquelle (Kaufmann-Fiedler-Typ) radioaktiv markiert und die Übertragung von Katodenmaterial in die aufwachsende Schicht gemessen.

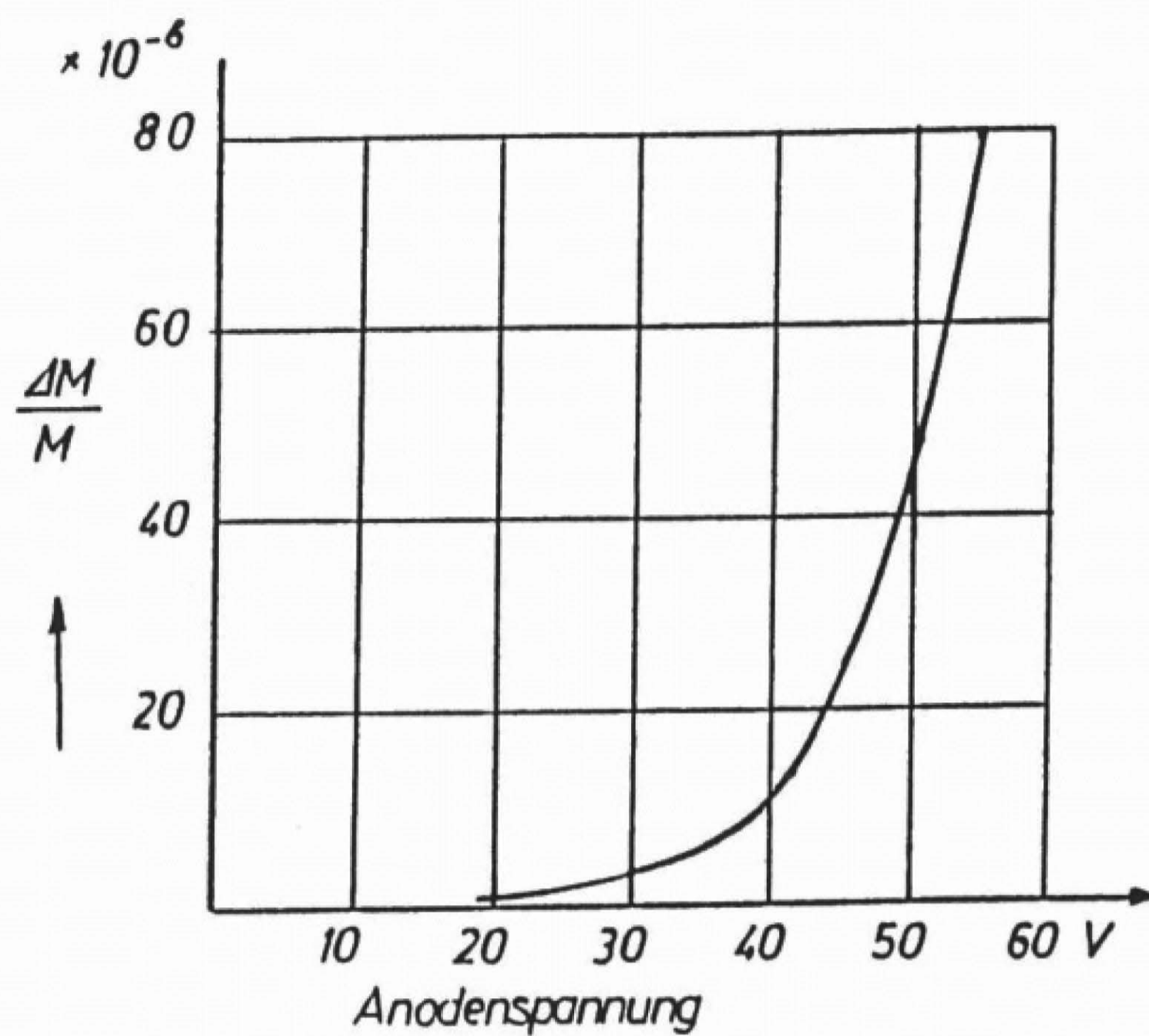


Abb. 5

Schichtverschmutzung durch Material der Ionenquelle

Abb. 5 zeigt die gemessene Abhängigkeit der Verschmutzung auf dem Substrat von der Entladungsspannung in der Ionenquelle bei Argonbetrieb. Bei 30 Volt beträgt die Verschmutzung 2 ppm, sie vergrößert sich um den Faktor 25, wenn die Spannung auf 50 Volt erhöht wird.

