(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 697 23 127 T2** 2004.04.22

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 790 757 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **697 23 127.5**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **97 102 532.5**
(96) Europäischer Anmeldetag: **17.02.1997**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **20.08.1997**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **02.07.2003**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **22.04.2004**

(51) Int Cl.[7]: **H05H 3/02**

(30) Unionspriorität:
5405796 16.02.1996 JP

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB

(73) Patentinhaber:
Ebara Corp., Tokio/Tokyo, JP

(74) Vertreter:
WAGNER & GEYER Partnerschaft Patent- und Rechtsanwälte, 80538 München

(72) Erfinder:
Hatakeyama, Masahiro, Fujisawa-shi, Kanagawa-ken, JP; Ichiki, Katsunori, Fujisawa-shi, Kanagawa-ken, JP; Toma, Yasushi, Kawasaki-shi, Kanagawa-ken, JP; Saitoh, Masao, Fujisawa-shi, Kanagawa-ken, JP

(54) Bezeichnung: **Quelle für schnelle Atomstrahlen**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

Hintergrund der Erfindung

Gebiet der Erfindung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Strahlquelle für schnelle Atomstrahle, die aus Plasma erzeugt werden, wobei die ausgegebene Energie über einen großen Bereich von Energieniveaus gesteuert werden kann.

Beschreibung der verwandten Technik

[0002] Herkömmliche Quellen für schnelle Atomstrahle werden zuerst kurz dargelegt. Atome und Moleküle, die eine thermische Bewegung in der gewöhnlichen Atmosphäre durchlaufen, haben kinetische Energie von ungefähr 0,05 eV. Im Vergleich zu solch niedrigen kinetischen Energien werden Atome und Moleküle mit einem viel höheren Niveau an kinetischer Energie als schnelle Atome bezeichnet. Wenn solche schnellen Atome als ein enger gerichteter Strahl abgestrahlt werden, werden sie als schneller Atomstrahl bezeichnet (im Folgenden als FAB (= Fast Atomic Beam) abgekürzt).

[0003] Von den verschiedenen bekannten Quellen zur Erzeugung von schnellen Atomstrahlen basierend auf gasförmigen Atomen zeigt **Fig.** 1 eine schematische Darstellung eines Beispiels eines argonbasierten schnellen Atomstrahls mit einer kinetischen Energie im Bereich von 0,5 bis 10 KeV. Die Hauptkomponenten sind eine zylindrisch negative Elektrode **1**, eine torrusförmige positive Elektrode **2**, eine Hochspannungsquelle **3**, ein Gaseinlassrohr **4**, ein Argon-Gasplasma **6**, ein Emissions- bzw. Auslassloch **7** für den schnellen Atomstrahl und ein schneller Atomstrahl bzw. FAB **8**.

[0004] Alle Komponenten außer der elektrischen Leistungsquelle für die Strahlquelle und der (nicht gezeigte) Entladungsstabilisierungswiderstand (Resistor) sind in einem Vakuumbehälter aufgenommen, und nachdem der Behälter ausreichend evakuiert worden ist, wird Argongas **5** in die zylindrische negative Elektrode **1** durch das Gaseinlassrohr **4** eingeleitet. Eine Gleichstromspannung (DC-Spannung) wird von einer Hochspannungsgleichstromquelle **3** angelegt, so dass die positive Elektrode **3** auf einem positiven Potential sein wird, und dass die negative Elektrode **1** auf einem negativen Potential sein wird. Das Ergebnis ist, dass eine elektrische Entladung, die zwischen den positiven und negativen Elektroden aufgetreten ist, ein Plasma **6** erzeugt, wodurch Argon-Ionen und Elektronen geliefert werden.

[0005] Die Elektronen, die aus der Unterseite **1a** der zylindrischen negativen Elektrode **1** ausgestoßen werden, werden zu der positiven Elektrode **2** beschleunigt durch das positive Potential geleitet, und nachdem sie durch das mittlere Loch in der positiven Elektrode **2** gelaufen sind, erreichen sie die Unterseite am gegenüberliegenden Ende der zylindrischen negativen Elektrode **1**, wo die Elektronen Geschwindigkeit verlieren und ihre Flugrichtung wegen dem negativen Potential umkehren. Die Elektronen, die sich nun in der entgegengesetzten Richtung bewegen, beginnen, zu der positiven Elektrode **2** hin beschleunigt zu werden. Somit erzeugen die Elektronen hochfrequente Oszillationen in dem Plasmaraum zwischen den Unterseiten der negativen Elektrode **1** durch das mittlere Loch in der positiven Elektrode **2**. Die oszillierenden Elektronen kollidieren mit den Argon-Atomen und erzeugen viel mehr Argon-Ionen.

[0006] Die so erzeugten Argon-Ionen werden zur Unterseite **1a** der zylindrisch negativen Elektrode **1** beschleunigt, wodurch sie eine kinetische Energie erhalten. Das Niveau der kinetischen Energie ist ungefähr beispielsweise 1 KeV, wenn die Potentialdifferenz zwischen den positiven und negativen Elektroden 1 KV ist. Der Raum nahe der Unterseite **1a** der negativen Elektrode **1** ist eine Umkehrregion für die mit hoher Frequenz oszillierenden Elektronen und enthält einen großen Prozentsatz von niederenergetischen Elektronen. Die Argon-Ionen, die in diesen Raum eingeleitet werden, werden wieder zu Argon-Atomen durch Kollision bzw. erneute Zusammensetzung mit den Elektronen. Weil die Masse der Elektronen in zu vernachlässigender Weise klein im Vergleich zu den Argon-Ionen ist, wird die kinetische Energie der Argon-Ionen fast nicht durch den Kollisionsvorgang mit den Elektronen beeinflusst, und die kinetische Energie der Argon-Ionen wird im wesentlichen auf die Argon-Atome übertragen, um einen schnellen Atomstrahl zu erzeugen. Daher ist die kinetische Energie der sich schnell bewegenden Argon-Atome ungefähr 1 KeV. Sich schnell bewegende Argon-Atome werden als ein schneller Argon-Atomstrahl aus den Entladungslöchern ausgestoßen, die an einer Unterseite der negativen zylindrischen Elektrode vorgesehen sind.

[0007] Jedoch sind herkömmliche Quellen für schnelle Atomstrahlen für Anwendungen geeignet, die eine Potentialdifferenz von mehr als 1 KeV erfordern, um Atompartikel zu erzeugen, die einen ausreichend hohen Entladungsstrom haben, um die Prozesse davon auszuführen. Bei niedrigen Spannungen ist es nur möglich, einen Strahl mit niedrigem Entladestrom zu erzeugen, und daher ist es nötig, andere Mittel einzusetzen, um eine hohe Strahldichte zu erhalten. Die Situation ist die gleiche, wenn Magnete verwendet werden, um Magnetfelder zu erzeugen, und dies ist charakteristisch für einen Gleichstromentladungsprozess. Daher bedeutet ein niedriger Entladestrom, dass das Volumen der erzeugten Ionen gering ist, und folglich ist die Stärke des ausgegebenen schnellen Atomstrahls ebenfalls gering. Weiterhin können Quellen für schnelle Atomstrahlen nur Strahlen mit schlechter Richtungshaltigkeit erzeugen, und zwar wegen ihren Charakteristiken eine starke Strahlverteilung, was ungeeignet zur Erfüllung der kritischen Anforderungen der modernen Mik-

ro-Herstellungstechniken ist, wobei ein schneller Atomstrahl dreidimensionale feine Objekte mit hohen Seitenverhältnissen in irgendeiner Orientierung herstellen können muss.

[0008] Daher ist es erforderlich gewesen, eine Quelle zur Erzeugung von schnellen Atomstrahlen zu realisieren, die eine hohe Strahldichte, eine präzise Richtungshaltigkeit und einen großen Bereich von Ausgangsenergiepegeln erzeugen kann.

