

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
21. Oktober 2004 (21.10.2004)

PCT

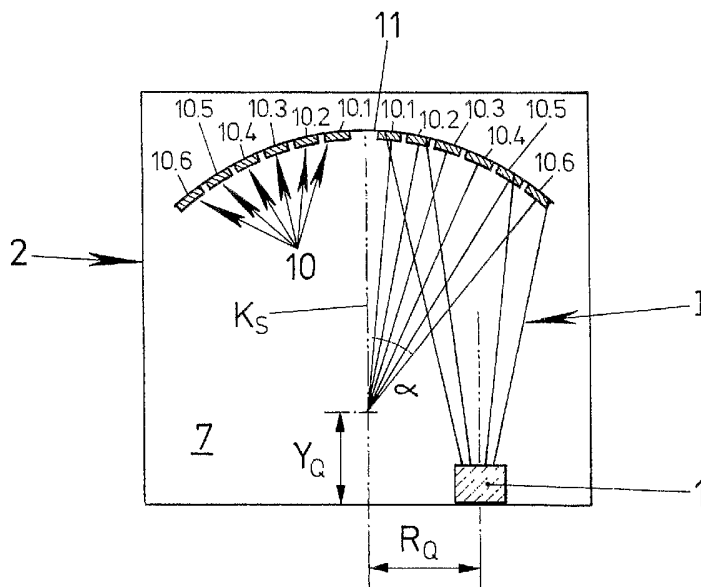
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 2004/091264 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **H05H**
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2004/003796
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
8. April 2004 (08.04.2004)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
103 17 027.8 11. April 2003 (11.04.2003) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **LEYBOLD OPTICS GMBH** [DE/DE]; Siemensstrasse 86, 63755 Alzenau (DE).
- (72) Erfinder; und  
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **BECKMANN, Rudolf** [DE/DE]; Am Katzengraben 35, 63546 Hammersbach (DE).
- (74) **Anwalt: POHLMANN, Bernd, Michael**; Reinhardt & Pohlmann Partnerschaft, Günthersburgallee 40, 60316 Frankfurt am Main (DE).
- (81) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title:** HIGH FREQUENCY PLASMA JET SOURCE AND METHOD FOR IRRADIATING A SURFACE

(54) **Bezeichnung:** HOCHFREQUENZ-PLASMASTRAHLQUELLE UND VERFAHREN ZUM BESTRAHLEN EINER OBERFLÄCHE



(57) **Abstract:** The invention relates to a high frequency plasma jet source (1) comprising a space (3) for accommodating a plasma, electrical means (8, 9) for applying a voltage to said high frequency plasma jet source (1) so as to ignite and obtain the plasma, means (4) for extracting a plasma jet (I) from the plasma space (3), and an outlet port which is separated from the vacuum chamber (7) by means of an extraction grid (4). The plasma jet (I) emerges from the high frequency plasma jet source (1) with essentially divergent radiation characteristics. The invention further relates to a method for irradiating a surface with a plasma jet (I) of a high frequency plasma jet source, said plasma jet (I) being divergent.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2004/091264 A2



(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

---

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft eine Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle (1) mit einem Plasmaraum (3) für ein Plasma, elektrischen Mitteln (8, 9) zum Anlegen einer elektrischen Spannung an die Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle (1) zum Zünden und Erhalten des Plasmas, Extraktionsmitteln (4) zum Extrahieren eines Plasmastrahls (I) aus dem Plasmaraum (3) sowie eine Austrittsöffnung, welche durch ein Extraktionsgitter (4) von der Vakuumkammer (7) getrennt ist. Der Plasmastrahl (I) tritt mit im wesentlichen divergenter Strahlungscharakteristik aus der Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle (1) aus. Ferner betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Bestrahlen einer Oberfläche mit einem Plasmastrahl (I) einer Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle, wobei der Plasmastrahl (I) divergent ist.

## **Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle und Verfahren zum Bestrahlen einer Oberfläche**

Die Erfindung bezieht sich auf eine Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle sowie ein Verfahren zum Bestrahlen einer Oberfläche mit einem Plasmastrahl gemäß den Oberbegriffen der unabhängigen Patentansprüche.

Bei Vakuumbeschichtungsverfahren von Substraten werden häufig so genannte Hochfrequenz-Plasmastrahlquellen eingesetzt. Ein Plasma enthält neben neutralen Atomen und/oder Molekülen Elektronen und positive Ionen als geladene Teilchen. Die geladenen Teilchen werden durch elektrische und/oder magnetische Felder gezielt beschleunigt und z. B. zum Abtragen einer Oberfläche oder zum Eintragen reaktiver Komponenten wie z. B. Sauerstoff in eine frisch aufwachsende Beschichtung eingesetzt und dergleichen mehr. Bekannt sind auch ionengestützte Verfahren, bei denen Material aus einer Materialquelle, typischerweise einer Verdampferquelle, verdampft wird und sich auf einem Substrat niederschlägt. Das auf dem Substrat aufwachsende Material wird mit einer reaktiven Komponente aus einem Plasma, beispielsweise Sauerstoff, beaufschlagt und bildet so z.B. eine Oxidschicht. Solche Verfahren sind z. B. bei der Herstellung transparenter Schichten für optische Anwendungen üblich. Dabei ist es auch von erheblicher Bedeutung, wie gleichmäßig der Plasmastrahl die Schicht beaufschlagt da die optischen Eigenschaften solcher Schichten in der Regel stark mit dem Sauerstoffgehalt variieren.

Bei der Herstellung dünner Schichten in der Mikroelektronik oder für optische Anwendungen wird in der Regel die Bereitstellung möglichst gleichmäßiger Schichtdicken und Schichteigenschaften, wie z. B. der Brechwert der abgeschiedenen Schichten angestrebt. Im industriellen Einsatz werden dabei große Flächen und/oder viele Substrate gleichzeitig beschichtet, was die Problematik der Schichtdickenhomogenität erhöht. Besonders bei optischen Schichten werden Schichtdickenschwankungen über eine Fläche oder die Substrate einer Beschichtungscharge von allenfalls wenigen Prozent als tolerabel betrachtet.

- 2 -

Aus dem europäischen Patent EP 349 556 B1 ist eine Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle zur Sicherstellung eines möglichst großflächigen homogenen Beschusses von Oberflächen mit Atom- oder Molekülstrahlen einer hohen Parallelität bekannt. Die Öffnung der Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle ist dabei mit einem Extraktionsgitter versehen, welches eine geringe Maschenweite aufweist, um das Plasma nicht zu stören. Das Extraktionsgitter ist als Hochfrequenz führende Elektrode in Form eines geeignet konfigurierten Drahtnetzes oder in Form parallel verlaufender Drähte ausgeführt. Zwischen dem Plasma und dem Extraktionsgitter wird eine ionenbeschleunigende Potentialdifferenz erzeugt, die einen neutralen Plasmastrahl ermöglicht, der quer zur Strahlrichtung völlig homogen ist und keinerlei Modulationsstruktur aufweist. Um stets eine gute Ebenheit der Fläche des Extraktionsgitters aufrechtzuerhalten und eine nachteilige Beeinflussung des Plasmastrahls durch eine Verformung des Extraktionsgitters zu vermeiden, wird die Gitterhalterung des Extraktionsgitters der bekannten Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle mit einer Nachspannvorrichtung versehen. Es ist üblich, den Durchmesser der Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle zu vergrößern, um eine großflächigere Bestrahlung zu ermöglichen. Dies erhöht jedoch die Kosten und stößt zudem schnell an konstruktive Grenzen.

Bei Aufdampfprozessen wird eine Großzahl von Substraten gleichmäßig beschichtet, indem die Substrate auf einer Kalotte angeordnet sind. Hierbei wird eine besonders große Fläche gleichmäßig beschichtet.

Wenn die bekannte Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle zur großflächigen Abscheidung von Schichten auf Substraten verwendet wird, die auf einer solchen Kalotte oder anderen gekrümmten Flächen angeordnet sind, zeigt sich ferner, dass auch bei einer Vergrößerung des Durchmessers der Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle Einbußen bei der Homogenität der abgeschiedenen Schichtdicke und Schichteigenschaften hingenommen werden müssen. Dies hat zur Folge, dass eine großflächige Bestrahlung nicht mit der gewünschten Qualitätsanforderung erfolgen kann.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist die Schaffung einer Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle, einer Vakuumkammer mit einer derartigen Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle sowie eines Verfahrens zum Bestrahlen einer Oberfläche mit ei-

- 3 -

nem Plasmastrahl, die eine großflächige und hochqualitative Bestrahlung von Oberflächen ermöglichen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche gelöst.