Die Ergebnisse der Markierungsexperimente zeigen, daß

- die Verschmutzung aufgestäubter Schichten durch Quellenmaterial, die im ppm-Bereich liegt, sehr stark von den Betriebsparametern der Quelle abhängt,
- die optischen Eigenschaften aufgestäubter Metalloxide dieser Abhängigkeit nicht folgen. Die Fremdatome oxidieren in reaktiver Restgasatmosphäre und lagern sich als Oxide in der amorphen Schicht ein, ohne Streuzentren zu bilden,
- die elektronischen Eigenschaften aufgestäubter Halbleitermaterialien verhalten sich dagegen analog zu den Verschmutzungseinträgen (Schwermetall-dotierung). Die elektronische Reinheit nimmt merklich ab.

Die Nutzungsdauer einer Ionenquelle im Prozeß der Fertigung hängt wesentlich von der Lebensdauer der Heizkatode ab. Sie muß nach einer bestimmten Zeit gewechselt werden. Diesen Nachteil vermeiden Ionenquellen, die mit Hochfrequenz-Plasma-Entladungen arbeiten. Die HF-Energie wird induktiv oder kapazitiv eingekoppelt, so daß bei guter Anpassung an die Plasmainpedanz ein hoher Wirkungsgrad der Quellenspeisung und ein stabiler Entladungsbetrieb gewährleistet sind. H. Löb (Univ. Gießen) und J. Engemann (Univ. Wuppertal) haben wesentlichen Anteil an der Entwicklung leistungsfähiger HF-Ionenquellen.

Laserspiegel für Laserkreisel

Ringlaser-Kreisel

Seit etwa 15 Jahren werden mit Erfolg optoelektrische Sensoren zur Messung von inertialen Winkeln und Winkelgeschwindigkeiten eingesetzt. Bekannt sind Ringlaser-Kreisel für Präzisionsmessungen und hochgenaue Führungen in zivilen und militärischen Navigationsanlagen sowie Lichtleitfaser-Kreisel mit geringeren Auflösungen für Low-Cost-Anwendungen. Gegenüber mechanischen Kreiseln entfällt die rotierende Masse. Die Trägheitslosigkeit, das Fehlen von Verschleißteilen sowie die hohe Präzision haben Ringlaser-Kreisel zu den bevorzugten Führungssystemen von bemannten und unbemannten Flugkörpern gemacht. Darüber hinaus sind sie für die Anwendungen in der Automatisierungstechnik interessant geworden, z. B. als Istwertgeber für Industrieroboter-Steuerungen oder fahrerlose Transportsysteme, zur Messung der Abweichung des Bohrkopfes in Bohrsystemen oder zur Bestimmung von Kurswinkeln beim Vortrieb in Tunnelbausystemen sowie beim Einsatz automatischer Bearbeitungssysteme in der Landwirtschaft.

Beeindruckend sind die Ergebnisse der automatischen Flugkursbefolgung mit Hilfe von Ringlaser-Kreiseln, nämlich Kursabweichung kleiner als 0,1%. Die hohe Präzision ist vor allem den besonderen Eigenschaften der Laserspiegel im Ringlaser zu verdanken, die eine extrem geringe Rückstreuung aufweisen, wenn sie mit der beschriebenen Ionenbreitstrahl-Zerstäubungsmethode hergestellt werden. Der Ringlaser-Kreisel besteht aus einem Ringresonator, der aus mindestens drei Spiegeln mit einer Gasentladungsstrecke (z. B. mit HeNe-Füllung) besteht.

