



18 **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

12 **Offenlegungsschrift**
10 **DE 100 32 955 A 1**

51 Int. Cl.⁷:
H 05 H 1/46
B 01 J 19/08
// B82B 1/00

21 Aktenzeichen: 100 32 955.1
22 Anmeldetag: 6. 7. 2000
43 Offenlegungstag: 24. 1. 2002

DE 100 32 955 A 1

71 Anmelder:
Roth & Rau Oberflächentechnik GmbH, 09358
Wüstenbrand, DE

72 Erfinder:
Roth, Dietmar, Dr., 09358 Wüstenbrand, DE;
Schlemm, Hermann, Dr., 07743 Jena, DE; Gericke,
Karl-Heinz, Prof., 38102 Braunschweig, DE;
Schmidt-Böcking, Horst, Prof., 65779 Kelkheim, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Anordnung zur grossflächigen Erzeugung von Hochfrequenz-Niedertemperatur-Plasmen bei Atmosphärendruck

57 Eine Anordnung zur Erzeugung eines großflächigen Hochfrequenz-Niedertemperaturplasmas bei Atmosphärendruck auf oder in flächenförmigen Elektrodensystemen, die typische Elektrodenabstände von 0,05 bis 1 mm aufweisen und die zur Erzeugung des Plasmas mit Hochfrequenzanpassungsnetzwerken zur Anpassung und Verteilung der Hochfrequenzleistung im Elektrodensystem ausgestattet sind.

Mit einem Hochfrequenzplasma bei Atmosphärendruck können leistungsfähige Niedertemperaturplasmen aus Edelgasen und reaktiven (z. B. beschichteten oder ätzenden) Gasen erzeugt werden, die für Dünnschichtprozesse mit hohen Beschichtungs- oder Abtragsraten sowie zur Oberflächenmodifizierung oder Erzeugung von Nano-Partikeln verwendet werden können.

DE 100 32 955 A 1

Beschreibung

Anwendungsgebiet

[0001] Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur Erzeugung eines Niedertemperaturplasmas mittels einer Hochfrequenz-Gasentladung gemäß der Gattung der Patentansprüche und ist insbesondere in plasmagestützten Dünnschichtverfahren sowie bei der Oberflächenmodifizierung von Materialien verwendbar.

Stand der Technik

[0002] Bereits in den 30-er Jahren wird neben den bereits bekannten Corona- und Barriereentladungen die Möglichkeit des Erzeugens einer Glimmentladung bei vergleichsweise hohen Gasdrücken zwischen 10 und 1000 mbar beschrieben. Es wird gezeigt (A. v Engel, M. Steenbeck, "Elektrische Gasentladungen", Bd. I und II, Springer Verlag Berlin, 1932 und 1936, und von Engel, A.; Seeliger, R.; Steenbeck, M.; Zeitschrift für Physik (1933) vol. 85, 144-160,) daß selbst bei Atmosphärendruck eine Glimmentladung mit Gleichstrom gezündet werden kann, wenn der Abstand der Elektroden der bekannten Ähnlichkeitsbeziehung $p \cdot d = \text{const.}$ genügt (p - Gasdruck, d - Elektrodenabstand). Es wird gezeigt, daß bei Elektrodenabständen von einigen Zehntel Millimeter auf vergleichsweise geringen Flächen von einigen Quadratmillimetern ein Niedertemperaturplasma mit typischen Brennspannungen von 300-600 V gezündet werden kann. Beträchtliches Augenmerk ist auf die extrem hohe Wärmebelastung der Elektroden zu legen, weshalb mit atmosphärischer Luft nur Elektrodenflächen von ein paar Quadratmillimetern untersucht werden.

[0003] Neben diesen atmosphärischen DC-Plasmen gab es zu Beginn des 20. Jahrhunderts bereits einige Aktivitäten zur Erzeugung von Hochfrequenz-Plasmen mit vergleichsweise hohen Spannungen. Hochfrequenz-Funkenentladungen an atmosphärischer Luft wurden vor dem Siegeszug der Elektronenröhren ab etwa 1920 zum Anregen der Schwingkreise von Funkseidern eingesetzt (Löschfunkensender).

[0004] Vor allem mit dem Entstehen der Halbleitermikroelektronik und dem damit hervorgerufenen Bedarf an Dünnschichtverfahren entsteht ein außerordentlich breites Feld von Anwendungen von Niedertemperaturplasmen im Fein- und Hochvakuumbereich. Plasmaverfahren basierend auf dem ausgereift untersuchten Niedertemperaturplasma wie Plasma CVD, Plasmaätzen oder Plasmapolymersation erreichen als Dünnschichttechnologien in Vakuumanlagen eine außerordentliche wissenschaftliche und industrielle Reife.

[0005] Mit dem Ende des 20. Jahrhunderts entstehen sowohl aus der Halbleitermikroelektronik als auch aus dem Vordringen dieser Plasma-Dünnschichttechnologien in neue Märkte wie Medizintechnik, Photovoltaik, Mikrosystemtechnik oder Neue Materialien und Werkstoffe die Forderung nach kostengünstigeren und produktiveren Verfahren. Beides könnten Atmosphärendruck-Plasmaverfahren liefern, wenn sie von der physikalischen Grundlage und der technischen Nutzung her einsetzbar gemacht werden.

[0006] Vor diesem Hintergrund wurden ältere Arbeiten zu Corona- und Barriere-Entladungen einer erneuten Prüfung unterzogen und an dieses neu gesteckte Ziel atmosphärischer Plasmatechnik angepasst. Arbeiten wie (K. Pochner, S. Beil, H. Horn, M. Blömer, Surf. Coatings Technology 97 (1997) 372-377, Barriereentladung) oder (R. Thyen, A. Weber, C.-P. Klages, Surf. Coatings Technology, 97 (1997) 426-434, Coronaentladung) zeigen Möglichkeiten des Ein-

satzes dieser Verfahren in der Dünnschichttechnologie bei Atmosphärendruck.

[0007] Die zum Erzeugen eines atmosphärischen Niedertemperaturplasmas notwendige elektrische Feldstärke von mehr als 1 kV/mm kann auch durch induktiv gekoppelte Plasmen eingebracht werden. Möglichkeiten hierzu werden z. B. in (Paul, K. C., Hatazawa, S., Takahashi, M., Thin Solid Films, Vol. 345, (1999) 134) gezeigt.

[0008] Dem Problem der Leistungsbelastung der Elektroden vor allem bei atmosphärischen DC-Plasmen kann auch mit strömungstechnischen Mitteln begegnet werden (Jet-Plasmen). Z. B. in (Babayan, S. E., Jong, J. Y., Tu, V. J., Plasma Sources, Science and Technology (1998), vol. 7, 286) oder (Jeong, J. Y., Babayan, S. E., Tu, V. J., Plasma Source, Science and Technology (1998) Vol. 7, 282,) werden atmosphärische Jet-Plasmen beschrieben, die neben der Erzeugung mit DC auch mit Hochfrequenz oder Mikrowellengeneratoren betrieben werden können. Für die Jet-Plasmen ist ein verhältnismäßig geringer Durchmesser von 1-10 mm kennzeichnend, weshalb zur Bearbeitung von Flächen in industriellen Masstäben Bewegungsanordnungen für den Jet oder Multiple Jet Anordnungen untersucht werden.