[0009] Weiterhin sei hingewiesen auf die Schrift "Patent Abstracts of Japan" Vol. 095, Nr. 001, vom 28. Februar 1995 und auf JP-06289198A (Ebara Corporation), vom 18. Oktober 1994, die eine Quelle für schnelle Atomstrahlen offenbart, um einen schnellen Atomstrahl zu erhalten, der eine niedrige Energie besitzt, und zwar mit einer niedrigen elektrischen Entladungsspannung durch Einleitung von Mikrowellen in einen elektrischen Entladungsteil.

[0010] Weiterhin sei hingewiesen auf die Schrift IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 36, Nr. 10 vom 1. Oktober 1993, Seite 501–502 XP000412462 "Compact High Density Radical Generator" (kompakter Generator für hochdichte Radikale) die eine Vorrichtung offenbart, die eine hohe Dichte von atomaren und molekularen Radikalen erzeugt, und zwar durch interne Einstellung einer resonanten induktiven Spule, die eine zylindrische Plasmakammer umgibt. Die von der Auftreffdissotation der Elektronen erzeugten Radikale des Einspeisungsgases diffundieren aus der Plasmakammer und können für eine Oberflächenbehandlung und eine Reaktionsgasmodifikation von gesputterten, verdampften oder abgelösten Dünnfilmen verwendet werden.

[0011] Zuletzt sei nicht als unwichtigstes hingewiesen auf die Schrift EP-A-0 639 939 (Ebara Corporation) vom 22. Februar 1995, die eine Quelle für einen schnellen Atomstrahl offenbart, der einen schnellen Atomstrahl mit einer niedrigen Energie und einem hohen Partikelfluss emittieren kann. Die Quelle weist eine plattenförmige Elektrode mit einer Vielzahl von Atomen aussendenden Löchern auf, ein weiteres Paar von Elektroden, die in Reihe angeordnet ist, so dass sie gegenüberliegend zu der plattenförmigen Elektrode weisen, um einen elektrischen Entladungsteil zu bilden. Eine Leistungsversorgung legt eine Wechselstromspannung zwischen dem Paar von Elektroden an. Eine weitere Leistungsversorgung legt eine Gleichstromspannung zwischen der plattenförmigen Elektrode und einer des Paares von Elektroden an, die näher an der plattenförmigen Elektrode liegt. Ein Gaseinlassteil erzeugt ein Gas zur Einleitung einer elektrischen Entladung in dem Raum zwischen der plattenförmigen Elektrode und dem Paar von Elektroden.

Zusammenfassung der Erfindung

[0012] Es ist ein Ziel der Erfindung, eine Quelle für einen schnellen Atomstrahl vorzusehen, die schnelle Atomstrahlen mit einer hohen Strahldichte erzeugen kann, weiter mit einer präzisen Richtungshaltigkeit und einem großen Bereich von gesteuerten Ausgangsenergiepegeln.

[0013] Das Ziel ist gemäss der Erfindung durch eine Quelle für einen schnellen Atomstrahl nach Anspruch 1 erreicht, die eine positive Elektrode mit Partikelsteueröffnungen besitzt, die in einem stromaufwärtsliegenden Abschnitt eines Entladungsrohrs angeordnet sind, und durch eine negative Elektrode mit einer Strahlsteueröffnung, die stromabwärts des Entladungsrohrs angeordnet ist.

[0014] Gemäss der grundlegenden Konfiguration der Quelle für den schnellen Atomstrahl nach Anspruch 1, wird das Energieniveau des Strahls, der aus der Strahlöffnung an der stromabwärts liegenden Elektrode ausgestoßen wird, durch die Gleichstromspannung gesteuert, die an den zwei Elektroden angelegt wird. Induktiv erzeugtes hochdichtes Plasma erzeugt eine hohe Dichte von geladenen Partikeln in dem Raum zwischen den zwei Elektroden, so dass die positiven Ionen zu der negativen stromabwärtsliegenden Elektrode hin beschleunigt werden, und innerhalb der Strahlsteueröffnung der negativen Elektrode neutralisiert werden, um einen hochdichten schnellen Atomstrahl aus der Plasmaregion zu emittieren.

[0015] Ein Aspekt der grundlegenden Konfiguration der Strahlquelle ist, dass die Strahlsteueröffnung mehrfach an der stromabwärts liegenden Elektrode vorgesehen werden kann, so dass eine Vielzahl von Strahlen mit hoher Strahldichte aus einer Strahlquelle erzeugt werden können.

[0016] Eine weitere Konfiguration der vorliegenden Quelle für den schnellen Atomstrahl ist, dass beide der Elektroden stromabwärts des Plasmabildungsabschnittes des Entladungsrohres nach Anspruch 6 angeordnet werden könnten. Die Ionenpartikel, die durch die stromaufwärts liegende Elektrode gelaufen sind, werden zu der negativen Elektrode beschleunigt, wie zuvor, und der Ladungsneutralisierungsprozess findet innerhalb der Strahlsteueröffnung statt, wie zuvor erwähnt, um einen schnellen Atomstrahl oder eine Vielzahl von Strahlen zu emittieren.

[0017] Gemäss der grundlegenden Konfiguration der oben dargelegten Quelle für den schnellen Atomstrahl kann ein hochdichter Strahl mit irgendeinem erwünschten Energieniveau erzeugt werden, und der Strahl kann präzise zu einer erwünschten Richtung geleitet werden, um ein Objekt in einem feinen Herstellprozess zu treffen. Gaspartikel, die in das Entladungsrohr der Quelle für den schnellen Atomstrahl aus dem Gaseinlassrohr eingeleitet werden, werden durch den induktiv gekoppelten Plasmagenerator durch das Anlegen eines hochfrequenten Wechselstromes an der Erregungsspule des Entladungsrohrs erregt, wodurch ein Plasma des eingegebenen Gases erzeugt wird. Zwei Plattenelektroden sind so angeordnet, dass eine Elektrode stromaufwärts des Plasmabildungsabschnittes positioniert ist, und dass eine Elektrode stromabwärts des Plasmabildungsab-

schnittes in dem Entladungsrohr positioniert ist. Die stromabwärts liegende Elektrode ist mit einer Strahlsteueröffnung oder mit einer Vielzahl von Öffnungen versehen.

[0018] In einer weiteren Konfiguration der Quelle für den schnellen Atomstrahl wird ein schneller Atomstrahl erzeugt, der irgendein Niveau an kinetischer Energie hat, wenn beide der Elektroden in der stromabwärts liegenden Region des Plasmabildungsabschnittes angeordnet sind, und zwar entsprechend der angelegten Spannung dazwischen in einem kompakten Raum in den stromabwärtsliegenden Regionen des Entladungsrohrs. Anders als bei der herkömmlichen Quelle ist die vorliegende Quelle für den schnellen Atomstrahl so konfiguriert, dass der Plasmaerzeugungsprozess unabhängig von dem Ionenbeschleunigungsprozess der Quelle arbeitet, was somit die Erzeugung eines hochdichten Plasmas gestattet, auch wenn eine Ausgangsstrahlenergie von niedrigem Niveau erforderlich ist. Daher kann ungeachtet dessen, ob jede der Elektroden stromaufwärts und stromabwärts mit Bezug auf den Plasmabildungsabschnitt gelegen ist, oder ob beide in dem stromabwärtsgelegenen Abschnitt des Entladungsrohrs gelegen sind, die Entladungsspannung, die an den Elektroden angelegt wird, auf einen hohen oder niedrigen Wert eingestellt werden, um sich an die Anforderungen der Ausgangsstrahlenergie anzupassen. Die Funktion der Strahlsteueröffnung kann in drei große Kategorien eingeteilt werden, und zwar entsprechend den Anforderungen der Richtungshaltigkeit und des Neutralisationsfaktors in dem ausgegebenen schnellen Atomstrahl.