Abb. 6 zeigt einen Ringlaser-Kreisel mit 3 Spiegeln. Sie bilden den Resonatorraum für den HeNe-Laser mit einer Katode und zwei symmetrisch angeordneten Anoden (Fa. Honeywell).

Im Laserbetrieb sind zwei entgegengesetzt umlaufende Laserstrahlen vorhanden. Der obere Spiegel ist für beide Strahlen schwach durchlässig, so daß mit Hilfe eines Umlenkprismas beide Strahlen überlagert werden können. Es entsteht ein Interferenzmuster, das ein Photodetektor abtastet. In Ruhelage des Ringlasers sind die Frequenzen der beiden Strahlen gleich groß, so daß das Interferenzstreifenmuster ortsfest bleibt. Rotiert der Laser-Resonator im Uhrzeigersinn, so verringert sich die Frequenz des in gleicher Richtung laufenden Strahles, während sich die Frequenz des entgegengesetzt laufenden Strahles erhöht. Die Differenzfrequenz ist ein Maß für die Winkelgeschwindigkeit des Dreiecks. Sie wird mit der Impulsrate (Frequenz f) gemessen, mit der sich die Streifen des Interferenzmusters am Photodetektor vorbeibewegen.

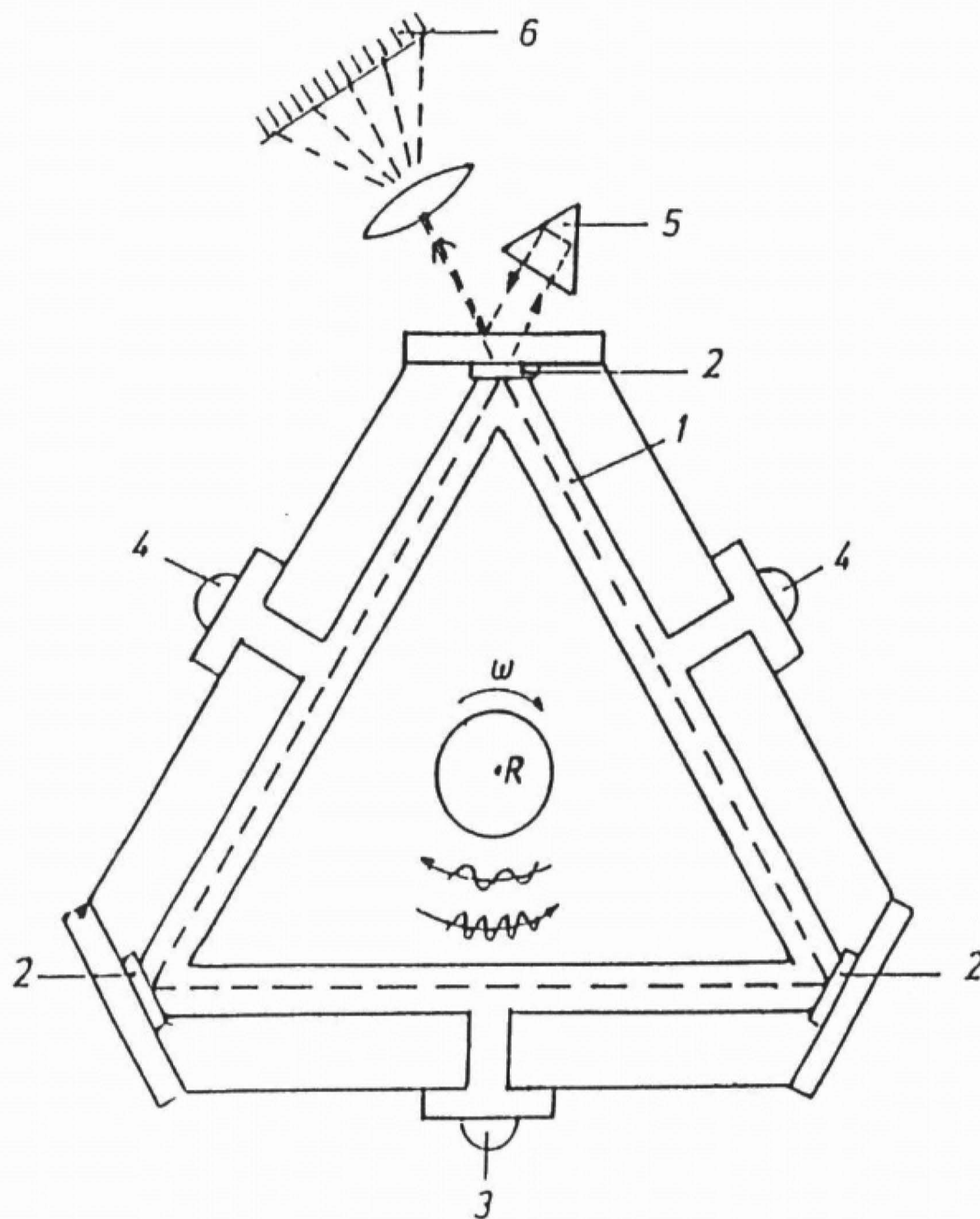


Abb. 6

Ringlaser-Kreisel

1 Laserrohr, 2 Laserspiegel, 3 Katode, 4 Anode, 5 Umlenkprisma, 6 Interferenzmuster,
R Drehachse des Kreisels senkrecht zur Zeichenebene, ω Winkelgeschwindigkeit