Gemäß einem bevorzugten Aspekt der Erfindung wird entgegen der Lehre des Standes der Technik ein divergenter neutraler Plasmastrahl erzeugt.

Ein Vorteil der Erfindung ist, dass es durch die erfindungsgemäße Ausbildung der Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle gelingt, auch auf Substraten, die auf einer Kalotte angeordnet sind, homogen großflächig Schichten abzuscheiden oder größere Flächen zu reinigen.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung ist eine Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle, insbesondere mit einem Plasmastrahl hoher Parallelität, die zur verbesserten Bestrahlung von Substraten, die auf einer Kalotte angeordnet sind, zumindest eine außerhalb eines Plasmariums angeordnete Blende aufweist, mit der inhomogene Bereiche der Plasmastrahldichte auf der Kalotte bzw. den Substraten vermieden werden. Ebenso kann hierzu die Austrittsöffnung des Plasmariums in Teilbereichen mit Blenden abgedeckt sein.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Zeichnungen näher beschrieben, aus denen sich auch unabhängig von der Zusammenfassung in den Patentansprüchen weitere Merkmale, Einzelheiten und Vorteile der Erfindung ergeben.

Es zeigen in schematischer Darstellung:

Figur 1 eine Beschichtungskammer mit einer bevorzugten Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle,

Figur 2 Verteilungskurven einer  $\cos^n$ -Strahlcharakteristik,

- 4 -

- Figur 3 die geometrischen Verhältnisse in der Beschichtungskammer aus Fig. 1, wobei Substrate auf einer Kalotte angeordnet sind,
- Figur 4 Verteilungen eines Brechwertes von TiO<sub>2</sub>-Schichten auf einer Kalotte,
- Figur 5 den Einfluss der Größe der Austrittsöffnung einer Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle und der Strahldivergenz auf die Verteilung der Plasmastrahldichte auf einer Kalotte,
- Figur 6 eine Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach dem Stand der Technik,
- Figur 7 die Dicke der Raumladungszone in Abhängigkeit von der angelegten Extraktionsspannung,
- Figur 8 die Dicke der Raumladungszone in Abhängigkeit von der Stromdichte bei einer festen Extraktionsspannung,
- Figur 9 eine bevorzugte Ausgestaltung des Extraktionsgitters und
- Figur 10 eine weitere bevorzugte Ausgestaltung des Extraktionsgitters.

Figur 1 zeigt schematisch eine Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle 1, im folgenden Hf-Plasmastrahlquelle genannt, mit einem divergenten neutralen Plasmastrahl I. Die Hf-Plasmastrahlquelle 1 ist topfartig ausgebildet und in einem Bereich einer als Beschichtungskammer 7 ausgebildeten Vakuumkammer angeordnet, die von einem Gehäuse 2 umgeben ist. Details der Beschichtungskammer 7 wie etwa übliche Vakuumpumpen, Gasversorgung, Substrathalterungen, Analytik etc. sind nicht dargestellt. Die Hf-Plasmastrahlquelle 1 weist einen Plasmaraum 3 auf, in dem ein Plasma gezündet wird, z. B. durch eine Hochfrequenzeinstrahlung. Zum Zünden und Aufrechterhalten des Plasmas sind elektrische Mittel 8, 9 vorgesehen, etwa ein Hochfrequenz-Sender 8 und elektrische Verbindungen 9. Weiterhin kann zumindest ein Magnet 5 vorgesehen sein, der in üblicher Weise zum Einschließen des Plasmas in dem Plasmaraum 3 eingesetzt wird. Für eine Gasversorgung der Hf-Plasmastrahlquelle 1 ist eine Zuführung 6 vorgesehen. Zum Extrahieren eines neutralen Plasmastrahls aus dem Plasma im Plasmaraum 3 ist in einem Bereich einer Austrittsöffnung ein Extraktionsgitter 4 mit vorzugsweise hoher Transmission ange-

ordnet. Der zur Transmission zur Verfügung stehende, insbesondere nicht abgedeckte Bereich der Fläche des Extraktiergitters 4, wird als Quellengröße bezeichnet. Im Allgemeinen wird die Quellengröße durch die Größe der Austrittsöffnung festgelegt. Eine derartige Quelle ist, allerdings mit einem planaren Extraktionsgitter und mit einem stark gerichteten Plasmastrahl, bereits aus der EP 349 556 B1 bekannt. Bevorzugt ist eine nach dem ECWR - Prinzip arbeitende Quelle mit einem Plasma relativ hoher Dichte.

Ein erfindungsgemäß divergenter Plasmastrahl I wird bevorzugt durch eine gezielte Wechselwirkung zwischen dem Plasma und dem Extraktionsgitter 4 bewirkt. Das Extraktionsgitter 4 ist dergestalt ausgebildet, dass der Plasmastrahl I eine im wesentlichen divergente Strahlcharakteristik aufweist. Details entsprechender Extraktionsgitter 4 sind in den Figuren 9 und 10 näher gezeigt.

Unter einem divergenten Plasmastrahl soll ein Plasmastrahl verstanden werden, der auch in zumindest einer Richtung senkrecht zur Hauptstrahlrichtung, d.h. der Richtung mit der höchsten Plasmastrahldichte, noch merklich abstrahlt. Üblicherweise wird die Hauptstrahlrichtung als Quellennormale bezeichnet. Eine Strahldivergenz lässt sich näherungsweise durch einen Exponenten  $n$  einer Cosinus-Verteilung beschreiben. Der Exponent  $n$  der Cosinus-Verteilung ist ein Maß für die Strahldivergenz. Je größer  $n$ , desto gerichteter ist der Plasmastrahl; je kleiner  $n$  ist, desto divergenter ist der Plasmastrahl. Eine detailliertere Abhandlung über derartige Verteilungsfunktionen ist bei G. Deppisch: "Schichtdickengleichmäßigkeit von aufgedampften Schichten in Theorie und Praxis", Vakuum Technik, 30. Jahrgang, Heft 3, 1981 zu finden. Fig. 2 zeigt Kurven von  $\cos^n$ -Verteilungen eines relativen Ionenstroms eines Plasmastrahls als Funktion des Winkels der Abstrahlung zur Quellennormalen für verschiedene Werte  $n$ . Es handelt sich bei dieser Verteilung um eine mathematisch berechnete Größe, die angibt, wie stark die Ionenstrahldichte vom Winkel abhängt. Es wird bei einem stark divergenten Strahl ( $n=1$ ) unter einem Winkel von z. B.  $40^\circ$  zur Quellennormalen noch 78% des Wertes erreicht, der in Richtung der Quellennormalen emittiert wird. Bei  $n=8$  wird unter diesem Winkel dagegen nur noch 13% emittiert. Bei einem Plasmastrahl mit  $n=16$  oder  $n=36$  ist bei einem Winkel von  $40^\circ$  praktisch kein Plasmastrahl vorhanden.