[0009] In der chemischen massenspektroskopischen Analytik benötigen Massenspektrometer eine Ionen erzeugende Quelle, die auf einem Plasmaprinzip basieren kann. Besonders hohe Nachweisempfindlichkeiten können erreicht werden, wenn die Ionenquelle bei atmosphärischem Druck betrieben wird. Hierzu werden typischerweise sehr kleine (Durchmesser kleiner 10-20 mm) HF-Plasmen (Blades, M. W., Spectrochimica Acta, Part B, (1994), vol. 49B, 47) oder ICP-Plasmen (Girshick, S. L., Yu. W. Plasma Chemistry and Plasma Processing (1990), vol. 10, 515) oder (Ishigaki, T.; Xiabao Fan; Sakuta, T.; Banjo, T.; Shibuya, Y.; Appl. Phys. Letters (1997), vol. 71, 3787) verwendet.

[0010] Einen generell anderen Anspruch mit dem Hintergrund großflächiger Nutzung stellt sich dagegen die Patentanmeldung (K. H. Gericke, H. Schmidt-Böcking, Deutsches Patent, DE 196 05 226 A1, (1996)) wieder basierend auf dem vergleichsweise alten $p \cdot d = \text{konst.}$ Skalierungsgesetz atmosphärischen DC-Plasmen in $p \cdot d$ -skalierten Elektrodenanordnungen, die mit der jetzt verfügbaren Mikrosystemtechnik billig und großflächig erzeugbar sind. Mikrostrukturelektroden zur Plasmerzeugung werden z. B. auch in (Stark, R. H.; Schoenhach, K. H.; in International Conference on Plasma Science (Cat. No.: 98CH36221) New York, NY, USA, IEEE, 1998, 241) erwähnt.

[0011] Ähnliche Anordnungen von Elektroden werden in den Patenten von J. R. Roth (Roth, J. R.; US-Patent US 5669583 (1997)) zur technischen Anordnung der Elektrodenysteme und in (Roth, J. R.; Patent WO 9638311 (1997)) und (Laroussi, M.; Liu, C.; Roth, J.; Spence P. D.; Tsai, P.; Wadsworth, L. C.; Roth, J. R.; Tsai, P. P.; Patent WO 9428568) zur Anwendung dieser Elektrodenysteme vorrangig zur Oberflächenmodifizierung von Polymeren vorgeschlagen. Diese ($p \cdot d$)-skalierten Kammstrukturen von Elektrodenystemen werden mit Gleichspannungen oder mit im amerikanischen Sprachgebrauch bereits als Hochfrequenz bezeichneten Frequenzen von 0.1 bis 30 kHz betrieben.

[0012] Mit den so gezeigten Möglichkeiten kammartig ineinander geschachtelter und wieder ($p \cdot d$)-skalierten Elektrodenstrukturen konnte der Durchbruch in der industriellen Anwendung jedoch nicht erreicht werden, weil der Wärmeeinstrom auf die das Niedertemperaturplasma erzeugenden Elektroden bei Atmosphärendruckplasmen nicht beherrscht wird. Der Einsatz von Hochfrequenz (1-100 MHz) wurde an ($p \cdot d$)-skalierten Elektrodenstrukturen bisher nicht unter-

sucht.

Nachteile des Standes der Technik

[0013] Eine dem Stand der Technik entsprechende Plasmaanlage ist dadurch gekennzeichnet, daß in einer Vakuumkammer bei einem Gasdruck zwischen 0.01 und 10 mbar ein Plasma durch Anlegen von Gleich-, Niederfrequenz-, oder Hochfrequenzspannungen an Elektroden erzeugt wird. Die Vakuumkammer muß dabei so aufgebaut sein, daß sie die Kräfte des darauf einwirkenden Atmosphärendrucks aushält. Dies führt bei größeren industriellen Plasmaanlagen dazu, daß ein beträchtlicher Teil der gesamten Ausrüstungskosten auf das Vakuumsystem entfallen (mehr als 50% der Gesamtkosten möglich).

[0014] Während Plasmaanlagen zum Bearbeiten von Kleinserien noch traditionell mit den zu bearbeitenden Gegenständen bei belüftetem Zustand beschickt werden und dann in Zeiten zwischen 0.5 und 60 min das erforderliche Prozeßvakuum durch Abpumpen der Vakuumkammer erzeugt wird, wird bei größeren industriellen Plasmaanlagen mit Vakuumschleusen zum Ein- und Ausbringen der zu bearbeitenden Gegenstände gearbeitet. Diese Schleusen sind teuer und aufwendig, da darin befindliche mechanische Handhabungstechnik speziell den Vakuumanforderungen angepaßt werden muß.

[0015] Die gesamte Technologiestrecke zum Herstellen eines Produkts mit hohem Dünnschichttechnologieanteil, wie z. B. mikrosystemtechnische Bauelemente, Solarzellen oder Sensoren besteht aus einem großen Anteil von atmosphärischen Bearbeitungsstationen, an die die im Vakuum stattfindende Plasmatechnologie dann mittels Übergangselementen (wie z. B. Schleusen) angepasst werden muß.

[0016] Aus allen diesen Überlegungen folgt, daß besonders für die industrielle Produktion Atmosphärendruckplasmaanlagen beträchtliche Vorteile bringen. Forschungsarbeiten zu Corona-Entladungen oder Barriere-Entladungen sind die bisher in dieser Hinsicht am weitesten gediehenen Entladungsformen. Diese Entladungen werden auf in der Regel kleineren Flächen bis hin an atmosphärischer Luft direkt erzeugt und erreichen z. B. mit Anordnungen bei denen das relativ kleine Plasma über größere Flächen mechanisch bewegt wird, ausreichende Produktivität für z. B. die industrielle Polymeroberflächenmodifizierung. Der Nachteil dieser Plasmen besteht darin, daß in diesen Plasmen eine Vielzahl von vergleichsweise hochenergetischen Plasmaprozessen ablaufen (z. B. Teilcoronaentladungen, Sparks, Streamer), die mit den damit verbundenen hohen und sehr inhomogen verteilten Ladungsträgerenergien einen negativen, bis zur Zerstörung reichenden Einfluß auf Dünnschichtsysteme haben. Für Dünnschichtprozesse wie Plasmaätzen oder Plasmabeschichtung, die als wesentlichen Prozessparameter eine definierte Ionenenergie (eingestellt durch die Self-Biasspannung des erzeugten HF-Plasmas) erfordern, sind diese atmosphärischen Plasmen daher nicht anwendbar.

[0017] Produktive industrielle Plasmaanlagen sollen Abtrags- oder Beschichtungsraten im Bereich von einigen $\mu\text{m}/\text{min}$ aufweisen (Hochrateprozesse). Um dies zu erreichen, ist bei Plasmen im mbar-Bereich eine bis an die Grenzen gehende Optimierung von plasmaphysikalischen und plasmachemischen Parametern notwendig, die gegebenenfalls mit Kompromissen bzgl. weiterer Plasma- und Prozessparameter erkaufte werden müssen.

[0018] (p · d)-skalierte Elektrodensysteme, betrieben bei hohem oder atmosphärischem Druck ermöglichen nach ersten Versuchen hohe für industrielle Masstäbe erfolgversprechende Abtrags- und Beschichtungsraten. Werden sie mit Gleich- oder Niederfrequenzspannungen (< 100 kHz)

betrieben, führt die hohe Wärmebelastung durch das erzeugte stromstarke Plasma zu schwer beherrschbaren Standortproblemen an den Elektrodenstrukturen. Werden diese Elektrodensysteme mit Hochfrequenzspannungen betrieben, ist die Wärmeleistungsbelastung geringer aber es können nur Plasmaflächen von einigen Quadratzentimeter Elektrodenfläche aufgrund der hohen Lastkapazität der Anordnung erzeugt werden, wenn konventionelle Hochfrequenzgeneratoren und Anpassungsnetzwerke verwendet werden.