$$f = \frac{4F}{L \cdot \lambda} \cdot \omega \quad (1)$$

F Resonatorfläche (Dreieckfläche)

L Resonatorlänge

λ Wellenlänge

ω Winkelgeschwindigkeit (Drehrate)

Die Anzahl der gezählten Impulse ist das Maß für die gesamte Winkeländerung.

Die hohe Empfindlichkeit des Meßsystems zeigt das Beispiel:

Bei $F = 100 \text{ cm}^2$, $L = 45 \text{ cm}$, $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

ergibt sich mit $\omega = 15^\circ/\text{h}$ (Winkelgeschwindigkeit der Erde)

die Impulsrate $f = 10,2 \text{ Hz}$.

Eine Reihe von Problemen mußte gelöst werden, um kleine Winkelgeschwindigkeiten (bis zu $1^\circ/\text{h}$) messen zu können. Dazu gehörte z. B. die Verringerung des

Totbereiches am Nullpunkt der Winkelgeschwindigkeit. Der Laser-Kreisel ist unterhalb einer bestimmten Geschwindigkeit blockiert (Lock-in-Effekt). Die Interferenzstreifen beginnen erst oberhalb der sogenannten Lock-in-Schwelle ω_L der Drehgeschwindigkeit zu folgen und zwar mit

$$f = \frac{4F}{L \cdot \lambda} \sqrt{\omega^2 - \omega_L^2} \quad (2)$$

Abb. 7 zeigt schematisch die Nichtlinearitäten in den Schwellenbereichen $\pm \omega_L$. Mit $\omega \gg \omega_L$ geht Gl. (2) in Gl. (1) über.