- 6 -

In Fig. 3 sind die geometrischen Verhältnisse in einer als Beschichtungskammer ausgebildeten Vakuumkammer 7 dargestellt. In der Beschichtungskammer 7 sind eine Mehrzahl von Substraten 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6 auf einer im wesentlichen kugelförmigen Kalotte 11 angeordnet. Die Kalotte 11 ist in Form eines Ausschnitts einer Kugelschale ausgebildet. Die Substrate 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6 sind jeweils auf Kreisen auf der Kalotte 11 abgelegt, d.h. jedes Bezugszeichen kennzeichnet eine Mehrzahl von Substraten, die auf dem jeweiligen Kreis auf der Kalotte 11 angeordnet sind. Die senkrecht gestrichelten Linien entsprechen der Richtung einer Quellennormalen, bzw. einer Parallelen dazu. Der innerste Kreis mit den Substraten 10.1 entspricht einem Kalottenwinkel  $\alpha$  von z. B.  $9^\circ$ , der nächste Kreis mit den Substraten 10.2 einem Winkel von  $\alpha = 14^\circ$ , der nächste Kreis mit den Substraten 10.3 einem Winkel von  $\alpha = 21^\circ$ , der nächste Kreis mit den Substraten 10.4 einem Winkel von  $\alpha = 27^\circ$ , der nächste einem Winkel von  $\alpha = 33^\circ$ , und der äußerste Kreis einem Winkel von  $\alpha = 39^\circ$ . Die Kalotte 11 kann während der Beschichtung rotieren, um eine bessere Schichtdickenhomogenität zu erlangen. Die Hf-Plasmastrahlquelle 1 ist im vorliegenden Fall versetzt zum Symmetriezentrum der Kalotte 11 angebracht, wobei  $R_Q$  den radialen Abstand der Quelle zur Symmetrie-Achse  $K_S$  der Kalotte 11 bezeichnet. Neben  $R_Q$  können insbesondere die Richtung der Quellennormalen und/oder der Abstand  $Y_Q$  variiert werden, um gezielt die Intensität des Plasmastrahls I auf den Substraten 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6 zu beeinflussen. Bevorzugt kann auch eine weitere Materialquelle in der Beschichtungskammer 7 vorgesehen sein, insbesondere eine Verdampfungsquelle. Zudem kann die Quelle unter einem Winkel Beta gegen die Richtung der Symmetrieachse gekippt werden. Bei anderen Ausbildungen der Erfindung kann die Oberfläche, auf der die Substrate angeordnet sind eine andere, vorzugsweise gekrümmte Form aufweisen.

Üblicherweise würde, um eine möglichst gleichmäßige großflächige Ausleuchtung der Kalotte 11 zu erreichen, eine Hf-Plasmastrahlquelle 1 mit einer möglichst großen Austrittsöffnung und einem gerichteten Plasmastrahl gewählt. Allerdings zeigen die praktischen Ergebnisse von Beschichtungsversuchen sowie Simulationsrechnungen, für eine derartige Anlagenkonfiguration, dass durch eine Vergrößerung der Austrittsöffnung nur bedingt eine ausreichende Homogenität der Schichtdicke der

auf den Substraten abgeschiedenen Beschichtungen erzielt wird. Eine Verbesserung der Beschichtungsqualität insbesondere der Schichtdickenhomogenität ist erfindungsgemäß jedoch durch Verwendung eines divergenten Plasmastrahls I möglich.

Fig. 4 zeigt Brechwertverteilungen von  $\text{TiO}_2$ -Schichten auf einer im wesentlichen kugelförmigen Kalotte. Dabei wurde mit einer Hf-Plasmastrahlquelle mit  $n=16$  und großer Austrittsöffnung in einer Beschichtungskammer 7 wie in Fig. 1 und Fig. 2 dargestellt, Titandioxid  $\text{TiO}_2$  abgeschieden.  $\text{TiO}_2$  ist transparent und weist einen Brechwert auf, der von der Intensität des verwendeten Plasmastrahls abhängt. Die Austrittsöffnung der Hf-Plasmastrahlquelle weist eine Fläche von  $18.750\text{mm}^2$  auf. Bei einer homogenen Bestrahlung der Kalotte 11 müsste der optische Brechwert homogen über der Kalotte 11 sein. Ohne Plasmabestrahlung liegt der Brechwert bei etwa 2,2 und erreicht bei sehr hohen Strahldichten des Plasmastrahls einen Wert bis zu 2,4. Die Messergebnisse in Fig. 4 zeigen, dass aufgrund der Variation der Plasmastrahldichte der Brechwert bei einer Beschichtung auf den Positionen 1 und 6 um etwa 30% geringer ist als auf den Positionen 2 bis 5, wobei die Positionen den erwähnten Kreisen 10.1,..... auf der Kalotte 11 in Fig. 2 und den zugeordneten Winkeln auf der Kalotte 11 entsprechen.

Fig. 5 zeigt Ergebnisse einer Simulationsrechnung über den Einfluss der Größe der Austrittsöffnung einer Hf-Plasmastrahlquelle sowie der Strahldivergenz auf die Verteilung der Plasmastrahldichte auf einer Kalotte. Bei einer Hf-Plasmastrahlquelle mit  $n=16$  und einer relativ kleinen Austrittsöffnung (nur  $1/10$  der Fläche wie in Fig. 4) ist die Plasmastrahldichte am stärksten vom Kalottenwinkel abhängig (oberste Kurve). Bei einer Hf-Plasmastrahlquelle mit gleicher Divergenz von  $n=16$ , aber einer größeren Austrittsöffnung, ist die Winkelabhängigkeit etwas geringer. Die Kurven mit  $n=8$  und  $n=4$  sind ebenso mit der kleinen Austrittsöffnung gerechnet. Es ist deutlich erkennbar, dass mit zunehmender Divergenz, d.h. abnehmendem Exponenten  $n$ , die Plasmastrahldichte weniger mit dem Kalottenwinkel variiert. Damit nimmt die Homogenität des Plasmastrahls über der Kalotte zu.

Ein divergenter Plasmastrahl I ermöglicht auf einfache Weise eine homogene großflächige Bestrahlung der Kalotte 11. Bei einer Abscheidung von Material auf einem

- 8 -

Substrat und/oder einer Bestrahlung des Substrats mit einem Plasmastrahl, z. B. zur Modifizierung des Substrates führt ein divergenter Plasmastrahl zu wesentlich homogeneren Ergebnissen als eine konventionelle Lösung mit einer Hf-Plasmastrahlquelle mit größerer Austrittsöffnung und einem Plasmastrahl hoher Parallelität. Bei einer planaren Oberfläche ist bei einem divergenten Plasmastrahl eine geringere Homogenität der Bestrahlung zu erwarten, die jedoch für viele Anwendungen, wie beispielsweise die Reinigung von Oberflächen noch ausreichend ist.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Bestrahlung einer Oberfläche wird ein Plasmastrahl I einer Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle mit einer hohen Strahldivergenz, vorzugsweise mit einem Divergenzmaß von höchstens  $n=16$ , besonders  $n=4$  und  $n=10$ , verwendet, wobei  $n$  ein Exponent der Cosinus-Verteilungsfunktion  $\cos^n$  ist, welcher die Strahldivergenz beschreibt. Ein Plasmastrahl I mit dieser Strahlcharakteristik ermöglicht beispielsweise eine Plasmastrahldichte hoher Homogenität auf den Substraten 10.1,...auf der Kalotte 11 und modifiziert eine Beschichtung und/oder führt Komponenten, beispielsweise Sauerstoff, zu.

Es versteht sich, dass die Erfindung nicht auf Hf- Plasmastrahlquellen beschränkt ist, deren divergente Strahlcharakteristik durch eine Cosinus-Verteilungsfunktion charakterisiert werden kann, sondern jede geeignete gezielte divergente Strahlcharakteristik umfasst.

Eine gewünschte divergente Strahldivergenz lässt sich zweckmäßigerweise gezielt durch konstruktive Ausgestaltung der Hf-Plasmastrahlquelle 1 erreichen. Dabei wird vorzugsweise das Extraktionsgitter 4 im Bereich der Austrittsöffnung der Hf-Plasmastrahlquelle 1 gegenüber den aus dem Stand der Technik bekannten Ausbildungsformen modifiziert. Es werden drei Möglichkeiten bevorzugt. Das Extraktionsgitter 4 weist Maschen mit einer großen Maschenweite auf oder es ist nicht planar, sondern zum Plasma hin konkav oder konvex ausgebildet. Ferner kann das Extraktionsgitter 4 eine konkave oder konvexe Form sowie Maschen mit großer Maschenweite aufweisen. Das Extraktionsgitter 4 besteht bevorzugt aus einem Wolframnetz mit einer Drahtstärke von etwa 0,02 – 3 mm, besonders bevorzugt 0,1 – 1 mm. Bevorzugt ist es, wenn zumindest ein Teilbereich der Fläche des Extraktionsgitters

einen Ausschnitt aus der Mantelfläche eines zylinderartigen, insbesondere zylinderförmigen Raumkörpers ist. Beispielsweise kann das Extraktionsgitter 4 eine rechteckförmige Grundfläche haben, die einer entsprechend ausgebildeten Austrittsöffnung der Hf-Plasmastrahlquelle 1 entspricht. Bei einem zylinderförmigen Raumkörper kann die Längsachse des Zylinders parallel zu einer der Seiten des Rechtecks angeordnet sein. Durch die Wölbung des Zylindermantels wird jeweils eine konkave bzw. konvexe Form gegenüber dem Plasma verwirklicht.

