



(11)

EP 1 442 640 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
28.12.2011 Patentblatt 2011/52

(51) Int Cl.:
H05H 1/54 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **02785332.4**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2002/012095

(22) Anmeldetag: **30.10.2002**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2003/039215 (08.05.2003 Gazette 2003/19)

(54) **PLASMABESCHLEUNIGER-ANORDNUNG**

PLASMA ACCELERATOR SYSTEM

ENSEMBLE ACCELERATEUR DE PLASMA

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE FR GB IT

(30) Priorität: **31.10.2001 DE 10153723**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
04.08.2004 Patentblatt 2004/32

(73) Patentinhaber: **Thales Electron Devices GmbH**
89077 Ulm (DE)

(72) Erfinder:
• **KORNFELD, Günter**
89275 Elchingen (DE)

• **COUSTOU, Gregory**
89071 Ulm (DE)
• **EMSELLEM, Gregory**
F- Bourg la Reine (FR)

(74) Vertreter: **Weber, Gerhard**
Patentanwalt
Postfach 2029
89010 Ulm (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
DE-A- 10 014 033 DE-A- 10 014 034
DE-A- 19 828 704

EP 1 442 640 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Plasmabeschleuniger-Anordnung

[0002] Plasmabeschleuniger-Anordnungen dienen beispielsweise als Antriebe für Raumflugkörper. Dabei wird in einer Plasmakammer ein Arbeitsgas ionisiert und die Ionen werden in einem elektrostatischen Feld beschleunigt und mittels zugeführter Elektronen als neutralisierter Plasmastrahl ausgestossen.

[0003] Die gebräuchlichste Ausführungsart solcher Plasmabeschleuniger-Anordnungen ist der sogenannte Hall-Thruster, dessen ringförmige Plasmakammer von einem im wesentlichen radialen statischen Magnetfeld durchsetzt ist. Solche Hall-Thruster sind beispielsweise bekannt aus der EP 0541309 A1 oder der US 5847493.

[0004] Bei diesen Hall-Thrustern emittiert eine auf der Seite des Strahlaustritts der Plasmakammer außerhalb dieser und seitlich gegen diesen versetzt angeordnete Elektronenquelle einen Elektronenstrom, welcher teilweise unter dem Einfluss des elektrischen Feldes zwischen Elektronenquelle und am Boden der Plasmakammer angeordneter Anode als Ionisationselektronen in die Plasmakammer geleitet und teilweise als Neutralisationselektronen von aus der Kammer austretenden Ionen mitgetragen werden. Die Ionisationselektronen werden in der Plasmakammer unter dem Einfluß des Magnetfelds umgelenkt und bilden ringförmige Driftströme, wodurch die Verweildauer und die Ionisationswirkung auf in die Plasmakammer eingeleitetes Arbeitsgas wesentlich erhöht wird.

[0005] DE-AS1222589 zeigt eine Plasmabeschleuniger-Anordnung, bei welcher in einer durch eine Anode und eine Kathode längsbegrenzten Plasmakammer durch ein elektrostatisches Feld zwischen Anode und Kathode eine Bogenentladung gezündet wird. Die dabei entstehenden Ionen werden durch eine außerhalb der Plasmakammer und von dieser durch eine isolierte Elektrode getrennt angeordnete ringförmige Ionen-Beschleunigungselektrode abgezogen und beschleunigt ausgestoßen. Ein von der Kathodenseite auf der Mittelachse der Anordnung zugeführter energiereicher gebündelter Elektronenstrahl läuft durch die Plasmakammer und tritt mit den Elektronen des Elektronenstrahls durch die Beschleunigungselektrode aus und neutralisiert den Ionenstrahl. Die bei der Bogenentladung entstehenden Elektronen und die durch Stoßvorgänge abgebremsten Elektronen des zugeführten Strahls führen eine oszillierende Bewegung zwischen der Ionen-Beschleunigungselektrode und der Kathode aus. Ein zur Längsachse paralleles magnetisches Kollimatorfeld bündelt die Teilchenströme um die Mittelachse. An die Beschleunigungselektrode können sich weitere elektrostatische Beschleunigungsstufen mit magnetischer Bündelung anschließen.

[0006] In Patent Abstracts of Japan 09223474 ist ein Plasmabeschleuniger beschrieben, welcher nacheinander eine Plasma-Generatorkammer und eine Plasma-Beschleunigerkammer aufweist, durch welche jeweils

Arbeitsgas durchgeleitet ist. Eine Spulanordnung erzeugt ein strahlparalleles magnetisches Feld. In beiden Kammern sind aufeinanderfolgend mehrere den Strahl umfassende Stabilisierungselektroden angeordnet.

[0007] Aus der DE19828704A1 ist eine Plasmabeschleuniger-Anordnung bekannt, bei welcher ein energiereicher gebündelter Elektronenstrahl in eine von einer Anode und einer Endelektrode in Längsrichtung begrenzte Plasmakammer eingeleitet und längs der Mittelachse durch eine Magnetanordnung geführt wird. In Längsrichtung zwischen Anode und Endelektrode sind mehrere Zwischenelektroden vorgesehen, welche die Potentialdifferenz zwischen Anode und Endelektrode in mehrere Stufen unterteilen. Die Magnetanordnung zeigt die Besonderheit, dass das von ihr in der Plasmakammer erzeugte Magnetfeld in Längsrichtung periodisch die Polarität wechselt und in Längsrichtung alternierend Feldabschnitte erster Art und zweiter Art auftreten, wobei in den Abschnitten erster Art die Feldlinien überwiegend radial, d. h. senkrecht zur Längsrichtung, und in den Abschnitten zweiter Art die Feldlinien überwiegend achsial, d. h. parallel zur Längsrichtung verlaufen. Die Abschnitte erster Art liegen vorzugsweise zwischen zwei in Längsrichtung aufeinanderfolgenden Elektroden und bilden Barrieren für zur Anode hin beschleunigte Elektronen. Eine derart mehrstufig mit den Elektronenbarrieren aufgebaute Anordnung ermöglicht eine Steigerung des Wirkungsgrads des Plasmabeschleunigers. Die DE 10014033 A1 beschreibt eine Plasmabeschleuniger-Anordnung mit einer ähnlichen Magnetfeldanordnung für eine ringförmige Plasmakammer und eine am Ende der Plasmakammer außen liegende Elektronenquelle. Eine aus der DE 10014033 A1 bekannte Plasmabeschleuniger-Anordnung sieht vor, in eine ringförmige Plasmakammer von der Anodenseite her beschleunigte Elektronen in Form eines zylindrischen Hohlstrahls in die Plasmakammer einzuleiten.

