(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 1 496 727 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
30.04.2008 Bulletin 2008/18

(51) Int Cl.:
H05H 1/54 *(2006.01)* ***F03H 1/00*** *(2006.01)*

(21) Numéro de dépôt: **04291618.9**

(22) Date de dépôt: **28.06.2004**

(54) **Accélérateur à plasma à dérive fermée d'électrons**

Plasmabeschleuniger mit geschlossener Elektronenbahn

Closed electron drift plasma accelerator

(84) Etats contractants désignés:
DE GB IT

(30) Priorité: **09.07.2003 FR 0308384**

(43) Date de publication de la demande:
12.01.2005 Bulletin 2005/02

(73) Titulaire: **SNECMA**
75015 Paris (FR)

(72) Inventeurs:
- **Secheresse, Olivier**
  91590 La Ferte Alais (FR)
- **Bougrova, Antonina**
  12904 Moscou (RU)
- **Morozov, Alexei**
  12309 Moscou (RU)

(74) Mandataire: **Thévenet, Jean-Bruno et al**
Cabinet Beau de Loménie
158, rue de l'Université
75007 Paris (FR)

(56) Documents cités:
FR-A- 2 693 770
US-A- 5 763 989
US-B1- 6 215 124

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la date de publication de la mention de la délivrance du brevet européen, toute personne peut faire opposition au brevet européen délivré, auprès de l'Office européen des brevets. L'opposition doit être formée par écrit et motivée. Elle n'est réputée formée qu'après paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

EP 1 496 727 B1

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

Description

Domaine de l'invention

[0001] La présente invention concerne les accélérateurs à plasma à dérive fermée d'électrons qui constituent des sources plasmiques d'ions utilisables notamment en tant que propulseurs à plasma stationnaire dans le domaine spatial mais également dans d'autres domaines techniques, par exemple pour le traitement ionique de pièces mécaniques.

Art antérieur

[0002] On connaît déjà des sources d'ions constituées par des systèmes à deux étages qui assurent l'accélération électrostatique du flux des ions.

[0003] Un exemple de telles sources d'ions est décrit dans le document de brevet WO 01/93293. Selon ce document, une source d'ions comprend une chambre cathodique avec un distributeur de gaz tandis qu'une anode creuse forme une chambre anodique liée à la chambre cathodique par l'orifice de sortie ménagé dans la paroi de cette dernière. Un système électrostatique assure l'extraction des ions avec l'électrode électro-isolée à émission placée dans l'orifice de sortie de la chambre anodique. Un système magnétique crée dans les chambres cathodique et anodique un champ magnétique avec un vecteur d'induction principalement dans la direction axiale. Le distributeur de gaz de la chambre cathodique est utilisé aussi comme électrode d'allumage connectée à l'anode creuse. Une électrode supplémentaire isolée d'un point de vue électrique par rapport à l'anode creuse et à la chambre cathodique est installée au niveau de l'orifice de sortie de la chambre cathodique et présente un orifice dont le diamètre est très inférieur au diamètre intérieur maximum de l'anode creuse. L'ionisation s'effectue dans les chambres anodique et cathodique avec un champ magnétique essentiellement longitudinal tandis que l'extraction et l'accélération des ions sont produites par le système électrostatique. De telles sources ioniques fonctionnent dans le domaine des petites densités de courant (j_i < 2mA/cm^2) et ne sont efficaces qu'avec de hautes tensions d'accélération (U > 1000 v), ce qui limite leurs applications.

[0004] Parmi les sources où l'accélération des ions est due aux forces électromagnétiques on peut citer l'accélérateur plasmique type KCPU : accélérateur coaxial quasi stationnaire à plasma (décrit par exemple dans l'article de Volochko A. U. et autres intitulé "L'étude de l'accélérateur plasmique coaxial quasi stationnaire à deux étages (KCPU) avec les électrodes de support" paru dans la revue Académie de Sciences de l'URSS, La Physique du Plasma, t. 16, éd. 2, M. "Science" en février 1990.

[0005] Le KCPU comprend, fixés sur la bride de bord (arrière) et isolés de cette bride, un groupe anode, un groupe cathode et une unité ionique d'entrée. Les groupes anode et cathode sont séparés à l'aide d'un isolateur annulaire à disque. Le groupe anode contient une anode cylindrique de support faite en forme de "roue d'écureuil", fixée sur la bride de transition. Autour de l'anode est établi en supplément un écran cylindrique diélectrique contribuant à l'augmentation de la concentration de gaz et de plasma dans l'espace en dehors de l'anode. Le groupe cathode est installé à l'intérieur de la "roue d'écureuil" du groupe anode et comprend deux tubes de cuivre superposés, aux extrémités desquels sont fixées des lamelles formant l'ellipsoïde de rotation. Sur le tube intérieur sont fixées 128 pointes, prises de courant avec affûtage conique, qui forment huit rangs en section longitudinale et sont interposées entre les lamelles par intervalle, en répétant la forme de la cathode. L'unité ionique est constituée de quatre chambres ioniques d'entrée raccordées à la source de gaz actif, qui sont introduites dans un canal d'accélération de KCPU par les orifices de la bride de bord symétriques par rapport à l'axe du système. Chaque chambre contient une anode ayant la forme d'un cylindre plein et une cathode pleine profilée.

[0006] L'accélérateur KCPU est ainsi conçu comme un système à deux étages. Au premier étage de l'accélérateur la substance active est ionisée et pré-accélérée jusqu'à la vitesse :

$$v \approx 0{,}1 v_m :$$

où :

v_m = vitesse d'écoulement pour les accélérateurs à plasma avec leur propre champ magnétique ;

$$v_m = \theta \frac{I^2}{mc^2},$$

où

θ = coefficient constant,
m = débit en masse de la substance active,
c = vitesse de la lumière,
I = courant passant par le volume plasmique entre deux électrodes coaxiales.

[0007] Au deuxième étage se réalise l'accélération définitive du plasma.

[0008] Dans le KCPU avec des courants de décharge d'environ 500 kA et des tensions de décharge d'environ 10 kV, on a obtenu des flux de plasma de 0,2 m.c avec l'énergie des ions hydrogène d'environ 1 keV. L'accélérateur KCPU possède une grande puissance permettant de créer les courants des particules à grande énergie. Il est à noter que dans cet accélérateur il n'y a pratiquement pas de limite supérieure de puissance et d'énergie.

[0009] Ce type d'accélérateur à plasma est électromagnétique, l'accélération du plasma se réalise à l'aide de la force d'ampère de densité :

$$f_M = \frac{1}{c}(j \times H),$$

où

c = vitesse de la lumière,
j = densité du courant,,
H = le champ magnétique propre du courant I passant dans le volume de plasma.

[0010] Le champ magnétique dans le KCPU est formé par les courants passant dans le volume plasmique (grâce à la présence des électrodes coaxiales) et constitue le champ magnétique propre. Il s'ensuit que ce type d'accélérateur ne peut fonctionner qu'à haute puissance. C'est pourquoi actuellement son utilisation en tant que moteur dans les domaines spatiaux, par exemple, ne paraît pas possible.

[0011] Un autre exemple d'accélérateur à dérive fermée d'électrons est donné par le document US-B1-6 215 124.

[0012] On connaît également par le document FR 2 693 770 un accélérateur à plasma à dérive fermée d'électrons dans lequel des améliorations importantes ont été apportées en ce qui concerne les conditions de l'ionisation de la substance active et la configuration du champ magnétique dans tout le volume du canal coaxial. Un tel accélérateur à plasma comprend une chambre d'ionisation ou de tranquilisation et une chambre de décharge avec un canal coaxial d'ionisation et d'accélération à sortie ouverte. Une cathode creuse de décharge de gaz est placée du côté de la sortie ouverte du canal coaxial. Une anode annulaire est placée à l'entrée du canal coaxial. Un distributeur de gaz annulaire est installé dans la chambre de tranquilisation sans obturer l'accès au canal coaxial. Les chambres de décharge et de tranquilisation sont formées par les éléments du système magnétique de l'accélérateur, qui comprend un couple de pôles magnétiques, un circuit magnétique et un générateur du champ magnétique. Les pôles magnétiques forment une extrémité de l'accélérateur du coté de la sortie ouverte du canal annulaire. Un des pôles magnétiques est extérieur, l'autre est intérieur et par conséquent ils délimitent la chambre de décharge à l'extérieur et à l'intérieur. Une autre extrémité de l'accélérateur, du côté de la chambre de tranquilisation, est formée par une partie de circuit magnétique, qui est reliée aux pôles magnétiques. Un mandrin central cylindrique et des éléments de support secondaires qui sont disposés uniformément autour des chambres relient ainsi les extrémités de l'accélérateur. Un premier générateur de champ magnétique est disposé entre la chambre de tranquilisation et le pôle extérieur magnétique autour du canal d'accélération, un deuxième générateur de champ magnétique se trouve sur le mandrin central cylindrique au voisinage du pôle intérieur magnétique et un troisième générateur de champ magnétique est lui aussi disposé sur le mandrin central cylindrique dans la zone de localisation de l'anode annulaire et est donc plus proche de la chambre de tranquilisation.