Zum Vergleich zeigt Fig. 6 schematisch eine Hf-Plasmastrahlquelle 1 mit einem planaren Extraktionsgitter 4 im Bereich einer Austrittsöffnung und einem Plasmastrahl I mit hoher Parallelität nach dem Stand der Technik. Die Plasmarandschicht am Extraktionsgitter 4 ist im wesentlichen planar. Nach allgemeiner Lehre, wie beispielsweise aus der EP 349 556 B1 bekannt, ist das Extraktionsgitter 4 so feinmaschig ausgebildet, dass das Plasma nicht davon beeinflusst wird. Die Maschenweite wird daher kleiner als die Dicke der Raumladungszone zwischen Extraktionsgitter 4 und Plasma gewählt.

Die Dicke  $d$  der Raumladungszone kann aus Textbüchern entnommen werden. Danach hängt die Dicke  $d$  von der Stromdichte  $j$  und dem Spannungsabfall  $U$  zwischen dem Plasmarand und dem Extraktionsgitter 4 ab:

$$d = \sqrt{\frac{4\epsilon_0}{9 \cdot j}} \cdot \sqrt[4]{\frac{2 \cdot e}{m_{ion}}} \cdot U^{\frac{3}{4}}$$

- mit  $\epsilon_0$ : Dielektrizitätskonstante des Vakuums  
 $e$ : Elementarladung  
 $m_{ion}$ : Masse der beteiligten Ionen  
 $U$ : Spannungsabfall zwischen dem Plasmarand und dem Extraktionsgitter 4  
 (entspricht der Extraktionsspannung)

Zur Bestimmung einer erfindungsgemäßen vergrößerten Maschenweite des Extraktionsgitters 4 wird wie folgt vorgegangen.

Für einen Ionenstrom von  $10 \text{ A/m}^2$ , der einen üblichen Wert für den Betrieb derartiger Beschichtungsanlagen darstellt, wurde bei einer Hf-Plasmastrahlquelle mit einer Austrittsöffnung von  $0,1 \text{ m}^2$  die Dicke  $d$  der Raumladungszone berechnet. Dies ist in Fig. 7 dargestellt. Die Dicke  $d$  der Raumladungsschicht steigt demnach mit zunehmendem Spannungsabfall an und variiert zwischen  $0,5 \text{ mm}$  bis zu  $2,5 \text{ mm}$  bei einem Spannungsabfall zwischen ca.  $50$  und ca.  $370$  Volt. Die Dicke  $d$  in einem bevorzugten Spannungsbereich zwischen  $50$  und  $200$  Volt ist deutlich kleiner als  $2 \text{ mm}$ .

Betrachtet man die Abhängigkeit der Dicke  $d$  der Raumladungszone von der Ionenstromdichte bei fester Extraktionsspannung, z. B. bei  $150$  Volt, ergibt sich die in Fig. 8 dargestellte Kurve. Die Dicke der Raumladungsschicht  $d$  fällt bei fester Extraktionsspannung mit steigender Stromdichte. In einem bevorzugten Bereich zwischen  $4 \text{ A/m}^2$  und  $25 \text{ A/m}^2$  ist die Dicke  $d$  der Raumladungszone geringer als  $2 \text{ mm}$ .

Fig. 9 zeigt schematisch eine erfindungsgemäße Plasmastrahlquelle 1 mit einer bevorzugten Ausgestaltung eines Extraktionsgitters 4 mit Maschen mit vergrößerter Maschenweite. Ist die Maschenweite größer als die Dicke  $d$  der Raumladungszone, so verformt sich die Plasmarandschicht in diesem Bereich, wie durch die wellige Kurve unterhalb des Extraktionsgitters 4 angedeutet ist. Dies führt zu einer erhöhten Divergenz des Plasmastrahls I. Sinnvollerweise sollte die Maschenweite noch klein genug sein, damit das Plasma nicht merklich durch die Austrittsöffnung entweicht. Zweckmäßigerweise beträgt die Maschenweite bevorzugt höchstens  $30 \text{ mm}$ , besonders vorzugsweise höchstens  $20 \text{ mm}$ , insbesondere, wenn die Dicke der Raumladungszone in einem Bereich zwischen  $0,5$  und  $2,5 \text{ mm}$  liegt.

Fig. 10 zeigt schematisch eine weitere bevorzugte Ausgestaltung eines Extraktionsgitters 4, welches nicht planar, sondern konkav vom Plasmaraum 3 ausgesehen, ausgebildet ist. Dadurch bildet sich eine gekrümmte Plasmarandschicht aus, und der austretende Plasmastrahl I zeigt eine divergente Strahlungscharakteristik. Hier kann die Maschenweite des Extraktionsgitters 4 auch relativ klein, insbesondere geringer als die Dicke der Raumladungszone gewählt werden. Das Extraktionsgitter 4 kann auch konvex ausgebildet sein.

- 11 -

Bei einer weiteren Ausführungsform kann das Extraktionsgitter 4 über zumindest einen Teilbereich seiner Fläche inhomogen ausgebildet sein. Hierzu kann beispielsweise eine Maschenweite variiert werden, so dass zum Rand hin eine geringere Maschenweite vorgesehen ist. Ferner können zur Modulation des Plasmastrahls außerhalb des Plasmaraums 3 eine oder mehrere Blenden vorgesehen sein. Ebenso kann die Austrittsöffnung in Teilbereichen mit Blenden abgedeckt sein und damit sonst inhomogen bestrahlte Bereiche der Oberfläche ausgeblendet werden. Die Blenden können zusätzlich mit einem elektrischen Potential beaufschlagt sein, um den Plasmastrahl zusätzlich zu modulieren.

In einer alternativen Ausführungsform der Erfindung kann eine aus der EP 349 556 B1 an sich bekannte Hf-Plasmastrahlquelle mit einem planaren Extraktionsgitter zur Bestrahlung von auf einer Kalotte angeordneten Substraten verwendet werden, wobei jedoch in einem Raumbereich außerhalb des Plasmaraums der Quelle zumindest eine Blende angeordnet ist. Diese Blende moduliert den Plasmastrahl derart, dass die ansonsten inhomogen bestrahlten Bereiche auf der Kalotte von der Bestrahlung ausgenommen werden. Dies kann ebenso durch die Abdeckung von Teilbereichen der Austrittsöffnung erfolgen. Die Form der verwendeten Blenden wird vorzugsweise empirisch anhand der erreichten Bestrahlungsergebnisse bestimmt. Zusätzlich ist vorgesehen, dass die Blenden mit einem elektrischen Potential zur Modulation des Plasmastrahls beaufschlagt sind.

**BEZUGSZEICHENLISTE**

- 1 Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle
- 2 Gehäuse
- 3 Plasmaraum
- 4 Extraktionsgitter
- 5 Magnet
- 6 Gas-Zuführung
- 7 Beschichtungskammer
- 8 Hochfrequenz-Sender
- 9 Elektrische Verbindung
- 10 Substrate
- 11 Kalotte
- I Plasmastrahl
- $K_s$  Kalottensymmetrieachse
- $\alpha$  Kalottenwinkel
- $R_Q$  Radialer Abstand Quelle – Symmetrieachse
- $Y_Q$  Vertikaler Abstand Quelle – Symmetriezentrum

## PATENTANSPRÜCHE

1. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle mit einem Plasmaraum (3) für ein Plasma, elektrischen Mitteln (8, 9) zum Zünden und Erhalt des Plasmas, einem auf einem Hochfrequenz – Potenzial liegendem Extraktionsgitter (4) zum Extrahieren eines Plasmastrahls (I) aus dem Plasmaraum (3) sowie einer Austrittsöffnung, vorzugsweise zu einer Vakuumkammer (7), wobei das Extraktionsgitter (4) im Bereich der Austrittsöffnung angeordnet ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Plasmastrahl (I) im wesentlichen divergent ausgebildet ist.
2. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Divergenz des Plasmastrahls (I) durch eine gezielte Wechselwirkung zwischen dem Plasma und dem Extraktionsgitter (4) bewirkt ist.
3. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Erreichung einer hohen Homogenität der Plasmastromdichte auf zumindest einem Teilbereich einer Oberfläche, der Plasmastrahl (I) der Form von zumindest einem Teilbereich der Oberfläche angepasst ist.
4. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Extraktionsgitter (4) vom Plasmaraum (3) aus gesehen konkav oder konvex ausgebildet ist, wobei vorzugsweise zumindest ein Teilbereich der Fläche des Extraktionsgitter ein Ausschnitt aus der Mantelfläche eines zylinderartigen Raumkörpers ist.
5. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Extraktionsgitter (4) über zumindest einen Teilbereich seiner Fläche inhomogen ausgebildet ist.
6. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest eine außerhalb des Plasmaraums (3) angeordnete Blende vorgesehen ist.