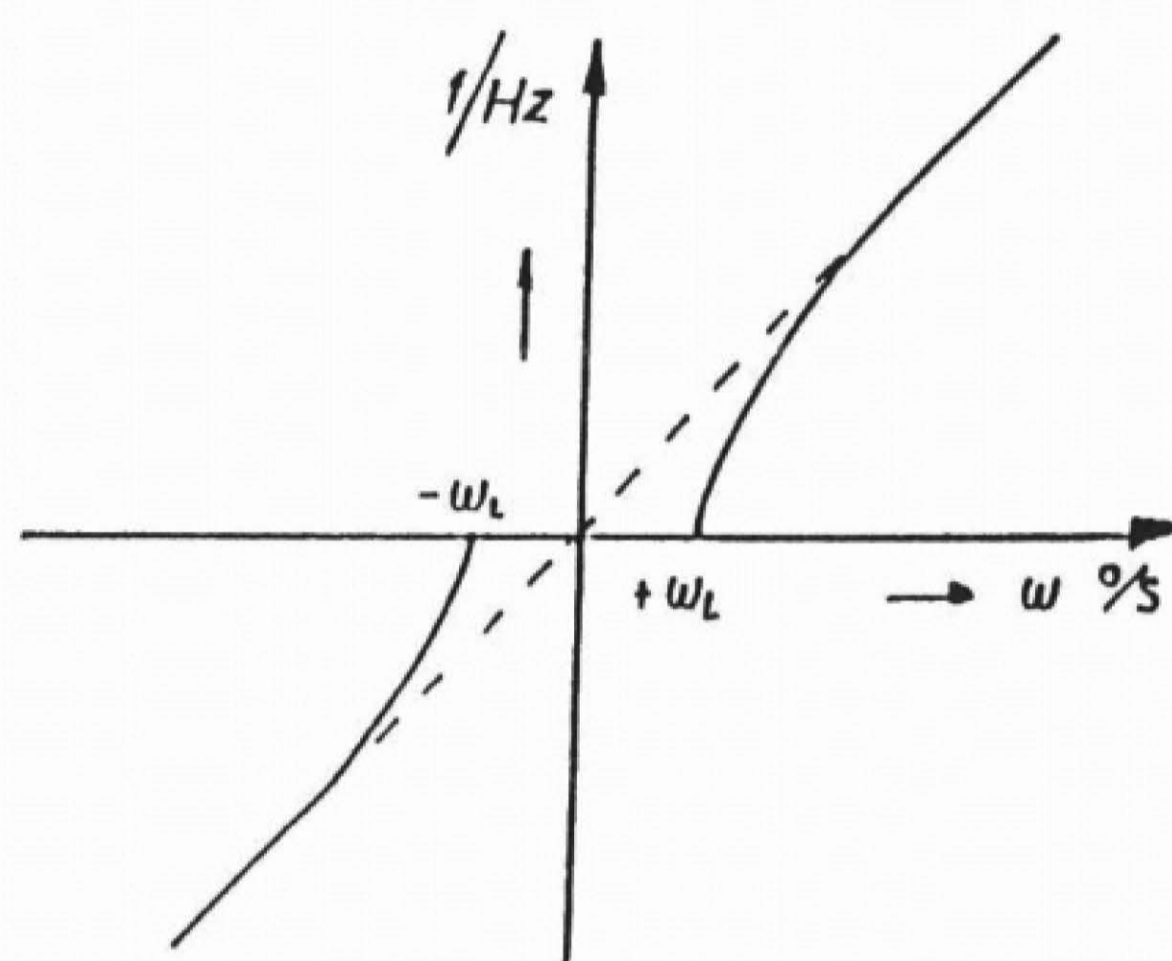


Abb. 7

Impulsrate f in Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit ω des Kreisels, ω_L Lock-in-Schwellwert

Dieser Effekt erklärt sich aus der Kopplung der beiden Oszillatorkreise im Resonatorraum bei kleinen Frequenzunterschieden (Mitzieheffekt gekoppelter Oszillatoren).

Die Kopplung der Oszillatoren wird den Streueffekten an den Spiegeln zugeschrieben. Die Laserspiegel reflektieren nicht nur das Licht, sondern streuen auch geringe Intensitäten an Schichtinhomogenitäten in alle Raumrichtungen und damit auch in die Richtung des gegenläufigen Strahles. Die Überlagerung des gestreuten Strahles mit dem Nutzstrahl führt zur Kopplung der beiden optischen Kreise, was ein gegenseitiges Mitziehen der Oszillatoren zur Folge hat. Der aus der Elektronik bekannte Effekt hat zur Folge, daß unterhalb einer bestimmten Schwelle keine Frequenzdifferenz auftritt und der Laserkreisel bei kleinen Winkelgeschwindigkeiten keine Bewegung des Interferenzmusters anzeigt. So ist man bestrebt, die Kopplung und den Totbereich möglichst klein zu halten. Da sie nie auszuschließen sind, moduliert man die Bewegung mit Drehschwingungen um

die Achse des Ringlasers (Zitterkreisel). Die Modulation führt aus dem Totbereich heraus, sie ist mit bekannter Zähltechnik leicht kompensierbar, so daß heute Drehbewegungen bis zu $\omega = 0,5''/s$ herab meßbar sind.