[0008] Die US 6215124 B1 beschreibt einen Ionenbeschleuniger nach Art eines Hall-Thrusters mit einer ringförmigen Plasmakammer und einem im wesentlichen radialen Magnetfeld zwischen einem radial innenliegenden ersten und einem radial außenliegenden zweiten Magnetpol. Als Besonderheit ist hier vorgesehen, dass an der Strahlaustrittsseite der Plasmakammer an deren in Strahlrichtung weisender, im wesentlichen quer zur Strahlrichtung und außerhalb der Plasmakammer liegender Stirnfläche elektrisch isoliert mehrere Elektroden in unterschiedlichen radialen Abständen zum Ausgang der Plasmakammer angeordnet sind, welche auf unterschiedlichen Zwischenpotentialen zwischen dem Kathodenpotential und dem Anodenpotential oder auch darunter liegen. Durch einen magnetischen Kurzschluss um den Anodenbereich wird ein Maximum des Longitudinalgradienten des magnetischen Felds in Richtung des Ausgangs der Plasmakammer und vorzugsweise nach außerhalb verschoben. Durch die Zwischenelektroden an der außen liegenden Stirnfläche kann in dem elektrostatischen

tischen Beschleunigungsfeld eine der Divergenz des Ionenstrahls entgegenwirkende Feldlinse erzeugt und das Maximum des Beschleunigungsfelds in Strahlrichtung hinter die Strahlaustrittsöffnung verlegt werden.

[0009] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine derartige Plasmabeschleuniger-Anordnung, insbesondere hinsichtlich des Wirkungsgrads weiter zu verbessern.

[0010] Die Erfindung ist im Patentanspruch 1 beschrieben. Die abhängigen Ansprüche enthalten vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung.

[0011] Durch die erfindungsgemäße Stufung der über die Länge der Plasmakammer anstehenden Potentialdifferenz in eine ausgangsseitige letzte Potentialstufe mit relativ hoher und eine oder mehrere anodenseitige Potentialstufen mit demgegenüber kleiner Potentialdifferenz, wie in den Ansprüchen und nachfolgend noch präziser angegebenen Verhältnissen, steht in der Beschleunigungsstufe und damit an einer Position, wo die Ionenkonzentration durch Ionisation der vorhergehenden Stufen bereits hoch ist, eine hohe Potentialdifferenz zur Beschleunigung der Ionen auf eine große Geschwindigkeit und damit großem Impuls zur Verfügung, wogegen die demgegenüber geringe Potentialdifferenz der vorangehenden Stufen besonders günstig für die Ionisation des Arbeitsgases ist. Zugleich steht aber auch die Beschleunigungsstufe für die Vervielfältigung der dort zugeführten Ionisationselektronen durch Stoßionisation und dabei entstehende Sekundärelektronen zur Verfügung.

[0012] Mit Ionisationselektronen seien dabei und im folgenden die Elektronen verstanden, welche in dem elektrostatischen Feld zur Anode hin beschleunigt werden und bei ihrer durch das Magnetfeld beeinflussten Bewegung positiv geladene Ionen des Arbeitsgases erzeugen. Die Bezeichnung Ionisationselektronen grenzt diese Elektronen zugleich von den als Neutralisationselektronen bezeichneten Elektronen ab, welche mit dem beschleunigten Ionenstrahl nach außen abgegeben werden und einen ladungsneutralen Plasmastrahl gewährleisten. Ionisationselektronen und Neutralisationselektronen können, zumindest teilweise, derselben Elektronenquelle entstammen.

[0013] Als letzte oder austrittsseitige Potentialstufe sei der Abschnitt zwischen einer beim Austritt des Plasmastrahls aus der Plasmakammer angeordneten Endelektrode und einer dieser in Richtung zur Anode nächsten Zwischenelektrode bezeichnet. Die in dieser Potentialstufe auftretende Potentialdifferenz zwischen der Endelektrode und der nächsten Zwischenelektrode ist als letzte Potentialdifferenz bezeichnet.

[0014] Von besonderer Bedeutung für die Erfindung ist die in der Plasmakammer vorliegende Magnetfeldkonfiguration in Verbindung mit der Elektrodenanordnung innerhalb der Plasmakammer, vorzugsweise in Form einer in Längsrichtung alternierenden Folge von Abschnitten erster Art mit überwiegend radial, d. h. senkrecht zur Längsrichtung der Plasmakammer verlaufenden Feldlinien und Abschnitten zweiter Art mit überwiegend

achsialen, d. h. parallel zur Längsrichtung der Plasmakammer verlaufenden Feldlinien, und insbesondere das in der Plasmakammer bestehende Magnetfeld mit dem Magnetfeldabschnitt in der letzten Potentialstufe in Verbindung mit der großen Potentialdifferenz der austrittsseitigen letzten Potentialstufe. Die Zwischenelektroden liegen vorzugsweise zwischen benachbarten Magnetfeldabschnitten erster Art mit überwiegend radialem Verlauf des Magnetfelds.

[0015] Insbesondere in der letzten Potentialstufe verhindert ein Magnetfeldabschnitt erster Art, dass die der letzten Potentialstufe zugeführten Ionisationselektronen hoch beschleunigt werden und unter Verlust der dabei aufgenommenen Energie auf eine der nächsten Elektroden aufschlagen. Vielmehr bildet ein Magnetfeldabschnitt erster Art eine Barriere für die im elektrostatischen Feld beschleunigten Elektronen, indem diese auf Driftbahnen mit überwiegend quer zur Längsrichtung verlaufender Bewegungskomponente gezwungen werden und die Energie aus dem elektrostatischen Feld schrittweise durch Stoßionisation abbauen bis sie die Barriere überwinden. Dabei ergibt sich auch bereits in der dem Plasmastrahlaustritt nächsten, als letzte Stufe bezeichneten Potentialstufe ein hoher Vervielfältigungsfaktor der Ionisationselektronen, so dass bereits die letzte Potentialstufe eine hohe Zahl von Elektronen an die vorletzte Potentialstufe übergibt.

[0016] Der Magnetfeldabschnitt erster Art in der letzten Potentialstufe liegt dabei vorteilhafterweise zwischen den die letzte Stufe bildenden Elektroden, insbesondere in einem Bereich, wo das elektrostatische Feld im wesentlichen achsial verläuft und hohe Werte aufweist. Die Ionen werden durch das magnetische Feld nicht nennenswert in ihrer Bewegung beeinflusst und durch das elektrostatische Feld der letzten Potentialstufe achsial hoch beschleunigt, wobei durch die erfindungsgemäße starke Ungleichheit der Potentialstufen die hohe Beschleunigung im Längsverlauf der Plasmakammer vorteilhafterweise erst in einem Bereich einsetzt, in welchem der Ionisationsgrad des Arbeitsgases sehr hoch ist, so dass die letzte Potentialstufe, die fast die gesamte Potentialdifferenz der Anordnung umfasst, im wesentlichen für alle Arbeitsgasionen zur Beschleunigung ausgenutzt werden kann.

[0017] Die letzte Potentialdifferenz beträgt vorteilhafterweise wenigstens das 4-fache, insbesondere wenigstens das 10-fache der ersten Potentialdifferenz, d. h. der Potentialdifferenz zwischen der dem Plasmaaustritt abgewandten Elektrode und der dieser in Richtung des Plasmaaustritts nächsten Zwischenelektrode. Der Abschnitt zwischen Anode und der dieser nächsten Zwischenelektrode sei als erste Potentialstufe bezeichnet.

[0018] Bei mehr als einer Zwischenelektrode zwischen Anode und Endelektrode treten entsprechend weitere Zwischenpotentialstufen zwischen aufeinanderfolgenden Zwischenelektroden auf. Die Potentialdifferenz der letzten Potentialstufe beträgt dann vorteilhafterweise wenigstens das 4-fache, insbesondere wenigstens das 10-

fache der größten Potentialdifferenz der übrigen Potentialstufen.

[0019] Die letzte Potentialdifferenz ist vorteilhafterweise größer als die Summe der übrigen Potentialdifferenzen und beträgt vorzugsweise wenigstens das 2-fache, insbesondere wenigstens das 4-fache der Summe der übrigen Potentialdifferenzen.

[0020] Vorteilhafterweise zeigt sich dass die Zwischenpotentiale der Zwischenelektroden nicht zwingend fest vorgegeben werden müssen, sondern dass ein oder mehrere Zwischenelektroden auch auf gleitenden Potentialen liegen können.

[0021] Die Endelektrode kann gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform durch eine die Plasmakammer beim Austritt des Plasmastrahls umgebende und/oder seitlich begrenzende Elektrode gebildet sein. In anderer vorteilhafter Ausführungsform kann die Endelektrode auch beim Plasmastrahlaustritt außerhalb der Plasmakammer, insbesondere auch nach Art der Kathoden der Hall-Thruster-Anordnungen seitlich versetzt angeordnet sein.

[0022] Die die Ionisation einleitenden Ionisationselektronen können der letzten Potentialstufe in an sich bekannter Weise zugeführt sein. Beispielsweise kann ein beschleunigter Elektronenstrahl von der Anodenseite der Plasmakammer in diese eingeführt werden und durch die Magnetfeldanordnung in Längsrichtung zentral geführt sein. Die Elektronen des Elektronenstrahls ES werden in dem elektrischen Feld abgebremst. Ein Teil der Elektronen des Elektronenstrahls wird am Ende der letzten Potentialstufe umgelenkt und als Ionisationselektronen zur Anode hin beschleunigt. Ein anderer Teil der Elektronen des Elektronenstrahls tritt mit den Arbeitsgas-Ionen als elektrisch neutraler Plasmastrahl aus der Kammer aus. In anderer, den Hall-Thrustern ähnlicher Weise ist eine Elektronenquelle beim Austritt des Plasmastrahls außerhalb der Plasmakammer seitlich versetzt angeordnet und emittiert einen Elektronenstrom, welcher zum Teil als Ionisationselektronen durch den Plasmastrahlaustritt in die Plasmakammer geleitet wird und zu einem anderen Teil durch Raumladungseffekte eines nicht neutralisierten Ionenstroms mitgetragen wird und die Ausgabe eines elektrisch neutralen Plasmastrahls bewirkt. In wieder anderer Ausführung kann beim Austritt des Plasmastrahls aus der Plasmakammer eine Elektrode vorgesehen sein, welche einem Randbereich des Plasmastrahls ausgesetzt ist. Die an dieser Position bereits hoch beschleunigten Ionen setzen beim Auftreffen auf diese Elektrode einen Elektronenschauer und/oder durch Raumladungseffekte Elektronen frei, welche wieder teilweise als Ionisationselektronen in Anodenrichtung beschleunigt und teilweise zur Neutralisierung des Plasmastrahls mitgetragen wird. Zur Erzeugung eines anfänglichen Ionenstroms kann, z. B. durch kurzes Erhöhen des Gasdrucks und/oder der Potentialdifferenz der letzten Potentialstufe eine Gasentladung gezündet werden. Ein Start kann aber auch allein durch spontane Ionisation, z.B. durch hochenergetische Höhenstrahlung

erfolgen. Die verschiedenen Arten von Elektronenquellen können auch kombiniert realisiert sein.

[0023] Die Erfindung ist nachfolgend anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die Abbildungen noch eingehend veranschaulicht. Dabei zeigt

Fig. 1 einen Längsschnitt durch eine Plasmakammer,
Fig. 2 eine Anordnung mit außenliegender Elektronenquelle,
Fig. 3 eine Anordnung mit Ionenbeaufschlagter Elektrode als Elektronenquelle.

[0024] Bei der in Fig. 1 skizzierten Plasmabeschleuniger-Anordnung ist eine Plasmakammer PK im wesentlichen kreiszylindrisch um eine Längsachse LA aufgebaut. Die Plasmakammer ist von mehreren, in Längsrichtung LR beabstandet aufeinanderfolgenden, vorzugsweise kreisringförmigen Elektroden EA, EZ1, EZ2, EE auf verschiedenen Potentialen umgeben. Der Plasmakammer ist ein Arbeitsgas AG, insbesondere Xenon, zugeführt.

[0025] Ein eng gebündelter, hoch beschleunigter Elektronenstrahl ES aus einer nicht eingezeichneten Strahlquelle ist auf der Längsachse von Seiten der ersten, auch als Anode bezeichneten Elektrode EA, in die Plasmakammer geleitet und durch das Magnetfeld MF einer die Plasmakammer umgebenden Magnetanordnung auf der Längsachse LA zentral geführt.

[0026] Der Potentialverlauf über die verschiedenen Potentiale der getrennten Elektroden ist in Längsrichtung LR monoton und so gerichtet, dass die Elektronen des Elektronenstrahls entlang ihres Wegs durch die Plasmakammer abgebremst und in der Plasmakammer erzeugte positiv geladene Ionen des Arbeitsgases in Richtung der Endelektrode EE, welche als letzte Elektrode der Reihe am Strahlaustritt SA der Plasmakammer angeordnet ist, beschleunigt werden. Ionen und Elektronen NE verlassen die Plasmakammer am Strahlaustritt als elektrisch neutraler Plasmastrahl PB.

[0027] Die Magnetanordnung ist schematisch repräsentiert durch mehrere, die Plasmakammer umgebende Magnetringe MR, welche in Längsrichtung aufeinanderfolgend alternierend entgegengesetzt gepolt sind.

[0028] Eine solche Magnetanordnung erzeugt in der Plasmakammer ein Magnetfeld, welches in Längsrichtung an Positionen zwischen aufeinanderfolgenden Magnetringen Abschnitte MA1A, MA1Z, MA1E erster Art aufweist, in welchen das Magnetfeld MF überwiegend radial gerichtet ist.

[0029] Die Magnetfeldabschnitte erster Art bilden Elektronen-Barrieren in den durch je zwei aufeinanderfolgende Elektroden gebildeten Potentialstufen mit einer ersten Potentialdifferenz PDA für die erste, anodenseitige Potentialstufe zwischen der Anode EA und der ersten Zwischenelektrode EZ1, einer Zwischenpotentialdifferenz PDZ für eine Zwischenstufe zwischen erster (EZ1) und zweiter (EZ2) Zwischenelektrode und einer letzten, austrittsseitigen Potentialdifferenz PDE für die letzte Po-

tentialstufe zwischen zweiter Zwischenelektrode EZ2 und Endelektrode EE, indem von der Längsachse beabstandete, im elektrostatischen Feld EF der Elektrodenanordnung beschleunigte Elektronen durch das Magnetfeld umgelenkt und lange in einer Stufe gehalten werden. Hierdurch wird die Wahrscheinlichkeit der ionisierenden Wechselwirkung mit dem Arbeitsgas und damit auch das Maß der Vervielfältigung der Elektronen durch die bei der Ionisation freigesetzten Sekundärelektronen stark erhöht.

[0030] Erfindungsgemäß beträgt die Potentialdifferenz PDE der letzten Potentialstufe wenigstens das 4-fache, insbesondere wenigstens das 10-fache der Potentialdifferenz PDA der ersten Potentialstufe bzw. bei mehr als zwei Potentialstufen wenigstens das 4-fache, insbesondere wenigstens das 10-fache der größten der Potentialdifferenzen PDA, PDZ der übrigen Potentialstufen. Diese Potentialdifferenzen PDA, PDZ der übrigen Potentialstufen vorteilhafterweise geringer als die letzte Potentialdifferenz PDE und beträgt vorzugsweise maximal 50% insbesondere maximal 25% der letzten Potentialdifferenz PDE. Beispielsweise kann PDA = 50 V, PDZ = 50 V und PDE = 900 V gewählt sein.

[0031] Die Anzahl von zur Ionisation geeigneten Elektronen steigt durch den Vervielfältigungsfaktor von Stufe zu Stufe von der letzten Potentialstufe zur ersten Potentialstufe steil an. Der Hauptanteil der Ionisation des Arbeitsgases liegt daher in den Potentialstufen PDA und PDZ. Durch den Magnetfeldabschnitt MA1 E erster Art in der letzten Potentialstufe werden aber in dieser Stufe im eingeleiteten Elektronenstrahl starke abgebremste Elektronen lange in dieser Stufe gehalten und erzeugen dadurch bereits eine hohe Zahl von Sekundärelektronen, welche an die in Richtung zur Anode nächstfolgende Stufe übergeben werden. Zugleich hat die Konzentration der in Richtung von der Anode EA zur Endelektrode EE beschleunigten Ionen beim Eintritt in die letzte Potentialstufe ihr Maximum annähernd erreicht, so dass die hohe Potentialdifferenz dieser letzten Potentialstufe im wesentlichen für den gesamten Ionenstrom als Beschleunigungspotential zur Verfügung steht.

[0032] Die Kombination der hohen letzten Potentialdifferenz PDE und des Magnetfeldabschnitts MA1E in der letzten Potentialstufe führt damit zu einem besonders guten Wirkungsgrad der Plasmabeschleuniger-Anordnung.

[0033] Die übrigen Potentialstufen weisen vorteilhafterweise gleichfalls Magnetfeldabschnitte MA1A, MA1Z erster Art auf, welche sich in Längsrichtung aufeinanderfolgend mit Magnetfeldabschnitten MA2 zweiter Art abwechseln, in welchen das Magnetfeld in der Plasmakammer überwiegend achsial, d. h. parallel zur Längsrichtung verläuft. Ein besonders hoher Ionisationsanteil wird in der ersten Potentialstufe erreicht.

[0034] In den Abbildungen sind zur besseren Differenzierung Magnetfeldabschnitte erster und zweiter Art durch Übergangsabschnitte beabstandet eingezeichnet.

[0035] Durch den zur Längsachse hin divergierenden

Verlauf des Magnetfelds in den Abschnitten erster Art und den überwiegend achsialen Verlauf in den Abschnitten zweiter Art werden die Elektronen weitgehend von den seitlichen Elektroden ferngehalten und bleiben als Ionisationselektronen erhalten.

[0036] Während bei der in Fig. 1 skizzierten Anordnung die anfänglichen Ionisationselektronen IE in der letzten Potentialstufe dadurch gewonnen werden, dass ein Teil der Elektronen des eingeleiteten Elektronenstrahls das Potential der Endelektrode nicht überwindet und aus dem Elektronenstrahl abgezweigt und in Gegenrichtung beschleunigt wird, sieht eine in Fig. 2 für den Bereich des Plasmastrahl-Austritts SA skizzierte Ausführungsform eine nach Art der Hall-Thruster außerhalb der Plasmakammer PKT angeordnete Kathode als Elektronenquelle QE vor, deren emittierter Elektronenstrom zu einem ersten Anteil als Ionisationselektronen IE durch den Strahlaustritt SA in die Plasmakammer geleitet ist und zu einem anderen Anteil als Neutralisationselektronen NE von dem Plasmastrahl PB mitgetragen wird. Die Endelektrode kann bei einer solchen Anordnung durch diese Kathode gebildet sein, so dass die letzte Potentialstufe zwischen Kathode EQ und austrittsnächster Zwischenelektrode gebildet ist.

[0037] In der Plasmakammer liegt wiederum zwischen Strahlaustritt SA und Zwischenelektrode EZ2 ein Magnetfeldabschnitt MA1 E erster Art mit der beschriebenen Wirkungsweise auf die von der Kathode EQ in Richtung der Zwischenelektrode beschleunigten Ionisationselektronen vor. Die Plasmakammer ist im Beispiel nach Fig. 2 abweichend von Fig. 1 in an sich gebräuchlicher Ausführung als ringförmig um eine Längsachse LAT angenommen. Die Magnetanordnung enthält dann radial mit gleicher Polung gegenüberstehend innere und äußere Magnetringe MRI bzw. MRA. Die Erzeugung der primären Elektroden ist aber von der kreiszylindrischen oder ringförmigen Kammergeometrie unabhängig und insbesondere ist die externe Kathode EQ als Elektronenquelle für beide Geometrien geeignet.

[0038] Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Ionisationselektronen in der letzten Potentialstufe ist in Fig. 3 skizziert. Hierbei ist die Endelektrode EEB dem Beschuss und/oder Feldeinfluss durch Ionen aus einem Randbereich RP des Plasmastrahls ausgesetzt. Auf die Endelektrode aufschlagende Ionen setzen z.B. Elektronenschauer frei, welche teilweise als Ionisationselektronen IE zur Zwischenelektrode EZ2 hin beschleunigt werden und teilweise auch als Neutralisationselektronenstrom NE von dem Plasmastrahl mitgetragen werden. Die Endelektrode EEB besteht vorteilhafterweise aus dem Ionenbeschuss widerstehendem Material mit hohem Sekundärelektronenemissionskoeffizient. Zwischen Endelektrode EE4 und Zwischenelektrode EZ2 ist wiederum der Magnetfeldabschnitt MA1 E vorgesehen, ohne dass hier der Feldverlauf explizit eingezeichnet ist. Die passive Elektrode ist insbesondere auch vorteilhaft in Verbindung mit Zwischenelektroden auf gleitenden Zwischenpotentialen.

[0039] Die vorstehend und in den Ansprüchen angegebenen sowie die den Zeichnungen entnehmbaren Merkmale sind sowohl einzeln als auch in verschiedenen Kombinationen vorteilhaft realisierbar. Die Erfindung ist nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt, sondern im Rahmen fachmännischen Könnens in mancherlei Weise abwandelbar.

Patentansprüche

1. Plasmäbeschleuniger-Anordnung mit einer Plasmakammer (PK) zwischen einer Anode (EA) und einer in Längsrichtung (LR) der Plasmakammer von der Anode beabstandeten Endelektrode (EE) beim Austritt (SA) des Plasmastrahls (PB) aus der Plasmakammer, sowie mit einer oder mehreren in Längsrichtung zwischen Anode und Endelektrode angeordneten und elektrisch auf Zwischenpotentialen liegenden Zwischenelektroden (EZ1, EZ2) und mit einer Magnetanordnung, die ein Magnetfeld (MF) in der Plasmakammer erzeugt, welches in einem in Längsrichtung (LR) die Endelektrode (EE) und die dieser nächste Zwischenelektrode (EZ2) umfassenden Bereich einen Magnetfeldabschnitt (MA1 E) erster Art überwiegend senkrecht zur Längsrichtung und in dem Magnetfeldabschnitt erster Art in Längsrichtung beidseitig benachbarten Magnetfeldabschnitten zweiter Art überwiegend parallel zur Längsrichtung verläuft, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine letzte Potentialdifferenz (PDE) zwischen der Endelektrode (EE) und der dieser nächsten Zwischenelektrode (EZ2) wenigstens das 4-fache einer ersten Potentialdifferenz (PDA) zwischen der Anode (EA) und der dieser nächsten Zwischenelektrode beträgt.
2. Anordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** mehrere Zwischenelektroden (EZ1, EZ2) vorhanden sind und die letzte Potentialdifferenz (PDE) wenigstens das 4-fache der größten der übrigen Potentialdifferenzen (PDA, PDZ) zwischen jeweils in Längsrichtung aufeinanderfolgenden Elektroden beträgt.
3. Anordnung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Summe der außer der letzten Potentialdifferenz (PDE) anderen Potentialdifferenzen (PDA, PDZ) nicht größer als die letzte Potentialdifferenz, vorzugsweise nicht größer als 50%, insbesondere nicht größer als 25% der letzten Potentialdifferenz ist.
4. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Plasmakammer (PK) von der Seite der Endelektrode (EE) her Ionisationselektronen (IE) zugeführt sind.

5. Anordnung nach Anspruch 4, **gekennzeichnet durch** eine auf der Seite des Plasmastrahlaustritts außerhalb der Plasmakammer angeordnete Elektronenquelle (QE).
6. Anordnung nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein Teil (RP) des Plasmastrahls am Austritt aus der Plasmakammer auf die Endelektrode (EEB) geleitet ist und diese dabei Ionisationselektronen (IE) freisetzt.
7. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Plasmakammer (PK) von der Seite der Anode (EA) ein gebündelter, beschleunigter Elektronenstrahl (ES) zugeführt ist.
8. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Magnetfeldabschnitt (MA1 E) erster Art in Längsrichtung zwischen Endelektrode (EE) und erster Zwischenelektrode (EZ2) liegt.
9. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** mehrere Magnetfeldabschnitte erster Art (MA1A, MA1Z, MA1E) alternierend mit Magnetfeldabschnitten zweiter Art (MA2) in Längsrichtung (LR) aufeinanderfolgen.

Claims

1. Plasma accelerator assembly having a plasma chamber (PK) between an anode (EA) and an end electrode (EE) that is spaced apart from the anode in the longitudinal direction (LR) of the plasma chamber and is situated by the exit (SA) of the plasma beam (PB) from the plasma chamber, and also having one or more intermediate electrodes (EZ1, EZ2) which are arranged in the longitudinal direction between anode and end electrode and are electrically at intermediate potentials and having a magnet assembly producing a magnetic field (MF) in the plasma chamber, which magnetic field runs, in a region comprising in the longitudinal direction (LR) the end electrode (EE) and the intermediate electrode (EZ2) nearest thereto, largely perpendicular with respect to the longitudinal direction in a magnetic field section (MA1E) of a first type and mainly parallel to the longitudinal direction in magnetic field sections of a second type which are adjacent to the magnetic field section of the first type on both sides in the longitudinal direction, **characterized in that** a last potential difference (PDE) between the end electrode (EE) and the intermediate electrode (EZ2) nearest thereto is at least four times a first potential difference (PDA) between the anode (EA) and the intermediate electrode nearest thereto.

2. Assembly according to Claim 1, **characterized in that** a plurality of intermediate electrodes (EZ1, EZ2) are present and the last potential difference (PDE) is at least four times the largest of the remaining potential differences (PDA, PDZ) between electrodes which are respectively arranged sequentially in the longitudinal direction.
3. Assembly according to Claim 1 or 2, **characterized in that** the sum of the other potential differences (PDA, PDZ) not including the last potential difference (PDE) is not greater than the last potential difference, preferably not greater than 50%, in particular not greater than 25%, of the last potential difference.
4. Assembly according to one of Claims 1 to 3, **characterized in that** ionization electrons (IE) are guided into the plasma chamber (PK) from the side of the end electrode (EE).
5. Assembly according to Claim 4, **characterized by** an electron source (QE) arranged on the side of the plasma beam exit outside the plasma chamber.
6. Assembly according to Claim 4 or 5, **characterized in that** a portion (RP) of the plasma beam at the exit of the plasma chamber is guided onto the end electrode (EEB) and the latter releases ionization electrons (IE) in the process.
7. Assembly according to one of Claims 1 to 3, **characterized in that** a focused, accelerated electron beam (ES) is guided into the plasma chamber (PK) from the side of the anode (EA).
8. Assembly according to one of Claims 1 to 7, **characterized in that** the magnetic field section (MA1E) of the first type is located in the longitudinal direction between end electrode (EE) and first intermediate electrode (EZ2).
9. Assembly according to one of Claims 1 to 8, **characterized in that** a plurality of magnetic field sections of the first type (MA1A, MA1Z, MA1E) alternate sequentially in the longitudinal direction (LR) with magnetic field sections of the second type (MA2).

Revendications

1. Ensemble d'accélérateur de plasma présentant une chambre (PK) à plasma disposée entre une anode (EA) et une électrode finale (EE) située à distance de l'anode dans le sens de la longueur (LR) de la chambre à plasma à la sortie (SA) du faisceau (PB) de plasma hors de la chambre à plasma, une ou de plusieurs électrodes intermédiaires (EZ1, EZ2) situées dans le sens de la longueur entre l'ano-

de et l'électrode finale et placées électriquement à des potentiels intermédiaires, un ensemble magnétique qui produit dans la chambre à plasma un champ magnétique (MF) qui, dans une zone qui comprend dans le sens de la longueur (LR) l'électrode finale (EE) et l'électrode intermédiaire (EZ2) la plus proche de celle-ci, s'étend dans une partie de champ magnétique (MA1E) de premier type principalement perpendiculaire au sens de la longueur et dans des parties de champ magnétique de deuxième type, principalement parallèles au sens de la longueur, et voisines des deux côtés de la partie de champ magnétique de premier type dans le sens de la longueur, **caractérisé en ce que** une dernière différence de potentiel (PDE) entre l'électrode finale (EE) et l'électrode intermédiaire (EZ2) la plus proche de cette dernière représente au moins 4 fois une première différence de potentiel (PDA) entre l'anode (EA) et l'électrode intermédiaire la plus proche de cette dernière.

2. Ensemble selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** plusieurs électrodes intermédiaires (EZ1, EZ2) sont prévues et **en ce que** la dernière différence de potentiel (PDE) représente au moins 4 fois la plus grande des autres différences de potentiel (PDA, PDZ) entre des électrodes qui se succèdent dans le sens de la longueur.
3. Ensemble selon les revendications 1 ou 2, **caractérisé en ce que** la somme des différences de potentiel (PDA, PDZ) autre que la dernière différence de potentiel (PDE) n'est pas supérieure à la dernière différence de potentiel et ne représente de préférence pas plus de 50 % et en particulier pas plus de 25 % de la dernière différence de potentiel.
4. Ensemble selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** des électrons d'ionisation (IE) sont apportés à la chambre (PK) à plasma par le côté de l'électrode finale (EE).
5. Ensemble selon la revendication 4, **caractérisé par** une source d'électrons (QE) disposée sur le côté de la sortie du faisceau plasma et à l'extérieur de la chambre à plasma.
6. Ensemble selon les revendications 4 ou 5, **caractérisé en ce qu'**une partie (RP) du faisceau de plasma est amenée à la sortie de la chambre à plasma sur l'électrode finale (EEB) et amène cette dernière à libérer des électrons d'ionisation (IE).
7. Ensemble selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce qu'**un faisceau d'électrons (ES) accéléré et concentré est apporté à la chambre (PK) à plasma du côté de l'anode (EA).

8. Ensemble selon l'une des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** la partie (MA1E) de champ magnétique de premier type est située dans le sens de la longueur entre l'électrode finale (EE) et la première électrode intermédiaire (EZ2). 5
9. Ensemble selon l'une des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce que** plusieurs parties de champ magnétique de premier type (MA1A, MA1Z, MA1E) se succèdent en alternance avec des parties de champ magnétique de deuxième type (MA2) dans le sens de la longueur (LR). 10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