- 14 -

7. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Austrittsöffnung in Teilbereichen mit Blenden abgedeckt ist.
8. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Extraktionsgitter (4) Maschen mit einer Maschenweite aufweist, die geringer ist als die Dicke der Raumladungszone zwischen Extraktionsgitter (4) und dem Plasma im Plasmaraum (3).
9. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Extraktionsgitter (4) Maschen mit einer Maschenweite aufweist, die zumindest so groß ist wie eine Dicke einer Raumladungszone zwischen dem Extraktionsgitter (4) und dem Plasma im Plasmaraum (3).
10. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** Extraktionsgitter (4) Maschen mit einer Maschenweite aufweist, die höchstens so groß ist, dass das Plasma noch im wesentlichen im Plasmaraum (3) verbleibt.
11. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle mit einem Plasmaraum (3) für ein Plasma, elektrischen Mitteln (8, 9) zum Zünden und Erhalt des Plasmas, einem auf einem Hochfrequenz-Potential liegendem planaren Extraktionsgitter (4) zum Extrahieren eines Plasmastrahls (1) aus dem Plasmaraum (3) sowie einer Austrittsöffnung, vorzugsweise zu einer Vakuumkammer (7), wobei das Extraktionsgitter (4) im Bereich der Austrittsöffnung angeordnet ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Plasmastrahl eine hohe Parallelität aufweist, und dass zumindest eine außerhalb des Plasmaraums (3) angeordnete Blende vorgesehen ist mit der der Plasmastrahl (1) zur Erreichung einer hohen Homogenität der Plasmastrahldichte auf zumindest einem Teilbereich der Oberfläche einer Kalotte (11) modulierbar ist.

- 15 -

12. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Modulierung des Plasmastrahls (I) zumindest eine Blende mit einem elektrischen Potential beaufschlagt ist.
13. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** in einer Beschichtungskammer (7), der Austrittsöffnung im wesentlichen gegenüberliegend, eine gekrümmte Oberfläche, vorzugsweise eine Kalotte (11), mit Substraten (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6) angeordnet ist.
14. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zusätzlich zur Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle (1) eine Verdampfungsquelle vorgesehen ist.
15. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Extraktionsgitter (4) aus einem Wolframnetz mit einer Drahtstärke von etwa 0,02 – 3 mm, bevorzugt 0,1 – 1 mm, gebildet ist.
16. Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest ein Magnet (5) zur Einschließung des Plasmas im Bereich des Plasmariums (3) vorgesehen ist.
17. Vakuumkammer mit einem Gehäuse (2), einer Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle und einer zu bestrahlenden Oberfläche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle (1) nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche ausgebildet ist.
18. Vakuumkammer nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zu bestrahlende Oberfläche gekrümmt, vorzugsweise eine Kalotte (11) ist und ein oder mehrere Substrate (10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6) umfasst.

19. Verfahren zum Bestrahlen einer Oberfläche mit einem Plasmastrahl einer Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle **dadurch gekennzeichnet, dass** ein divergenter Plasmastrahl (I) verwendet wird und die Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nach zumindest einem der Ansprüche 1-16 ausgebildet ist.
20. Verfahren nach Anspruch 19, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Plasmastrahl (I) eine Strahlcharakteristik mit einem Divergenzmaß von höchstens  $n = 16$ , bevorzugt  $n=4$  aufweist, wobei  $n$  ein Exponent einer Cosinus-Verteilungsfunktion ist.
21. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 19 und 20, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Strahlcharakteristik des Plasmastrahls (I) durch eine gezielte Wechselwirkung zwischen dem Plasma und dem Extraktionsgitter (4) bewirkt wird.
22. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 19 bis 21, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine gezielte Wechselwirkung zwischen einem extrahierten Plasma und zumindest einer außerhalb des Plasmariums (3) angeordneten Blende eingesetzt wird.
23. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 19 bis 22, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Erreichung einer hohen Homogenität der Plasmastrahldichte auf zumindest einen Teilbereich einer Oberfläche die Strahlcharakteristik des Plasmastrahls (I) an zumindest einen Teilbereich der bestrahlten Oberfläche angepasst wird.
24. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 19 bis 23, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine gekrümmte Oberfläche, vorzugsweise eine Kalotte (11), vorgesehen ist.
25. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 19 bis 24, **dadurch gekennzeichnet, dass** durch das Bestrahlen der Oberfläche eine Beschichtung der Oberfläche erfolgt.

- 17 -

26. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 19 bis 25, **dadurch gekennzeichnet, dass** durch das Bestrahlen der Oberfläche eine Modifizierung und/oder Reinigung der Oberfläche erfolgt.