[0019] Wenn eine Mischung von hochdichten Atomstrahlen und Ionenstrahlen erforderlich ist, sollte die Tiefe der Strahlsteueröffnung im Bereich von 1 bis 5 Mal des Öffnungsdurchmessers sein. In diesem Fall ist der Neutralisationsfaktor relativ gering, und weniger als ungefähr 40% der Ionen werden in den Strahlsteueröffnungen neutralisiert. Die Richtungshaltigkeitseigenschaft des Strahls hängt auch von dem Seitenverhältnis der Strahlsteueröffnung ab, und weil der Strahl dazu tendiert, auseinander zu laufen, nachdem er die Öffnung verlassen hat, ist die Richtungshaltigkeit in diesem Fall relativ schlecht.

[0020] Wenn ein Strahl mit starker Richtungshaltigkeit erforderlich ist, sollte die Tiefe der Strahlsteueröffnung im Bereich von 5 bis 20 Mal des Öffnungsdurchmessers sein. Der Neutralisierungsfaktor ist im Bereich von 40 bis 70%.

[0021] Wenn eine besonders starke Richtungshaltigkeit und eine hohe Strahldichte erforderlich ist, sollte die Tiefe der Strahlsteueröffnung mehr als 20 Mal des Öffnungsdurchmessers sein. Der Neutralisationsfaktor wird auch auf über 70% gesteigert. Die meisten der Radikale werden innerhalb des Raumes der Öffnung deaktiviert, und daher können stark verfeinerte schnelle Atomstrahlen in diesem Bereich von Seitenverhältnissen der Strahlsteueröffnung erzeugt werden.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0022] **Fig.** 1 ist eine schematische Zeichnung einer herkömmlichen Quelle für einen schnellen Atomstrahl.

[0023] **Fig.** 2 ist eine schematische Darstellung eines ersten Ausführungsbeispiels der Quelle für den schnellen Atomstrahl der vorliegenden Erfindung.

[0024] **Fig.** 3 ist eine schematische Darstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels der Quelle für den schnellen Atomstrahl der vorliegenden Erfindung.

[0025] **Fig.** 4A ist eine Kurvendarstellung, die eine Beziehung zwischen der Länge der Entladungsöffnung und der Menge des erzeugten Strahls zeigt.

[0026] **Fig.** 4B ist eine Kurvendarstellung, die eine Beziehung zwischen der Länge der Entladungsöffnung und der Neutralisationsrate zeigt.

Beschreibung der bevorzugten Ausführungsbeispiele

[0027] Bevorzugte Ausführungsbeispiele der Quelle für den schnellen Atomstrahl der vorliegenden Erfindung werden mit Bezugnahme auf die **Fig.** 2 bis 4A und 4B erklärt. In der gesamten Beschreibung der Strahlquelle und der Prozesse beziehen sich die Ausdrücke "stromaufwärts" und "stromabwärts" auf den Plasmabildungsabschnitt des Entladungsrohrs und die Richtung des ausgegebenen schnellen Atomstrahls.

[0028] **Fig.** 2 ist eine schematische Darstellung der Quelle für den schnellen Atomstrahl, die ein Entladungsrohr **21** aufweist, welches aus einem Keramikmaterial oder aus Quarz gemacht ist, weiter ein Gaseinlassrohr **22** und zwei Plattenelektroden **29**, **30**. Die stromaufwärts liegende Elektrode **29** ist mit einem Gasdurchlass **29a** versehen, und die stromabwärts liegende Elektrode **30** (mit Bezug auf die Auslassrichtung des schnellen Atomstrahls) ist mit Strahlsteueröffnungen **30a** versehen. Der Innendurchmesser des Entladungsrohrs kann 15–300 mm sein. Ebenfalls in der mittleren Region des Rohrs ist eine Erregungsspule **25**, mit einer bis drei Windungen, zur Erzeugung eines hochdichten Plasmas vorgesehen, und zwar durch Anlegen eines magnetischen Erregungsfeldes von einem induktiv gekoppelten Plasmagenerator **24** bei 13,56 MHz. In diesem Ausführungsbeispiel sind die Plattenelektroden **29**, **30** jeweils in stromaufwärts- und stromabwärtsgelegenen Regionen der Plasmaregion **27** angeordnet, und durch das Anlegen einer Gleichstromvorspannspannung **32** an den zwei Elektroden **29**, **30** werden die positiven Ionen der Gaspartikel **26** zu der positiven Elektrode **30** hin beschleunigt, wodurch ein schneller Atomstrahl **28** ausgegeben wird, der eine Energie besitzt, die der Vorspannspannung **32** entspricht, und zwar durch die Strahlsteueröffnungen **30a**, die an der positiven Elektrode **30** vorgesehen sind. Bei herkömmlichen Quellen für schnelle Atomstrahlen, die durch eine Gleichstromentladung angetrieben werden, kann kein hoher Strahlstrom erhalten

werden, außer wenn eine Spannung von mehr als 1 KV angelegt wird, und zwar auch bei Anwendung von Magnetfeldern, die durch Magneten erzeugt werden. Jedoch kann bei der vorliegenden Vorrichtung eine Plasmaentladung mit hohem Strom bei irgendeiner Spannung erzeugt werden, und zwar von niedrigen bis hohen Werten der Vorspannspannung an den zwei Elektroden **29**, **30**. Der Energiepegel des so erzeugten schnellen Atomstrahls hängt von der Größe der angelegten Vorspannspannung ab.

[0029] Beispielsweise kann unter Verwendung eines induktiv gekoppelten Plasmagenerators eine Plasmadichte leicht erzeugt werden, die von 10^{11} bis 10^{12} Ionen/cm^3 reicht. Die präzise Richtungshaltigkeit des erzeugten schnellen Atomstrahls wird erreicht durch Vorsehen von beispielsweise den Strahlsteueröffnungen **30a** mit einem Durchmesser von 1 mm und einer Länge von 10 mm, wie durch die Dicke t der negativen Elektrode **30** bestimmt. Durch Veränderung der Dicke t der negativen Elektrode **30**, in dem man sie beispielsweise dicker als 20 mm macht, kann ein Neutralisationsfaktor von mehr als 70 % erreicht werden, und ausgegebene Strahle mit einem hohen Prozentsatz von neutralen Atomen und einem starken Richtungscharakter können somit erzeugt werden. Arbeiten bei einer mikroskopischen Herstellung, wie sie von den ausführenden Erfindern offenbart wurden, beispielsweise in Dokumenten, wie der japanischen Patentanmeldung Nr. H7-86538, der europäischen Patentanmeldung Nr. EP-A-0 732 624 und in der europäischen Patentanmeldung EP-A-0 637 901 erfordern einen Strahl von hoher Richtungshaltigkeit, und es ist nötig, die Art des oben beschriebenen, schnellen Atomstrahls zu verwenden. Ebenfalls kann die vorliegende Erfindung eine hohe Strahldichte und einen Strahl mit niedrigerer Energie erzeugen, als jene, die von herkömmlichen Quellen von schnellen Atomstrahlen erzeugt wurden, und solche Strahle sind nützlich bei der effizienten Herstellung von Halbleitermaterialien ohne einen inneren Schaden an den Halbleitervorrichtungen zu erzeugen.

[0030] Die Fähigkeit zur Erzeugung einer dreidimensionalen mikroskopischen Herstelleinheit ist auch auf dem Gebiet der Mikro- oder Ultra-Mikro-Bearbeitung erforderlich, genauso wie bei der maschinellen Bearbeitung von Mikro-Objekten mit vielen Facetten, und es ist wichtig das Energieniveau des hochdichten, schnellen Atomstrahls zu steuern.