Laserspiegel

Die Empfindlichkeit des Ringlaser-Kreisels hängt von der Qualität seiner Spiegel ab. Die reflektierenden Schichten sollen im Idealfall keine Streuzentren haben. Praktisch ist das nicht der Fall, so daß immer mit einer gewissen Rückstreuung zu rechnen ist. Sie zu minimieren, ist die Aufgabe der Beschichtungstechnologie.

Bewährt haben sich Spiegel mit Oberflächen aus einer Mehrzahl von $\lambda/4$ -Schichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes, z. B. optische Schichten abwechselnd aus SiO_2 ($n = 1,5$) und TiO_2 ($n = 2,5$). Die Reflexion an der Grenzschicht TiO_2 erfolgt mit einem Phasensprung $\lambda/2$ und an der Grenzschicht SiO_2 mit gleicher Phase (Abb. 8).

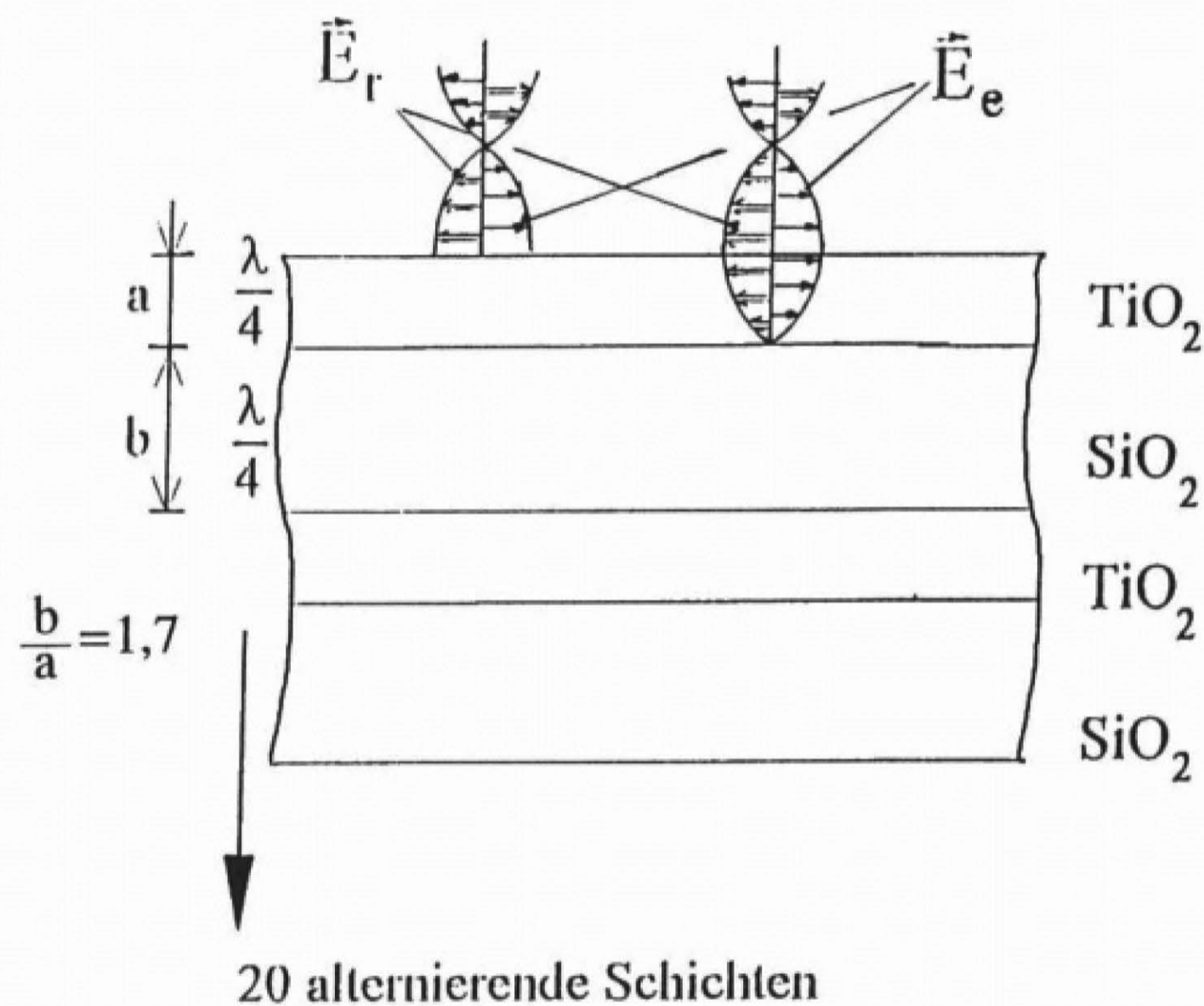


Abb. 8

Dielektrische Laserspiegel

E_e einfallende Feldstärke

E_r reflektierte Feldstärke

λ Wellenlänge des Laserlichts

Nach Durchlaufen der $\lambda/4$ -Schichten überlagern sich die reflektierten Wellen phasenrichtig und erfüllen die Forderung der Phasengleichheit.

Hohe Reflektivität und geringe Rückstreuung der Laserspiegel verlangen hohe Reinheit und Homogenität des Schichtsystems. Die aufgetragenen Schichten sol-