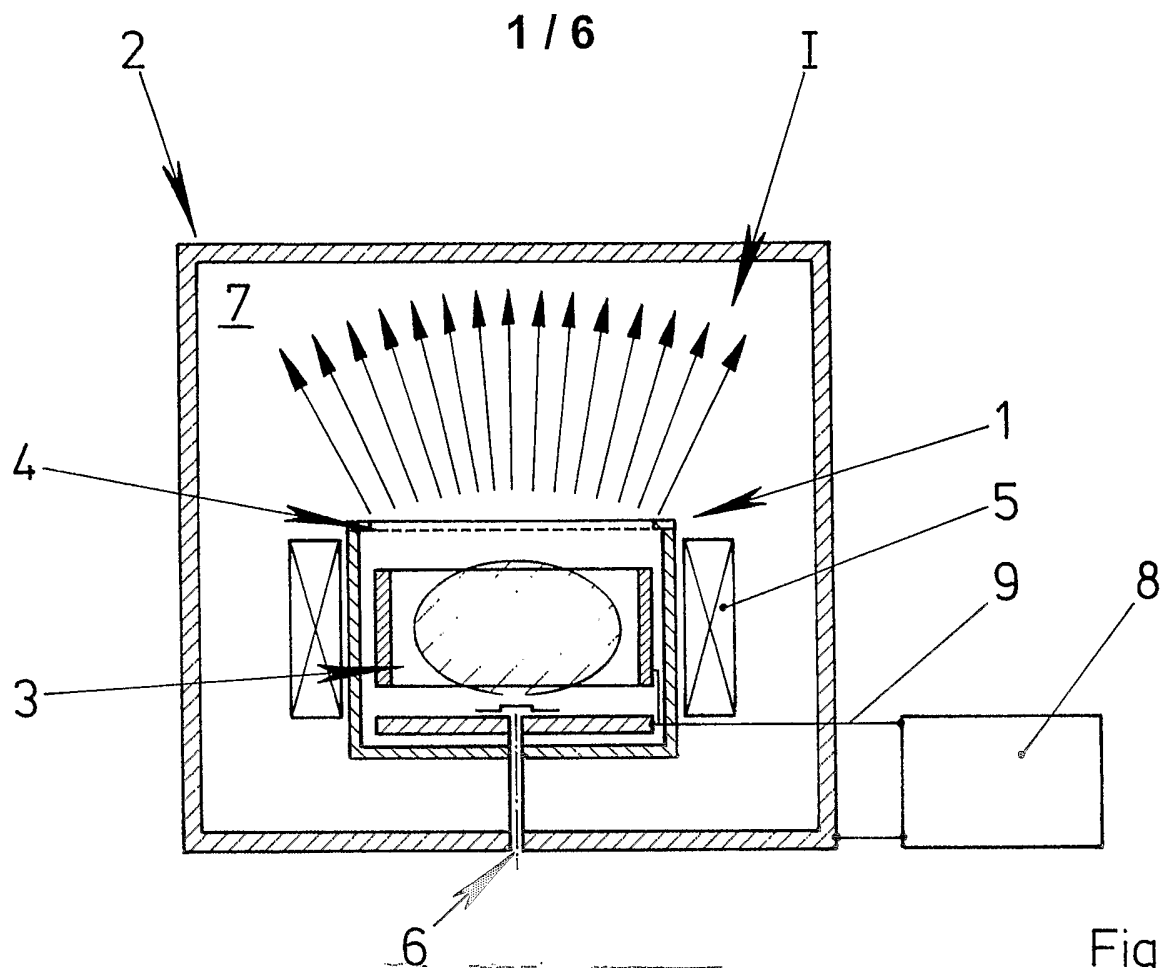


Fig.1

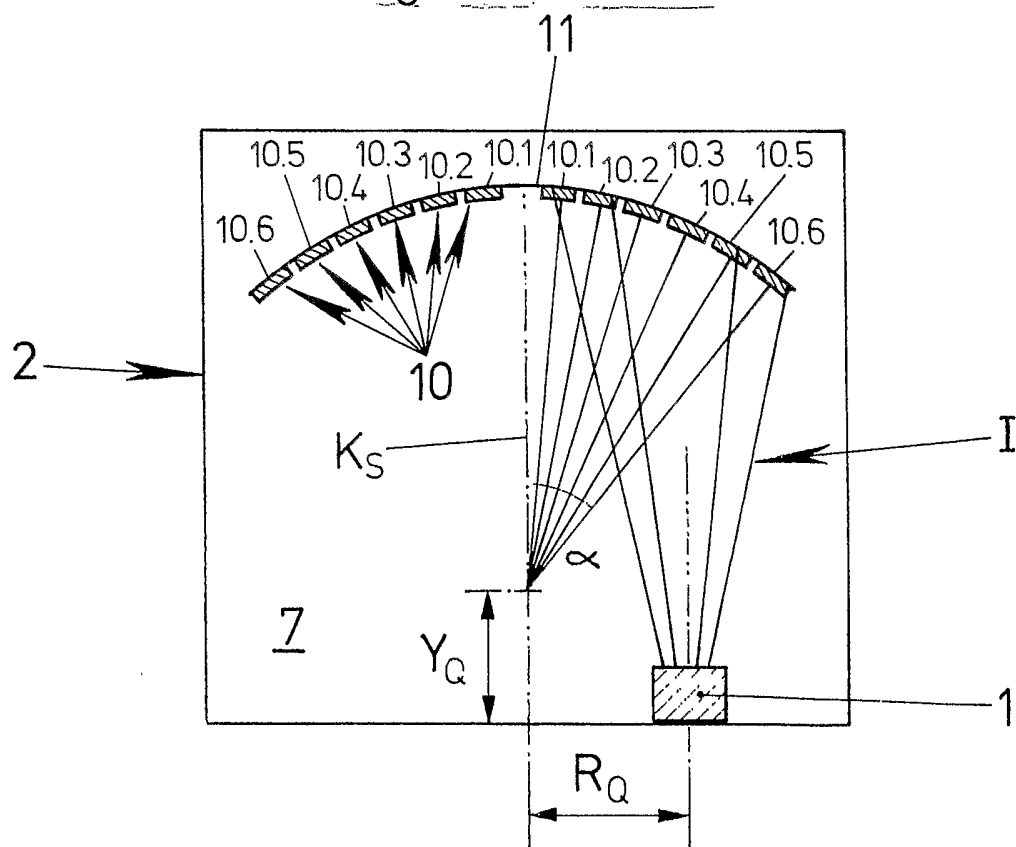


Fig. 3

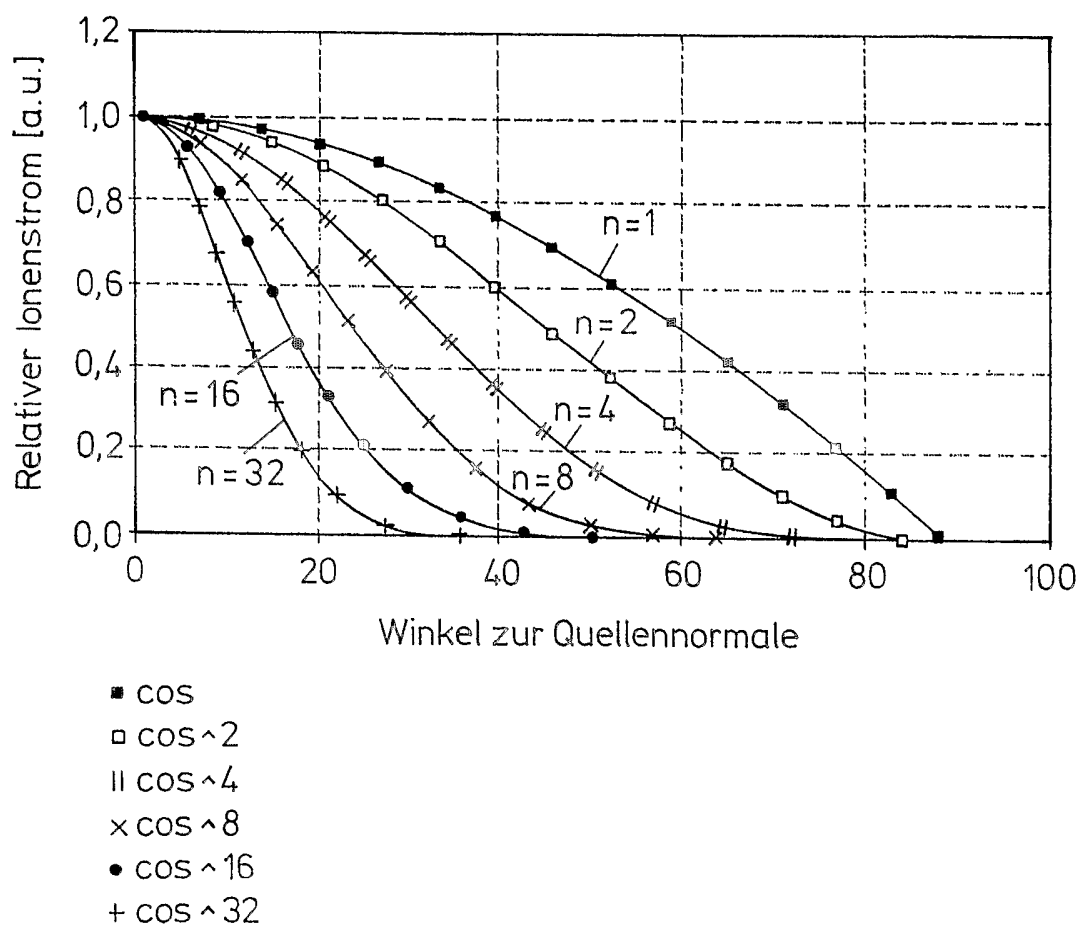


Fig. 2

3 / 6