Aufgabe der Erfindung

[0019] Aufgabe der Erfindung ist es daher eine Anordnung zu schaffen, die eine Hochfrequenzgasentladung zum Einsatz in Plasmaanlagen bei Atmosphärendruck ermöglicht und die langzeitstabil zur Bildung eines Plasmas sowohl aus Edelgasen als auch aus molekularen Gasen eingesetzt werden kann. Es sollen insbesondere im Plasma Ladungsträger- und Radikaldichten im Bereich von 10^{11} bis 10^{14} cm^{-3} erzeugt werden, die hohe auf ein zu bearbeitendes Substrat zu leitende Plasma- oder Teilchenströme ermöglichen. Die auf Substrate eintreffenden Ladungsträger speziell die Ionen sollen eine mittels Hochfrequenzentladungs-Plasmaparameter (Self-Biasspannung) beeinflussbare Teilchenenergie (kleiner 1 keV) haben. Ihre Verteilung im Gas und auf dem zu bearbeitenden Substrat soll im mikroskopischen Massstab homogen sein und nicht Plasmastabilitäten wie z. B. Streamer aufweisen. Durch die im Vergleich zu Plasmen im mbar-Bereich um bis zu drei Größenordnungen höheren Teilchendichten werden Beschichtungs- und Abtragsraten im Bereich von 1–10 $\mu\text{m}/\text{min}$ und mehr als typische mittlere nicht optimierte Werte erzielt.

[0020] Werden Hochfrequenzplasmen bei Atmosphärendruck mit Elektrodensystemen erzeugt, haben die Elektroden kleine Abstände, die etwa im Bereich von 0.1 mm liegen. Dadurch sind, besonders wenn die Elektrodenanordnungen großflächig sein sollen, Lastkapazitäten dieser Anordnung bedingt, die die Anpassungsmöglichkeiten von konventionellen Hochfrequenznetzwerken auf der Basis eines Pi-Filters weit überschreiten können. Neben der Lösung der oben beschriebenen Aufgaben durch prinzipielle Anwendung des Hochfrequenzplasmas besteht die Aufgabenstellung für die erfindungsgemäße Lösung darin, daß Elektrodenanordnungen und darin oder daran angeschlossene Hochfrequenznetzwerkkomponenten so aufgebaut werden, daß großflächige Hochfrequenzplasmen in Elektrodenanordnungen erzeugt werden können, die mit konventionellen Pi-Filteranordnungen als Anpassungsnetzwerk nicht mehr betreibbar wären.

Lösung der Aufgabe

[0021] Gemäß der Erfindung wird diese Aufgabe durch die kennzeichnenden Merkmale des ersten Patentanspruchs gelöst. Durch die erfindungsgemäße Anordnung und elektrische Beschaltung wird erreicht, daß Plasmaquellen aufgebaut werden können, die bei Bewahrung wichtiger Vorteile von Hochfrequenzentladungen wie steuerbare Ionenenergie, leistungsfähige Atmosphärendruckplasmen mit industriell nutzbaren Standzeiten aufgebaut werden können.

[0022] Bei der erfindungsgemäßen Lösung wird ein Niedertemperaturplasma bei Atmosphärendruck zwischen Elektroden erzeugt. Für die Bemessung des Abstands der Elektroden gilt das aus der Plasmatechnik im mbar-Druckbereich bekannte Ähnlichkeitsgesetz $p \cdot d = \text{konst}$, wobei p den Gasdruck im Plasma und d den Abstand der Elektroden darstellt. Auf Atmosphärendruck angewendet ergeben sich so Elektrodenabstände in Abhängigkeit von der Gasart zwi-

schen 0,05 und etwa 1 mm.

[0023] An die Elektroden wird eine Hochfrequenzspannung mit einer Amplitude von 100–500 V_e angelegt, so daß das Plasma im Elektrodenspalt zündet und je nach Art des Gases und der sich ergebenden Plasmaparameter sich weiter über die umgebenden Elektroden ausbreitet.

[0024] Bei dem so erzeugten Atmosphärenplasma sind die Teilchendichten der Neutralgase, Radikale und Ladungsträger um mehrere Größenordnungen gegenüber bekannten mbar-Plasmen gesteigert. Das hat zur Folge, daß die Stromdichte der Ladungsträger auf die Elektroden ebenfalls um mehrere Größenordnungen gesteigert ist, was eine bis an die thermische Belastungsgrenze der Elektroden gehende Wärmebelastung zur Folge hat. Wird ein DC-Plasma zwischen den Elektroden erzeugt, beträgt die Ionenenergie auf der Kathode 100–500 eV, was verbunden mit der hohen Ionenstromdichte zu einem die Elektrode zerstörenden Leistungseintrag führen kann. Bei Hochfrequenzplasmen ist die Energie der auf die Elektroden auftreffenden Ionen durch die sich aufbauende Bias-Spannung bestimmt und im Vergleich zu DC-Plasmen um ein bis zwei Größenordnungen kleiner. Deshalb werden vorteilhaft Hochfrequenzspannungen mit Frequenzen zwischen 1–300 MHz zum Erzeugen von Atmosphärenplasmen an die Elektroden angelegt, wenn die Elektroden größere Flächen mit langen Plasmabetriebszeiten für industriellen Einsatz darstellen sollen. Um größere Plasmaflächen zu erzeugen, werden statt zwei Elektroden Gruppen von sich paarweise mit dem geforderten Abstand gegenüberstehenden Elektroden als Elektrodensysteme aufgebaut, an die jeweils die Hochfrequenzspannung angelegt wird. Der Rand der Elektrodensysteme am Plasmaspalt kann geradenförmig sein oder auch mit einem sich periodisch wiederholenden Muster gestaltet sein. Der Abstand der Elektroden kann im Elektrodensystem unterschiedlich oder vorteilhafterweise gleich sein.

[0025] Die Elektrodensysteme können aus einzelnen mechanisch hergestellten Elektroden und dazwischen befindlichen Isolatoren zusammengesetzt werden oder als strukturiertes Schichtsystem auf einem isolierenden Träger aufgebracht sein. Die aus einem elektrisch gut leitfähigen Material hergestellten Elektroden können mit einer isolierenden Schicht bis etwa 10 µm Dicke versehen sein, um beim Einsatz reaktiver Gase gegen plasmachemischen Abtrag inerte Elektrodensysteme zu erzeugen.

[0026] Um den Ausgang eines Hochfrequenzgenerators leistungsangepasst und auf die Betriebsfrequenz abgestimmt an die Impedanz der Elektrodenanordnung mit dem erzeugten Plasma anzuschließen, wird ein Hochfrequenzanpassungsnetzwerk zwischen Generator und Elektrodensystem geschaltet. Sollen größere industriell nutzbare Elektrodensysteme so betrieben werden, kann die Impedanz des Elektrodensystems außerhalb des Anpassungsbereichs einen Hochfrequenznetzwerks liegen. Zur erfindungsgemäßen Lösung dieses Problems gibt es mehrere Wege:

- 1) Unterteilung der gesamten Plasmaanordnung in Gruppen, die jeweils mit einem separaten Hochfrequenznetzwerk und Generator versehen sind, so dimensioniert, daß jede Gruppe hochfrequenztechnisch anpassbar ist.
- 2) Unterteilung der gesamten Plasmaanordnung in Gruppen, die mit vorteilhafterweise in oder an der Elektrodenanordnung integrierten Zwischennetzwerken ausgestattet sind, die die dann an einem Hauptanpassungsnetzwerk zusammenzuführenden Teilimpedanzen so verändern, daß die Gesamtimpedanz der Anordnung am Hauptanpassungsnetzwerk im Anpassungsbereich liegt.

