



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 020 004 A1** 2008.01.17

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 020 004.7**

(22) Anmeldetag: **26.04.2006**

(43) Offenlegungstag: **17.01.2008**

(51) Int Cl.⁸: **C23C 14/35** (2006.01)

(71) Anmelder:

**Systec System- und Anlagentechnik GmbH &
Co.KG, 97753 Karlstadt, DE**

(74) Vertreter:

**Zounek, Plate, Schweitzer Patentanwaltskanzlei,
65203 Wiesbaden**

(72) Erfinder:

**Münz, Wolf-Dieter, Prof. Dr., Wien, AT; Kunkel,
Stefan, 63599 Biebergemünd, DE; Mangold,
Jürgen, 97711 Thundorf, DE; Hofmann, Dieter,
63571 Gelnhausen, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 42 39 843 A1

EP 06 74 337 A1

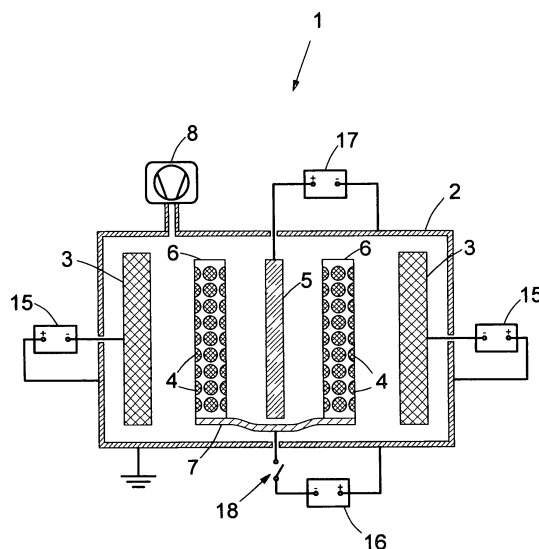
WO 98/31 041 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur homogenen PVD-Beschichtung**

(57) Zusammenfassung: Vorrichtung und Verfahren zur PVD-Beschichtung von Substraten. Die Vorrichtung 1 umfaßt eine Beschichtungskammer 2, zwei oder mehrere peripher innerhalb der Beschichtungskammer angeordnete Kathoden 3, Substratträger 6 zur Halterung der Substrate 4, Vakuumpumpen 8 und Spannungsquellen 15, 16, 17, wobei eine einzelne Anode 5 zentrisch zwischen den Kathoden 3 in der Beschichtungskammer 2 angeordnet ist und die Substrate 4 zwischen der Anode 5 und den Kathoden 3 positioniert sind. Bei dem Verfahren zur PVD-Beschichtung wird zwischen der einzelnen Anode 5 und den Kathoden 3 jeweils eine Gasentladung mit einem Plasma 14 gezündet. Die Substrate 4 werden stationär gehalten oder um eine oder mehrere Achsen gedreht und dabei den Plasmen 14 ausgesetzt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur homogenen PVD-Beschichtung von dreidimensionalen Substraten.

[0002] Die magnetfeldunterstützte Kathodenzerstäubung (Magnetron Sputtering) hat Eingang gefunden in viele Bereiche der modernen Oberflächentechnik. Ausgehend von Anwendungen in der Mikroelektronik ist die magnetfeldunterstützte Kathodenzerstäubung heute als industrielles Beschichtungsverfahren für Architekturglas, Flachbildschirme, Brillengläser, Bandmaterialien, Werkzeuge, dekorative Gegenstände und funktionelle Bauteile etabliert. Dabei werden funktionelle Bauteile oft mit Korrosionsschutz- oder Hartstoffschichten aus Nitriden wie TiN, TiAlN, VN, ZrN, CrN oder Karbonitriden wie TiCN in ein oder Mehrlagentechnik versehen. Zunehmend finden auch „superharte“ Schichten auf Basis von Nano-Mehrlagenschichten mit Härtewerten bis zu 50 GPa Anwendung. In der Automobilindustrie sind reibungs- und verschleißmindernde Metall-Kohlenstoff-Schichten bestens bewährt.

[0003] Verfahren und Anlagen zur homogenen Beschichtung ebener Flächen, wie z.B. Silizium Wafer oder Glasscheiben sind technisch hoch entwickelt und gut beherrschbar. Allerdings weisen die auf dreidimensionalen Substratkörpern – wie z.B. Uhrengehäusen, Schreibgeräten, Brillengestellen, Schneid- und Umformwerkzeugen, medizinischen Geräten oder Komponenten des Automobil-, Maschinen- und Gerätebaus – abgeschiedenen Schichten mikroskopische Inhomogenitäten auf. Diese Inhomogenitäten beeinträchtigen die Schichtqualität und somit die funktionellen Eigenschaften und die mechanische Widerstandsfähigkeit der beschichteten Komponenten.

[0004] Die Inhomogenitäten sind eine Folge der Anisotropie des im Beschichtungsprozeß eingesetzten Plasmas. Wird ein dreidimensionales Substrat vor einer planaren Kathode angeordnet, so ist der Abstand zwischen der Kathode und den Punkten auf der Substratoberfläche nicht konstant. Darüber hinaus schattet die der Kathode zugewandte vordere Hälfte des Substrats die rückwärtige Seite vom Plasma der Kathoden und damit von dem Ionenbeschuss und auch vom Materialfluß ab. Auf der rückwärtigen, von der Kathode abgewandten Substratseite ist die Intensität des Ionenbeschusses wesentlich geringer als auf der vorderen, dem Plasma der Kathoden ausgesetzten Substratseite. Für viele Anwendungen ist jedoch eine gleichmäßige Beschichtung der Substrate erforderlich. Eine bewährte Methode zur gleichmäßigen Beschichtung dreidimensionaler Substrate besteht darin, die Substrate vor der Beschichtungsquelle zu rotieren, wobei ein bestimmter Punkt der Substratoberfläche periodisch Bereiche mit intensivem und mit schwachem Ionenbeschuss durchläuft. Hierdurch wird eine mehrlagige Beschichtung abgeschieden, die abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit und Abscheiderate aus Lagen mit Dicken im Bereich von wenigen Nanometern bis zu einigen Mikrometern besteht. Ein derartig inhomogener Schichtaufbau beeinflusst die Mikrostruktur, Härte, Eigenspannung, Verschleiß- und Korrosionsfestigkeit sowie die Farbe der Beschichtung zumeist in unerwünschter Weise.

[0005] Wie oben erörtert, liegt die Hauptursache für den inhomogenen Schichtaufbau in der Begrenzung des bei der Magnetronentladung erzeugten Plasmas auf eine Raumzone vor der Kathode. Die Intensität des Innenbeschusses der aufwachsenden Schicht variiert mit dem Abstand der Substratoberfläche von der Kathode. Diese räumliche Variation kann bei Substraten mit geringer Tiefenabmessung nahezu vollständig kompensiert werden, indem die Substrate während der Beschichtung zwischen zwei sich gegenüberstehenden Kathoden positioniert werden (siehe [Fig. 1](#)). Die von den beiden Kathoden ausgehenden Plasmen überlagern sich in der Mitte, wobei eine Raumzone mit praktisch isotropem Plasma und gleichmäßigen Beschichtungsbedingungen gebildet wird. Es ist bekannt, daß auf diese Weise z.B. zylindrische Substratkörper bis zu einem Durchmesser von 10 mm gleichmäßig rundum beschichtet werden können, ohne daß eine spezielle Substratrotation um die Zylinderachse erforderlich ist.

[0006] Sogenannte „balancierte“ Planare Magnetronkathoden (siehe [Fig. 2a–Fig. 2b](#)) sind mit Permanentmagneten ausgestattet, die vor dem auf der Kathode montierten Target ein tunnelförmiges geschlossenes Magnetfeld erzeugen. Wird dieser geschlossene Magnetunnel mit einem elektrischen Feld überlagert, so erfolgt die Bewegung der Elektronen vor dem Target auf schraubenförmigen Bahnen. Dies bedeutet, daß die Elektronen in einem Raumvolumenelement längere Wege zurücklegen als im Falle einer Kathode ohne Magnetfeld, bei der sich die Elektronen entlang der elektrischen Feldlinien – zumeist linear – bewegen. Hierdurch nimmt die Anzahl der Stöße zwischen Elektronen und Gasatomen bzw. -molekülen je Raumvolumenelement zu und damit verbunden erhöht sich die Gasionisation, wobei sich ein intensives Plasma ausbildet, das vor dem Target im Bereich des Magnetunnels eingeschlossen wird.

[0007] Wichtige Eigenschaften der abgeschiedenen Schichten, wie z.B. Zusammensetzung, Morphologie,

Haftung und Eigenspannung werden durch das Schichtwachstum auf dem Substrat maßgeblich bestimmt. Es ist bekannt, daß das Schichtwachstum und damit die Schichteigenschaften durch Ionenbeschuß während des Beschichtungsvorgangs beeinflußt werden. So haben Thornton (J. A. Thornton, Annu. Rev. Mater. Sci. 7, p. 239, 1977) und Messier (R. Messier, J. Vac. Sci. & Technol., 2, 500, 1984) in ihren Arbeiten die Abhängigkeit der Schichtstruktur von Gasdruck und Ionenbeschuß während des Schichtwachstums untersucht. Insbesondere bei Hartstoffschichten, die aus Materialien mit hohem Schmelzpunkt bestehen und deren Schichtwachstum in dem von Thornton und Messier entwickelten Strukturzonenmodell durch die Zone T beschrieben wird, ist ein intensiver Ionenbeschuß zwingend erforderlich, um kompakte bzw. dichte Schichten abzuscheiden. Um einen intensiven Ionenbeschuß der Substrate zu realisieren, werden im Stand der Technik sogenannte "unbalancierte" Magnetronkathoden eingesetzt. Bei einem unbalancierten Magnetron ist ein Teil der magnetischen Feldlinien nicht vor dem Kathodentarget geschlossen, sondern verläuft in Richtung des Beschichtungsraums, in welchem sich die Substrate befinden. Aufgrund dieser Feldkomponenten wird ein Teil der Elektronen in Richtung der Substrate geführt, so daß sich das Plasma zu den Substraten hin ausdehnt. Durch das Anlegen eines Substratpotentials werden Ionen aus dem substratnahen Plasma auf die aufwachsende Schicht beschleunigt und der für das Schichtwachstum vorteilhafte Ionenbeschuß liegt vor.

[0008] Beispiele für Verfahren und Vorrichtungen zur Kathodenzerstäubung mit Innenunterstützung sind im nachfolgenden Stand der Technik aufgeführt.

[0009] DE 40 42 289 A1 betrifft eine Vorrichtung zum reaktiven Beschichten eines Substrates, die eine Magnetron-Kathode und eine separate von der Beschichtungskammer elektrisch isolierte Anode beinhaltet. Die Anode ist ringartig gestaltet und räumlich zwischen der Magnetron-Kathode und dem zu beschichtenden Substrat angeordnet. Die direkte Sichtverbindung zwischen Magnetron-Kathode und Anode ist durch eine Blende unterbunden, wodurch die Beschichtung der Anode vermieden wird. Bei reaktiven Beschichtungsprozessen mit Materialien, die eine hohe Affinität zum Reaktivgas haben, können die Innenwände der Beschichtungskammer, Blenden und andere Einbauten mit elektrisch nichtleitenden oder schlecht leitenden Belägen beschichtet werden. Der Einsatz einer gegen Beschichtung abgeschirmten Anode ermöglicht es in einem solchen Fall, den Beschichtungsprozeß stabil und Arcing-frei zu führen, wobei es nicht erforderlich ist, die Beschichtungskammer und deren Einbauten häufig zu reinigen bzw. die Einbauten häufig auszutauschen.