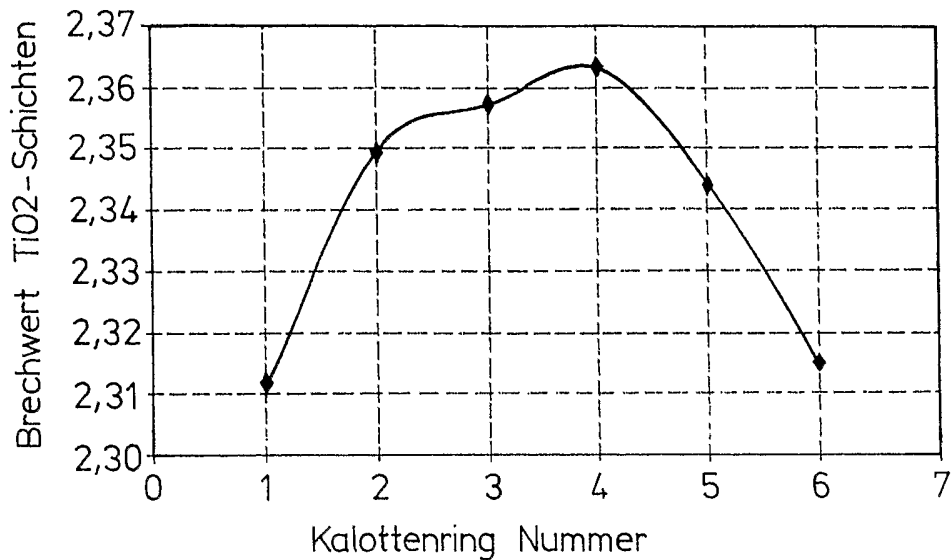


Fig. 4

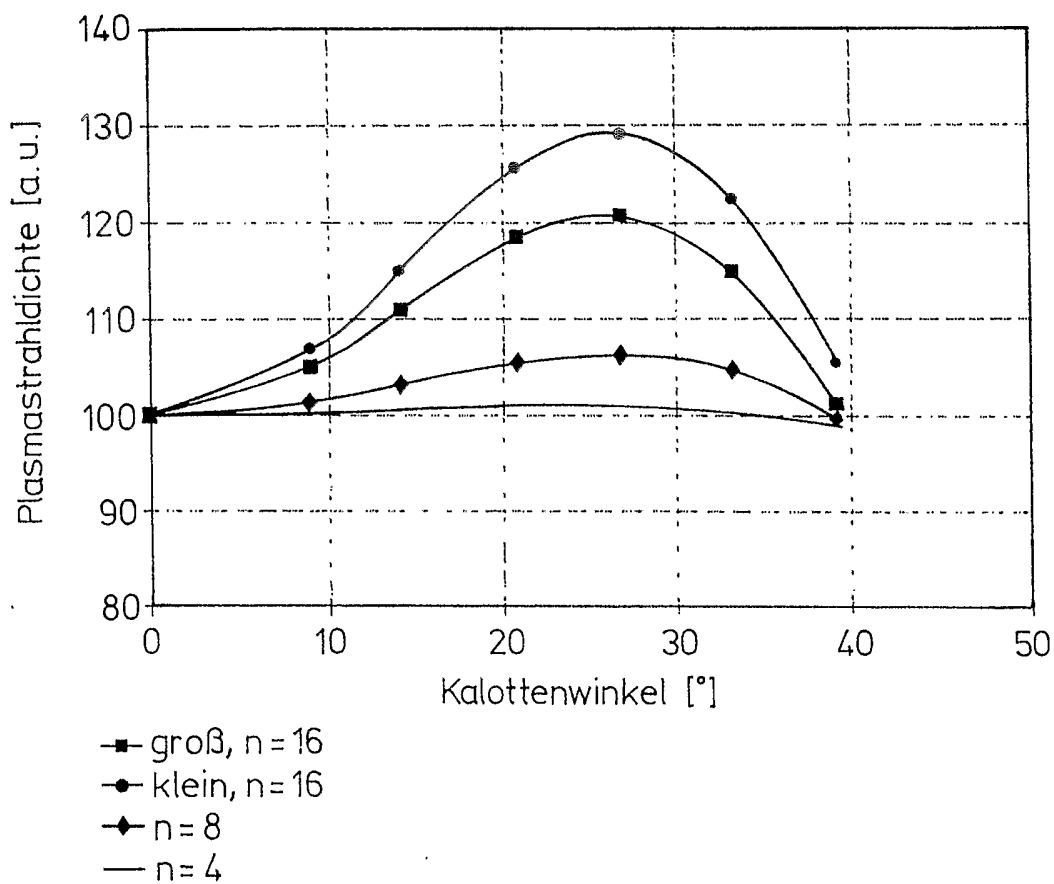


Fig. 5

4 / 6

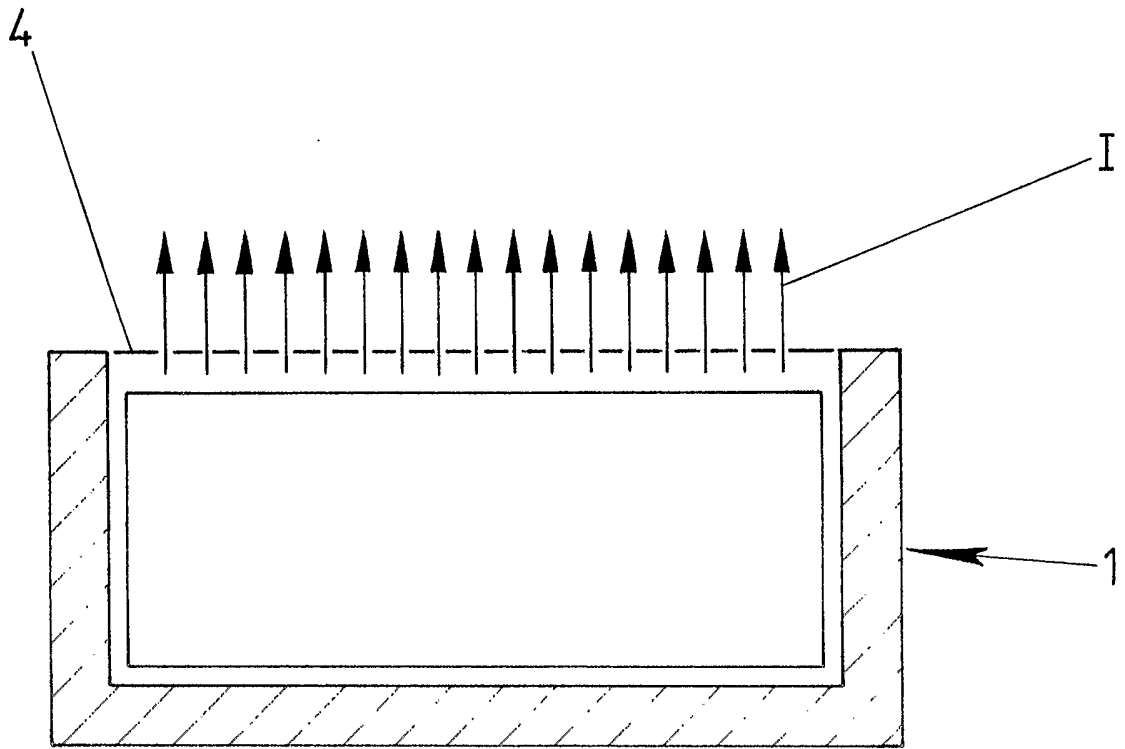


Fig. 6

5 / 6

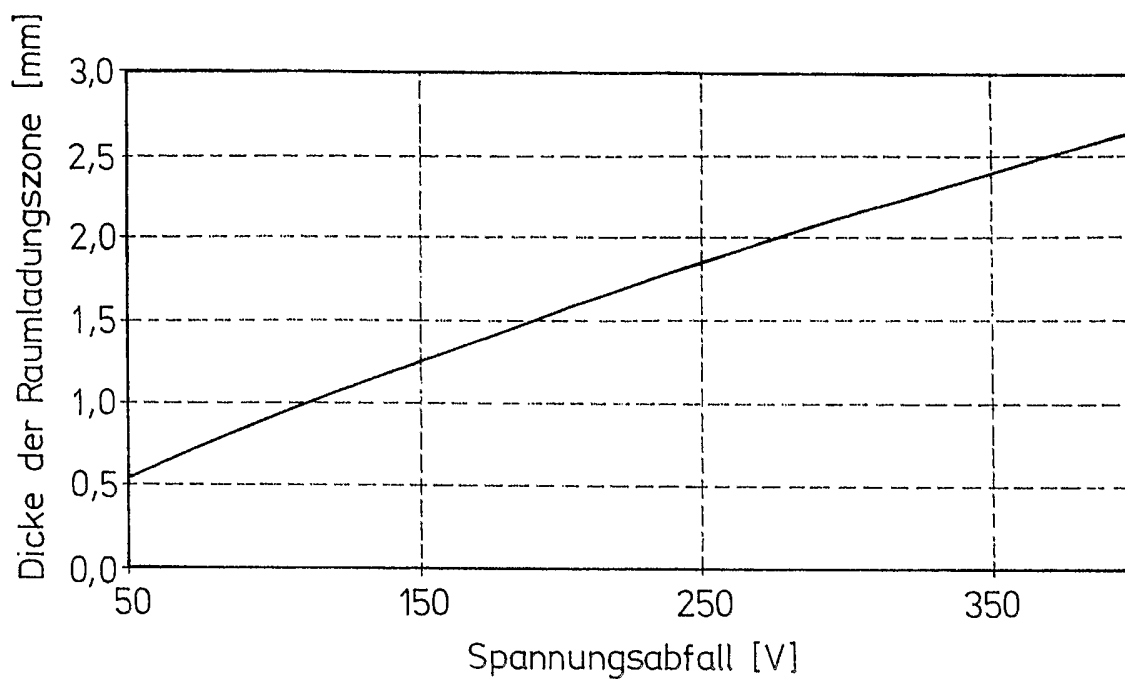