[0027] Die Zuführung der Hochfrequenzspannung über diese Netzwerke kann asymmetrisch oder symmetrisch bzgl. Masse erfolgen (asymmetrische oder symmetrische Netzwerke).

Vorteile der Erfindung

[0028] Durch die erfindungsgemäße Anordnung werden großflächige Plasmaquellen geschaffen, die bei Bewahrung der Vorteile von konventionellen Hochfrequenzgasentladungen für die Dünnschichttechnik, im Atmosphärendruckbereich arbeitende Plasmaquellen ergeben. Durch die erfindungsgemäße Anordnung der Elektrodensysteme zur Plasmaerzeugung und durch den Betrieb des Plasmas mit Hochfrequenz kommt es nicht zu gleichspannungsbedingten Instabilitäten im Plasma (Übergang Bogenentladung). Die thermische Belastung der Elektrodensysteme kann im Gegensatz zu Atmosphärendruckgleichspannungsentladungen auf Werten gehalten werden, die auch bei großflächiger Plasmaerzeugung vom Elektrodensystem als Wärme abgeleitet werden können. Durch Anwendung eines Modulkonzepts (Unterteilung des Gesamtplasmas in einzelne, hochfrequenztechnisch beschaltbare Module) können im Prinzip beliebig große Plasmaflächen zusammengestellt werden.

Teil B

Beispielbeschreibung

[0029] Die Erfindung wird nachstehend anhand von zehn in den schematischen Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen:

[0030] Fig. 1: ein Elektrodensystem aus:

a) einem Paar streifenförmiger Elektroden angeschlossen an einen HF-Generator (Anordnung (11)),

b) zwei kammförmig ineinander geschachtelten Elektrodengruppen angeschlossen an einen HF-Generator (Anordnung (12)),

c) zwei kammförmig ineinander geschachtelten Elektrodengruppen angeschlossen an einen HF-Generator über ein Anpassungsnetzwerk (Anordnung (13)),

[0031] Fig. 2: die Gestaltung des Rands der Elektroden am plasmaerzeugenden Spalt als glatter paralleler Rand oder als gleichsinnig oder gegensinnig versetzte Zackenlinie,

[0032] Fig. 3: die Draufsicht und Querschnitt eines plasmaerzeugenden Elektrodensystems aufgebaut aus:

a) Einzelteilen, d. h. elektrisch leitfähigen Elektroden und isolierenden Zwischenisolatoren (Anordnung (31)),

b) mit Dünnschicht- oder Dickschichttechnologie auf einem Träger aufgebracht Elektrodensystem (Anordnung (32)),

[0033] Fig. 4: den Anschluß mehrere Elektrodensysteme über ein Anpassungsnetzwerk an einen HF-Generator,

[0034] Fig. 5: den Anschluß mehrerer Elektrodensysteme über jeweils ein Anpassungsnetzwerk an jeweils einen Hochfrequenzgenerator,

[0035] Fig. 6: den Anschluß und Erzeugung einer bzgl. Masse symmetrischen HF-Spannung an einem Elektrodensystem,

[0036] Fig. 7: den Anschluß und Erzeugung einer bzgl. Masse asymmetrischen HF-Spannung an einem Elektrodensystem,

[0037] Fig. 8: ein zusätzliches integriertes Anpassungsnetzwerk direkt am Elektrodensystem zur Impedanztransformation auf Anschlußwerte des Hauptanpassungsnetzwerks,

[0038] Fig. 9: die Darstellung verschiedener Varianten von integrierten Anpassungsnetzwerken nach Fig. 8:

a) Verminderung der kapazitiven Last einer Teilgruppe des Elektrodensystems durch eine Reiheninduktivität (Anordnung (91)),

b) Verminderung der kapazitiven Last einer Teilgruppe des Elektrodensystems durch eine Reihenkapazität (Anordnung (92)),

[0039] Fig. 10: die Darstellung eines integrierten Anpassungsnetzwerkes nach Fig. 8 mit integrierten Übertragern deren Primärseiten in Reihe geschaltet sind.

[0040] Die konkrete Funktionsweise der Erfindung wird anhand von Fig. 1 erläutert. An zwei streifenförmige Elektroden (15) mit einer typischen Breite von 0.2–2 mm und einem typischen Abstand von 0.05–0.5 mm wird eine Hochfrequenzspannung mittels eines Generators angelegt (Anordnung (11)). Zwischen den Elektroden befindet sich ein Gas bei Atmosphärendruck vorzugsweise ein Edelgas wie Helium. Sobald durch die Hochfrequenzspannung eine ausreichende hohe elektrische Feldstärke erzeugt ist (typische Werte von 1000 V/mm), zündet zwischen den Elektroden ein Plasma.

[0041] Die so zu erreichenden Plasmaabmessungen können zwar in einer Dimension (Länge der Elektroden) bis zu einigen hundert Millimeter betragen, die Breite des Plasmas und damit die für Bearbeitungszwecke zur Verfügung stehende Plasmafläche ist dagegen durch den bei Atmosphärendruck kleinen Elektrodenabstand bestimmt. Diesen Nachteil weist die Anordnung (12) nicht mehr auf, bei der ein Elektrodensystem aus alternierend beschalteten Elektroden (16 und 17) gleicher Abmessungen wie in Anordnung (11) eingesetzt wird. Alle Spalte zwischen den Elektroden mit Abmessungen von 0.05–0.5 mm erzeugen ein Plasma, welches je nach Breite der Elektroden und Rekombinationsverhalten der Ladungsträger im ionisierten Gas eine mehr oder weniger homogene Plasmafläche über dem Elektrodensystem ergibt.

[0042] Die Elektrodensysteme der Anordnungen (11) und (12) werden von einem Hochfrequenzgenerator (14) gespeist. Hierfür können Generatoren mit Frequenzen von 1–100 MHz eingesetzt werden. Vorteilhafterweise werden die ISM-Frequenzen 13.56 MHz oder 27.12 MHz verwendet. Durch die beschriebene Elektrodenanordnung entstehen schon bei verhältnismäßig kleinen Plasmaflächen Lastkapazitäten, die die Zwischenschaltung eines Anpassungsnetzwerkes wie in Anordnung (13) gezeigt, erfordern. Gleichzeitig dient das Anpassungsnetzwerk der Leistungsanpassung zwischen Generator (14) und Elektrodenanordnung.

[0043] Die Spalte zwischen den in Fig. 1 beschriebenen Elektroden können z. B. Spalte zwischen parallel angeordneten Blechen sein. Sie können aber auch von ebenen Elektroden (z. B. Schichtstrukturen auf einem Träger) gebildet werden. Für beide diese Varianten existieren unterschiedliche Möglichkeiten der Ausformung des linien- oder flächenförmigen Rands des plasmaerzeugenden Spalts, wie dies in Fig. 2 schematisch dargestellt ist.

[0044] Anordnung (21) zeigt einen Spalt zur Erzeugung des Plasma (24) mit ebenem Rand, die Anordnungen (22) und (23) zeigen unterschiedliche Ausformungen des Rands mit einem zackenförmigen Muster in einmal gleichsinniger Weise (Elektrode (27)) oder in gegensinniger Weise (Elektroden (26)).