[0010] Eine Lichtbogen-Beschichtungsanlage gemäß EP 0 534 066 A1 umfaßt eine die zu beschichtenden Teile enthaltende Kammer, die mit Kathoden/Verdampfern und einer ersten und einer zweiten Anode ausgestattet ist. Während des Beschichtungsvorgangs wird die zweite Anode auf einem Potential gehalten, das höher ist als das Potential der ersten Anode. Die Substrate befinden sich hierbei auf einem negativen Potential, das größer ist als das negative Potential der Kathode. In der beschriebenen Anordnung wird durch die Anoden ein Teil der Elektronen aus dem Kathodenplasma abgesaugt und in die Beschichtungskammer hinein beschleunigt. Hierdurch wird die Ionisation der in der Beschichtungskammer befindlichen Gase verstärkt und der Ionenbeschuß der Substrate intensiviert.

[0011] Die in US 5 556 519 A beschriebene Vorrichtung zur Beschichtung von Substraten mittels magnetfeld-unterstützter Niederdruck-Entladungen umfaßt zwei oder mehrere Magnetronkathoden. Die äußeren magnetischen Pole benachbarter Magnetronkathoden weisen entgegengesetzte Polarität auf und erzeugen einen Magnetfeldkäfig, der praktisch alle Elektronen der Niederdruck-Entladungen einschließt. Hierdurch wird im Raum vor den Kathoden der Ionisierungsgrad der Niederdruck-Entladungen erhöht und der Ionenbeschuß der Substrate intensiviert.

[0012] DE 31 07 914 A1 lehrt ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Beschichtung eines Formteils mit dreidimensionaler Beschichtungsfläche durch magnetfeldunterstützte Kathodenzerstäubung, bei dem das Formteil zwischen zwei sich gegenüberstehenden Kathoden angeordnet ist und zugleich den Plasmawolken beider Kathoden ausgesetzt ist. An das Formteil wird eine gegenüber Massepotential negative Spannung niedriger/gleich -10 V angelegt. Die Plasmen der gegenüberliegend angeordneten Kathoden werden so überlagert, daß das Formteil einem rundum gleichmäßigen Ionenbeschuß ausgesetzt ist.

[0013] DE 38 37 487 A1 offenbart ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Ätzen von Substraten mittels einer magnetfeldunterstützten Niederdruck-Entladung. Die Substrate sind zwischen Elektronen-Emittern und Anoden angeordnet. Die Elektronen-Emitter sind von dem Magnetfeld eines auf Massepotential befindlichen Magnetsystems umgeben. An die Substrate werden negative Potentiale von 100 bis 1000 V angelegt. Die Anodenpotentiale betragen 10 bis 250 V. Aus den mit Strom beheizten Elektronen-Emittern treten Elektronen und werden zu den Anoden hin beschleunigt. Die Elektronen kollidieren mit Gasatomen bzw. -molekülen, wobei durch Stoßionisation Gasionen und weitere Elektronen generiert werden. Das so erzeugte Plasma dehnt sich

aus und durchdringt die Substratanordnung. Aufgrund des negativen Substratpotentials werden die positiven Gasionen aus dem Plasma beschleunigt, so daß eine intensive Innenätzung der Substrate erzielt wird.

[0014] WO 1998 0 31041 A1 beschreibt eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Einstellung der Ionenstromdichte am Substrat. Die Vorrichtung besteht aus einer an ihrem Außenumfang mit Magnetronkathoden oder Ionisationsquellen bestückten Vakuumkammer, die um eine Beschichtungszone herum angeordnet sind und in deren Zentrum sich eine aus einzelnen Permanentmagneten zusammengesetzte Magnetanordnung befindet. Die Polungen der Magnetanordnung und der sie umgebenden Magnetronkathoden/Ionisationsquellen können gleich oder entgegen gerichtet sein. Zusätzlich kann die magnetische Feldstärke der Magnetanordnung und die Position bzw. Orientierung ihrer Einzelmagnete variiert werden. Hieraus resultieren vielfältige Möglichkeiten zur Einstellung des magnetischen Feldes in der Beschichtungszone und damit verbunden zur Steuerung der Ionisation am Substrat. Z.B. werden bei umgekehrter Polung der Magnetanordnung und der Magnetronkathoden magnetische Feldlinien durch die Beschichtungszone geführt, was eine erhöhte Ionisation am Substrat zur Folge hat. Die in der Beschichtungszone positionierten Substrate können mit oder ohne Anlegen eines elektrischen Potentials beschichtet werden. Zur elektrischen Versorgung der Substrate können sowohl DC-, AC-, gepulste DC-, MF- und RF-Quellen eingesetzt werden.

[0015] Bei der industriellen Beschichtung von dreidimensionalen Substraten arbeitet die überwiegende Zahl der im Stand der Technik bekannten PVD-Verfahren mit stark inhomogenen Entladungsplasmen. Die mit diesen PVD-Verfahren auf dreidimensionalen Substraten abgeschiedenen Schichten weisen daher Inhomogenitäten auf. Demgegenüber umfassen einige der bekannten PVD-Verfahren und -Anlagen Maßnahmen bzw. Vorrichtungen, die ein homogenes Entladungsplasma aufweisen, jedoch mit erheblichem apparativen Aufwand und Kosten, geringem Substrat-Durchsatz und/oder einer Begrenzung der Substratdicke verbunden sind.

[0016] Dementsprechend hat die vorliegende Erfindung die Aufgabe, eine Vorrichtung zu schaffen, die es ermöglicht, dreidimensionale Substrate auf kostengünstige und effektive Weise mit einer homogenen PVD-Beschichtung zu versehen.

[0017] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch eine Vorrichtung zur PVD-Beschichtung von Substraten, umfassend eine Beschichtungskammer, zwei oder mehrere am Außenumfang der Beschichtungskammer angeordnete Kathoden, Substraträger zur Halterung der Substrate, Vakuumpumpen und Spannungsquellen, wobei eine einzelne Anode zentrisch zwischen den Kathoden in der Beschichtungskammer angeordnet ist und wobei die Substrate zwischen der Anode und den Kathoden positioniert sind.

[0018] In Weiterbildung der Erfindung sind die Kathoden rotationssymmetrisch um die Anode angeordnet und die Substraträger auf einem Drehteller montiert, wobei der Drehteller zur Anode axial zentriert ist und die Substraträger drehbar sind.

[0019] Um einen hohen Substratdurchsatz bei zugleich kompakter Bauweise zu realisieren, wird die erfindungsgemäße Vorrichtung bevorzugt mit vier oder sechs Kathoden ausgestattet. Insbesondere sind die Kathoden als balancierte Magnetronkathoden ausgeführt, die mittels konzentrisch um die Magnetronkathoden angeordneter elektromagnetischer Spulen als unbalancierte Magnetrons betrieben werden. Als Kathoden können Planare Rechteckkathoden (Linearkathoden) oder Planare Rundkathoden eingesetzt werden.

[0020] Vorzugsweise zeichnet sich die Anode dadurch aus, daß sie:
von teleskopartiger Konstruktion ist, so daß die Anodenlänge zwecks Be- und Entladen der Beschichtungskammer reduziert werden kann;
mit einer Kühlvorrichtung ausgestattet ist zur Kompensation der Anodenaufheizung durch Plasmen mit hoher Leistungsdichte; und
aus rostfreiem Stahl, Graphit oder metallummanteltem Graphit besteht.

[0021] Zwecks horizontaler Be- und Entladung von Substraten ist die Beschichtungskammer mit einer seitlich angeordneten Vakuumtür oder Vakuumschleuse ausgestattet.

[0022] In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist die Beschichtungskammer mit einem Rezipienten zur Aufnahme der zentralen Anode verbunden. Um die Anode beim Belüften der Beschichtungskammer vor Kontamination zu schützen, ist zwischen dem Rezipienten und der Beschichtungskammer ein Ventil installiert.

[0023] Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein kostengünstiges und effektives Verfahren zur homogenen PVD-Beschichtung dreidimensionaler Substrate bereitzustellen. Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren zur PVD-Beschichtung von Substraten, wobei zwischen einer einzelnen, zentral positionierten Anode und mehreren Kathoden mittels Gasentladungen Plasma erzeugt wird und wobei die Substrate während der Beschichtung von Plasma umgeben sind.

[0024] Erfindungsgemäß werden die Gasentladungen in einem Modus betrieben, bei dem der Ionenbeschuß der den Kathoden sowie den Anoden zugewandten Substratzonen eine mittlere Stromdichte von 0,2 bis 8,0 mA/cm², bevorzugt von 0,2 bis 5,0 mA/cm² und insbesondere von 1,0 bis 3,0 mA/cm² aufweist.

[0025] Während des Beschichtungsvorgangs werden die Substrate typischerweise bewegt. Insbesondere werden die Substrate auf einer um die Anode zentrierten Kreisbahn zwischen der Anode und den Kathoden geführt und rotieren simultan um vertikale, auf der zentrierten Kreisbahn mitgeführte Achsen.

[0026] In einer vorteilhaften Fortbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird durch wechselnde magnetische Polung benachbarter Kathoden ein geschlossenes Magnetfeld erzeugt, wobei das Magnetfeld das Plasma im Inneren der Beschichtungskammer und beabstandet von der Wand der Beschichtungskammer einschließt.

[0027] Weiterentwicklungen des erfindungsgemäßen Verfahrens nach den Ansprüchen 22 bis 27 sind dadurch gekennzeichnet,
 daß an die Anode ein Potential von +20 bis +200 V, bezogen auf Massepotential angelegt wird;
 daß an die Substrate ein Potential von 0 bis -1000 V, bezogen auf Massepotential angelegt wird;
 daß die Substrate elektrisch isoliert sind und ein floatendes Potential annehmen;
 daß an die Kathoden ein Potential von -50 bis -1000 V, bezogen auf Massepotential angelegt wird;
 daß die PVD-Beschichtung in einer Atmosphäre erfolgt, die mindestens eines der Gase Argon, Neon, Helium, Sauerstoff, Stickstoff oder Actylen enthält; und
 daß der Druck in der Beschichtungskammer 10⁻³ bis 0,1 mbar beträgt.

[0028] Die Erfindung stellt eine kostengünstige Vorrichtung und ein industriell einsetzbares Verfahren für die homogene PVD-Beschichtung dreidimensionaler Substrate bereit.

[0029] Zudem eröffnet das Verfahren Möglichkeiten, Substrate mit dreidimensional ausgeprägter Oberflächentopographie zu beschichten, die mit den bekannten Methoden nicht beschichtet werden können.