Fig. 7

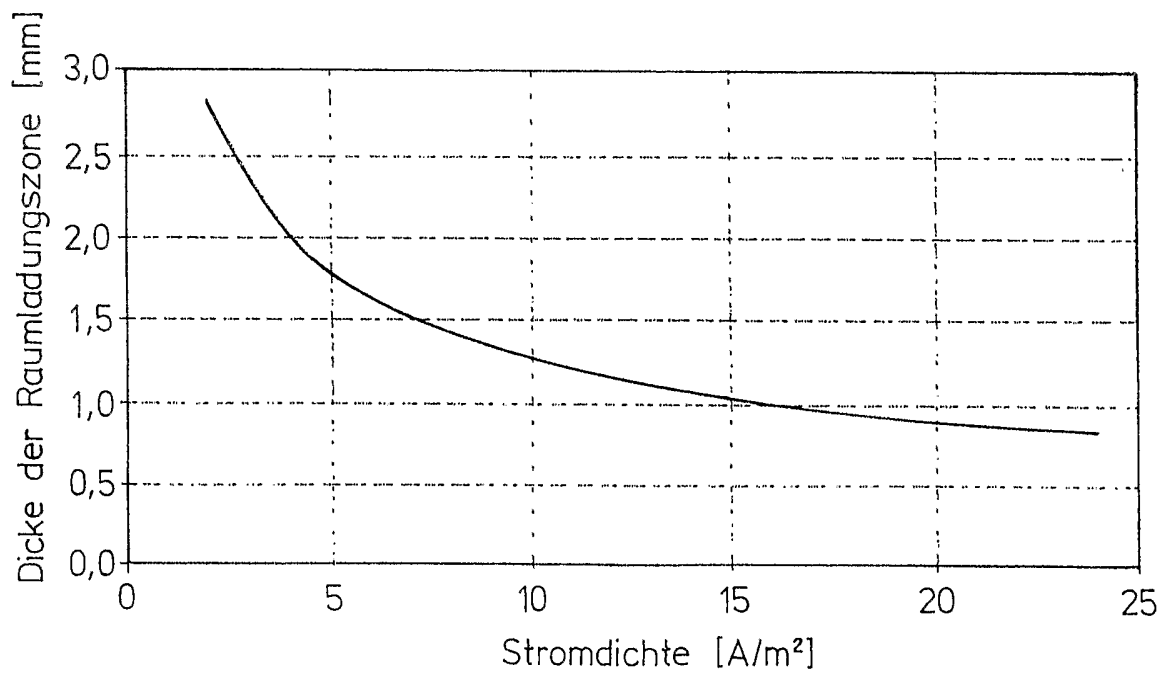


Fig. 8

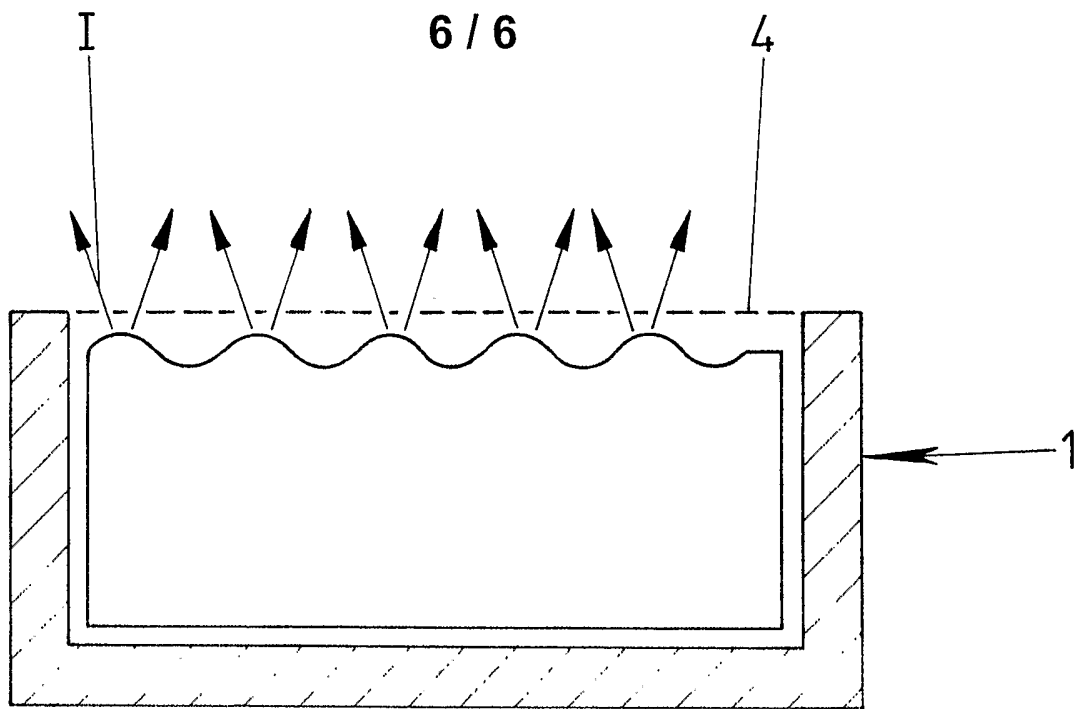


Fig.9

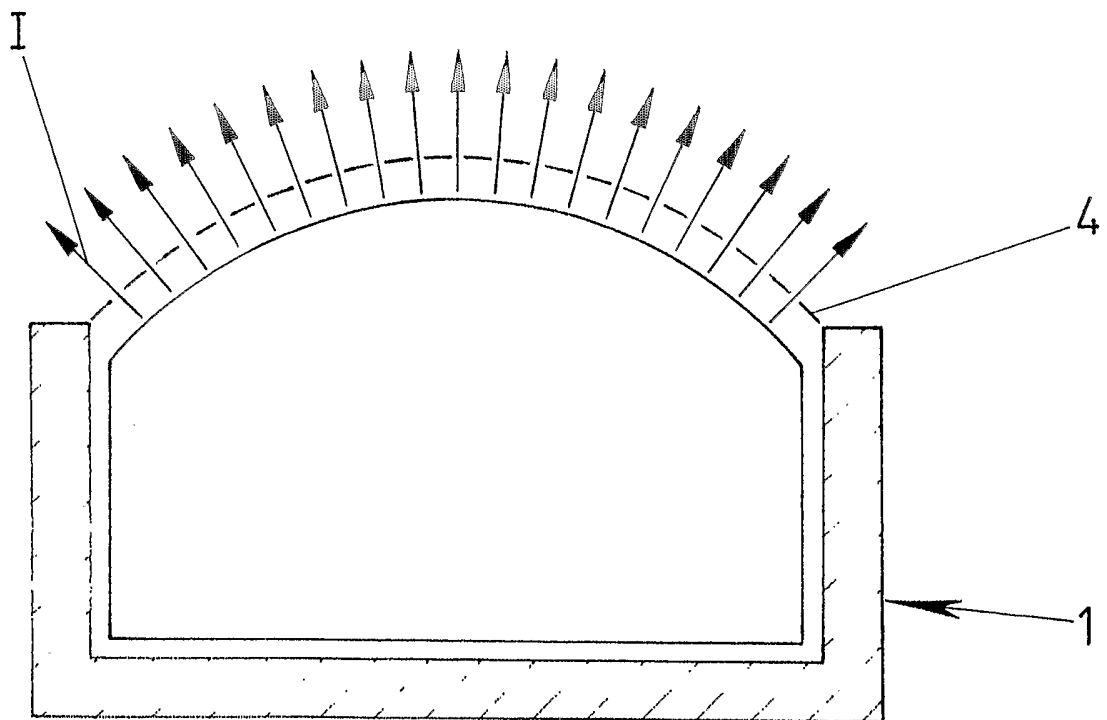


Fig.10