[0045] Fig. 3 zeigt zwei prinzipielle Möglichkeiten die Elektrodensysteme aufzubauen. Jeweils in der Drauf- und in der Seitenansicht sind eine Anordnung (31) aufgebaut aus einzelnen Elektrodensystemen (16 und 17) mit Zwischenisolatoren (33) und eine Anordnung (32) mit in Schichttechnik hergestellten Elektrodensystemen (35 und 36) auf einem isolierenden Träger (34) gezeigt. Über beiden Anordnungen kann sich das Plasma (24) flächenförmig ausbilden. Die

Dicke des Plasmas über der erzeugenden Elektrodenfläche ist in der Regel gering und beträgt 0.1 bis 2 mm. An die Elektrodensysteme wird der Hochfrequenzgenerator (14) mit den Zuleitungen (37) angeschlossen. Eine vorteilhafte Lösung ergibt sich, wenn der Generator wie in Fig. 1 gezeigt über ein Anpassungsnetzwerk angeschlossen wird. Die Elektroden (31) oder wie in Fig. 2 gezeigt das Dünnschichtelektrodensystem (32) können mit einer isolierenden Schutzschicht aufgebaut werden. Es kann trotzdem ein Plasma erzeugt werden solange der kapazitive Widerstand des durch die Elektrodenschicht gebildeten Kondensators bei der gegebenen Frequenz f einen Spannungsabfall von maximal 10% der Betriebsspannung nicht überschreitet. Dies ist erfüllt solange die Schichtdicke dieser Schichten d_{\max} kleiner ist als:

$$d_{\max} = \Delta U \cdot \frac{2\pi \cdot f \epsilon_0 \epsilon}{j}$$

[0046] Dabei bedeuten:

ΔU – maximal tolerierbarer Spannungsabfall an der Schicht,
 f – Frequenz,

ϵ_0, ϵ – absolute bzw. relative Dielektrizitätskonstante,
 j – Stromdichte.

[0047] Bei typischen Werten von $\Delta U = 5$ V, $f = 50$ MHz, $\epsilon = 3$ und $j = 50$ mAcm⁻² ergibt sich eine Grenzsichtdicke von ca. 20 μ m. Durch Wahl von z. B. Siliziumdioxid oder Aluminiumoxid als Schutzschicht kann eine beträchtliche plasmachemische Passivierung des Elektrodensystems gegen ätzende Plasmen erreicht werden.

[0048] Mit den in Fig. 1 bis Fig. 3 gezeigten Anordnungen können bis etwa 50 \times 50 mm² Plasmafläche in Abhängigkeit von Gasart und Gestaltung der Elektrodensysteme aufgebaut werden. Industrielle Anlagen erfordern aber wesentlich größere Plasmaflächen (z. B. 50 \times 1000 mm²). Plasmaflächen solcher Abmessungen werden vorteilhafterweise durch Aneinanderreihen von modulartigen Elektrodensystemen wie in Fig. 1 – Fig. 3 gezeigt, aufgebaut. Jedes Modul benötigt Hochfrequenzleistungen im Bereich von 100 W. Dabei treten zwei schaltungstechnische Probleme auf:

a) Es werden insgesamt Hochfrequenzleistungen im kW-Bereich benötigt, die von einem oder mehreren Generatoren aufgebracht und an die Elektrodensysteme verteilt werden müssen,

b) Die Gesamtimpedanz einer solchen Anordnung erfordert besonders dimensionierte Anpassungsnetzwerke oder übersteigt die schaltungstechnischen Möglichkeiten solcher Netzwerke.

[0049] Fig. 4 zeigt eine Anordnung (41), bei der mehrere Plasmamodule aus Elektrodensystemen (42) mittels eines Anpassungsnetzwerkes (43) über elektrische Anschlüsse (37) zusammengefasst werden, um von einem leistungsstarken Generator (14) betrieben werden zu können. Fig. 5 zeigt eine Anordnung (51) bei der die Probleme a) und b) dadurch gelöst werden, daß zu jedem plasmaerzeugenden Elektrodensystem (52) ein darauf abgestimmtes Netzwerk (53) und ein Generator (14) gehören. Vorteilhafterweise entsteht so eine Anordnung (51) bei der die Intensität des Plasmas (z. B. zur Homogenitätskontrolle) in den einzelnen Plasma-Generator-Modulen (55) separat eingestellt werden kann.

[0050] In allen bisher dargestellten Plasmageneratoren bei Atmosphärendruck besteht das Problem, daß einerseits im atmosphärischen Gas ein Plasma erzeugt werden soll, andererseits parasitäre Nebenentladungen durch Isolatoren oder durch Gasstrecken deren Gasweg groß gegen die Abmessungen der plasmaerzeugenden Spalte sein muß, vermieden

werden müssen. Vorteilhaft ist hierbei die in Fig. 6 dargestellte Anordnung (65), bei der im an den Generator (14) angeschlossenen Netzwerk (63) eine bzgl. Masse (64) symmetrische Hochfrequenzspannung erzeugt wird. Damit liegt zwischen den Zuleitungen und den sie umgebenden Masse-

teilen stets nur der halbe Wert der Hochfrequenzspannung an, der zum Erzeugen des Plasma benötigt wird. Nur zwischen den Elektroden des Elektrodensystems wird der volle Spannungswert erreicht und das Plasma erzeugt.

[0051] Fig. 7. zeigt eine Anordnung (71) bei der das Elektrodensystem (62) mit einem asymmetrischen Netzwerk (72) betrieben wird. Eine Elektrodengruppe ist jetzt mit Masse (64) verbunden. Obwohl diese Anordnung die anhand von Anordnung (61) beschriebenen Nachteile aufweisen kann, ist sie vorteilhaft, wenn ein einfacher und kostengünstiger Aufbau des Hochfrequenznetzwerks (72) und der Zuleitungen (65) angestrebt wird.

[0052] Wie bereits bei der Beschreibung der Anordnung (41) (Fig. 4) erwähnt, kann die Impedanz eines größeren industriell nutzbaren Elektrodensystems weit außerhalb der Grenzwerte liegen, die z. B. ein Anpassungsnetzwerk auf der Basis eines Pi-Filters kompensieren und anpassen kann. Dieser Fall ist mit der Anordnung (81) in Fig. 8 dargestellt. Um die Impedanz des plaserzeugenden Elektrodensystems (84) an den Netzwerkananschlußklemmen (83) auf akzeptable Werte zu transformieren, sind in den Zuleitungen zu je einer Gruppe des Elektrodensystems integrierte Zwischennetze (85) angeordnet. Sie dienen der Aufgabe, die zu große Lastkapazität des Elektrodensystems zu verringern.

[0053] In Fig. 9. sind zwei Anordnungen integrierter Zwischennetze dargestellt. Vorteilhaft können die darin enthaltenen induktiven oder kapazitiven Bauelemente im Fall von Elektrodensystemen ausgeführt in Schichttechnik bereits ebenfalls in Schichttechnik mit auf dem Träger des Elektrodensystems integriert werden. Das gesamte Elektrodensystem der Anordnungen (91) oder (92) wird hierzu in Gruppen (93) mit günstigeren Impedanzwerten aufgeteilt, die über eine Induktivität (95) oder eine Kapazität (94) in Reihe jeweils auf die Netzwerkkuleitung (96) geschaltet werden, die zur Anschlußklemme (83) des Hauptnetzwerks verläuft. Neben den einfachsten Möglichkeiten der Impedanzveränderung durch Induktivitäten oder Kapazitäten können die integrierten Zwischennetze (85) auch komplexere Schaltungen wie Pi-Filter o. ä. enthalten.