[0013] Ainsi, grâce à la présence de la chambre d'ionisation ou de tranquilisation, la zone de l'ionisation du gaz actif ne coïncide pas avec la zone d'accélération. Cela est dû au fait que le distributeur annulaire de gaz injecte le gaz actif directement devant l'anode. Le système magnétique à trois générateurs assure la formation dans le canal annulaire d'un champ magnétique quasi radial, dont le gradient se caractérise par une induction maximale à la sortie du canal. Les lignes de force du champ magnétique sont dirigées perpendiculairement à l'axe de symétrie du canal annulaire dans la zone de sortie et ces lignes sont légèrement inclinées dans la zone du canal près de l'anode. L'ionisation du gaz actif est assurée près de l'anode avant qu'il n'atteigne le canal annulaire. Cela a permis d'augmenter le rendement du moteur à plasma jusqu'à 60 à 70% et de diminuer l'angle de divergence du faisceau d'ions jusqu'à 10 à 15%.

[0014] Cependant, dans un tel accélérateur, le degré de l'ionisation du gaz actif dans la zone de tranquilisation n'est pas important, ce qui est confirmé par les expériences.

Objet et description succincte de l'invention

[0015] La présente invention a pour but de remédier aux inconvénients des accélérateurs à plasma connus et vise notamment à améliorer l'efficacité de l'ionisation du gaz actif.

[0016] L'invention vise également à permettre d'utiliser des substances actives diverses avec un grand rendement, de diminuer de façon significative l'angle de divergence du faisceau ionique, de diminuer le niveau des bruits liés au processus d'accélération des ions, d'augmenter le rendement en réduisant les pertes de courant électrique au niveau des parois, d'augmenter la durée de vie en réduisant les intensités des érosions ioniques et électroniques anormales et d'élargir la gamme de travail en débit (poussée) et en impulsion spécifique.

[0017] Ces buts sont atteints grâce à un accélérateur à dérive fermée d'électrons selon la revendication 1, comprenant :

(a) une chambre d'ionisation annulaire délimitée par des parois en matériau électriquement isolant dont les faces intérieures sont recouvertes d'un matériau électriquement conducteur,
(b) une chambre d'accélération formée d'un canal d'accélération annulaire en matériau isolant qui est coaxial à la chambre d'ionisation, dont la sortie est ouverte vers l'aval et dont l'entrée amont communique avec la chambre d'ionisation,
(c) une anode annulaire disposée à l'extrémité aval

de la chambre d'ionisation au voisinage de l'entrée amont du canal d'accélération,

(d) une cathode creuse disposée au voisinage de la sortie aval du canal d'accélération, à l'extérieur de celui-ci,

(e) une première source de tension continue dont le pôle négatif est connecté à la cathode et le pôle positif est connecté à l'anode,

(f) un distributeur annulaire de gaz disposé au voisinage du fond constituant la partie amont de la chambre d'ionisation,

(g) un circuit magnétique comprenant au moins un mandrin central cylindrique, des pôles magnétiques intérieur et extérieur qui délimitent la sortie ouverte aval du canal d'accélération, et un fond arrière qui forme l'extrémité amont de la chambre d'ionisation, et

(h) des moyens générateurs de champ magnétique comprenant au moins un premier générateur de champ magnétique disposé autour de la chambre d'accélération entre le pôle magnétique extérieur et la chambre d'ionisation, un deuxième générateur de champ magnétique disposé autour du mandrin central cylindrique entre le pôle magnétique intérieur et l'entrée amont du canal d'accélération située du côté de la chambre d'ionisation, et un troisième générateur de champ magnétique disposé autour du mandrin central cylindrique entre le deuxième générateur de champ magnétique et l'extrémité amont de la chambre d'ionisation, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une bobine annulaire coaxiale, qui est disposée dans la cavité de la chambre d'ionisation, est munie d'une gaine conductrice polarisée connectée avec le matériau électriquement conducteur des faces intérieures des parois de la chambre d'ionisation au pôle positif d'une deuxième source de tension dont le pôle négatif est relié à l'anode, et constitue un quatrième générateur de champ magnétique qui, avec les autres générateurs de champ magnétique, forme un champ magnétique avec une ligne magnétique de force ayant un point "X" correspondant à un zéro de champ magnétique situé entre ladite bobine annulaire coaxiale et l'anode.

[0018] Un accélérateur à plasma selon l'invention présente ainsi un bas niveau de bruit avec un flux bien localisé du fait de l'introduction dans la zone de tranquilisation de la chambre d'ionisation d'une bobine alimentée en courant, dont le champ magnétique, en combinaison avec celui des autres sources de champ magnétique, forme une configuration particulière contenant une ligne magnétique de force, dite ligne de séparation ou séparatrice, ayant un point X avec un zéro de champ magnétique. Grâce à ces caractéristiques, le canal d'accélération de l'accélérateur à plasma peut recevoir un courant d'ions bien formé, en utilisant le phénomène d'équipotentiellisation des lignes magnétiques de force et en créant une différence d'accélération des potentiels. La zone du point X avec un zéro de champ magnétique représente un piège pour les ions qui se forment le long de la séparatrice.

[0019] Avantageusement, les moyens générateurs de champ magnétique comprennent un cinquième générateur de champ magnétique disposé au voisinage du distributeur annulaire de gaz.

[0020] Le circuit magnétique peut en outre comprendre des éléments ferromagnétiques de support secondaires répartis autour des chambres d'ionisation et d'accélération et reliant le fond magnétique arrière au pôle magnétique extérieur.

[0021] Dans ce cas, de préférence, les moyens générateurs de champ magnétique comprennent en outre un sixième générateur de champ magnétique comprenant des composants disposés autour desdits éléments ferromagnétiques de support secondaire.

[0022] Les moyens générateurs de champ magnétique peuvent comprendre des bobines électromagnétiques mais également au moins en partie des aimants permanents.

[0023] La chambre d'ionisation présente dans le sens radial une dimension plus grande que celle du canal d'accélération en matériau isolant.

[0024] Selon une caractéristique particulière, la bobine annulaire coaxiale et sa gaine conductrice polarisée sont montées à l'aide d'éléments de fixation liés d'une façon rigide à la chambre d'ionisation.

[0025] De préférence, l'anode annulaire est montée avec un jeu radial par rapport à la paroi du canal d'accélération.

[0026] L'anode annulaire est connectée par une ligne d'alimentation électrique directement au pôle positif de la première source de tension continue sans être reliée mécaniquement ni électriquement au distributeur annulaire de gaz ou au matériau électriquement conducteur des pièces internes des parois de la chambre d'ionisation autrement que par l'intermédiaire de la deuxième source de tension continue.

[0027] A titre d'exemple, la deuxième source de tension applique sur la gaine conductrice de la bobine annulaire coaxiale une tension positive de quelques dizaines de volts par rapport à l'anode.

[0028] De préférence, la deuxième source de tension applique sur le matériau électriquement conducteur des faces intérieures des parois de la chambre d'ionisation annulaire un potentiel d'environ 20 à 40 volts par rapport à l'anode.

[0029] Les moyens générateurs de champ magnétique sont adaptés pour que le potentiel de la ligne magnétique de force ayant un point "X" correspondant à un zéro de champ magnétique soit proche du potentiel de l'anode.

[0030] Selon un mode de réalisation avantageux, le troisième générateur de champ magnétique présente des première et deuxième zones de diamètres différents, la première zone située au voisinage de l'anode présentant un diamètre supérieur à celui de la deuxième zone

située au voisinage de la chambre d'ionisation.

[0031] Selon un mode de réalisation particulier, la distance entre la gaine conductrice de la bobine annulaire coaxiale et les parois de la chambre d'ionisation est supérieure ou égale à environ 20 millimètres.

[0032] L'accélérateur à plasma selon l'invention peut être appliqué à un moteur plasmique spatial constituant un propulseur électrique à réaction pour satellite ou autre engin spatial.

[0033] L'accélérateur à plasma selon l'invention peut aussi être appliqué à une source ionique de traitement ionique de pièces mécaniques.