[0031] **Fig.** 3 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel der Quelle für den schnellen Atomstrahl der vorliegenden Erfindung. In dieser Konfiguration sind beide Elektrodenplatten in dem stromabwärts liegenden Abschnitt des Plasmabildungsabschnittes **27** angeordnet. Das Verfahren zur Herstellung des Plasmas ist das gleiche wie bei dem ersten Ausführungsbeispiel, und die Anwendung des Entladungsrohrs **21**, des induktionsgekoppelten Hochfrequenzgenerators **24** und der Erregungsspule **25** sind ebenfalls die gleichen. Zwei Plattenelektroden **35**, **36** sind parallel zueinander angeordnet. Die stromaufwärts liegende Elektrode **35** ist mit Partikelsteueröffnungen **35a** versehen, die eine vorherbestimmte Elektrodendicke und Öffnungsgröße besitzen. Die stromabwärts liegende Elektrode **36** ist mit Strahlsteueröffnungen **36a** versehen, die eine vorbestimmte Größe und Länge (Dicke) der Öffnungen besitzen. Die Trennungsdistanz zwischen den zwei Plattenelektroden **35**, **36** sollte auch gesteuert werden. Die charakteristischen Eigenschaften des schnellen Atomstrahls, der unter unterschiedlichen Strahlerzeugungsparametern erzeugt wurde, wie beispielsweise die Größen und Längen der Öffnungen, sind untereinander ziemlich unterschiedlich. Wenn beispielsweise die Dicke der Plasmascheide (Raumladungsregion) 1 mm ist, ist der Durchmesser der oberen Strahlöffnungen **35a** 1 mm, und die Dicke ist 0,5 mm. Unter diesen Betriebsbedingungen tritt ein Plasmaleck in dem Raum zwischen den zwei Plattenelektroden **35**, **36** auf, was zu einem Phänomen der Diffusion des Plasmas führt. Die positiven Ionen werden zu der stromabwärts gelegenen negativen Elektrode **36** beschleunigt, und die Ionen werden innerhalb der Strahlsteueröffnungen **36a** neutralisiert und werden als ein schneller Atomstrahl emittiert. Die Öffnungen der stromaufwärts liegenden Elektrode **35** und der stromabwärts liegenden Elektrode haben den gleichen Durchmesser und sind mit Bezug zueinander ausgerichtet. Abhängig von der Menge der Ionen, die in den Elektrodenraum zwischen den Plattenelektroden **35**, **36** eingeleitet wurden, kann eine Bogenentladung manchmal dazwischen unter ungünstigen Betriebszuständen auftreten. Aus diesem Grund ist die Trennungsdistanz zwischen beiden Elektroden auf ungefähr 5 – 100 mm eingestellt. Beispielsweise wird für Wasserstoffchlorid-Gas die Trennungsdistanz von ungefähr 15 mm als das Optimum angesehen.

[0032] Es gibt eine Vielzahl von Strahlsteueröffnungen **36a**, die an der stromabwärts liegenden Elektrode **36** vorgesehen sind, und die Beziehung zwischen dem Durchmesser und der Länge (Dicke) der Strahlsteueröffnungen ist die gleiche wie beim ersten Ausführungsbeispiel. Um einen schnellen Atomstrahl mit niedriger Energie zu erzeugen, wird die Vorspannspannung auf 200–300 eV eingestellt, und die Länge der Öffnung kann von 2, 10 bis 50 mm variiert werden. Wenn die Länge beispielsweise 2 mm ist, ist die Dichte des erzeugten schnellen Atomstrahls genauso wie die der aus der Quelle emittierten radikalen Atome hoch, jedoch ist die Richtungshaltigkeit und der Neutralisierungsfaktor schlechter gegenüber den Fällen mit 10 und 50 mm Länge. Wenn die Länge 10 mm ist, sind sowohl die Richtungshaltigkeit als auch der Neutralisierungsfaktor dem Fall mit einer Länge von 2 mm überlegen, jedoch sind die ausgelassenen Radikale weniger aktiv und die Menge der Radikale ist auch geringer. Wenn die Länge 50 mm ist, sind die Richtungshaltigkeit und der Neutralisierungsfaktor beide hoch, und die Mengen der Residualgaspartikel und der Radikale werden beträchtlich reduziert. Solche Charakteristiken des schnellen Atomstrahls sind

wünschenswert zur Herstellung oder Bestrahlung damit in einem ultrahohem Vakuum.

[0033] Die Betriebsparametersteuerung ist wichtig, um einen optimalen schnellen Atomstrahl für spezielle Bedingungen zu erzeugen, was erforderlich ist, um bei verschiedenen Bedingungen zu bearbeiten, wie beispielsweise unterschiedliche Grade des Vakuums, und aktive Radikale, die für den Betrieb erforderlich sind. Beispielsweise ist zur Herstellung von Halbleitermaterialien, wie beispielsweise GaAs, Si und SiO_2 unter Verwendung des schnellen Atomstrahls eine Öffnungslänge der Elektrode von 2 mm, optimal zur Erzeugung einer Bearbeitung mit hoher Geschwindigkeit, wobei die Mustergröße größer als 5 mm ist. Für eine Mikroherstellungsbearbeitung mit vielen Facetten an feinen Objekten oder für Mustergrößen von weniger als 5 μm ist eine Öffnungslänge von 10–50 mm optimal zur Herstellung von feinen Strukturen mit einem hohen Seitenverhältnis. Für eine ultrafeine Mikrobearbeitung bzw. Mikrofabrikation von fortschrittlichen Vorrichtungen, wie beispielsweise Quanteneffektvorrichtungen oder zur Bearbeitung in einer Atmosphäre von ultrahohem Vakuum, sollte die Länge der Strahlsteueröffnung **36a** 50 mm sein.

[0034] **Fig.** 4A ist eine Kurvendarstellung, die ein Beziehung zwischen der Länge (Tiefe) der Strahlsteueröffnung und der Dichte des erzeugten Strahls zeigt, und **Fig.** 4B ist eine Kurvendarstellung, die eine Beziehung zwischen der Länge (Tiefe) der Strahlsteueröffnung und dem Neutralisierungsfaktor zeigt. Wie in diesen Kurvendarstellungen zu sehen ist, bestimmt das Seitenverhältnis der Strahlsteueröffnung die charakteristischen Eigenschaften des ausgegebenen Strahls, wie beispielsweise die Richtungshaltigkeit und den Neutralisierungsfaktor genauso wie den Grad der Verteilung des Strahls in dem Bearbeitungsgefäß. Daher ist es nötig, das Seitenverhältnis der Öffnungen anzupassen, so dass es zu den Anforderungen von jeder Anwendung der Quelle für den schnellen Atomstrahl passt.

[0035] Wenn die zwei Elektroden in dem stromabwärts gelegenen Abschnitt des Entladungsrohrs angeordnet werden, sind die Beziehungen ähnlich. Jedoch beeinflussen die Seitenverhältnisse der Partikelsteueröffnungen und der Strahlsteueröffnungen stark die letztendlichen charakteristischen Eigenschaften des ausgegebenen Strahls. Insbesondere wird das Volumen der Ionen, die in den Elektrodenraum zwischen den stromaufwärts gelegenen und stromabwärts gelegenen Elektroden eingeleitet wird, durch das Seitenverhältnis der Partikelsteueröffnungen in der stromaufwärts gelegenen Elektrode beeinflusst. Um diesen Effekt zu optimieren sollte die Länge der Öffnung 0,2m2 mal den Wert von L haben, wenn der Durchmesser der Partikelsteueröffnungen geringer ist als ein Wert L der Plasmascheidenabmessung. Wenn beispielsweise der Öffnungsdurchmesser 1 mm ist und die Länge 0,2 bis 1 Mal des Öffnungsdurchmessers ist, ist es für die Plasmaabschirmung nicht ausreichend, und ein großes Volumen von Ionen wird in den Elektrodenraum eingeleitet. Das Ergebnis ist eine Erzeugung von hochdichten Ionen durch eine Leckage in den Raum zwischen den zwei Elektroden und durch eine Beschleunigung zu der negativen Elektrode hin.