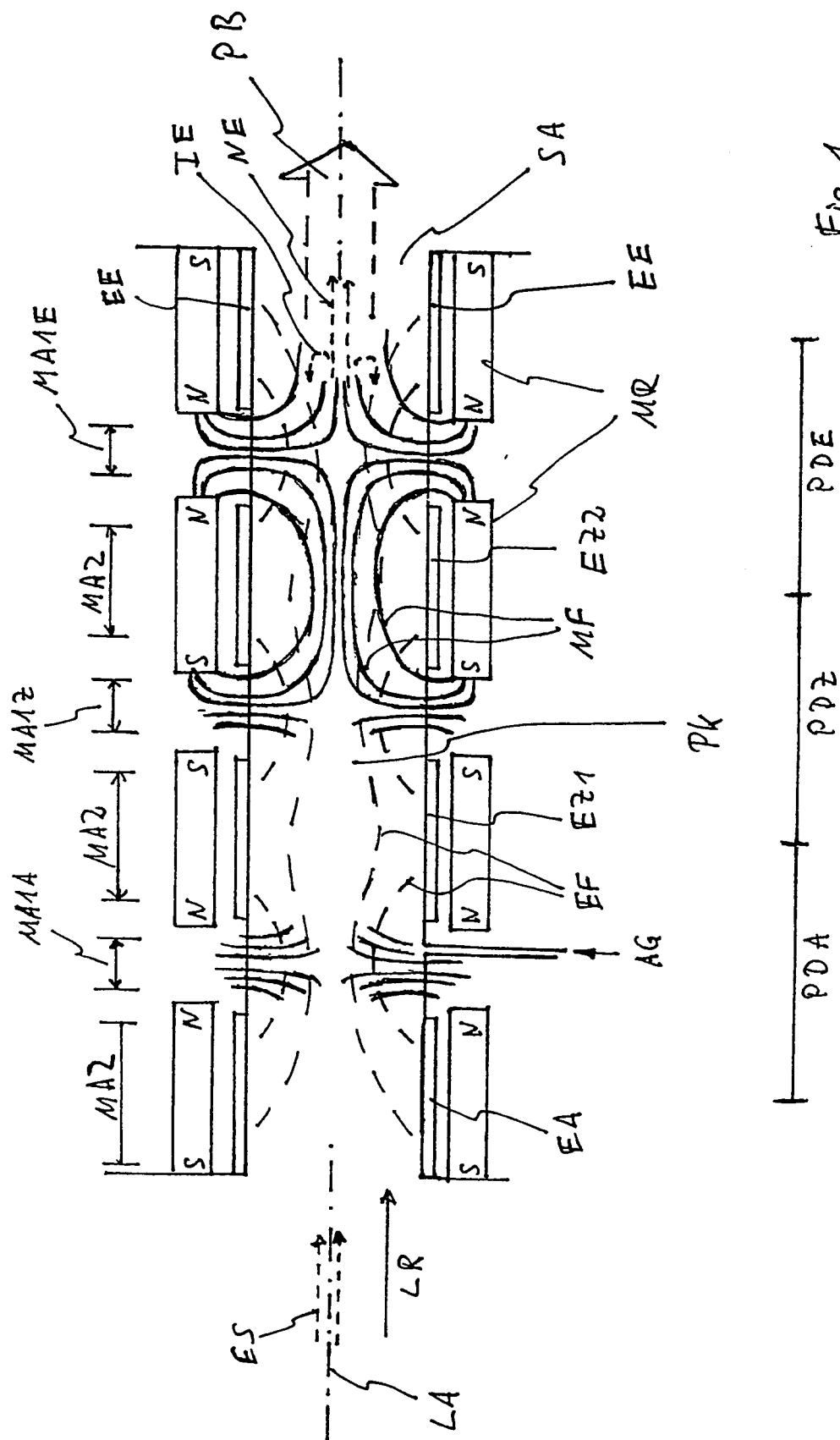


Fig. 1

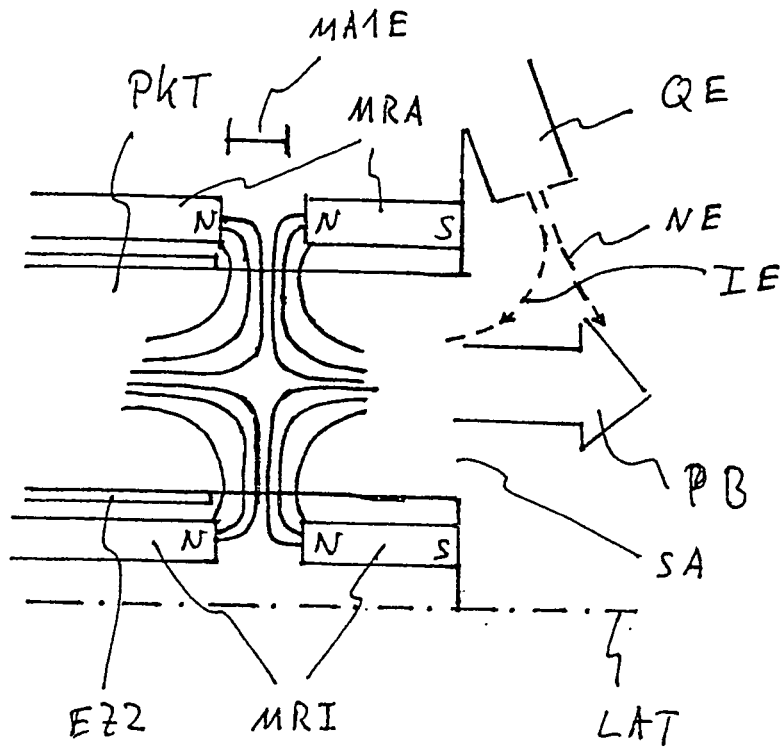


Fig. 2

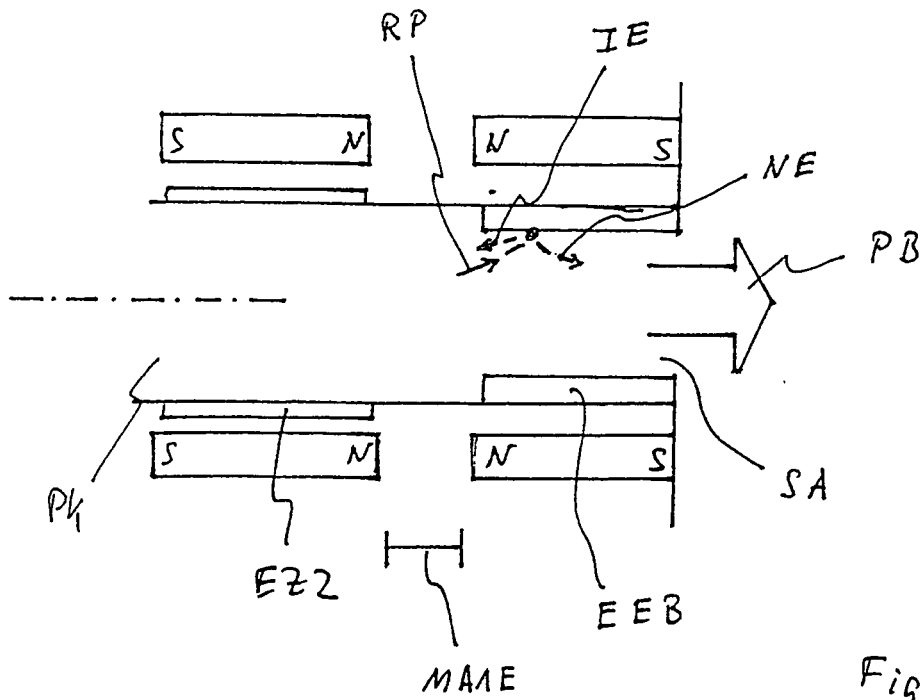


Fig. 3

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 0541309 A1 [0003]
- US 5847493 A [0003]
- DE AS1222589 B [0005]
- DE 19828704 A1 [0007]
- DE 10014033 A1 [0007]
- US 6215124 B1 [0008]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- *PATENT ABSTRACTS OF JAPAN*, 09223474 [0006]