len amorph sein, keine Schichtdefekte aufweisen, sehr gut haften und die Stöchiometrie erhalten. Diese Forderungen werden am besten von der Ionenbreitstrahl-Zerstäubung erfüllt.

Bereits 1976 berichtete J.H. Molitor (USA) über die Vorzüge der Anwendung dieser Technik zur Herstellung optischer Schichten für dielektrische Spiegel mit 24 Schichten, alternierend aus TiO_2 und SiO_2 , jede Schicht $\lambda/4$ dick.

In den 80er Jahren wurden nach diesem Rezept hochreflektierende Spiegel im Chargenbetrieb industrieller Anlagen hergestellt. Bei sorgfältiger Prozeßführung erreicht man heute Reflektivitäten des Laserlichtes bis zu 99,99%, ein Ergebnis, das nur mit der niederenergetischen Ionenbreitstrahl-Zerstäubung erreicht wurde. Es übertrifft die Ergebnisse aus anderen Beschichtungsverfahren, z. B. der reaktiven DC-Plasmazerstäubung oder der Hochfrequenz-Plasmazerstäubung, um ein Vielfaches.

Die Vorzüge des Verfahrens liegen in der Trennung des Ionenerzeugungsraumes vom Beschichtungsraum, so daß hier die Einflüsse der Bestrahlung der aufgewachsenen Schichten durch energiereiche γ -Elektronen und UV-Licht entfallen. Die Schichten weisen eine ausgezeichnete optische Homogenität aus. Außerdem ermöglicht die Trennung der Räume gegenüber der Plasma-Zerstäubung eine größere Variabilität in der Prozeßführung.