[0036] Indem man den stromaufwärts liegenden Öffnungsdurchmesser 1–3 mal den Wert L der Plasmascheidenlänge macht, sollten Ionen in dem Plasma, welches in den Raum zwischen den Elektroden leckt, selektiv beschleunigt werden. Das Plasma, welches durch die Öffnungen in der stromaufwärts liegenden Elektrode leckt, wird verteilt, und seine Dichte fällt ab, wodurch gestattet wird, dass die Elektronen und die Ionen sich unabhängig bewegen. Anders gesagt, ist der Plasmazustand nun stark in dem Raum zwischen den zwei Elektroden ausgelöscht worden, und die Ionen können zu der negativen Elektrode durch den Effekt der Gleichstromvorspannspannung beschleunigt werden. Daher sollte der Grad der Leckage des Plasmas gesteuert werden durch Auswahl des Durchmessers, so dass er 1–3 mal die Plasmascheidenlänge ist, so dass die Plasmaleckagerate kompatibel zur Ionendispersionsrate ist, die in dem Raum zwischen zwei Elektroden auftritt. Wenn die obere Grenze von 3 mal der Plasmascheidenlänge überschritten wird, wird der oben erwähnte Effekt weniger ausreichend, was eine Steigerung der von der Achse entfernt liegenden Komponente der beschleunigenden Ionen zur Folge hat.

[0037] Wenn der Durchmesser der Partikelsteueröffnung geringer als 1 Mal die Plasmascheidenlänge ist, dann gibt es nur eine kleinere Menge einer Plasmaleckage in den Raum zwischen zwei Elektroden, dann werden Ionen mit extrem geringen Energieniveaus in den Elektrodenraum eingeführt, die aus der Strahlsteueröffnung der stromabwärts liegenden Elektrode gemäss der Energiepegel emittiert werden, die von der Gleichstromvorspannspannung aufgeprägt werden. Der Druck in dem Raum zwischen den zwei Elektroden kann im Vergleich zu dem Druck in dem Plasmabildungsabschnitt reduziert werden, und zwar durch Vorsehen eines Auslassloches an der Seitenwand des Entladungs- bzw. Auslassrohrs oder durch Ausführung einer differentiellen Evakuierung des Raumes zwischen den zwei Elektroden. Wenn beispielsweise die Druckdifferenz 1/4 ist, kann die effektive Partikeldichte der Residualgaspartikel in dem Raum zwischen den zwei Elektroden beträchtlich reduziert werden. Durch Anpassung dieser Anordnung wird die Plasmadichte reduziert, und die Kollisionsrate der Ionen mit den Residualpartikeln wird beträchtlich reduziert, dann wird die Bewegungsfreiheit der Ionen gesteigert, und der Effekt der aufgeprägten Vorspannspannung kann genau in den letztendlichen charakteristischen Eigenschaften des ausgegeben Strahls reflektiert werden.

[0038] Das Volumen der in den Elektroderaum eingeleiteten Ionen und der Druck darin können präziser durch die Steuerung der Elektrodentrennungsdistanz

gesteuert werden. Diese Steuerung verhindert eine exzessive Leckage des Plasmas in den Elektrodenraum und die daraus resultierende Möglichkeit einer Lichtbogenbildung zwischen den Elektroden. In diesem Fall kann das hochdichte Plasma, welches in dem induktiv gekoppelten Plasmaerzeugungsabschnitt erzeugt wird, direkt in den Elektrodenraum durch die Öffnung in der stromaufwärts liegenden Elektrode eingeleitet werden, und ein Glühentladungsprozess darf zwischen den Elektroden bei einer niedrigen Vorspannspannung stattfinden. In diesem Fall wird ein hochdichtes Plasma auch bei niedriger Spannung einer Gleichstromvorspannung erhalten, wodurch gestattet wird, dass ein hochdichter schneller Atomstrahl erzeugt wird.

[0039] Es ist auch möglich, eine gepulste Vorspannspannung an die zwei Elektroden anzulegen. Ein solches Verfahren ermöglicht es, einen hochdichten schnellen Atomstrahl durch Beschleunigung von hochdichten Ionen in den Elektrodenraum zu erzeugen, auch wenn eine Lichtbogenbildung zwischen zwei Elektroden auftreten kann, und zwar im Fall von hochdichten Ionen darin.

[0040] Wenn die zwei Elektroden fehlausgerichtet werden, nämlich die entsprechenden Öffnungen der beiden Elektroden, wo die Ionen oder der schnelle Atomstrahl hindurchlaufen, fehlausgerichtet sind, dann steigt der Anteil der beschleunigten Ionen, die die stromaufwärts liegende Oberfläche der stromabwärts liegenden Elektrode treffen, und der Wirkungsgrad der Erzeugung des schnellen Atomstrahls wird verringert. Um solche Probleme zu lösen, kann ein hohles Isolierglied zwischen den beiden Elektroden angeordnet werden, so dass eine integrierte Elektrodeneinheit erhalten werden kann und als ganzes hergestellt werden kann, so dass die Ausrichtung der Öffnungen mit hoher Präzision ausgeführt werden kann.

[0041] Die Merkmale der vorliegenden Quelle für einen schnellen Atomstrahl werden wie folgt zusammengefasst. Die vorliegende Vorrichtung kann die herkömmlichen Schwierigkeiten überwinden, die mit Quellen für schnelle Atomstrahlen der Bauart mit Gleichstromentladung assoziiert sind, dass die Eingabe einer niedrigen Erregungsenergie in das Entladungsrohr keine ausreichende hohe Dichte des Plasmas erzeugt, und folglich nicht einen schnellen Atomstrahl (FAB = Fast Atomic Beam) mit einem niedrigen Energieniveau erzeugen kann. Weiterhin war die Qualität des schnellen Atomstrahls, der durch die herkömmliche Vorrichtung erzeugt wurde, so, dass die Richtungshaltigkeit des Strahls schlecht war, und dass die Strahlverteilung in dem Erzeugungsgefäß groß war, und es war schwierig, den Strahl präzise zu der angepeilten Region des herzustellenden bzw. zu bearbeitenden Objektes zu strahlen. Die vorliegende Vorrichtung hat gezeigt, dass ein hochdichter schneller Atomstrahl mit einer Strahlenergie über einen großen Bereich von gesteuerter Energie von niedrigen bis hohen Niveaus erreicht bzw. realisiert werden kann.

[0042] Durch Veränderung der Konfiguration der Plattenelektroden und der Form der Öffnungen, die sowohl an den ersten als auch den zweiten Elektroden vorgesehen sind, genauso wie durch die Veränderung ihrer Trennungsdistanz, ist es möglich, den Grad der Richtungshaltigkeit zu steuern, weiter die Menge der Radikale und der Residualgaspartikel, die in den Fabrikations- bzw. Bearbeitungsraum ausgelassen werden. Solche schnellen Atomstrahle mit spezifischen Charakteristiken sind wichtig in fortschrittlichen Technologien, die bei Herstellvorgängen für Vorrichtungen mit hoher Leistung erforderlich sind, wie beispielsweise von mikrooptischen Vorrichtungen, wie beispielsweise Quanteneffektvorrichtungen und Herstellung bzw. Bearbeitung mit niedriger Energie von dreidimensionalen Objekten, um einen internen strukturellen Schaden zu minimieren, genauso wie bei der Mikrofabrikation von optischen Vorrichtungen mit vielen Facetten. Es wird angenommen, dass signifikante Gelegenheiten für die vorliegende Quelle für schnelle Atomstrahlen existieren, um neue Wege zu Entdeckungen auf akademischem und industriellem Gebiet vorzusehen, indem ermöglicht wird, dass effektive und wirkungsvolle Mittel zur Mikrobearbeitung von feinen Objekten im Bereich von Mikro- und Nanometern vorgesehen werden.