[0030] Im Weiteren wird die Erfindung anhand von Zeichnungen und Beispielen näher erläutert. Es zeigen:

[0031] [Fig. 1](#) Die Plasmaverteilung einer Doppelkathode;

[0032] [Fig. 2a-Fig. 2b](#) eine Magnetronkathode;

[0033] [Fig. 3](#) eine erfindungsgemäße Vorrichtung mit zentraler Anode;

[0034] [Fig. 4a](#) die Plasmaverteilung in einer bekannten PVD-Beschichtungsanlage mit balancierten Magnetronkathoden;

[0035] [Fig. 4b](#) die Plasmaverteilung in einer bekannten PVD-Beschichtungsanlage mit unbalancierten Magnetronkathoden;

[0036] [Fig. 4c](#) die Plasmaverteilung in einer erfindungsgemäßen Vorrichtung mit zentraler Anode;

[0037] [Fig. 5a](#) eine Beschichtungskammer mit Rezipient für die zentrale Anode;

[0038] [Fig. 5b](#) eine zentrale Anode von teleskopartiger Konstruktion; und

[0039] [Fig. 6a-Fig. 6c](#) die elektrischen Kennlinien einer Versuchsanlage nach der Erfindung.

[0040] [Fig. 1](#) illustriert die Funktionsweise der im Stand der Technik bekannten Doppelkathoden-Anordnung. Ein Substrat ist mittig zwischen zwei sich gegenüberstehenden Kathoden A und B positioniert. Die Dichte des von jeder einzelnen Kathode erzeugten Plasmas nimmt mit dem Abstand von der Kathode rasch ab, so daß

jedes einzelne Plasma A bzw. B auf das Substrat stark unterschiedlich (anisotrop) einwirkt. Demgegenüber entsteht durch die Überlagerung der beiden Plasmen A und B am Ort des Substrates eine Raumzone mit einer im wesentlichen gleichmäßigen (isotropen) Plasmadichte.

[0041] In der industriellen Beschichtungstechnik werden vorzugsweise Magnetronkathoden eingesetzt. Die wesentliche Komponenten und das Bauprinzip einer rechteckigen Planaren Magnetron-Kathode sind in [Fig. 2a](#) und [Fig. 2b](#) dargestellt. Hinter dem Target, das beim Beschichtungsprozess abgetragen (zerstäubt) wird, sind Permanentmagnet-Segmente angeordnet, wobei ein inneres lineares Magnetsegment von einem äußeren Ring aus Magnetsegmenten mit umgekehrter Polung umgeben ist. Diese Magnetanordnung erzeugt vor dem Target ein tunnelförmiges geschlossenes Magnetfeld, das beim Beschichtungsvorgang den Einschluß des Entladungsplasmas bewirkt. Eine wassergekühlte Trägerplatte führt die bei hohen Kathodenleistungen an der Targetoberfläche erzeugte Wärmeenergie ab.

[0042] [Fig. 3](#) zeigt schematisch eine beispielhafte Ausführung der erfindungsgemäßen Vorrichtung **1**. Im Zentrum einer vakuumdichten Beschichtungskammer **2** ist eine Anode **5** angeordnet. Die Anode **5** ist umgeben von zwei oder mehr Kathoden **3**, die an der Innenwand der Beschichtungskammer **2** angebracht sind. Die Anzahl der Kathoden **3** beträgt n mit $n = 2, 4, 6, 8$ oder $2n + 1$ mit $n = 1, 2, 3$. Zwischen der Anode **5** und den Kathoden **3** befinden sich mit Substraten **4** bestückte Substraträger **6**. Die Substraträger **6** sind auf einem zur Anode **5** axial zentrierten Drehteller **7** montiert. Der Drehteller **7** und die auf Planetenachsen gelagerten Substraträger **6** werden mittels Motoren angetrieben, so daß die Substraträger **6** auf einer Kreisbahn zwischen der Anode **5** und den Kathoden **3** hindurchgeführt werden und simultan hierzu um ihre Längsachse rotieren.

[0043] Die Rotationsgeschwindigkeiten der Substraträger **6** (ω_s) und des Drehtellers **7** (ω_D) sind so abgestimmt, daß die mittlere Verweildauer jedes Substrats **4** vor den Kathoden **3** gleichlang ist. Dies wird z.B. erreicht, wenn ω_s ein Vielfaches von ω_D beträgt: $\omega_s = m \cdot \omega_D$ mit $m > 3$. Hierdurch wird eine gleichmäßige Beschichtung der Substrate gewährleistet.

[0044] Die Beschichtungskammer **2** ist mit mindestens einem inerten oder reaktiven Prozeßgas wie z.B. Argon, Neon, Helium oder Sauerstoff, Stickstoff, Acetylen gefüllt, dessen Druck mittels mit der Beschichtungskammer **2** verbundener Vakuumpumpen **8** im Bereich von 10^{-3} bis 0,1 mbar gehalten wird. Die Substrate **4**, die Kathoden **3** und die Anode **5** sind mit Spannungsquellen **15**, **16**, **17** verbunden, wobei das Bezugspotential der Spannungsquellen **15**, **16**, **17** und das Potential der Beschichtungskammer **2** auf Massepotential liegt. Üblicherweise werden an die Anode **5** Potentiale von +20 bis +200 V, an die Kathoden **3** Potentiale von -50 bis -1000 V und an die Substrate **4** Potentiale von 0 bis -1000 V angelegt. Alternativ können die Substrate **4** isoliert bzw. auf floatendem Potential gehalten werden – wie in [Fig. 3](#) durch einen geöffneten Schalter **18** angedeutet. Die Anode **5** wird durch eine nicht gezeigte Kühlvorrichtung gekühlt.

[0045] Der in [Fig. 4a](#) in Aufsicht dargestellte Querschnitt zeigt schematisch die räumliche Verteilung von Entladungsplasmen **14** in einer konventionellen PVD-Beschichtungsanlage mit vier als balancierte Magnetrons ausgeführten Kathoden **3**, die jeweils ein Target **13** und einen hinter dem Target **13** angeordneten Permanentmagnetsatz **11** aufweisen. Wie die Pfeile **20** und **21** andeuten, werden die Substraträger **6** auf einer Kreisbahn an den Kathoden **3** vorbeigeführt und rotieren simultan um ihre Längsachse. Die Wand der Beschichtungskammer **2** fungiert hierbei als Anode; alternativ werden auch separate, unmittelbar neben den Kathoden **3** angeordnete Anoden eingesetzt (in [Fig. 4a](#) nicht gezeigt). An jeder Kathode **3** wird ein Entladungsplasma **14** gezündet, das sich in eine Raumzone vor der Kathode **3** erstreckt. Vor dem Target **13** überlagern sich das Magnetfeld des Permanentmagnetsatzes **11** und das – hierzu im wesentlichen senkrecht gerichtete – elektrische Feld des Kathodenpotentials, wodurch das Entladungsplasma **14** vor dem Target **13** konzentriert und nahezu vollständig eingeschlossen wird.

[0046] [Fig. 4b](#) zeigt eine weitere PVD-Beschichtungsanlage bekannten Typs mit vier als balancierte Magnetrons ausgeführten Kathoden **3**, die jeweils mit einer elektromagnetischen Spule **12** ausgestattet sind. Mittels der elektromagnetischen Spule **12** wird ein zusätzliches Magnetfeld erzeugt dessen Feldlinien senkrecht zum Target **13** verlaufen und das Magnetfeld der Außenpole des Permanentmagnetsatzes **11** verstärken. Hierdurch wird der zuvor beschriebene Plasmaeinschluß vor den Kathoden **3** aufgehoben und das Entladungsplasma **14** füllt die Raumzone vor den Kathoden **3**. Eine nach diesem Prinzip arbeitende Kathode wird allgemein als unbalancierte Magnetronkathode (Unbalanced Magnetron) bezeichnet. Die Stärke des von den elektromagnetischen Spulen **12** erzeugten Magnetfeldes bestimmt die Einspeisung und Aufweitung des Entladungsplasmas **14** in den Raum vor der Kathode **3**. Somit können die Dichte und räumliche Ausdehnung des Entladungsplasmas **14** in einem begrenzten Bereich über die Stromstärke I_{UB} in den elektromagnetischen Spulen **12** gesteuert werden.

[0047] Wie jedoch in [Fig. 4b](#) schematisch angedeutet, gelingt es auch mit unbalancierten Magnetronkathoden **3** nicht, die Entladungsplasmen **14** derart auszudehnen, daß die offenen Bereiche der Raumzone **22** durchdrungen werden und die Substrate **4** gleichmäßig von Plasma umgeben sind. Insbesondere, wenn der lichte Abstand zwischen benachbarten Substraträgern **6** klein ist, sind die von den Kathoden **3** abgewandten Substratseiten praktisch gänzlich von den Entladungsplasmen **14** abgeschirmt.

[0048] [Fig. 4c](#) zeigt eine PVD-Beschichtungsanlage, die erfindungsgemäß mit einer zentralen Anode **5** ausgerüstet ist. Die zentrale Anode **5** bewirkt, daß sich die Entladungsplasmen **14** bis in den zentralen Bereich der Beschichtungskammer **2** erstrecken. Die Entladungsplasmen **14** durchsetzen die offenen Bereiche der Raumzone **22** und füllen den Raum zwischen der Anode **5** und den Substraträgern **6**, wobei die Substrate **4** von Entladungsplasmen **14** umschlossen werden.

[0049] Eine bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung ist gekennzeichnet durch eine Anordnung, bei der die Permanentmagnetsätze **11** und die elektromagnetischen Spulen **12** benachbarter Kathoden **3** zueinander entgegengesetzte Polaritäten aufweisen und ein geschlossenes Magnetfeld erzeugen. Die räumliche Ausdehnung dieses geschlossenen Magnetfelds ist in [Fig. 4c](#) mittels nach innen gekrümmter Linien illustriert, die jeweils von dem äußeren Nordpol eines Permanentmagnetsatzes **11** zu den äußeren Südpolen der beiden links und rechts benachbarten Permanentmagnetsätze **11** verlaufen.

[0050] Industriell genutzte Beschichtungsanlagen weisen z.T. Höhen von mehr als zwei Meter auf. Zwecks effektiver Be- und Entladung der Substratchargen ist die Beschichtungskammer mit einer seitlich angeordneten Vakuumtür oder Vakuumschleuse ausgestattet. Eine derartige Vakuumtür/schleuse ermöglicht den horizontalen Zugang zum Inneren der Beschichtungsanlage. [Fig. 5a](#) zeigt schematisch eine derartige Ausführungsform der Erfindung, bei der die Beschichtungskammer **2** mit einem vertikalen Rezipienten **9** zur Aufnahme der Anode **5** ausgestattet ist. Die mit Substraten **4** bestückten Substraträger **6** sind auf einer Halteplatte oder direkt auf dem Drehteller **7** montiert. Zum Entladen der Beschichtungskammer **2** wird zunächst die Anode **5** mittels eines Stellmotors (nicht gezeigt) aus ihrer Arbeitsposition in ihre Be-/Entladeposition im Rezipienten **9** verfahren, um den Innenraum der Beschichtungskammer **2** freizugeben. Danach wird die Vakuumtür/-schleuse (nicht gezeigt) geöffnet und die Halteplatte mit den Substraträgern **6** und den Substraten **4** mittels eines Chargierwagens horizontal aus der Beschichtungskammer **2** entnommen. Zum Beladen der Beschichtungskammer **2** wird die Halteplatte bzw. der Drehteller **7** mit den Substraträgern **6** und den zu beschichtenden Substraten **4** mittels des Chargierwagens horizontal in die Beschichtungskammer **2** eingebracht. Bei Verwendung einer Halteplatte wird diese auf den Drehteller **7** gesetzt. Hieran anschließend wird die Vakuumtür/-schleuse geschlossen, die Beschichtungskammer **2** evakuiert, die Anode **5** in ihre Arbeitsposition gefahren und der Beschichtungsprozeß gestartet.

[0051] Um die Anode **5** beim Belüften der Beschichtungskammer **2** vor Kontamination zu schützen, ist es zweckmäßig, den Rezipienten **9** mit einem Ventil (nicht gezeigt) auszurüsten.

[0052] [Fig. 5b](#), deren Bezugszahlen analog zu jenen der [Fig. 5a](#) sind, zeigt eine weitere Ausgestaltung der Erfindung, bei der eine Anode **5'** eine teleskopartige Konstruktion aufweist.

[0053] Vor dem Be-/Entladen der Beschichtungskammer **2** wird die Anode **5'** teleskopartig eingezogen. Dadurch wird es möglich, die Bauhöhe des Rezipienten **9** im Vergleich zu der Ausführungsform nach [Fig. 5a](#) zu verringern bzw. gänzlich auf den Rezipienten **9** zu verzichten.

Beispiel

[0054] Zur Erprobung des erfindungsgemäßen Verfahrens wurde in eine, mit vier unbalancierten Magnetronkathoden ausgestattete PVD-Beschichtungsanlage eine zentrale Anode eingebaut.

[0055] Aufbau und Konfiguration der erfindungsgemäßen Versuchsanlage entspricht im wesentlichen den [Fig. 3](#) und [Fig. 4b](#). Die wichtigsten Anlagen- und Versuchsparameter sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:

Kammerdurchmesser:	ca. 1 m
Kammerhöhe:	ca. 1 m
Anzahl Kathoden:	4
Gesamtfläche Targets:	0,6 m ²
Gesamt-Kathoden-Leistung:	10 bis 30 kW
Kathodenspannung (bei 10 kW):	ca. -400 V
Gesamtkathodenstrom (bei 10 kW):	25 A
Anzahl Substrathaltezyylinder:	12
Durchmesser Substrathaltezyylinder:	0,08 m
Länge Substrathaltezyylinder:	0,45 m
Gesamtfläche Substrathaltezyylinder:	1,4 m ²
Substratpotential:	-40 V
Abstand Kathodentarget/Substratträgermitte:	0,2 m
Prozeßgas:	Argon
Entladungsdruck:	3·10 ⁻³ mbar

[0056] Als Maß für den Beschuß der Substrate **4** mit Argon-Ionen aus den Entladungsplasmen **14** dient der an den Substratträgern **6** gemessene Strom, der im Folgenden als Substratstrom bezeichnet wird. [Fig. 6a](#) zeigt die Abhängigkeit des Substratstroms vom Anodenpotential bei einem mittels der Spannungsversorgung **16** erzeugten Substratpotential von -40 V und Kathodenleistungen von 10, 17 und 30 KW. Hierbei wurden die vier Magnetronkathoden **3** im balancierten Modus betrieben, d.h. die Stromstärke I_{UB} in den elektromagnetischen Spulen **12** betrug Null. In konventionellen Beschichtungsanlagen sind die Entladungsplasmen **14** im Betriebsmodus balancierter Magnetronkathoden **3** auf eine kleine Raumzone vor den Kathodentargets **13** konzentriert, wobei nur wenige Elektronen in die Nähe der Substrate **4** bzw. Substratträger **6** gelangen. Dementsprechend wird in Substratnähe nur eine geringe Zahl von Argon-Atomen durch Elektronenstoß ionisiert, so daß der Beschuß der Substrate mit Argon-Ionen und damit der Substratstrom sehr gering ist.

[0057] Demgegenüber werden mittels der zentralen Anode **5** auch für balancierte Magnetronkathoden **3** ($I_{UB} = 0$ A) Substratströme von einigen Ampere erzielt. Wie aus [Fig. 6a](#) ersichtlich, nimmt der Substratstrom annähernd linear mit dem Anodenpotential zu. Allerdings ist an der Versuchsanlage bereits bei einer Kathodenleistung von 17 KW und einem Anodenpotential von etwa 100 V der Maximalstrom der Spannungsversorgung **17** der Anode **5** erreicht. Aufgrund dieser apparativen Einschränkung der Versuchsanlage kann der Substratstrom, der an den Anodenstrom gekoppelt ist, nicht weiter erhöht werden. In noch stärkerem Maße trifft dies für eine Kathodenleistung von 30 KW zu, bei der der Grenzwert des Anodenstroms bei einer Anodenspannung von etwa 30 V erreicht ist. Ungeachtet dieser apparativen Einschränkung zeigen die in [Fig. 6a](#) dargestellten Meßergebnisse, daß bei Verwendung der zentralen Anode **5** der Substratstrom bei Erhöhung der Kathodenleistung um ein Vielfaches ansteigt.

[0058] Neben den elektrischen Meßkurven bestätigt auch ein Blick durch das Fenster der Versuchsanlage die mittels der erfindungsgemäßen zentralen Anode **5** erzielten Effekte. In konventionellen PVD-Beschichtungsanlagen bleibt der zentrale Bereich der Beschichtungskammer dunkel. In der erfindungsgemäßen Versuchsanlage hingegen ist die Raumzone zwischen der zentralen Anode **5** und den Substratträgern **6** mit leuchtendem Plasma gefüllt. Hierbei nimmt die Lichtstärke der Plasmaemission mit dem Anodenpotential zu. Die unerwartete und überraschend starke Wirkung der zentralen Anode **5** wird hierdurch auf eindrucksvolle Weise belegt.

[0059] Wegen der oben beschriebenen apparativen Einschränkung der Versuchsanlage wurde die Kathodenleistung bei den weiteren Messungen auf 10 KW begrenzt.

[0060] In [Fig. 6b](#) sind der Substrat- und Anodenstrom als Funktion des Anodenpotentials und der Stromstärke $I_{UB} = 0$ A, 3 A und 6 A in den elektromagnetischen Spulen **12** dargestellt. Die Kathodenleistung beträgt 10 KW und das Substratpotential -40 V. Wie oben erläutert, wird das Magnetfeld, das die Aufweitung der Plasmazone der balancierten Magnetron-Kathode bewirkt, über I_{UB} geregelt. Bei einer Erhöhung von I_{UB} von 0 auf 3 A nimmt der Substratstrom um bis zu 80 % zu. Eine weitere Erhöhung von I_{UB} auf 6 A hat jedoch keinen messbaren zusätzlichen Einfluß auf den Substratstrom. Anders das Anodenpotential, mit dem der Substratstrom stetig und annähernd linear über einen weiten Bereich von 20 bis zu 180 V ansteigt. Selbst bei einer Kathodenleistung von lediglich 10 KW wird ein Substratstrom bis zu 6,6 A erzielt (Anodenspannung 180V, $I_{UB} = 3$ A), was einer mittleren Substratstromdichte von 0,47 mA/cm² an der Oberfläche der Substratträger **6** entspricht. Durch einfache Maßnahmen wie Erhöhung von Kathodenleistung, Anodenpotential und/oder Entladungsdruck sowie Optimierung der Anoden- und Kathodengeometrie kann die Substratstromdichte auf Werte von bis zu

8,0 mA/cm² gesteigert werden. Erfindungsgemäß werden mittlere Substratstromdichten von 0,2 bis 5,0 mA/cm² und insbesondere von 1,0 bis 3,0 mA/cm² bevorzugt.

[0061] **Fig. 6c** schließlich veranschaulicht die Wirkung der erfindungsgemäßen Anode **5** anhand der Differenz ΔI zwischen dem Anodenstrom und dem Kathoden-Gesamtstrom. Die Meßwerte sind bei einer Kathodenleistung von 10 KW, einem Substratpotential von -40 V und einem Spulenstrom $I_{UB} = 6$ A aufgenommen. Während der Kathoden-Gesamtstrom praktisch konstant 25 A beträgt, wächst der Anodenstrom kontinuierlich an und übersteigt für Anodenpotentiale größer 50 V den Kathoden-Gesamtstrom. Generell bedeuten Werte von $\Delta I > 0$, daß die Zahl der Elektronen, die von den Entladungsplasmen über die zentrale Anode abgeleitet werden, größer ist als die Zahl der in den kathodenseitigen Plasmazonen (Kathodenfall bzw. Magnetron-Plasmafalle) generierten Argon-Ionen bzw. Elektronen. Dies ist nur möglich, wenn in Anodennähe zusätzliche Ionisations-Mechanismen – insbesondere Stoßionisation – wirken. Es ist überraschend, daß mittels der erfindungsgemäßen zentralen Anode **5** bereits in der Versuchsanlage Differenzströme ΔI von bis zu 13 A erzielt werden.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur homogenen PVD-Beschichtung von Substraten (**4**), umfassend eine Beschichtungskammer (**2**), zwei oder mehrere peripher innerhalb der Beschichtungskammer (**2**) angeordnete Kathoden (**3**), Substratträger (**6**) zur Halterung der Substrate (**4**), Vakuumpumpen (**8**) und Spannungsquellen (**15**, **16**, **17**), **dadurch gekennzeichnet**, daß eine einzelne Anode (**5**) zentrisch zwischen den Kathoden (**3**) in der Beschichtungskammer (**2**) angeordnet ist und daß die Substrate (**4**) zwischen der Anode (**5**) und den Kathoden (**3**) positioniert sind.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kathoden (**3**) rotationssymmetrisch um die Anode (**5**) angeordnet sind.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Substratträger (**6**) auf einem Drehteller (**7**) montiert sind, wobei der Drehteller (**7**) zur Anode (**5**) axial zentriert ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Substratträger (**6**) drehbar sind.
5. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß sie n Kathoden (**3**) aufweist, mit $n = 2, 4, 6, B$.
6. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß sie $2n + 1$ Kathoden (**3**) aufweist, mit $n = 1, 2, 3$.
7. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kathoden (**3**) unbalancierte Magnetrons sind.
8. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kathoden (**3**) balancierte Magnetrons sind.
9. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kathoden (**3**) eine runde Form aufweisen.
10. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kathoden (**3**) eine rechteckige Form aufweisen.
11. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Anode (**5**, **5'**) eine teleskopartige Konstruktion aufweist.
12. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Anode (**5**) mit einer Kühlvorrichtung ausgestattet ist.
13. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Anode (**5**) aus rostfreiem Stahl besteht.
14. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Anode (**5**) aus Graphit besteht.

15. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Anode (5) aus metallummanteltem, insbesondere aus stahlummanteltem Graphit besteht.
16. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Beschichtungskammer (2) mit einer seitlich angeordneten Vakuumschleuse oder Vakuumtür zur horizontalen Be- und Entladung der Substrate (4) ausgestattet ist.
17. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Beschichtungskammer (2) mit einem Rezipient (9) zur Aufnahme der Anode (5) ausgestattet ist.
18. Vorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Rezipient (9) mit einer Vakuumschleuse ausgerüstet ist.
19. Verfahren zur homogenen PVD-Beschichtung von Substraten (4), dadurch gekennzeichnet, daß zwischen einer einzelnen Anode (5) und mehreren Kathoden (3) jeweils eine Gasentladung mit einem Plasma (14) gezündet wird und daß die Substrate (4) während der Beschichtung den Plasmen (14) ausgesetzt werden.
20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß in jedem Plasma (14) der Ionenbeschuß der freistehenden, dem Plasma (14) ausgesetzten Oberfläche der Substrate (4) kathoden- und anodenseitig eine mittlere Stromdichte von 0,2 bis 8,0 mA/cm², bevorzugt von 0,2 bis 5,0 mA/cm² und insbesondere von 1,0 bis 3,0 mA/cm² aufweist.
21. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Substrate (4) während der PVD-Beschichtung stationär sind oder auf einer um die Anode (5) zentrierten Kreisbahn zwischen der Anode (5) und den Kathoden (3) umlaufen.
22. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Substrate (4) auf einer um die Anode (5) zentrierten Kreisbahn zwischen der Anode (5) und den Kathoden (3) umlaufen und simultan um vertikale, auf der zentrierten Kreisbahn mitgeführte Achsen rotieren.
23. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß von den mit elektromagnetischen Spulen (12) ausgestatteten Kathoden (3) ein zylinderartiger Magnetfeld-Käfig mit rotationsymmetrischer Feldverteilung und im wesentlichen horizontalen Feldkomponenten erzeugt wird und daß der Magnetfeld-Käfig die Plasmen (14) im Inneren der Beschichtungskammer (2) und beabstandet von der Wand der Beschichtungskammer (2) einschließt.
24. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß an die Anode (5) ein Potential von +20 bis +200 V, bezogen auf Massepotential, angelegt wird.
25. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß an die Substrate (4) ein Potential von 0 bis -1000 V, bezogen auf Massepotential, angelegt wird.
26. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Substrate (4) elektrisch isoliert sind und ein floatendes Potential annehmen.
27. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß an die Kathoden (3) ein Potential von -50 bis -1000 V, bezogen auf Massepotential, angelegt wird.
28. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die PVD-Beschichtung in einer Atmosphäre erfolgt die mindestens eines der Gase Argon, Helium, Neon, Sauerstoff, Stickstoff, oder Acetylen enthält.
29. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß der Druck in der Beschichtungskammer (2) 10⁻³ bis 0,1 mbar beträgt.

Es folgen 12 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

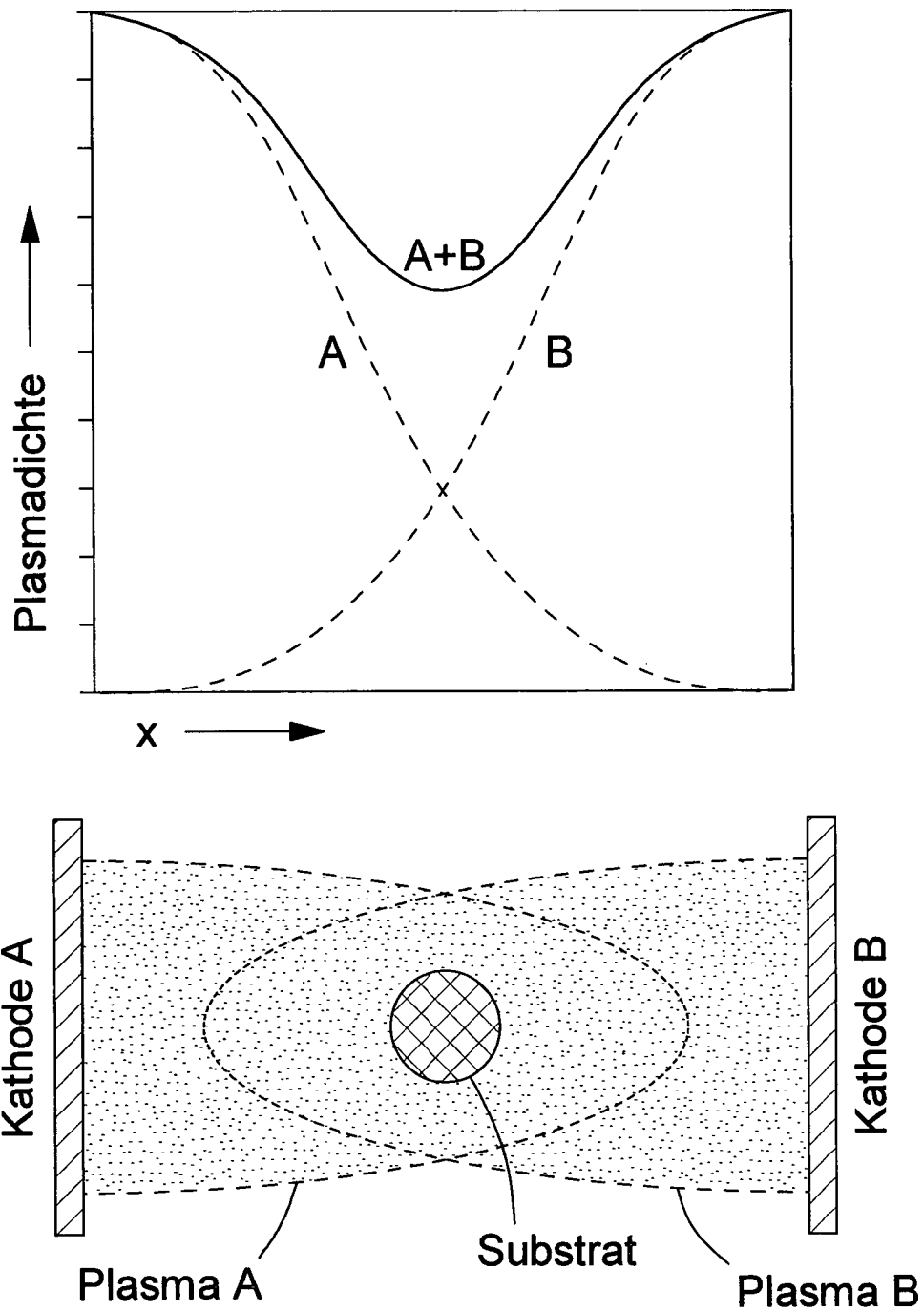


Fig. 1

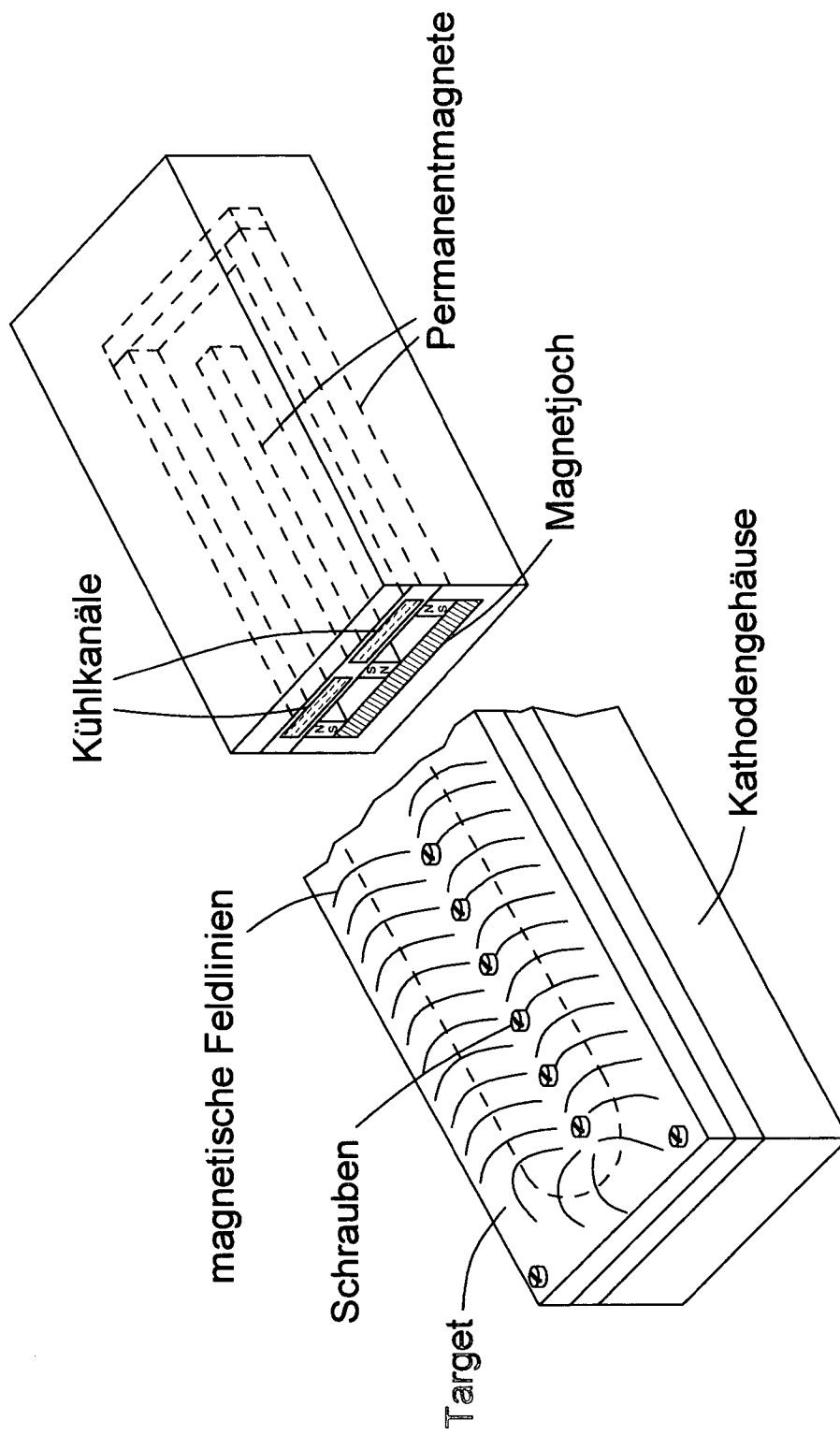


Fig. 2a

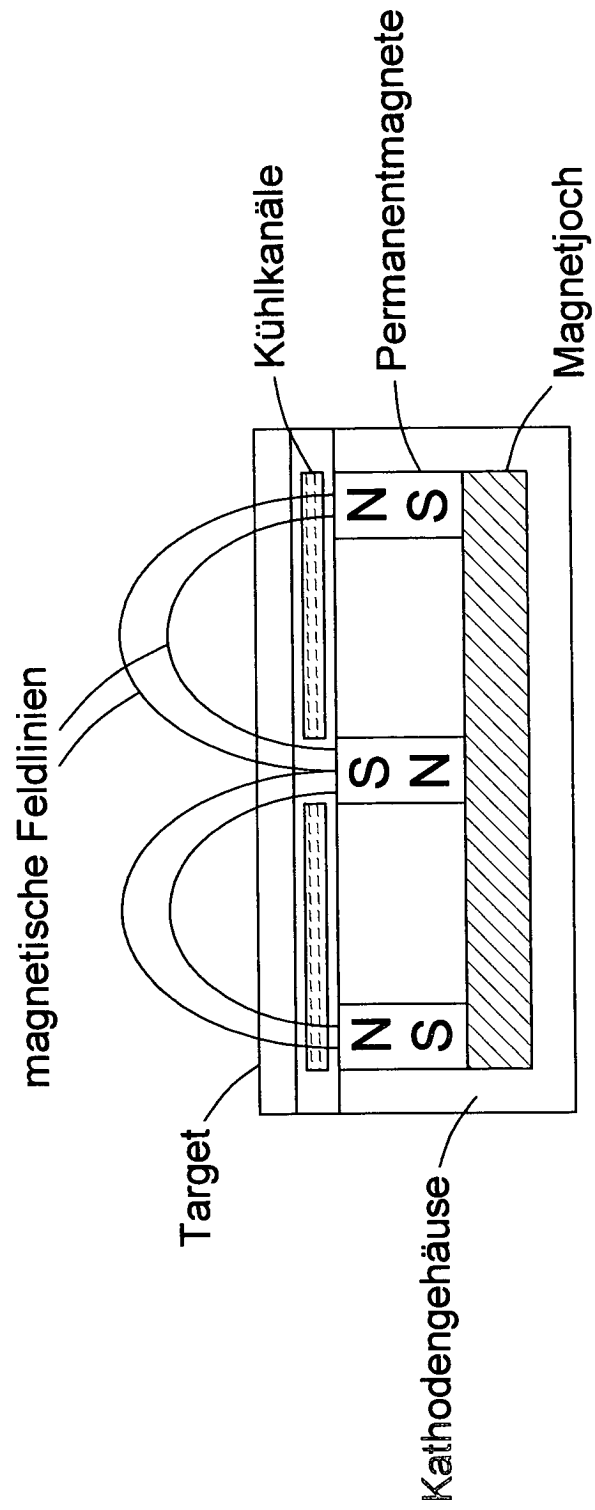


Fig. 2b