Erste Ionenbreitstrahlquelle für Ionenstrahlzerstäubung

von O. Fiedler

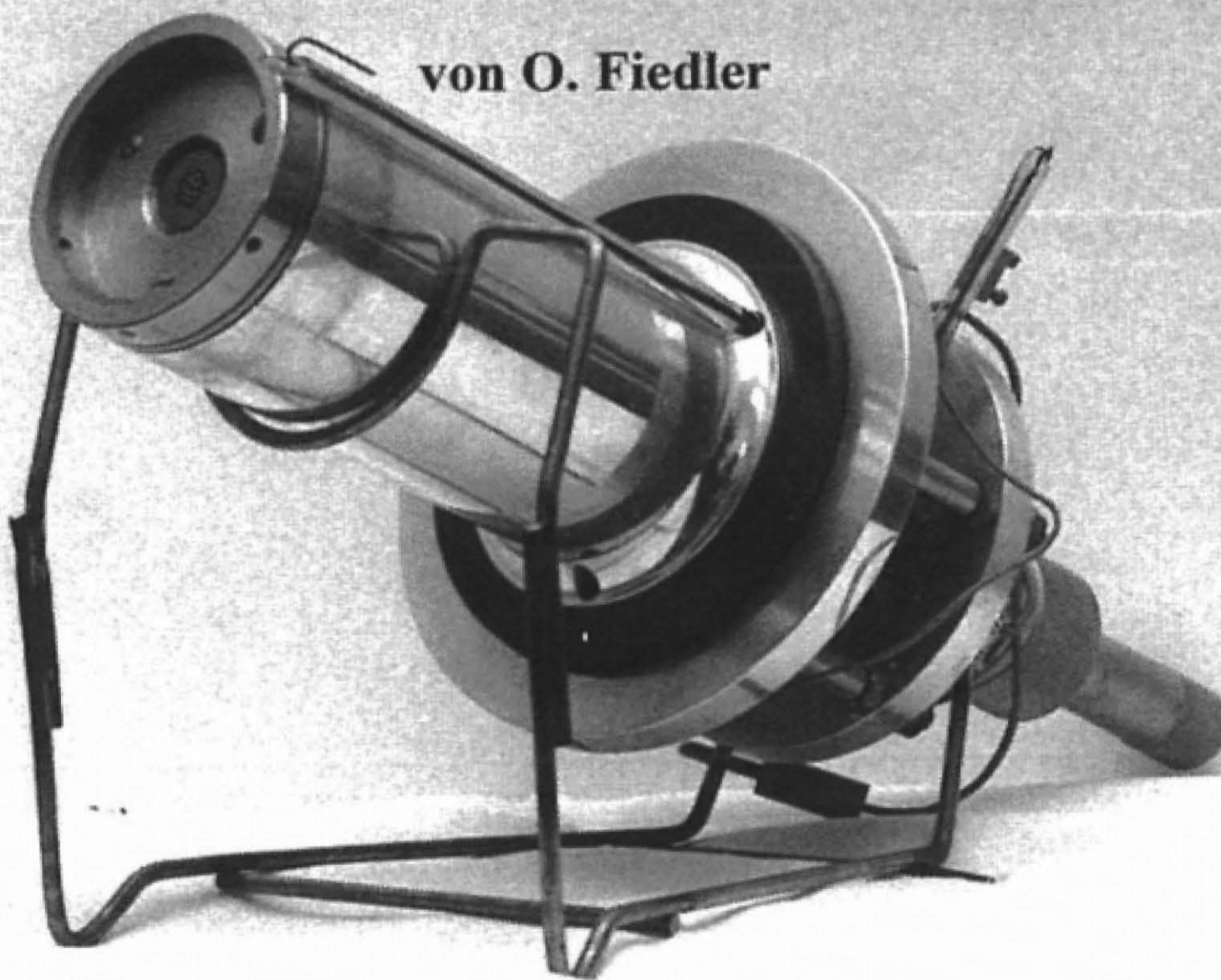


Abb. 9

Erste Ionenbreitstrahlquelle für Ionenstrahlzerstäubung

Im Ergebnis der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in hiesigen Hochschulinrichtungen wurde aus der Grundlagenforschung der 60er Jahre eine Hochtechnologie der 80er Jahre, die der Führungssensorik in technischen Systemen wertvolle Innovationen brachte.

(Die Abbildungen 2, 4 und 9 wurden vom Autor für die Veröffentlichung bereitgestellt.)