[0043] Obwohl die Ausführungsbeispiele oben beschrieben wurden, ist es dem Fachmann klar, dass verschiedene Modifikationen und Anwendungen möglich sind, ohne vom Umfang der beigefügten Ansprüche abzuweichen.

Patentansprüche

1. Quelle (**1**) für einen schnellen Atomstrahl zur Erzeugung eines hoch gerichteten Atomstrahls, wobei die Quelle (**1**) Folgendes aufweist: eine Entladungsröhre (**21**);

einen Gaseinlass (**22**), der sich in die Entladungsröhre (**21**) erstreckt, um dahinein ein Gas einzuleiten;

ein induktiv gekoppelter Plasmagenerator (**24**) zur Erzeugung von Gasplasma in einer Plasmabildungszone (**27**) in der Entladungsröhre (**21**), und zwar durch Erregen des Gases darin in einen Plasmazustand;

eine stromaufwärts gelegene positive Elektrode (**29**), positioniert stromaufwärts gegenüber der Plasmabildungszone (**27**) und eine stromabwärts gelegene negative Elektrode (**30**), positioniert stromabwärts gegenüber der Plasmabildungszone (**27**), wobei die stromaufwärts gelegene Elektrode (**29**) Gasdurchlässe (**29a**) darin hat, um den Durchgang von Gas dahindurch in die Plasmabildungszone (**27**) zu ermöglichen;

eine Spannungserzeugungsvorrichtung (**32**) zum Anlegen einer Spannung zwischen den Elektroden (**29**, **30**) und zum Erzeugen eines elektrischen Feldes dazwischen, wodurch bewirkt wird, dass positive Ionen zu der stromabwärts gelegenen Elektrode (**30**) hin

beschleunigt werden;
wobei die stromaufwärts gelegene Elektrode (**29**) sowie die stromabwärts gelegene Elektrode (**30**) beide plattenförmig sind; und
wobei die stromabwärts gelegene Elektrode (**30**) Strahlsteueröffnungen (**30a**) darin aufweist, die betreibbar sind, um die erwähnten positiven Ionen hindurch zu leiten, während die erwähnten Ionen neutralisiert werden, um dadurch einen stark gerichteten Atomstrahl zu erzeugen.

2. Quelle (**1**) nach Anspruch 1, wobei die plattenförmigen Elektroden (**29**, **30**) sich quer in einer Längsdimension der Entladungsröhre (**21**) und parallel zueinander erstrecken.

3. Quelle (**1**) nach Anspruch 1, wobei jede Strahlsteueröffnung (**30a**) eine Länge von einmal bis fünfmal einem Durchmesser derselben aufweist.

4. Quelle (**1**) nach Anspruch 1, wobei jede Strahlsteueröffnung (**30a**) eine Länge besitzt, die das fünf- bis zwanzigfache eines Durchmessers derselben ist.

5. Quelle (**1**) nach Anspruch 1, wobei jede Strahlsteueröffnung (**30a**) eine Länge besitzt, die größer ist als das zwanzigfache eines Durchmessers davon.

6. Quelle (**1**) für einen schnellen Atomstrahl zur Erzeugung eines hoch gerichteten Atomstrahls, wobei Folgendes vorgesehen ist:
eine Entladungsröhre (**21**);
ein Gaseinlass (**22**), der sich in die Entladungsröhre (**21**) erstreckt, um dahinein ein Gas einzuführen;
ein induktiv gekoppelter Plasmagenerator (**24**) zur Erzeugung eines Gasplasmas in einer Plasmabildungszone (**27**) in der Entladungsröhre (**21**), und zwar durch Erregen des Gases darin in einen Plasmazustand;
eine stromaufwärts gelegene positive Elektrode (**35**) und eine stromabwärts gelegene negative Elektrode (**36**), und zwar relativ zu dem Ausgang des schnellen Atomstrahls und beide positioniert stromabwärts gegenüber der Plasmabildungszone (**27**) und dazwischen einen Raum definierend, wobei die stromaufwärts gelegene Elektrode (**35**) Durchlässe (**35a**) darin ausgebildet aufweist, durch die Plasma von der Plasmabildungszone (**27**) zu dem erwähnten Raum laufen kann;
eine Spannungserzeugungsvorrichtung (**32**) zum Anlegen einer Spannung zwischen den erwähnten Elektroden (**35**, **36**) und zur Erzeugung eines elektrischen Feldes in dem erwähnten Raum dazwischen, wodurch bewirkt wird, dass positive Ionen zu der stromabwärts gelegenen Elektrode (**36**) hin beschleunigt werden;
wobei die stromaufwärts gelegene Elektrode (**35**) und die stromabwärts gelegene Elektrode (**36**) beide plattenförmig sind, und wobei die stromabwärts gelegene Elektrode (**36**) darin Strahlsteueröffnungen (**36a**) aufweist, die betreibbar sind, um dahindurch positive Ionen zu leiten, während die erwähnten Ionen neutralisiert werden, um dadurch einen stark gerichteten Atomstrahl zu emittieren.

7. Quelle (**1**) nach Anspruch 6, wobei die plattenförmigen Elektroden (**35**, **36**) sich quer zu einer Längsdimension der Entladungsröhre (**21**) parallel zueinander erstrecken.

8. Quelle (**1**) nach Anspruch 6, wobei jede der Strahlsteueröffnungen (**36a**) eine Länge besitzt, die das ein- bis fünffache eines Durchmessers derselben ist.

9. Quelle (**1**) nach Anspruch 6, wobei jede der Strahlsteueröffnungen (**36a**) eine Länge besitzt, die das fünf- bis zwanzigfache eines Durchmessers davon ist.

10. Quelle (**1**) nach Anspruch 6, wobei jede der Strahlsteueröffnungen (**36a**) eine Länge besitzt, die größer ist als das zwanzigfache eines Durchmessers derselben.

11. Quelle (**1**) nach Anspruch 6, wobei jeder Durchlass eine Länge gleich dem 0,2- bis 1,0-fachen seines Durchmessers besitzt.

12. Quelle (**1**) nach Anspruch 6, wobei die stromabwärts gelegene Elektrode (**36**) eine Dicke besitzt, die größer ist als die der stromaufwärts gelegenen Elektrode (**35**).

13. Quelle (**1**) nach Anspruch 6, wobei die Strahlsteueröffnungen (**36a**) ausgerichtet sind mit und den gleichen Durchmesser besitzen, wie die entsprechenden erwähnten Durchlässe (**35a**).

14. Quelle (**1**) nach Anspruch 6, wobei ferner Mittel vorgesehen sind zum Einstellen eines Trennungsabstandes zwischen den stromaufwärts und stromabwärts gelegenen Elektroden (**35**, **36**), wodurch die Dichte des Atomstrahls reguliert oder gesteuert wird.

15. Quelle (**1**) nach Anspruch 6, wobei ferner Mittel vorgesehen sind, um Gas aus dem Raum auszustoßen und dadurch einen Differenzdruck zwischen der Plasmabildungszone (**27**) und dem erwähnten Raum zu vergrößern.

16. Quelle (**1**) nach Anspruch 15, wobei die Mittel mit dem erwähnten Raum verbundene Auslassmittel aufweisen.

17. Quelle (**1**) nach Anspruch 15, wobei die erwähnten Mittel ein Loch durch eine Seitenwand aufweisen, die den Raum definiert.