[0054] Eine weitere Möglichkeit der Gestaltung der Anpassung mit nur einem Zwischennetzwerk ist in Fig. 10. mit Anordnung (101) gezeigt. Die plaserzeugenden Elektrodensysteme (84) werden jeweils mit einem Hochfrequenzübertrager im Zwischennetzwerk versehen, dessen Sekundärwicklung (102) vorteilhaft so bemessen ist, daß sie zusammen mit der Kapazität des Elektrodensystems einen abgestimmten Schwingkreis bildet. Zur Leistungsanpassung der einzelnen Plasmalasten an den Hauptstromkreis mit Leitung (104) wird sowohl das Übersetzungsverhältnis der Übertrager auf die Primärspule (103) als auch die Art der Zusammenschaltung der Primärspulen (in Anordnung (101) vorteilhaft in Reihe) genutzt. Andere Arten der Zusammenschaltung der Primärspulen wie parallel oder gruppenweise in Reihe und/oder parallel sind möglich.

[0055] Alle in der Beschreibung, den nachfolgenden Ansprüchen und in den Zeichnungen dargestellten Merkmale können sowohl einzeln als auch in beliebiger Kombination erfindungswesentlich sein.

Bezugszeichenliste

11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 41, 51, 61, 71, 81, 91, 92, 101

Anordnungen

14 Hochfrequenzgenerator

15 Elektrodenpaar

16, 17 Elektrodengruppe

18, 53, 82 Hochfrequenzanpassungsnetzwerke

24 Plasma

25 Elektrode mit geradenförmigem Rand

26 Elektroden mit gleichsinnig sägezahnförmigem Rand

27 Elektrode mit gegensinnig sägezahnförmigem Rand

33 Zwischenisolator

34 Elektrodenstrukturträger

35, 36 Dünnschicht- oder Dickschicht Elektrodenstruktur

37 Hochfrequenz Zuleitungen

38 Isolatorschicht

42, 52, 62, 84 plaserzeugende Elektrodensysteme

43 Gruppenanpassungsnetzwerk

55 Plasma-Generator-Modul

63 Hochfrequenzanpassungsnetzwerk mit symmetrischem Ausgang

64 Masseanschluß

72 Hochfrequenzanpassungsnetzwerk mit asymmetrischem Ausgang

83 Anschlußpunkte

85 integriertes Anpassungsnetzwerk

93 Teilelektrodengruppe

94 Kondensator

95 Induktivität

96 Leitung

102 Sekundärspule Übertrager

103 Primärspule Übertrager

104 Leitung

Patentansprüche

1. Anordnung zur Erzeugung eines Niedertemperatur-Plasmas bei Atmosphärendruck bestehend aus zwei Elektrodensystemen, zwischen denen eine Hochfrequenzspannung angelegt wird und die mit dem Plasma erzeugenden Gas gefüllte Abstände zwischen 10–1000 µm aufweisen, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Elektrodensysteme insgesamt oder Teile davon mit elektrischen Netzwerken zur Anpassung der Impedanz der Elektrodensysteme und der damit erzeugten Plasmen an die Ausgangsdaten von Hochfrequenzgeneratoren versehen sind.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Elektrodensystem aus einem parallel angeordneten streifenartigen Elektrodenpaar besteht, das an die Hochfrequenz angeschlossen wird.

3. Anordnung nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Elektrodensystem aus mehreren Elektrodenpaaren besteht, an die die Hochfrequenz durch Parallelschaltung direkt angeschlossen wird.

4. Anordnung nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektrodensysteme aus mehreren Elektrodenpaaren bestehen, an die die Hochfrequenz über zusätzliche Netzwerkkomponenten angeschlossen wird.

5. Anordnung nach Anspruch 1 und einem der Ansprüche 2, 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Elektrodensystem aus Einzelteilen, d. h. aus elektrisch leitfähigen Elektroden und Zuleitungen und aus nicht leitfähigen Zwischenisolatoren aufgebaut ist.

6. Anordnung nach Anspruch 1 und einem der Ansprüche 2, 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Elektrodensystem mit Hilfe von Dünnschicht- oder Dickfilmtechnologie auf einem ebenen Träger aufgebracht ist.

7. Anordnung nach Anspruch 1 und 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Elektrodensystem mit Hilfe von Dünnschicht- oder Dickfilmtechnologie auf einem geformten oder flexiblen Träger aufgebracht ist.
8. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Entladungsspalte der Elektrodensysteme gleichen Abstand aufweisen. 5
9. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Entladungsspalte der Elektrodensysteme unterschiedlichen Abstand aufweisen. 10
10. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Ränder der Entladungsspalte der Elektrodensysteme geradenförmig und parallel zueinander sind.
11. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Ränder der Entladungsspalte der Elektrodensysteme in bestimmten periodischen Formen geformt sind. 15
12. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den elektrisch leitfähigen Elektrodensystemen und dem Plasma eine isolierende Schicht aufgebracht ist, die eine hohe plasmachemische und plasmaphysikalische Stabilität gegenüber Plasmen mit reaktiven Gasen gewährleistet. 20
13. Anordnung nach Anspruch 1, und einem der Ansprüche 5, 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere auf jeweils einem Träger angeordnete Elektrodensysteme zum Erzeugen größerer Plasmaflächen über Netzwerke an einen Hochfrequenzgenerator angeschlossen werden. 25 30
14. Anordnung nach Anspruch 1 und einem der Ansprüche 5, 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere auf jeweils einem Träger angeordnete Elektrodensysteme zum Erzeugen größerer Plasmaflächen über jeweils einen separat leistungsgeregelten Hochfrequenzgenerator mit Anpassungsnetzwerk betrieben werden. 35
15. Anordnung nach Anspruch 1 und einem der Ansprüche 2, 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Hochfrequenzspannung aus dem Generator über ein oder mehrere Netzwerke symmetrisch transformiert wird und symmetrisch an die zwei plasmaerzeugenden von Masse isolierten Elektrodensysteme angelegt wird. 40
16. Anordnung nach Anspruch 1 und einem der Ansprüche 2, 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Hochfrequenzspannung aus dem Generator über ein oder mehrere Netzwerke asymmetrisch transformiert wird und asymmetrisch an die zwei plasmaerzeugenden Elektrodensysteme angelegt wird von denen eines mit Masse verbunden sein kann. 45
17. Anordnung nach Anspruch 1 und einem der Ansprüche 5, 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Impedanz des plasmaerzeugenden Elektrodensystems beim Betrieb mit und ohne Plasma von einem externen über zwei Zuleitungen angeschlossenem Hochfrequenz-Netzwerk versorgt werden kann. 50 55
18. Anordnung nach Anspruch 1 und einem der Ansprüche 5, 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Impedanz des plasmaerzeugenden Elektrodensystems beim Betrieb mit und ohne Plasma die Impedanzgrenzwerte eines externen über zwei Zuleitungen angeschlossenen Netzwerks übersteigt und somit die Hochfrequenz-Anpassung zusätzlich über im Elektrodensystem integrierte Hochfrequenz-Netzwerke oder Teile davon und über deren schaltungstechnischer Zusammenfassung erfolgt. 60 65
19. Anordnung nach Anspruch 1 und 18, dadurch gekennzeichnet, daß die im Elektrodensystem integrierten Netzwerkkomponenten Induktivitäten sind, die die