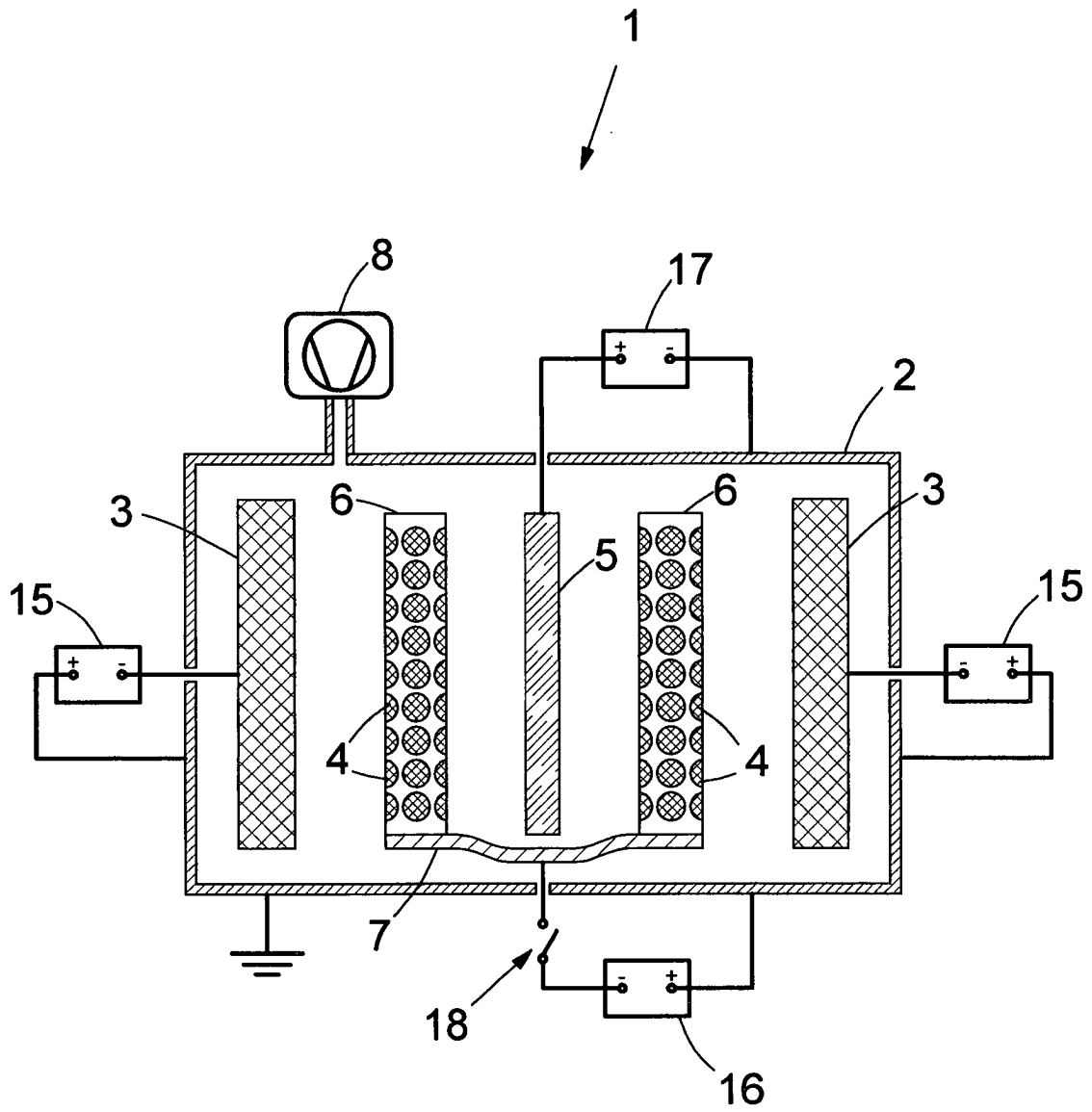


Fig. 3

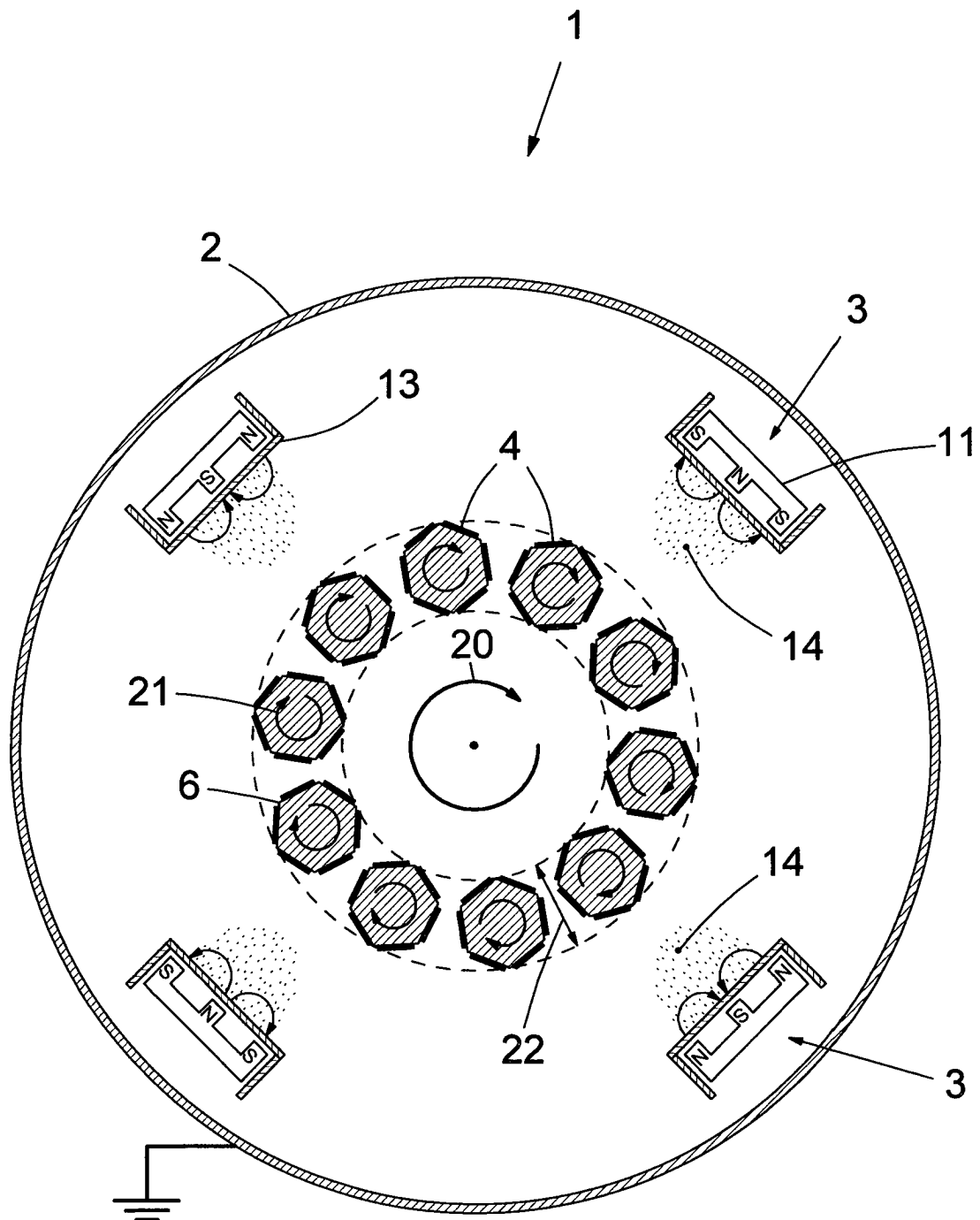


Fig. 4a

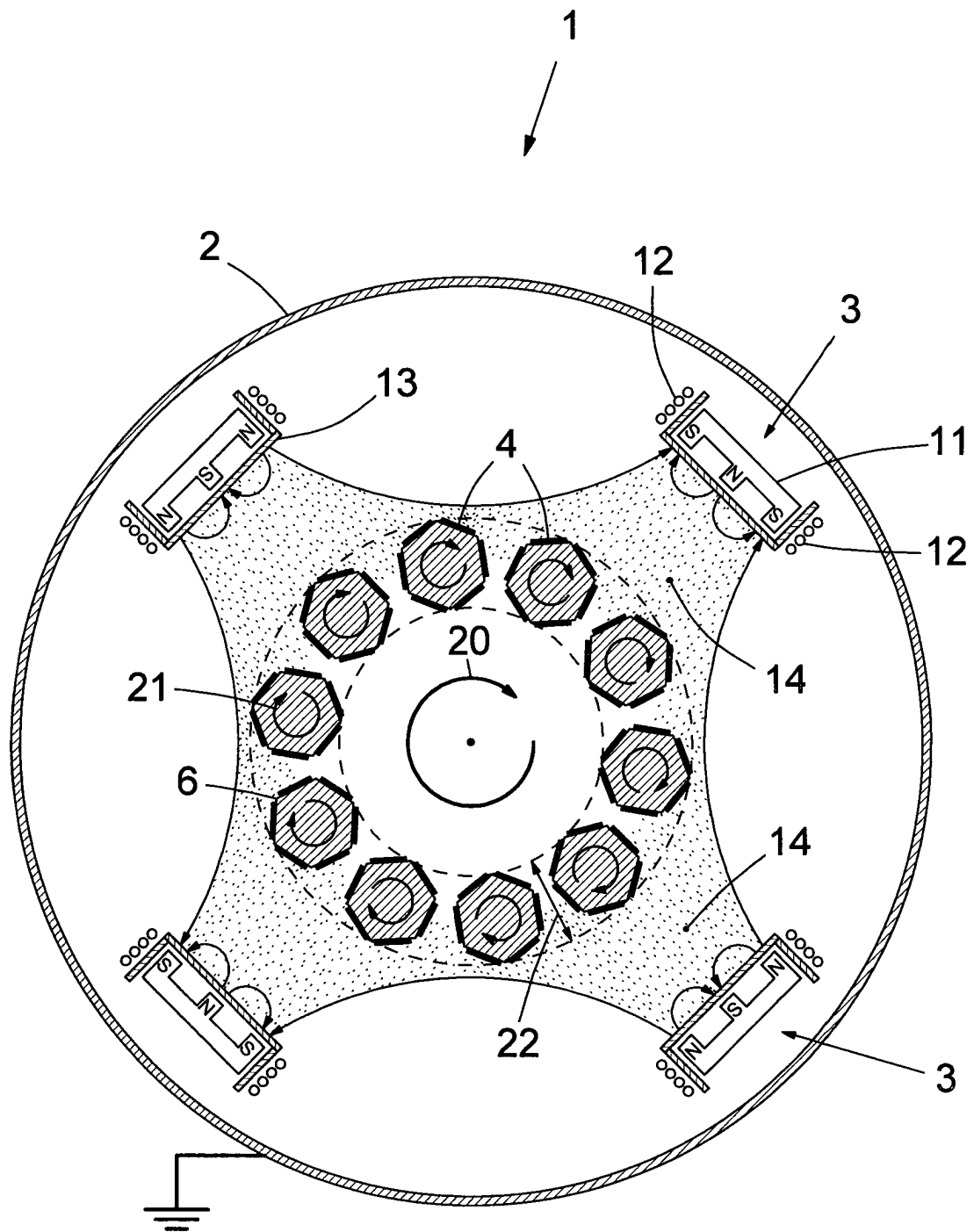


Fig. 4b

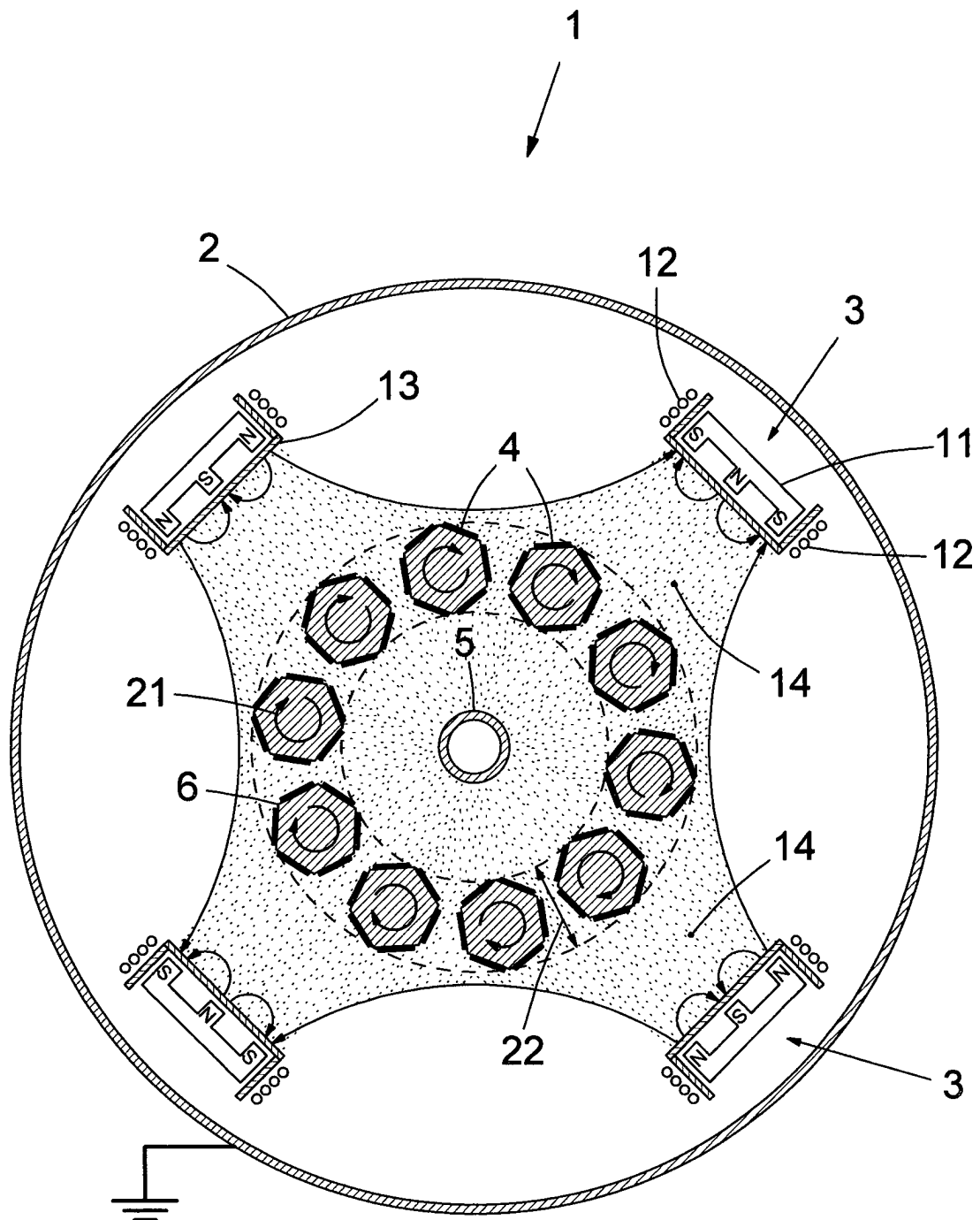


Fig. 4c

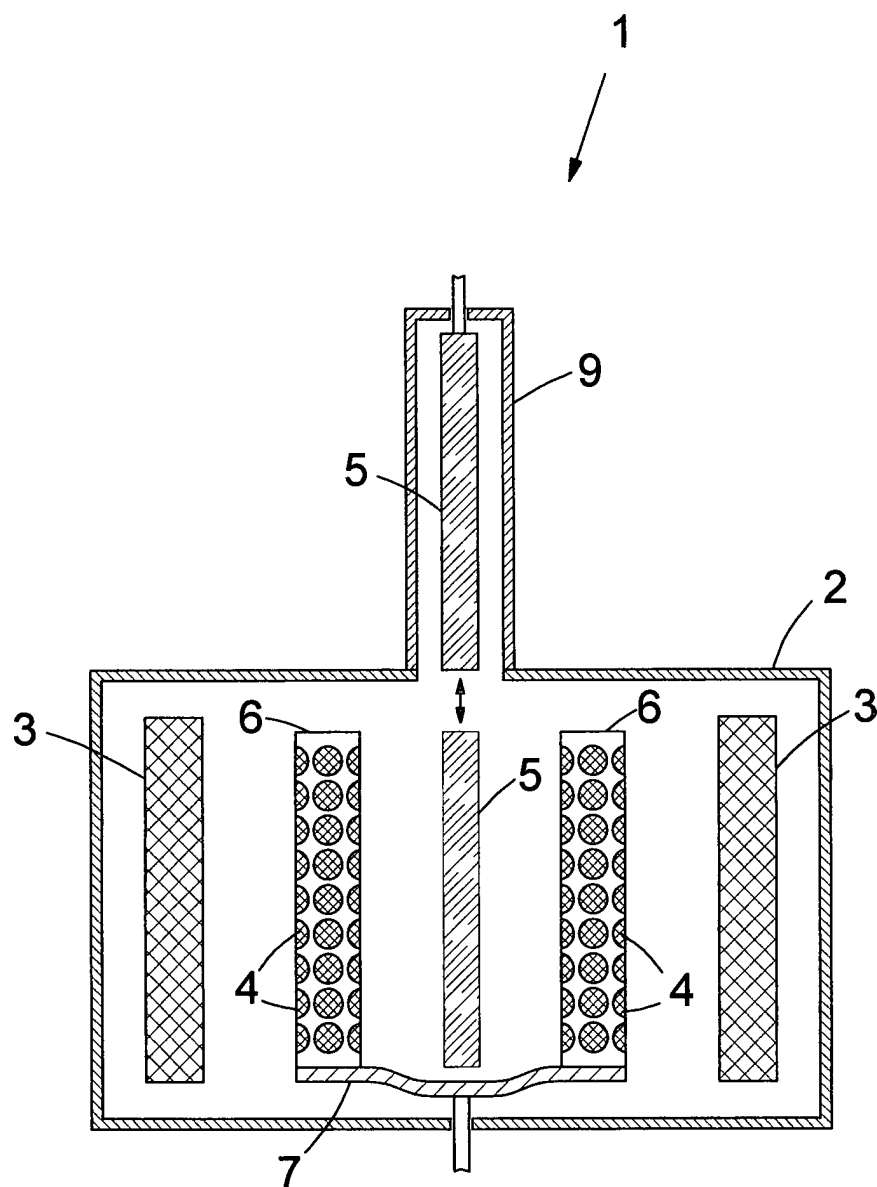