18. Quelle (**1**) nach Anspruch 6, wobei ferner ein

Isolierglied vorgesehen ist, welches den Raum ausfüllt und Löcher besitzt, die ausgerichtet sind mit den entsprechenden Durchlässen (**35a**) und Öffnungen (**36a**).

19. Quelle nach Anspruch 18, wobei die stromaufwärts und stromabwärts gelegenen Elektroden (**35**, **36**) und das Isolationsglied eine integrale Einheit aufweisen bzw. bilden.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG. 1 Stand der Technik

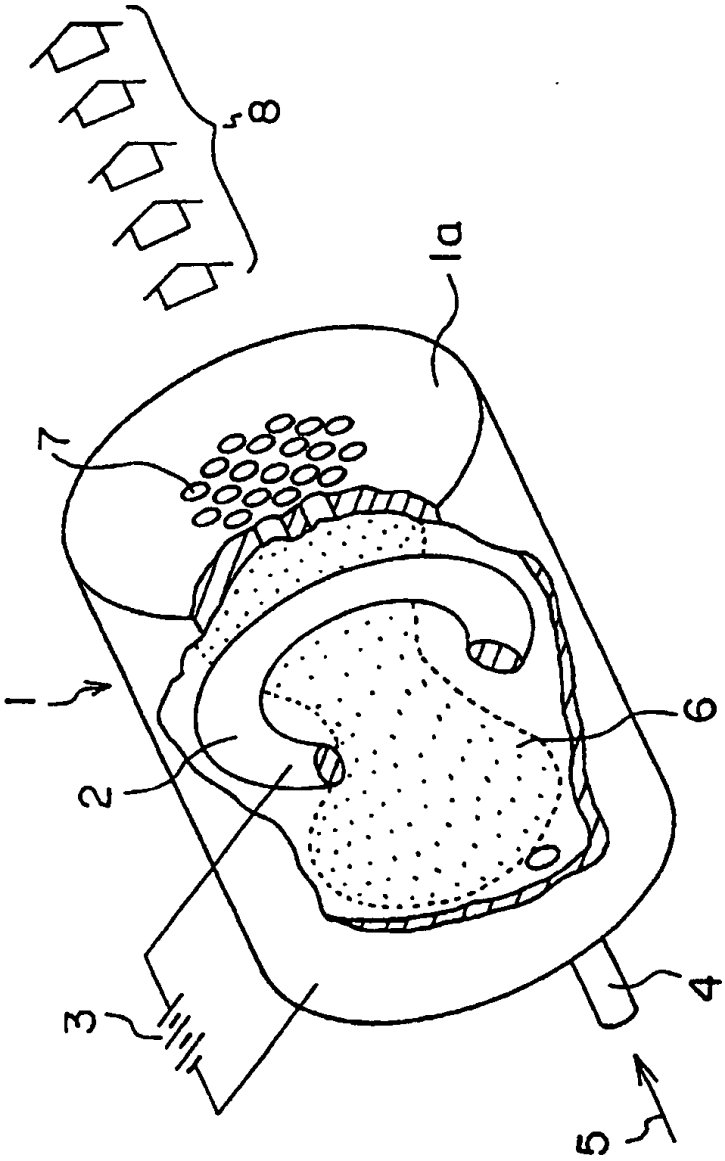


FIG. 2

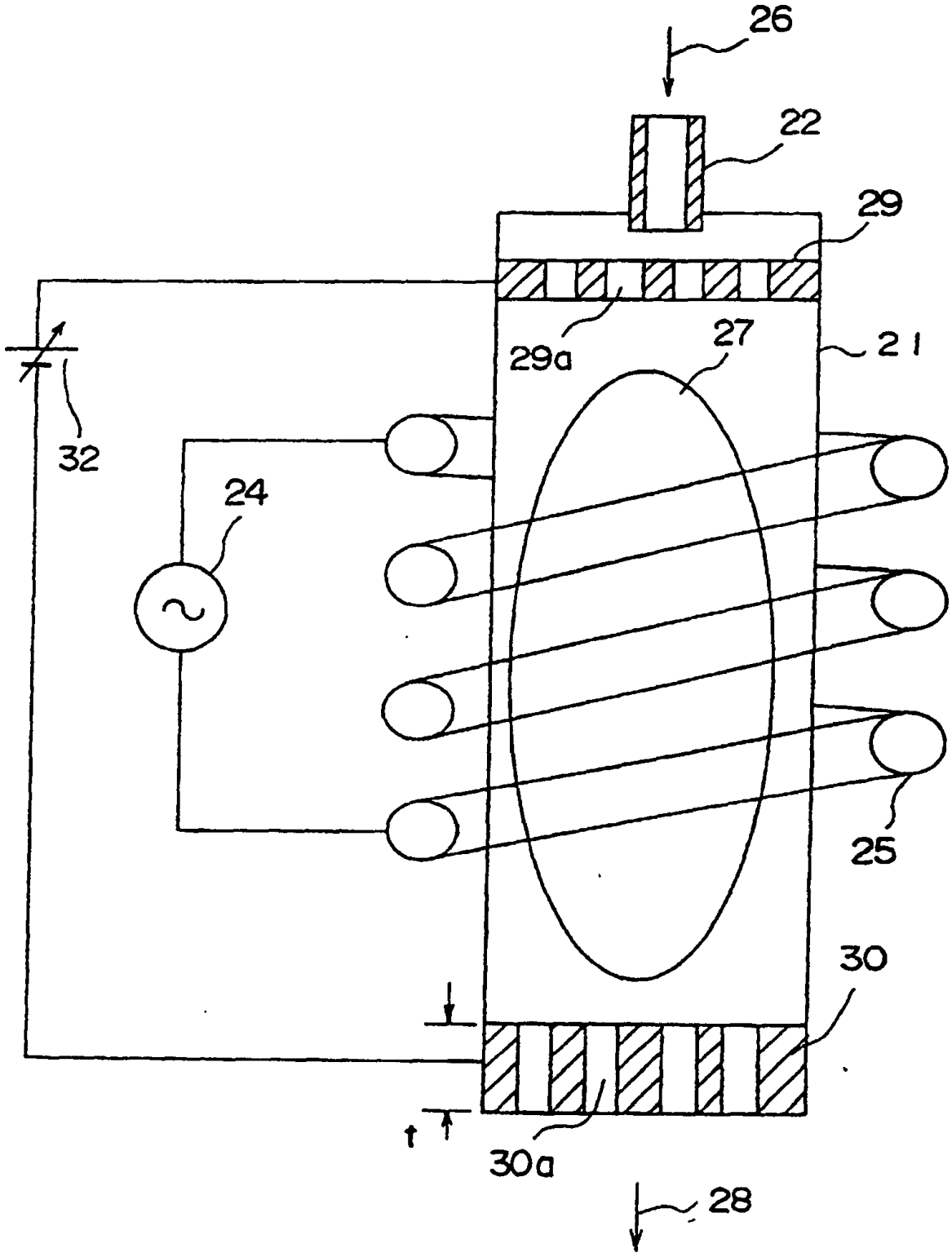


FIG.3

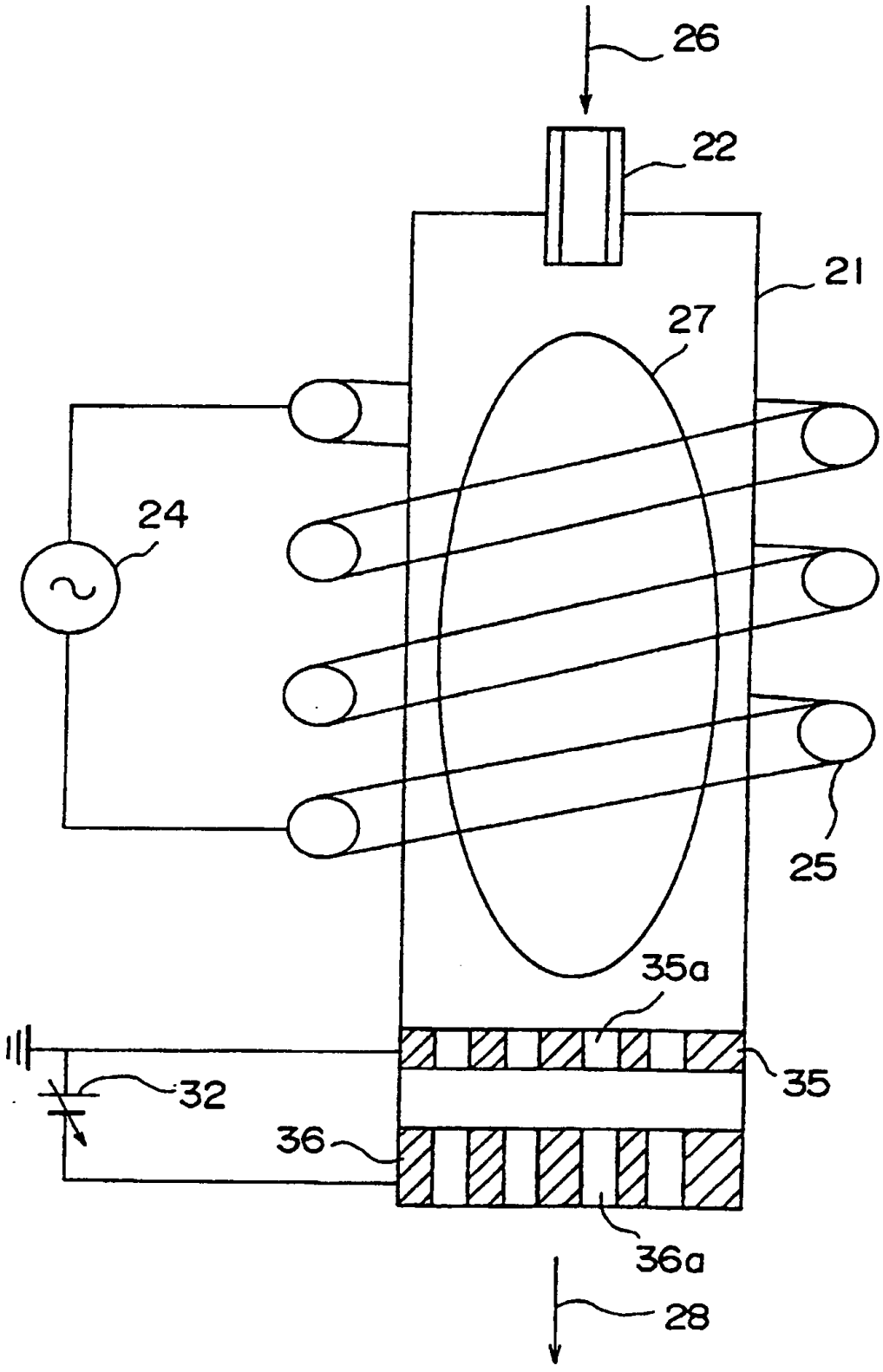


FIG. 4A

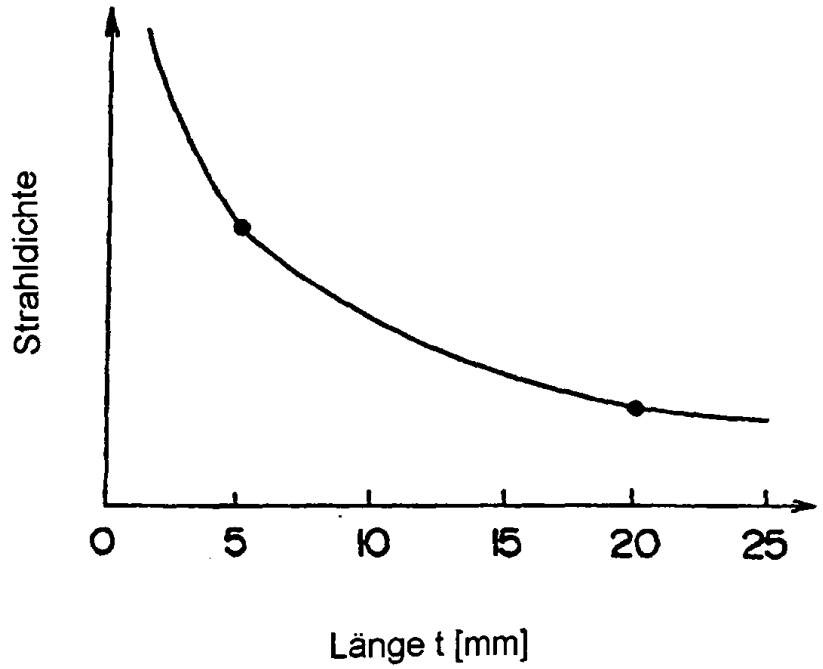
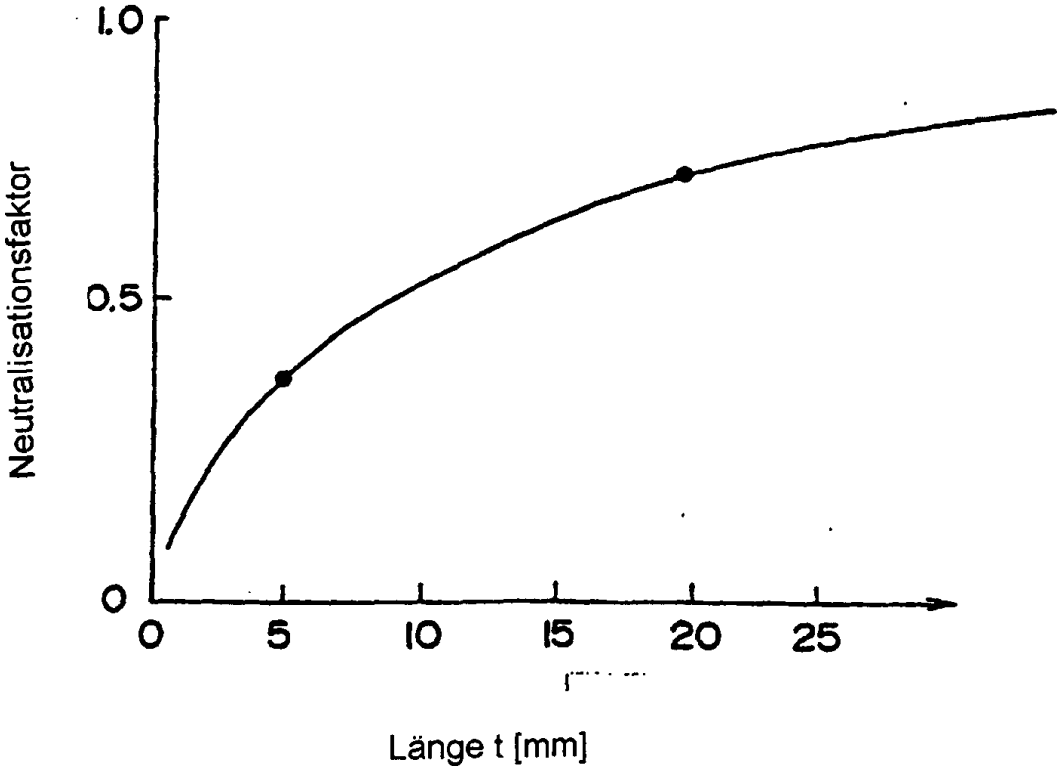

Strahldichte
0
5
10
15
20
25
Länge t [mm]

FIG. 4B


Neutralisationsfaktor
1.0
0.5
0
0
5
10
15
20
25
Länge t [mm]