Brève description des dessins

[0034] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description suivante de modes particuliers de réalisation, donnés à titre d'exemples, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la Figure 1 est un schéma montrant le concept de base d'un accélérateur à plasma à deux étages selon l'invention,
- la Figure 2 est un schéma de principe, en demi-coupe axiale longitudinale, d'un exemple d'accélérateur à plasma selon l'invention, montrant le circuit électrique associé pour la mise en route de cet accélérateur,
- la Figure 3 est une coupe axiale longitudinale d'un exemple d'accélérateur à plasma selon l'invention, et
- la Figure 4 représente la topographie du champ magnétique obtenue avec un exemple d'accélérateur à plasma selon l'invention.

Description détaillée de modes particuliers de réalisation

[0035] La Figure 3 montre un exemple d'accélérateur à plasma conforme à l'invention.

[0036] Un tel accélérateur à plasma à dérive fermée d'électrons comprend une première chambre 2, délimitée par des parois 52 en matériau électriquement isolant, dont les faces intérieures sont recouvertes d'un matériau conducteur 9. Cette première chambre 2 constitue une chambre d'ionisation ou chambre de tranquilisation.

[0037] Une deuxième chambre 3, dite chambre d'accélération, comprend un canal annulaire d'accélération 53 en matériau électriquement isolant dont la sortie 55 est ouverte vers l'aval. La partie amont 54 du canal d'accélération 53 communique avec la cavité de la chambre d'ionisation 2 qui est coaxiale avec la chambre d'accélération 3.

[0038] Une cathode creuse 8 à décharge de gaz est localisée à l'extérieur du canal d'accélération 53 au voisinage de la sortie 55 de celui-ci. La référence 81 désigne la ligne de liaison électrique de la cathode avec le pôle négatif d'une première source de tension continue 82 (Figure 2). La référence 88 désigne l'alimentation en gaz de la cathode creuse 8.

[0039] Une anode annulaire 7 est située à l'extrémité aval de la chambre d'ionisation 2 à proximité de l'entrée amont 54 du canal d'accélération 53 qui constitue la chambre d'accélération 3.

[0040] Comme représenté sur la Figure 2, la cathode 8 et l'anode 7 sont connectées respectivement au pôle négatif et au pôle positif de la source de tension continue 82, en formant le circuit de l'alimentation électrique. L'anode 7 est elle-même isolée du matériau conducteur 9 des parois de la chambre d'ionisation 2.

[0041] Un distributeur annulaire de gaz 11 est disposé dans la cavité de la chambre d'ionisation 2 sans obturer l'entrée 54 du canal d'accélération 53. Le distributeur de gaz est placé du côté amont de la chambre d'ionisation 2. La cathode 8 et le distributeur de gaz 11 sont reliés respectivement par des lignes 88 et 110 à des sources de gaz à ioniser qui peuvent être indépendantes ou communes. Le gaz introduit dans le distributeur annulaire de gaz 11 par la ligne 110 est distribué dans la chambre de tranquilisation 2 par des orifices 111 répartis dans ce distributeur 11.

[0042] La chambre d'ionisation ou de tranquilisation 2 présente une dimension dans le sens radial qui est supérieure à celle de la chambre d'accélération 3 et peut présenter un profil tronconique dans sa partie aval 521 débouchant dans l'entrée 54 du canal d'accélération 53.

[0043] L'anode annulaire 7 peut elle-même présenter une forme tronconique.

[0044] L'accélérateur à plasma à dérive fermée d'électrons comprend un circuit magnétique et des générateurs de champ magnétique.

[0045] Le circuit magnétique comprend un mandrin central cylindrique 60, des pôles magnétiques intérieur 61 et extérieur 62 qui délimitent la sortie ouverte aval 55 du canal d'accélération 53 et un fond arrière 63 qui forme l'extrémité amont de la chambre d'ionisation 2.

[0046] Le circuit magnétique comprend en outre des éléments ferromagnétiques de support secondaires 64 qui peuvent être répartis uniformément selon les génératrices d'un cylindre autour des chambres d'ionisation 2 et d'accélération 3 et relient le fond magnétique arrière 63 au pôle magnétique extérieur avant 62. Ces éléments ferromagnétiques de support secondaires 64 peuvent présenter la forme de tiges individuelles comme illustré sur la Figure 3, mais pourraient également être réunis sous la forme d'une cage cylindrique entourant les chambres d'ionisation 2 et d'accélération 3.

[0047] On notera que le pôle magnétique intérieur 61 et l'extrémité arrière 63 du circuit magnétique peuvent être réalisés sous la forme d'un ensemble unique avec le mandrin central cylindrique 61.

[0048] Les moyens générateurs de champ magnétique comprennent un premier générateur de champ magnétique 21 disposé autour de la chambre d'accélération 3 entre le pôle magnétique extérieur 62 et la chambre d'ionisation 2. Ce premier générateur de champ magné-

tique 21 peut comprendre une bobine électromagnétique blindée.

[0049] Un deuxième générateur de champ magnétique 22 est disposé autour du mandrin central cylindrique 60 entre le pôle magnétique intérieur 61 et l'entrée amont 54 du canal d'accélération 53 située du côté de la chambre d'ionisation 2. Dans l'exemple décrit en référence à la Figure 3, ce deuxième générateur de champ magnétique 22 comprend également une bobine électromagnétique.

[0050] Un troisième générateur 23 est disposé entre le deuxième générateur du champ magnétique 22 et l'entrée de la chambre de tranquilisation 2 autour du mandrin central cylindrique 60. De préférence, il a deux zones de diamètres différents. Le diamètre d'une partie 231 de ce générateur, qui est entourée par le canal d'accélération 53, y compris la zone contiguë à l'anode 7, est supérieur à celui d'une autre partie 232 du générateur disposée dans la zone de la chambre de tranquilisation 2. Le rapport des diamètres de ces différentes parties 231, 232 du troisième générateur du champ magnétique 23 est choisi tel que :

$$\frac{r_\delta}{r_k} = 0{,}3 \text{ à } 0{,}5,$$

où

r_δ = distance de l'axe de symétrie à la paroi de la chambre de tranquilisation,

r_k = distance de l'axe de symétrie du canal jusqu'à la paroi extérieure du canal extérieur.

[0051] L'objectif est de former la géométrie optimale de la ligne magnétique de force définissant l'entrée du plasma ionisé de la chambre de tranquilisation 2 dans le canal d'accélération 53 (c'est-à-dire assurer l'écartement des lignes magnétiques de force des parois de la chambre de tranquilisation).

[0052] Dans la cavité de la chambre de tranquilisation 2 on installe une bobine annulaire centrale 24 coaxiale mise dans une gaine polarisée 28 qui est connectée, par une ligne 86, à la source de tension continue 85 (Figure 2) à l'aide de laquelle on détermine le potentiel de la gaine 28 de la spire de la bobine 24 par rapport à l'anode 7 (voir Figure 2), la source de tension 85 étant elle-même reliée au pôle positif de la source de tension 82 et à l'anode 7 par une ligne 84. La spire coaxiale 24 peut être montée à l'aide d'éléments de fixation, liés d'une façon rigide à la chambre de tranquilisation 2 et isolés du circuit magnétique. Ainsi, la spire 24 représente un quatrième générateur de champ magnétique. Les dimensions de la chambre de tranquilisation 2 sont choisies selon la demande, de telle manière que la distance depuis la gaine 28 de la spire centrale 24 jusqu'aux parois de la chambre de tranquilisation 2 fasse environ 16 rayons de Larmor. Compte tenu des valeurs de la température des électrons, la température électronique qui doit assurer l'ionisation effective des atomes du gaz se trouve dans l'intervalle 15 - 20 eV, et la valeur du champ magnétique sur la séparatrice H - 100 oersteds, la distance b, de la gaine 28 de la spire centrale 24 jusqu'aux parois de la chambre de tranquilisation 2, doit donc être $b \geq 20 - 25$ mm.

[0053] En outre, afin d'obtenir la configuration optimale des lignes magnétiques de force, on peut introduire des premier et deuxième générateurs supplémentaires de champ magnétique 25, 26. Il est à noter que le premier générateur supplémentaire de champ magnétique 25 est placé au niveau de la chambre de tranquilisation 2 au voisinage du distributeur de gaz annulaire 11 et sert pour la formation de la géométrie du champ magnétique près du bord arrière qui se caractérise par l'écartement des lignes magnétiques de force du fond de chambre. Sa position est définie par la position du fond 63 du circuit magnétique selon :

$$L = Lpp - \Delta,$$

où

Lpp = distance du canal d'accélération 53 jusqu' au fond arrière 63 du circuit magnétique,

Δ = épaisseur de l'isolateur assurant l'isolation depuis le fond arrière 63 jusqu'au générateur du champ magnétique 25 et valant $\Delta = 2$ à 3mm.

[0054] Le deuxième générateur supplémentaire 26 de champ magnétique représente l'ensemble des éléments extérieurs, dont chacun est mis autour d'un élément secondaire de support 64. Ce générateur en commun avec les autres générateurs du champ magnétique assure la position du zéro de champ magnétique dans la zone de l'anode 7, le gradient donné de H = 100 oersteds / cm près de la coupe et la forme convexe des lignes du champ magnétique près de l'anode 7, nécessaire pour recevoir la zone du zéro. Il est à noter que ce générateur 26 peut être réalisé par une seule bobine torique autour du moteur, le support externe 64 du circuit magnétique étant alors lui-même torique.

[0055] La structure du système magnétique de l'accélérateur à plasma permet de créer par le choix des diamètres intérieurs des pôles magnétiques 61, 62, de la disposition conforme de la spire centrale 24 avec son courant et des générateurs magnétiques 21 à 26, la configuration demandée du champ magnétique (voir Figures 1 et 4).

[0056] Cette configuration est caractérisée par la valeur du zéro de champ dans la zone de positionnement de l'anode 7, par l'angle entre les branches des séparatrices 27 (Figure 2) égal à environ 90°, et par le fait que

ces séparatrices 27 traversent les parois du canal avec un angle d'environ 45° et se rencontrent dans la zone de l'anode 7, en entourant la spire centrale 24 sans contact avec les parois de la chambre de tranquilisation 2. Près de l'anode 7, la direction des séparatrices 27 crée un champ magnétique avec un angle de 45°, ce qui assure la condition de la séparation de l'écoulement des parois du canal et sa focalisation au milieu de la surface de la chambre de décharge 3 avec un gradient donné du champ (pas moins de 100 oersteds / cm) de la valeur zéro dans la zone de positionnement de l'anode 7 jusqu'à la valeur maximale à la sortie du canal annulaire 53.

[0057] Tous les générateurs de champ magnétique 21 à 26 peuvent être fabriqués à l'aide de bobines électromagnétiques ou avec des aimants permanents dont le point de Curie doit rester supérieur à la température active de l'accélérateur à plasma. On admet l'utilisation mixte des bobines électromagnétiques et des aimants permanents. Si l'on choisit la réalisation des générateurs avec des bobines électromagnétiques, elles peuvent être alimentées avec des sources de courant différentes et dans une seule direction ou bien par une seule source de courant (bobines en série) et, dans ce cas, il est nécessaire de bien sélectionner le nombre de spires dans chaque bobine afin d'assurer la géométrie voulue du champ magnétique.

[0058] L'anode annulaire 7 est positionnée dans la zone du zéro de champ magnétique, en joignant directement l'entrée du canal d'accélération 53. Cependant, dans ce cas, il est possible de re-pulvériser le matériau des parois isolantes de la chambre d'accélération 3 par le procédé du bombardement d'ions, à la suite de quoi on voit se former à la surface de l'anode 7 un film non conducteur. C'est pourquoi, pour maintenir la surface active de l'anode annulaire 7, il vaut mieux la mettre avec le jeu radial Δ relatif à la paroi du canal d'accélération 53. La valeur de ce jeu doit être choisie suivant des conditions optimales. D'une part, l'augmentation exagérée du jeu ne doit pas amener à la perturbation de l'intégrité du flux ni à l'érosion de l'anode 7 à cause du bombardement d'ions. D'autre part, la réduction considérable du jeu ne doit pas embarrasser le passage du courant à travers la surface de l'anode orientée vers le canal d'accélération. Le réglage du jeu Δ peut se faire par la liaison mécanique de l'anode à l'aide de linteaux rigides. Si ces linteaux sont conducteurs, on assure la liaison électrique de l'anode avec le pâle positif de la source par la ligne de l'alimentation électrique.

[0059] Pour neutraliser le flux ionique sortant du canal d'accélération 53, on peut installer tout type de cathode creuse 8 à décharge de gaz. En outre, cette cathode 8 peut être placée soit sur le côté du moteur, soit, selon une variante, à l'intérieur du mandrin central et dirigée vers l'extérieur.

[0060] Le fonctionnement de l'accélérateur à plasma selon la présente invention est le suivant : le champ magnétique avec la géométrie voulue est obtenu à l'aide des générateurs du champ magnétique 21 à 26 ainsi que des autres éléments du système magnétique. Après avoir distribué le gaz inerte, par exemple du Xénon, à une cathode chauffée pré-allumée 8 et au distributeur de gaz annulaire 11, on applique la tension aux éléments de l'accélérateur et la décharge s'allume alors dans les première et deuxième chambres 3, 2.

[0061] Le schéma de principe du système est présenté sur les Figures 1 et 2.

[0062] L'étage de tranquilisation 2 comprend une paroi équipotentielle 9 (notée SB), la spire annulaire 24 avec son courant et l'anode 7 qui fixe le potentiel dans la zone du zéro du champ magnétique et joue le rôle de la cathode pour cet étage. L'alimentation fluide arrive sur la face arrière de cet étage 2. La composition de l'étage d'accélération 3 est traditionnelle. Cet étage comprend un canal diélectrique 53 et une cathode 8 à la sortie du générateur.

[0063] La particularité de l'étage de tranquilisation 2 est l'anode 7 qui constitue une cathode de tranquilisation. Elle assure la décharge entre la séparatrice 27 et la paroi équipotentielle 9 (SB) du volume de tranquilisation. La deuxième particularité est la "spire centrale" 24 avec son courant formant le conducteur annulaire créant la séparatrice et le piège pour les ions formés.

[0064] Les tensions appliquées aux éléments du premier étage sont :

$$Umix = U_{SB} = U_A + \delta_{SB}$$

$$Usep = U_A$$

Avec:

U_A =	potentiel de l'anode 7
U_{sep} =	potentiel de la séparatrice 27
Umix =	potentiel de la mixyne 28 (surface polarisée de la spire centrale 24)
U_{SB} =	potentiel de la paroi 9.
Valeur de δ_{SB} =	~ 20 à 30 V.

[0065] En raison des équipotentiellisations des lignes magnétiques de force, aux potentiels imposés, la séparatrice 27 dont le potentiel est fixé par l'anode 7 représente le fond du puits du potentiel où se cumulent les ions formés. Ils oscillent, en tombant sur la barrière, soit près de la myxine 28, soit près de la paroi équipotentielle 9 (SB). Comme la distance entre les frontières des oscillations s'accroît vers le point "X" 4, les ions se dirigent vers le canal 53, en perdant (en vertu de la conservation de l'invariant adiabatique transversal $V^i_{\perp} h$ = Const, où h = distance entre les frontières des oscillations) la vitesse transversale et en acquérant la vitesse longitudinale, dirigée vers l'entrée 54 du canal d'accélération 53. A l'intérieur de ce canal 53 la configuration magnétique doit assurer un champ qui dirige les ions. En outre la valeur

du champ magnétique H sur la séparatrice 27 doit être :

$$\frac{H^2}{8\pi} \geq (2n_e kT_e)$$

où

n_e = concentration des électrons dans la décharge,
k = constante de Boltzmann,
T_e = température électronique.

[0066] De plus, en prenant en considération la diffusion possible, il faut que la distance h_{m-c} entre la myxine 28 et la séparatrice 27 et la distance h_{c-cb} entre la séparatrice 27 et le mur tampon soient supérieures ou égales à 8 x ρ_e, c'est-à-dire huit rayons électroniques, donc :

$$h_{M-C} = \theta_{MC}\rho_e \qquad \theta_{MC} \geq 8$$

$$h_{C-Cb} = \theta_{C-Cb}\rho_e \qquad \theta_{C-Cb} \geq 8$$

[0067] La création dans l'étage de tranquilisation 2 d'un plasma entièrement ionisé avec une basse énergie (5 ÷ 15) eV ouvre la possibilité d'obtenir dans le canal d'accélération 53 un flux ionisé pratiquement mono énergétique, qui peut être bien focalisé et éloigné des parois.
[0068] Le fonctionnement de l'étage d'accélération 3 est traditionnel. Le champ magnétique augmente vers la sortie et a son maximum dans le plan de sortie. Le gradient du champ magnétique fait 100 oersteds/cm. Les lignes magnétiques de force ont une géométrie convexe vers l'anode 7. C'est le champ électrique qui fait déplacer les ions. Quant aux électrons, ceux ci circulent en azimut dans le champ croisé électrique et magnétique.
[0069] La possibilité de la création du champ électrique, convexe vers l'anode 7 et focalisant les ions au milieu du canal d'accélération 53, est liée à l'équipotentiellisation des lignes magnétiques de force. Ce processus est lié au fait que pour l'accélérateur plasmique à dérive d'électrons dans un circuit fermé l'équation du mouvement des électrons est la suivante

$$0 = \nabla P_e + eE + 1/c \cdot [V_e H] \; ; \; E = -\text{grad}\,\Phi$$

où:

∇ Pe = gradient de la pression électronique;
e = charge d'électron.
E = intensité de champ électrique;
Ve = vitesse des électrons;
H = intensité de champ magnétique;
Φ = potentiel de champ électrique.

[0070] L'intégration de cette équation le long de la ligne magnétique de force 27 donne la formule suivante :

$$\Phi^*(\gamma) = \Phi(\chi) - kT_e/e \cdot \ln n_e/n_e(\gamma)$$

où:

$\Phi^*(\gamma)$ = valeur constante du potentiel le long de la ligne magnétique de force nommée le potentiel thermalisé;
$\Phi(\chi)$ = potentiel électrique;
T_e = température électronique;
k = constante de Boltzmann;
n_e = concentration des électrons dans la décharge;
$n_e(\gamma)$ = caractéristique de la concentration des électrons sur une ligne donnée de force du champ magnétique (valeur normalisée).

[0071] La dernière équation montre que les lignes magnétiques de force sont équipotentielles si $T_e \rightarrow 0$ ou $n_e = n_e(\gamma)$. Si ces conditions sont réalisées, il suffit de créer les lignes magnétiques de force convexes vers l'anode 7, pour obtenir la géométrie demandée des équipotentielles du champ électrique. Donc, pour créer l'accélérateur à plasma ayant des hautes performances de fonctionnement il faut respecter les conditions suivantes :
[0072] Premièrement, il faut assurer l'uniformité de la densité du flux des ions (et, par conséquent, des particules neutres) près de l'anode 7, ce qui réduit l'influence sur le processus de la composante VPe, et, deuxièmement il faut créer la géométrie des lignes magnétiques de force fortement convexe vers l'anode 7. Pour y réussir, il est très important d'assurer la focalisation nécessaire des ions dans la zone de l'ionisation où leur vitesse est faible.
[0073] Donc, l'accélérateur fonctionne comme un système à deux étages. Dans l'étage de tranquilisation 2, on ne résout qu'un problème : l'ionisation la plus complète de la substance, tandis que l'énergie des ions peut être très faible. Le volume de la zone de l'ionisation n'a pas de limites et pratiquement on peut obtenir l'ionisation complète de la substance active et ne pas laisser passer de neutres dans le canal d'accélération 53. Par conséquent, on voit diminuer la part des neutres ionisés dans la zone d'accélération, et s'élargir la gamme de fonctionnement en débit et en impulsion spécifique.
[0074] A la suite des expériences effectuées on a établi le profil demandé du champ magnétique dans la chambre de tranquilisation 2 et un canal proche de la configuration idéale du champ magnétique. La divergence du faisceau des ions a été réduite à une valeur d'environ $\pm 10°$ ou même $\pm$ 3°, le rendement a été augmenté jusqu'à 65 à 70 % et, autre point important, on a obtenu l'élargissement de la gamme de travail du moteur en poussée et en impulsion spécifique.
[0075] Les avantages techniques de l'invention dus à

l'augmentation du degré de l'ionisation de la substance active accélérée sont confirmés par les résultats des études expérimentales. On a réussi à obtenir une ionisation du gaz actif considérablement supérieure à celle des dispositifs existants dans un système quadripolaire créé par deux bobines parcourues par des courants de même direction. Dans ce cas là entre ces bobines se forme la zone du zéro de champ magnétique entourée de la barrière magnétique. Quand on met dans cette zone une cathode et un potentiel positif vers les bobines, on voit s'allumer la décharge, et le plasma remplit tous les alentours de la séparatrice. Dans ce système conforme à l'invention, avec une puissance à la source d'environ 30 W ($U_p \leq 200V$, $J_p \leq 160mA$) on obtient, avec du Xénon, les caractéristiques suivantes :
M = 2 mg/s,
$n_e \sim 10^{12}$ cm-3,
à $T_e \sim 30$ eV et $\varepsilon_i \sim 50$ eV,
où

M = débit de la substance active,
n_e = concentration des électrons,
T_e = température des électrons,
ε_i = énergie moyenne des ions.

[0076] Ces données sont uniques, puisqu'on est parvenu à obtenir dans une décharge stationnaire à faible puissance une haute température électronique et une concentration importante des électrons quel que soit le type du gaz actif utilisé.
[0077] On a la possibilité d'utiliser des substances actives diverses avec un grand rendement et ayant les caractéristiques suivantes :

a) moins chers (Kr, Ar, N2);
b) se trouvant dans les atmosphères des planètes (CO2, CH4, NH3);
c) constituées de vapeurs de métaux (des légers - Na, Mg, K, jusqu'aux lourds - Hg, Pb, Br).

Revendications

1. Accélérateur à plasma à dérive fermée d'électrons, comprenant :

(a) une chambre d'ionisation (2) annulaire délimitée par des parois (52) en matériau électriquement isolant dont les faces intérieures sont recouvertes d'un matériau électriquement conducteur (9),
(b) une chambre d'accélération (3) formée d'un canal d'accélération (53) annulaire en matériau isolant qui est coaxial à la chambre d'ionisation (2), dont la sortie (55) est ouverte vers l'aval et dont l'entrée amont (54) communique avec la chambre d'ionisation (2),
(c) une anode annulaire (7) disposée à l'extrémité aval de la chambre, d'ionisation (2) au voisinage de l'entrée amont (54) du canal d'accélération (53),
(d) une cathode creuse (8) disposée au voisinage de la sortie aval (55) du canal d'accélération (53), à l'extérieur de celui-ci,
(e) une première source de tension continue (82) dont le pôle négatif est connecté à la cathode (8) et le pôle positif est connecté à l'anode (7),
(f) un distributeur annulaire de gaz (11) disposé au voisinage du fond constituant la partie amont de la chambre d'ionisation (2),
(g) un circuit magnétique comprenant au moins un mandrin central cylindrique (60), des pôles magnétiques intérieur (61) et extérieur (62) qui délimitent la sortie ouverte aval (55) du canal d'accélération (53), et un fond arrière (63) qui forme l'extrémité amont de la chambre d'ionisation (2),
(h) des moyens générateurs de champ magnétique comprenant au moins un premier générateur de champ magnétique (21) disposé autour de la chambre d'accélération (3) entre le pôle magnétique extérieur (62) et la chambre d'ionisation (2), un deuxième générateur de champ magnétique (22) disposé autour du mandrin central cylindrique (60) entre le pôle magnétique intérieur (61) et l'entrée amont (54) du canal d'accélération (53) située du côté de la chambre d'ionisation (2), et un troisième générateur de champ magnétique (23) disposé autour du mandrin central cylindrique (60) entre le deuxième générateur de champ magnétique (22) et l'extrémité amont de la chambre d'ionisation (2),

caractérisé en ce qu'il comprend en outre une bobine annulaire coaxiale, qui est disposée dans la cavité de la chambre d'ionisation (2), est munie d'une gaine conductrice polarisée (28) connectée avec le matériau électriquement conducteur (9) des faces intérieures des parois (52) de la chambre d'ionisation (2) au pôle positif d'une deuxième source de tension (85) dont le pôle négatif est relié à l'anode (7), et constitue un quatrième générateur de champ magnétique qui, avec les autres générateurs de champ magnétique, forme un champ magnétique avec une ligne magnétique de force (27) ayant un point "X" (4) correspondant à un zéro de champ magnétique situé entre ladite bobine annulaire coaxiale (24) et l'anode (7).

2. Accélérateur à plasma selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les moyens générateurs de champ magnétique comprennent un cinquième générateur de champ magnétique (25) disposé au voisinage du distributeur annulaire de gaz (11).

3. Accélérateur à plasma selon la revendication 1 ou la revendication 2, **caractérisé en ce que** le circuit magnétique comprend en outre des éléments ferromagnétiques de support secondaires (64) répartis autour des chambres d'ionisation (2) et d'accélération (3) et reliant le fond magnétique arrière (63) au pôle magnétique extérieur (62).

4. Accélérateur à plasma selon la revendication 3, **caractérisé en ce que** les moyens générateurs de champ magnétique comprennent en outre un sixième générateur de champ magnétique (26) comprenant des composants disposés autour desdits éléments ferromagnétiques de support secondaire (64).

5. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, **caractérisé en ce que** les moyens générateurs de champ magnétique comprennent des bobines électromagnétiques.

6. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** les moyens générateurs de champ magnétique comprennent au moins en partie des aimants permanents.

7. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce que** le premier générateur de champ magnétique (21) est blindé.

8. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** la chambre d'ionisation (2) présente dans le sens radial une dimension plus grande que celle du canal d'accélération en matériau isolant (53).

9. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce que** la bobine annulaire coaxiale (24) et sa gaine conductrice polarisée (28) sont montées à l'aide d'éléments de fixation (29) liés d'une façon rigide à la chambre d'ionisation (2).

10. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce que** l'anode annulaire (7) est montée avec un jeu radial par rapport à la paroi du canal d'accélération (53).

11. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, **caractérisé en ce que** l'anode annulaire (7) est connectée par une ligne d'alimentation électrique (83) directement au pôle positif de la première source de tension continue (82) sans être reliée mécaniquement ni électriquement au distributeur annulaire de gaz (11) ou au matériau électriquement conducteur (9) des pièces internes des parois (52) de la chambre d'ionisation (2) autrement que par l'intermédiaire de la deuxième source de tension continue (85).

12. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, **caractérisé en ce que** la cathode (8) est une cathode creuse à décharge de gaz.

13. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, **caractérisé en ce que** la deuxième source de tension (85) applique sur la gaine conductrice (28) de la bobine annulaire coaxiale (24) une tension positive de quelques dizaines de volts par rapport à l'anode (7).

14. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, **caractérisé en ce que** la deuxième source de tension (85) applique sur le matériau électriquement conducteur (9) des faces intérieures des parois (52) de la chambre d'ionisation annulaire (2) un potentiel d'environ 20 à 40 volts par rapport à l'anode.

15. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 14, **caractérisé en ce que** les moyens générateurs de champ magnétique sont adaptés pour que le potentiel de la ligne magnétique de force ayant un point "X" correspondant à un zéro de champ magnétique soit proche du potentiel de l'anode (7).

16. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 15, **caractérisé en ce que** le troisième générateur de champ magnétique (23) présente des première et deuxième zones (231, 232) de diamètres différents, la première zone (231) située au voisinage de l'anode (7) présentant un diamètre supérieur à celui de la deuxième zone (232) située au voisinage de la chambre d'ionisation (2).

17. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, **caractérisé en ce que** la distance entre la gaine conductrice (28) de la bobine annulaire coaxiale (24) et les parois de la chambre d'ionisation (2) est supérieure ou égale à environ 20 millimètres.

18. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 17, **caractérisé en ce qu**'il est appliqué à un moteur plasmique spatial constituant un propulseur électrique à réaction pour satellite.

19. Accélérateur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 17, **caractérisé en ce qu**'il est appliqué à une source ionique de traitement ionique de pièces mécaniques.

Claims

1. A closed electron drift plasma accelerator comprising:

   (a) an annular ionization chamber (2) defined by walls (52) of electrically insulating material, having inside faces covered in an electrically-conductive material (9);
   (b) an acceleration chamber (3) formed by an annular acceleration channel (53) of insulating material which is on the same axis as the ionization chamber (2), having an outlet (55) that is open in a downstream direction and having an upstream inlet (54) communicating with the ionization chamber (2);
   (c) an annular anode (7) placed at the downstream end of the ionization chamber (2) in the vicinity of the upstream inlet (54) of the acceleration channel (53);
   (d) a hollow cathode (8) disposed in the vicinity of the downstream outlet (55) of the acceleration channel (53), and outside it;
   (e) a first DC voltage source (82) having its negative pole connected to the cathode (8) and its positive pole connected to the anode;
   (f) an annular gas manifold (11) disposed in the vicinity of the end wall constituting the upstream portion of the Ionization chamber (2);
   (g) a magnetic circuit comprising at least a central cylindrical mandrel (60), inner and outer magnetic poles (61, 62) defining the open downstream outlet (55) of the acceleration channel (53), and a rear end wall (63) which forms the upstream end of the ionization chamber (2); and
   (h) magnetic field generator means comprising at least a first magnetic field generator (21) disposed around the acceleration chamber (3) between the outer magnetic pole (62) and the ionization chamber (2), a second magnetic field generator (22) disposed around the central cylindrical mandrel (60) between the inner magnetic pole (61) and the upstream inlet (54) to the acceleration channel (53) situated beside the ionization chamber (2), and a third magnetic field generator (23) disposed around the central cylindrical mandrel (60) between the second magnetic field generator (22) and the upstream end of the ionization chamber (2);

   the accelerator being **characterised in that** it further comprises a coaxial annular coil which is disposed inside the cavity of the ionization chamber (2), which is provided with biased conductive cladding (28) connected together with the electrically-conductive material (9) of the inside faces of the walls (52) of the ionization chamber (2) to the positive pole of a second voltage source (85) whose negative pole is connected to the anode (7), and which constitutes a fourth magnetic field generator which, together with the other magnetic field generators, forms a magnetic field having a magnetic line of force (27) that includes an "X" point (4) corresponding to a magnetic field zero situated between said coaxial annular coil (24) and the anode (7).

2. A plasma accelerator according to claim 1, **characterised in that** the magnetic field generator means include a fifth magnetic field generator (25) disposed in the vicinity of the annular gas manifold (11).

3. A plasma accelerator according to claim 1 or claim 2, **characterised in that** the magnetic circuit further includes secondary ferromagnetic support elements (64) distributed around the ionization and acceleration chambers (2, 3) and connecting the rear magnetic end wall (63) to the outer magnetic pole (62).

4. A plasma accelerator according to claim 3, **characterised in that** the magnetic field generator means further include a sixth magnetic field generator (26) comprising components disposed around said secondary ferromagnetic support elements (64).

5. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 4, **characterised in that** the magnetic field generator means comprise electromagnetic coils.

6. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 5, **characterised in that** the magnetic field generator means comprise, at least in part, permanent magnets.

7. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 6, **characterised in that** the first magnetic field generator (21) is shielded.

8. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 7, **characterised in that** the ionization chamber (2) presents a dimension in the radial direction that is greater than that of the acceleration channel of insulating material (53).

9. A plasma accelerator, according to any one of claims 1 to 8, **characterised in that** the coaxial annular coil (24) and its biased conductive cladding (28) are mounted using fixing elements (29) connected rigidly to the ionization chamber (2).

10. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 9, **characterised in that** the annular anode (7) is mounted with radial clearance relative to the wall of the acceleration channel (53).

11. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 10, **characterised in that** the annular anode

(7) is connected via an electricity feed line (83) directly to the positive pole of the first DC source (82) without being mechanically or electrically connected to the annular gas manifold (11) or to the electrically-conductive material (9) of the internal parts of the walls (52) of the ionization chamber (2) other than via the second DC voltage source (85).

12. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 11, **characterised in that** the cathode (8) is a hollow gas-discharge cathode.

13. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 12, **characterised in that** the second voltage source (85) applies a positive voltage to the conductive cladding (28) of the coaxial annular coil (24) having a magnitude of several tens of volts relative to the anode (7).

14. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 13, **characterised in that** the second voltage source (85) applies a potential to the electrically-conductive material (9) of the inside faces of the walls (52) of the annular ionization chamber (2) having a magnitude of about 20 V to 40 V relative to the anode.

15. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 14, **characterised in that** the magnetic field generator means are adapted so that the potential of the magnetic line of force having an "X" point corresponding to a magnetic field zero is dose to the potential of the anode (7).

16. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 15, **characterised in that** the third magnetic field generator (23) presents first and second zones (231, 232) of different dimeters, the first zone (231) situated in the vanity of the anode (7) presenting a diameter greater than that of the second zone (232) situated in the vicinity of the ionization chamber (2).

17. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 16, **characterised in that** the distance between the conductive cladding (28) of the coaxial annular coil (24) and the walls of the ionization chamber (2) is greater than or equal to about 20 mm.

18. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 17, the accelerator being **characterised in that** it is applied to a plasma space engine constituting an electric reaction thruster for a satellite.

19. A plasma accelerator according to any one of claims 1 to 17, the accelerator being **characterised in that** it is applied to an ion source for ion treatment of mechanical parts.

Patentansprüche

1. Plasmabeschleuniger mit geschlossener Elektronendrift, umfassend:

(a) eine ringförmige Ionisierungskammer (2), die durch Wände (52) aus elektrisch isolierendern Material begrenzt ist, deren Innenseiten mit einem elektrisch leitenden Material (9) überzogen sind,
(b) eine Beschleunigungskammer (3), die von einem ringförmigen Beschleunigungskanal (53) aus Isoliermaterial gebildet ist, welcher zu der Ionisierungskammer (2) koaxial ist, dessen Ausgang (55) in stromabwärtiger Richtung offen ist und dessen stromaufwärtiger Eingang (54) mit der Ionisierungskammer (2) in Verbindung steht,
(c) eine ringförmige Anode (7), die am stromabwärtigen Ende der Ionisierungskammer (2) in der Nähe des stromaufwärtigen Eingangs (54) des Beschleunigungskanals (53) angeordnet ist,
(d) eine Hohlkathode (8), die in der Nahe des stromabwärtigen Ausgangs (55) des Beschleunigungskanals (53) außerhalb von diesem angeordnet ist,
(e) eine erste Gleichspannungsquelle (82), deren Minuspol an die Kathode (8) und deren Pluspol an die Anode (7) angeschlossen ist,
(f) einen ringförmigen Gasverteiler (11), der in der Nähe des den stromaufwärtigen Teil der Ionisierungskammer (2) badenden Bodens angeordnet ist,
(g) einen der wenigstens einen zylindrischen Mittelkern (60), einen inneren Magnetpol (61) und einen äußeren Magnetpol (62), die den offenen stromabwärtigen Ausgang (55) des Beschleunigungskanals (53) begrenzen, sowie einen rückwärtigen Boden (63) umfaßt, der das stromaufwärtige Ende der Ionisierungskammer (2) bildet,
(h) Mittel zur Erzeugung eines Magnetfeldes, die wenigstens einen ersten Magnetfelderzeuger (21), der um die Beschleunigungskammer (3) zwischen dem äußeren Magnetpol (62) und der Ionisierungskammer (2) angeordnet ist, einen zweiten Magnetfelderzeuger (22), der um den zylindrischen Mittelkern (60) zwischen dem inneren Magnetpol (61) und dem auf der Seite der Ionisierungskammer (2) gelegenen stromaufwärtigen Eingang (54) des Beschleunigungskanals (53) angeordnet ist, sowie einen dritten Magnetfelderzeuger (23) umfassen, der um den zylindrischen Mittelkern (60) zwischen dem zweiten Magnetfelderzeuger (22) und dem stromaufwärtigen Ende der Ionisierungskammer (2) angeordnet ist,

dadurch gekennzeichnet, daß er ferner eine koaxiale ringförmige Spule umfaßt, welche in dem Hohlraum der Ionisierungskammer (2) angeordnet ist, mit einer polarisierten leitenden Hülle (28) versehen ist, die mit dem elektrisch leitenden Material (9) der Innenseiten der Wände (52) der Ionisierungskammer (2) an den Pluspol einer zweiten Spannungsquelle (85) angeschlossen ist, deren Minuspol mit der Anode (7) verbunden ist, und welche einen vierten Magnetfelderzeuger bildet, der mit den anderen Magnetfelderzeugern ein Magnetfeld mit einer magnetischen Kraftlinie (27) bildet, die einen Punkt "X" (4) aufweist, der einem zwischen der koaxialen ringförmigen Spule (24) und der Anode (7) gelegenen Magnetfeldnullpunkt entspricht.

2. Plasmabeschleuniger nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Mittel zur Erzeugung eines Magnetfeldes einen fünften Magnetfelderzeuger (25) aufweisen, der in der Nähe des ringförmigen Gasverteilers (11) angeordnet ist.

3. Plasmabeschleuniger nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet daß** der Magnetkreis ferner sekundäre ferromagnetische Tragelemente (64) umfaßt, die um die Ionisierungskammer (2) und die Beschleunigungskammer (3) herum verteilt sind und die den rückwärtigen Magnetboden (63) mit dem äußeren Magnetpol (62) verbinden.

4. Plasmabeschleuniger nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Magnetfelderzeugungsmittel außerdem einen sechsten Magnetfelderzeuger (26) umfassen, der Bestandteile aufweist, die um die sekundären ferromagnetischen Tragelemente (64) herum angeordnet sind.

5. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Magnetfelderzeugungsmittel elektromagnetische Spulen umfassen.

6. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Magnetfelderzeugungsmittel wenigstens teilweise Permanentmagneten aufweisen.

7. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, daß** der erste Magnetfelderzeuger (21) abgeschirmt ist.

8. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Ionisierungskammer (2) In radialer Richtung eine Abmessung aufweist, die größer ist als die des Beschleunigungskanals aus Isoliermaterial (53).

9. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, daß** die koaxiale ringförmige Spule (24) und ihre polarisierte leitende Hülle (28) mit Hilfe von mit der Ionisierungskammer (2) starr verbundenen Befestigungselementen (29) angebracht sind.

10. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, daß** die ringförmige Anode (7) in bezug auf die Wand des Beschleunigungskanals (53) mit einem radialen Spiel angebracht ist.

11. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, daß** - anders als über die zweite Gleichspannungsquelle (85) - die ringförmige Anode (7) über eine elektrische Versorgungsleitung (83) direkt mit dem Pluspol der ersten Gleichspannungsquelle (82) verbunden ist, ohne mechanisch noch elektrisch mit dem ringförmigen Gasverteiler (11) oder dem elektrisch leitenden Material (9) der innenteile der Wände (52) der Ioniserungskammer (2) verbunden zu sein.

12. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Kathode (8) eine Hohlkathode mit Gasentladung ist.

13. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, daß** die zweite Spannungsquelle (85) an die leitende Hülle (28) der koaxialen ringförmigen Spule (24) eine positive Spannung von einigen Zehn Volt gegenüber der Anode (7) anlegt.

14. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, daß** die zweite Spannungsquelle (85) an das elektrisch leitende Material (9) der Innenseiten der Wände (52) der ringförmigen Ionisierungskammer (2) ein Potential von etwa 20 bis 40 Volt gegenüber der Anode anlegt.

15. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Magnettelderzeugungsmittel entsprechend ausgelegt sind, damit das Potential der magnetischen Kraftlinie, die einen einem Magnetfeldnullpunkt entsprechenden Punkt "X" aufweist, nahe dem Potential der Anode (7) ist.

16. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 15, **dadurch gekennzeichnet, daß** der dritte Magnetfelderzeuger (23) einen ersten und einen zweiten Bereich (231, 232) mit unterschiedlichen Durchmessern aufweist, wobei der in der Nähe der Anode (7) befindliche erste Bereich (231) einen größeren Durchmesser als der in der Nähe der Ioni-

sierungskammer (2) gelegene zweite Bereich (232) aufweist.

17. Plasmabeschleuniger nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, der Abstand zwischen der leitenden Hülle (28) der koaxialen ringförmigen Spule (24) und den Wänden der Ionisierungskammer (2) größer als oder gleich etwa 20 Millimeter ist.

18. Plasmabeschleuniger nach der Ansprüche 1 bis 17, **dadurch gekennzeichnet, daß** er auf einen einen elektrischen Reaktionsantrieb für Satelliten bildenden Weltraum-Plasmaantrieb angewandt wird.

19. Plasmabeschleuniger nach der Ansprüche 1 bis 17, **dadurch gekennzeichnet, daß** er auf eine Ionenquelle zur Ionenbehandlung mechanischer Teile angewandt wird.

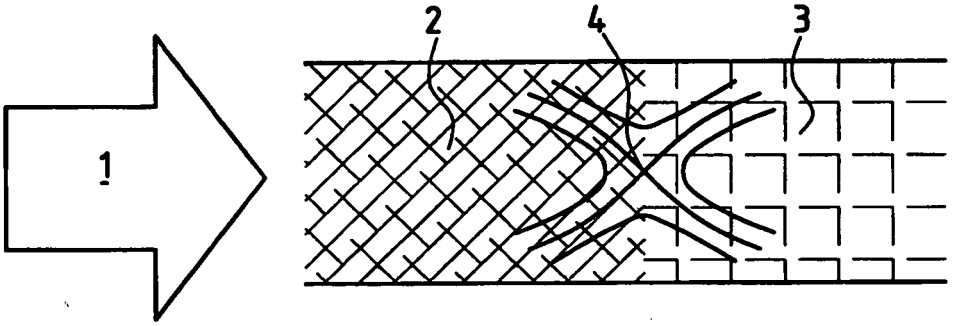


FIG.1

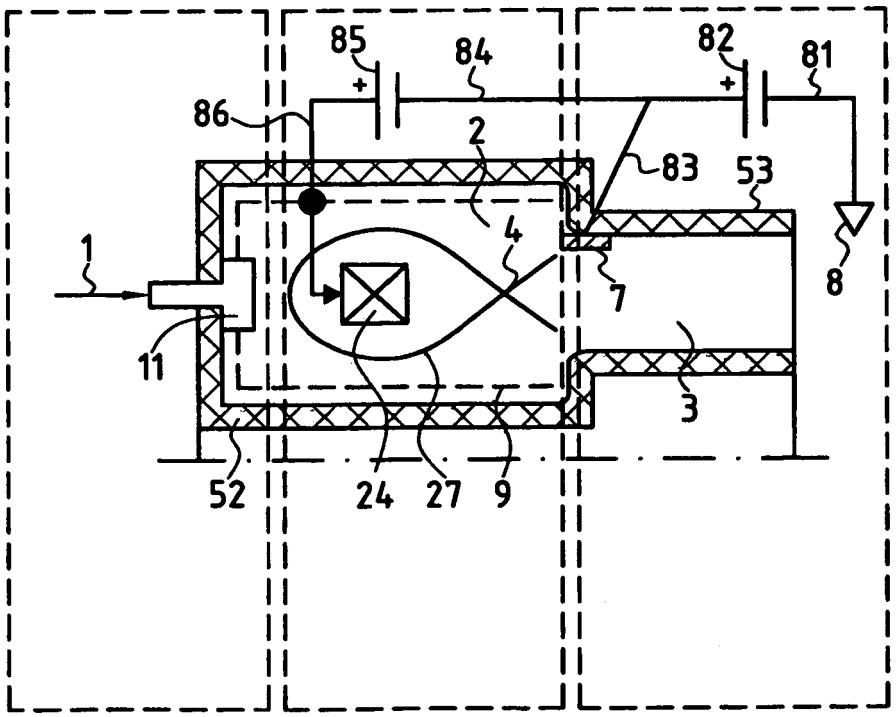


FIG.2

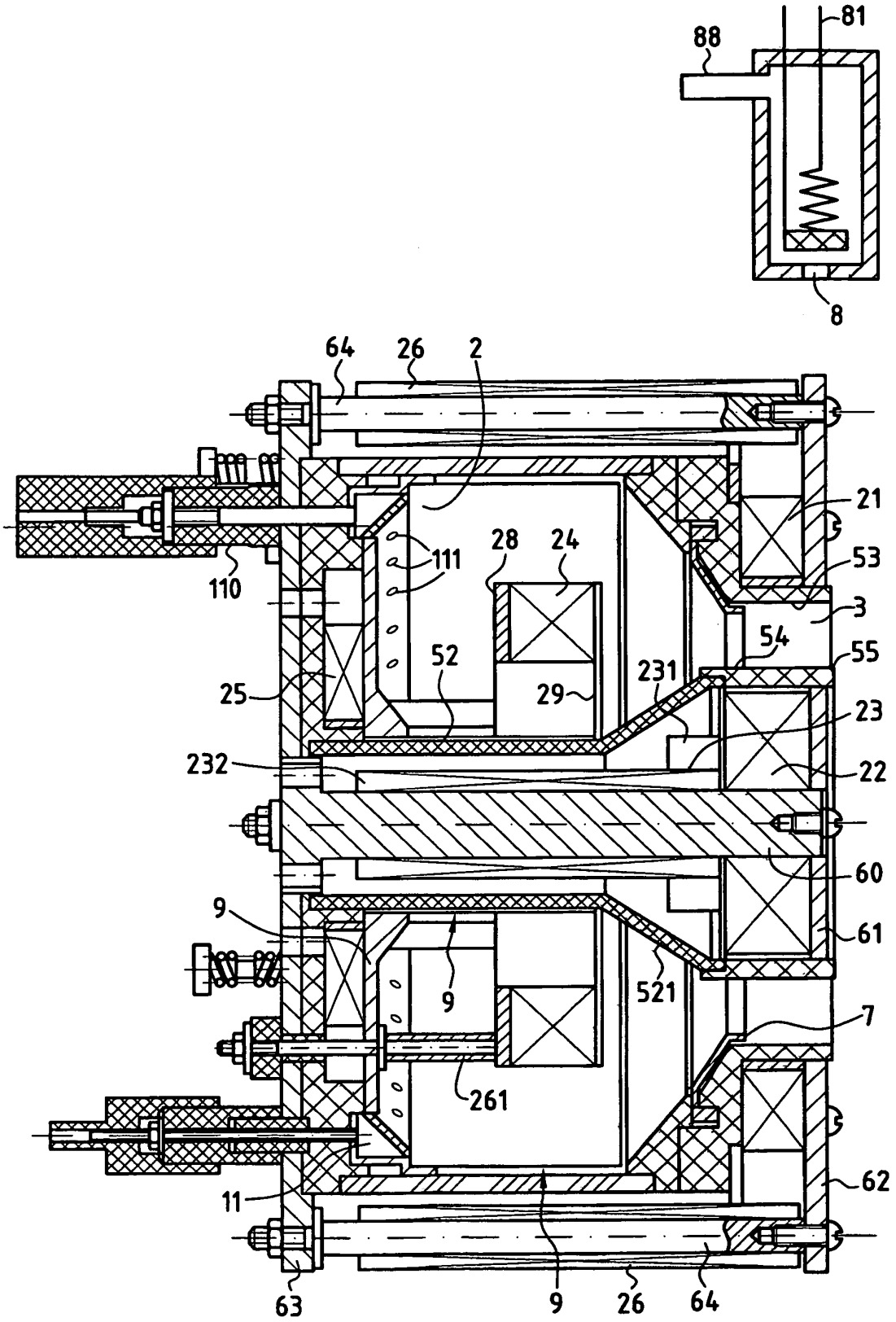

88
81
8
64
26
2
21
111
28
24
53
110
3
54
52
55
231
25
29
23
232
22
60
9
61
9
521
7
261
11
62
63
9
26
64

FIG.3

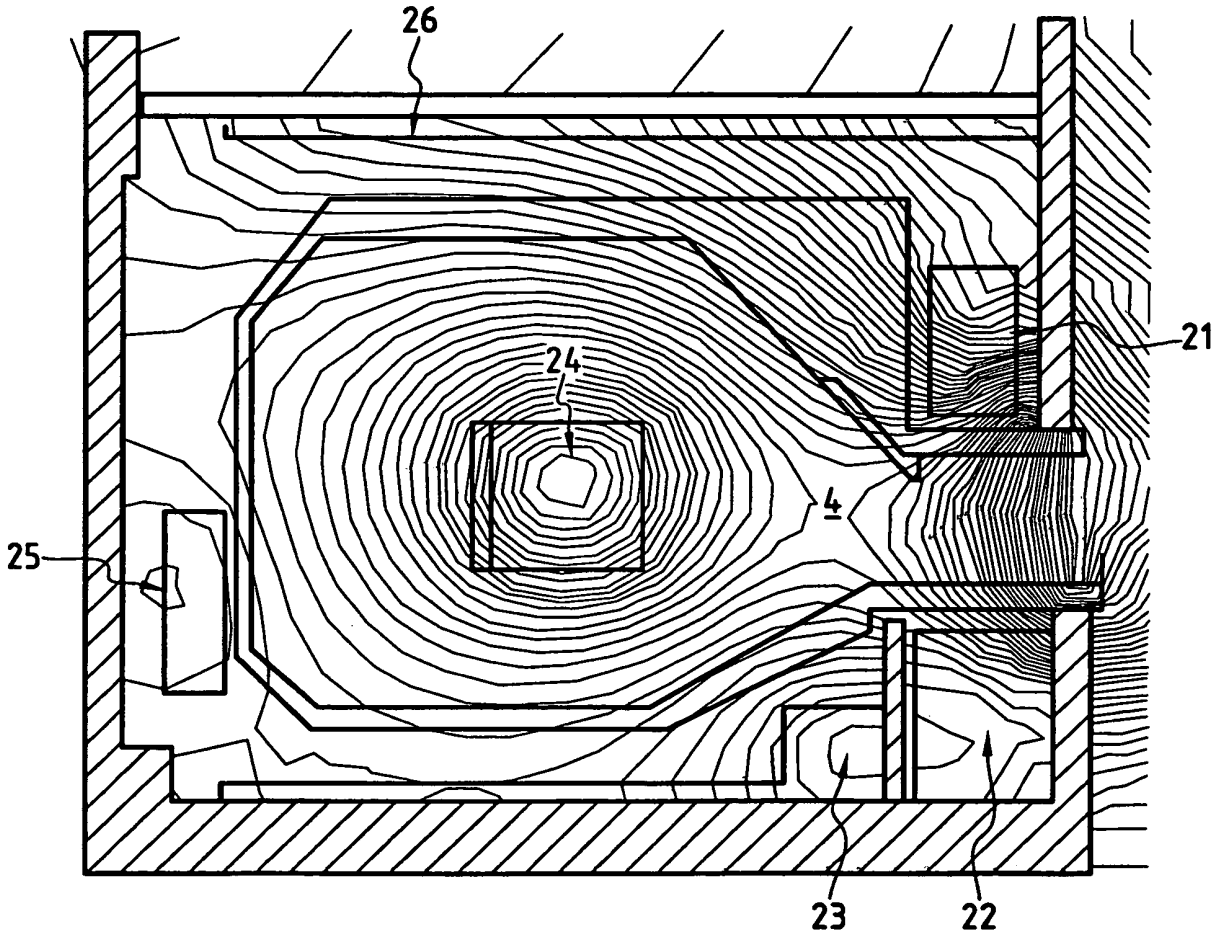


FIG.4

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- WO 0193293 A **[0003]**
- US 6215124 B1 **[0011]**
- FR 2693770 **[0012]**

Littérature non-brevet citée dans la description

- Académie de Sciences de l'URSS, La Physique du Plasma. *Science,* Février 1990, vol. 16 **[0004]**