Fig. 5a

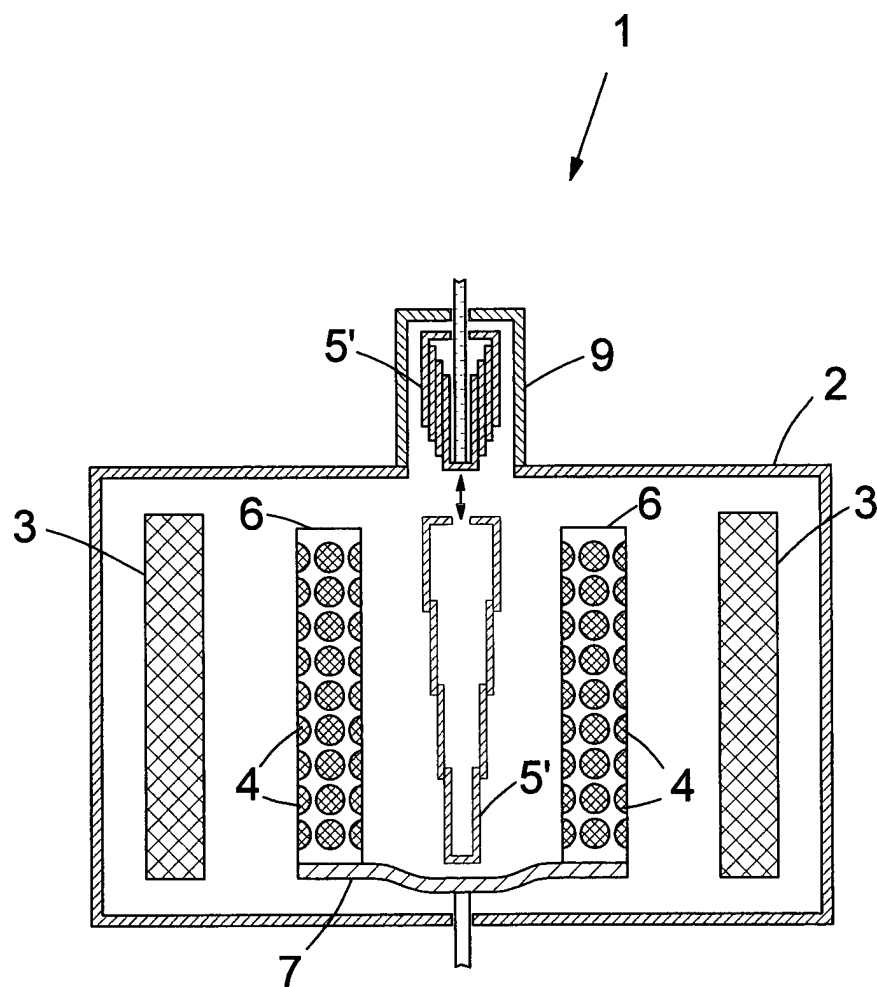


Fig. 5b

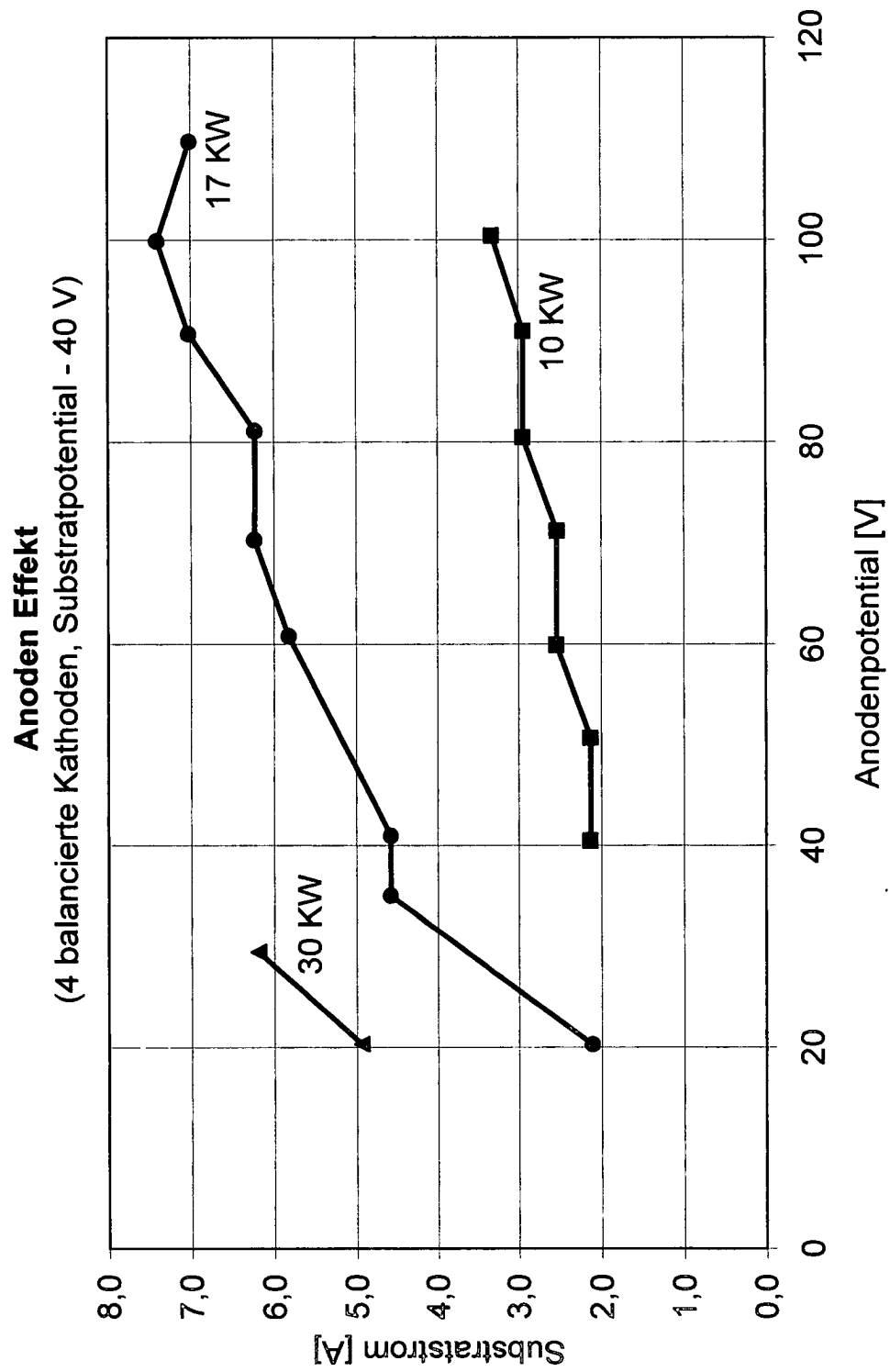


Fig. 6a

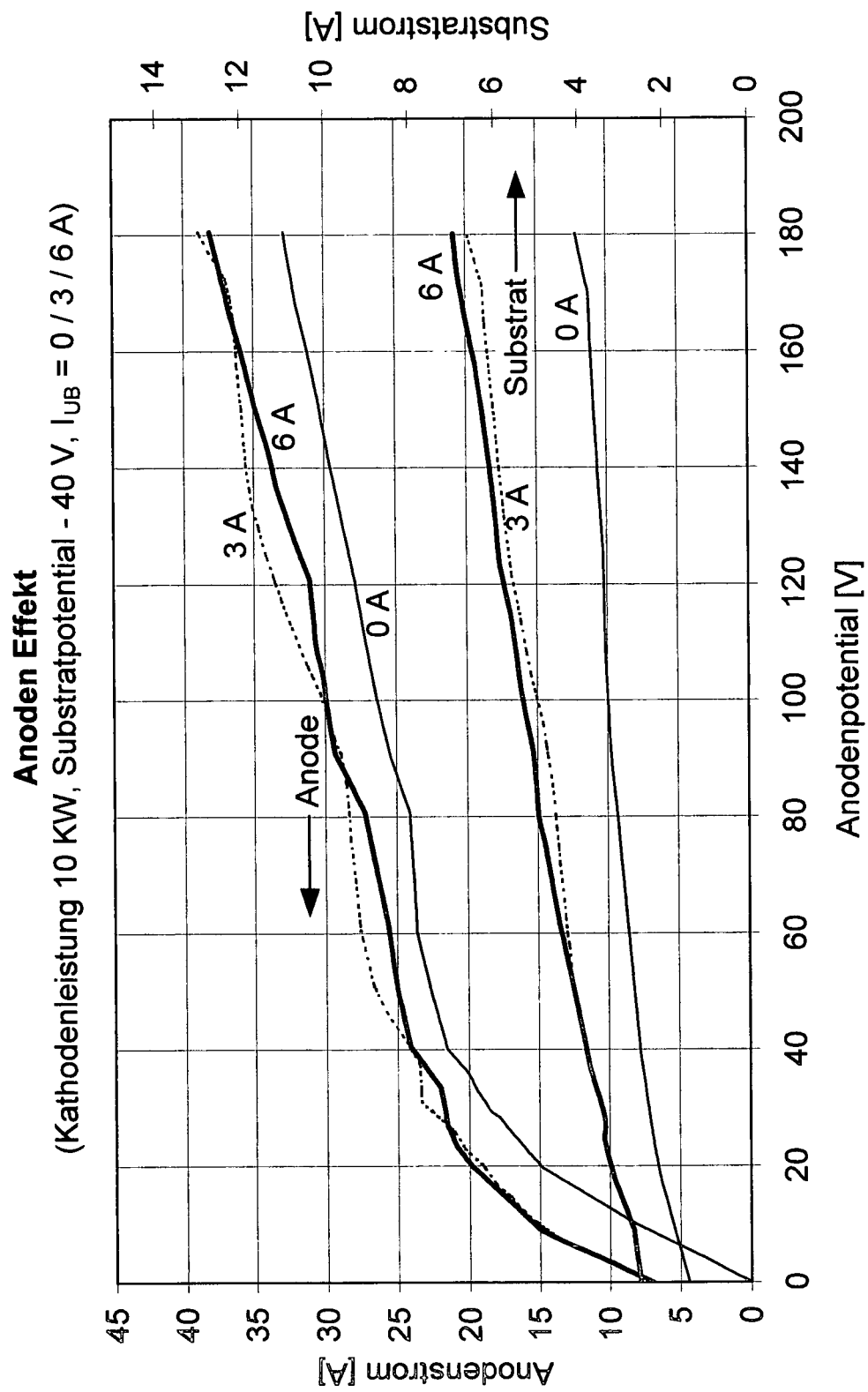


Fig. 6b

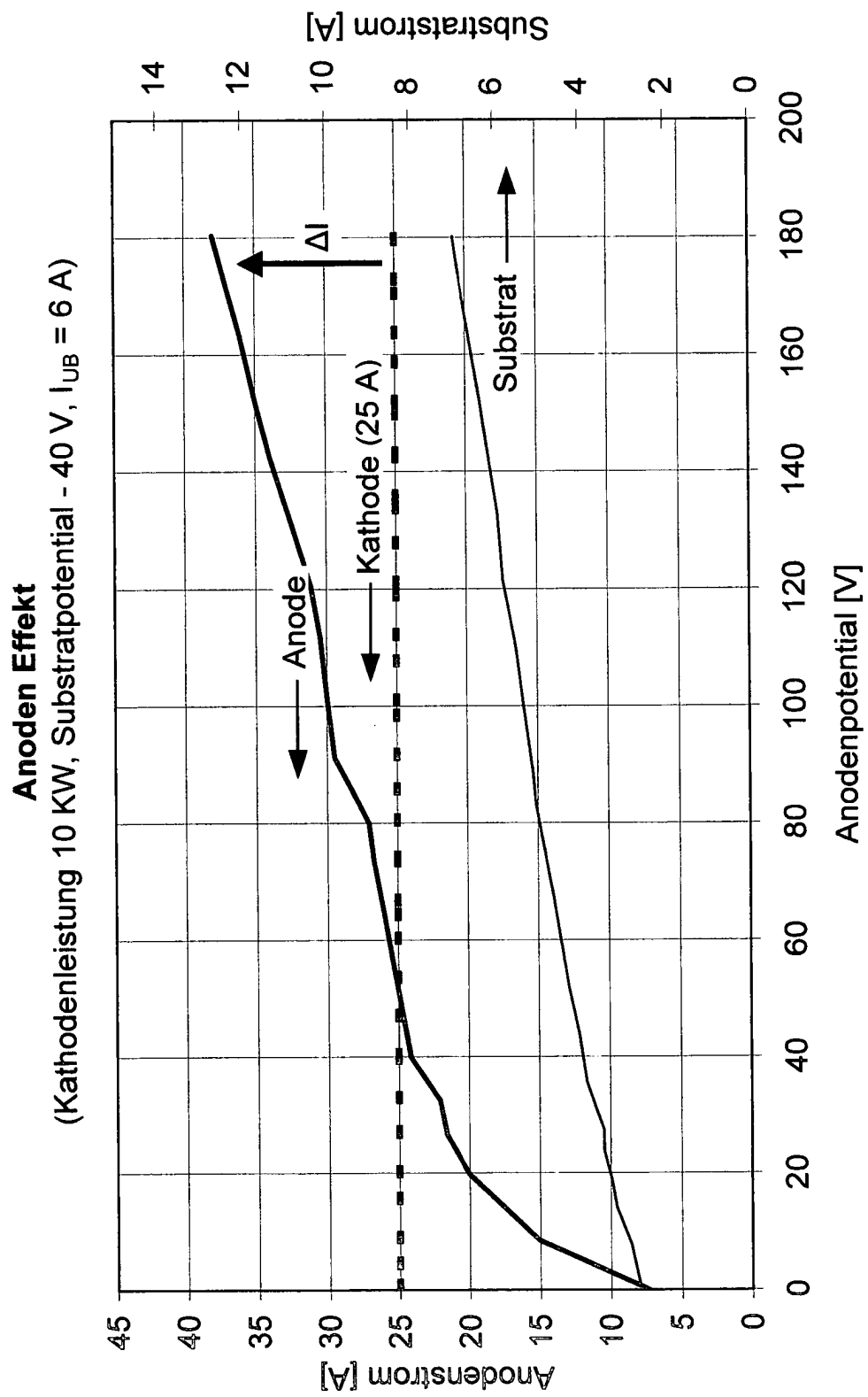


Fig. 6c