- kapazitive Last des zugehörigen Elektrodensystems ganz oder teilweise kompensieren.
20. Anordnung nach Anspruch 1 und 18, dadurch gekennzeichnet, daß die im Elektrodensystem integrierten Netzwerkkomponenten Kapazitäten sind, die die kapazitive Last des zugehörigen Elektrodensystems durch Reihenschaltung von Kapazitäten vermindern.
21. Anordnung nach Anspruch 1 und 18, dadurch gekennzeichnet, daß die im Elektrodensystem integrierten Netzwerkkomponenten Übertrager sind, deren Sekundärseite zusammen mit den Kapazitäten der zugehörigen Elektrodensysteme abgestimmte Schwingkreise bilden und deren Übersetzungsverhältnis zur Primärseite zur Leistungsanpassung genutzt wird wobei die Primärseiten parallel oder in Reihe oder in bestimmten Gruppen parallel und in Reihe geschaltet sind.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

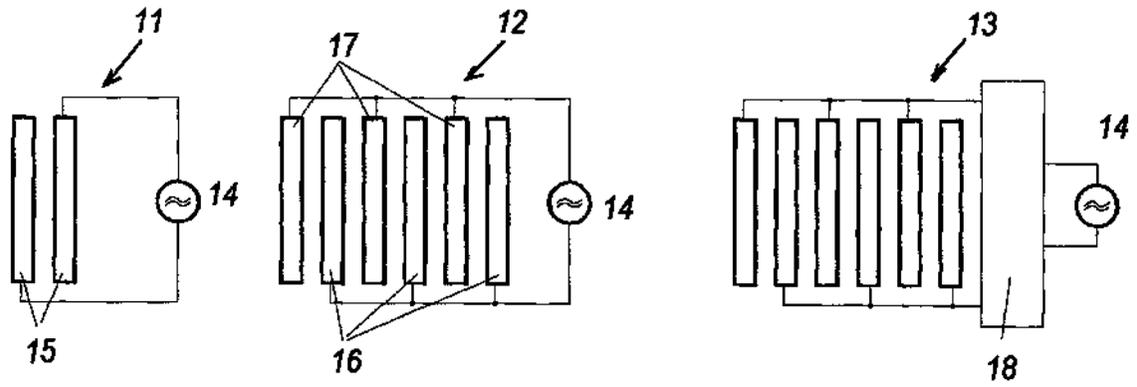


Fig. 1

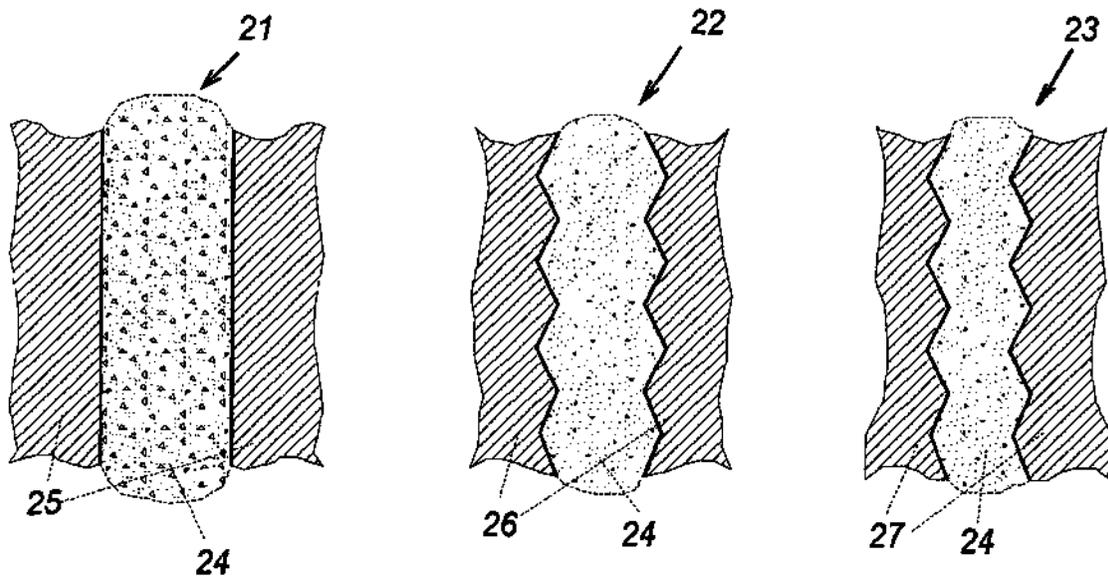


Fig. 2

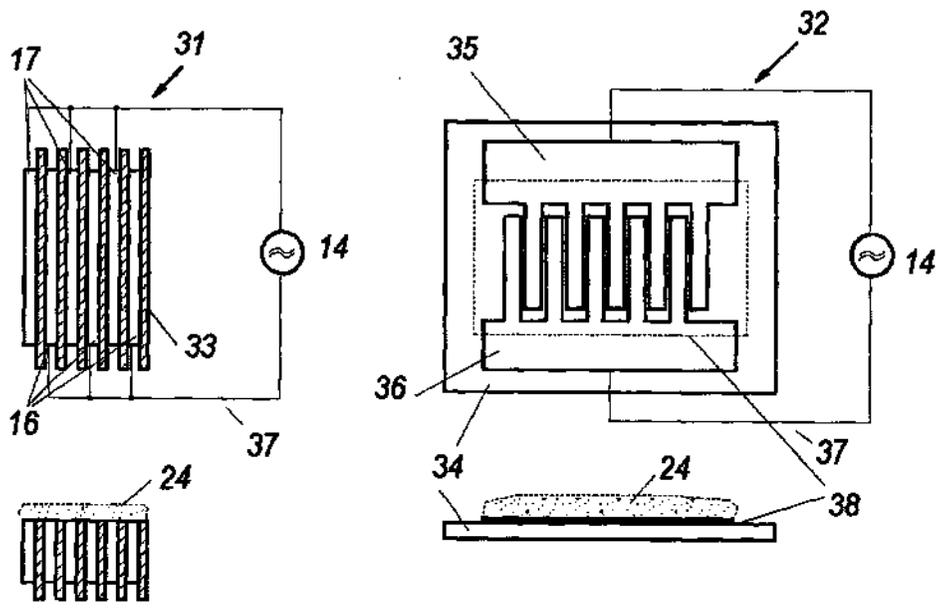


Fig.3:

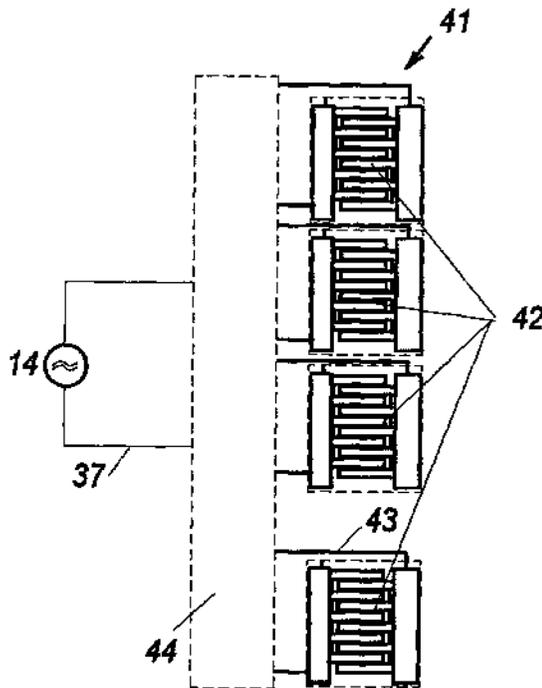


Fig.4:

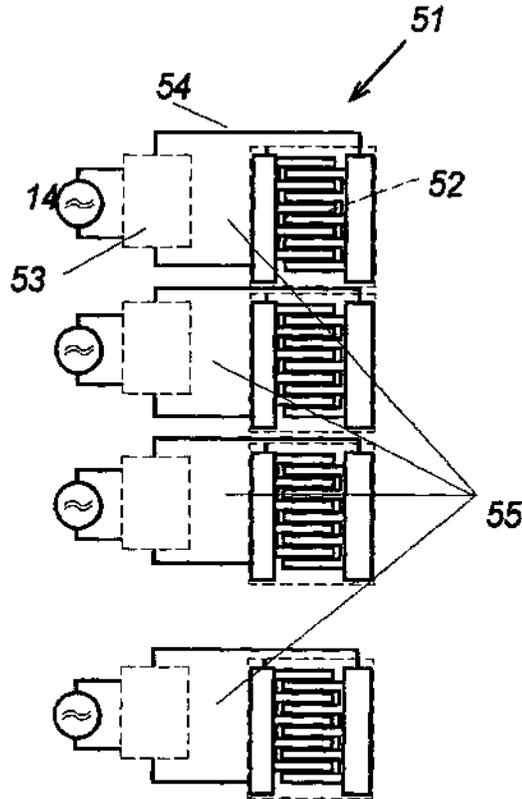


Fig.5:

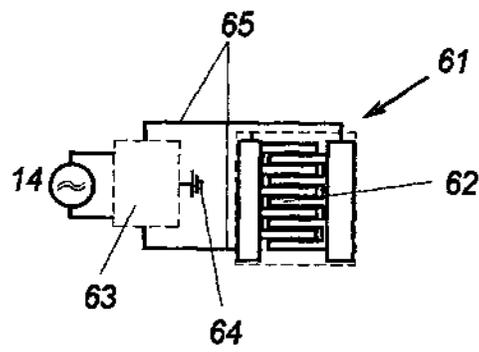


Fig.6:

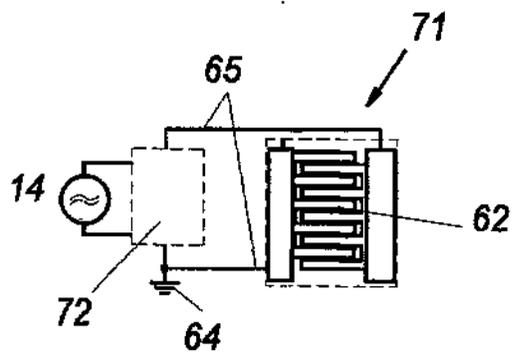


Fig.7:

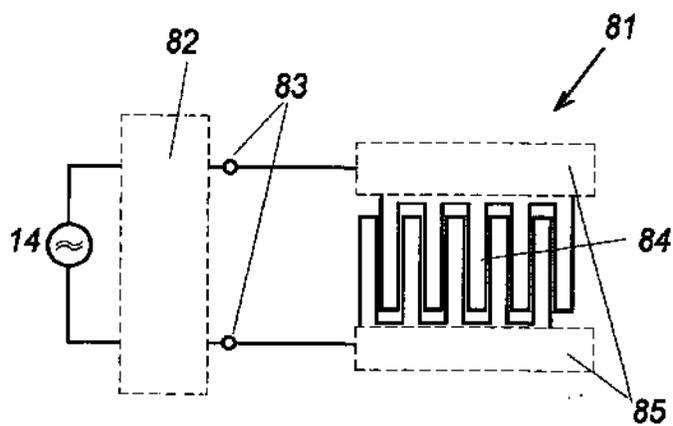


Fig.8:

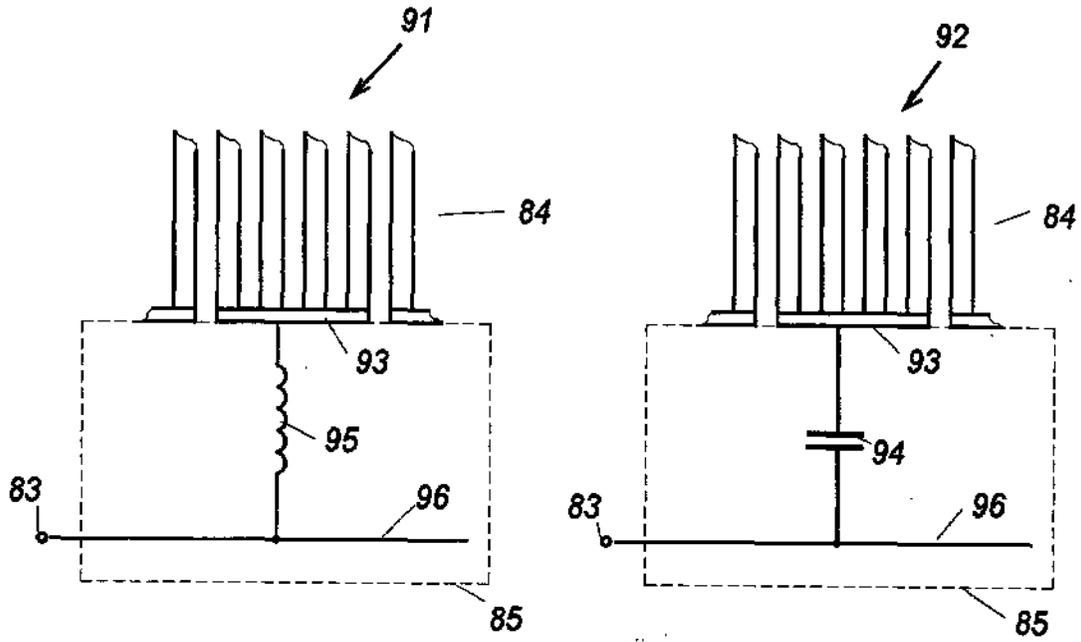


Fig.9:

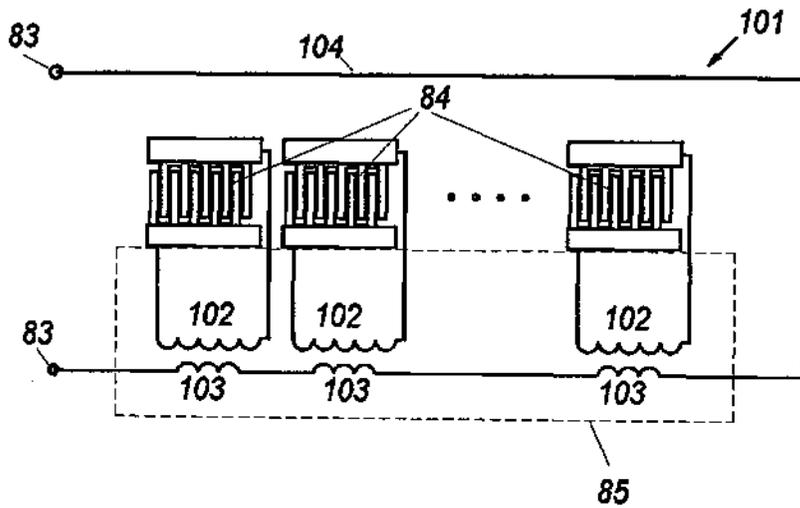


Fig.10: