



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) **EP 0 914 560 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
24.08.2005 Bulletin 2005/34

(21) Numéro de dépôt: **97925125.3**

(22) Date de dépôt: **23.05.1997**

(51) Int Cl.7: **F03H 1/00, H05H 1/54**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR1997/000906

(87) Numéro de publication internationale:
WO 1998/053201 (26.11.1998 Gazette 1998/47)

(54) **PROPULSEUR A PLASMA avec DISPOSITIF DE CONCENTRATION DE FAISCEAU D'IONS**

PLASMATRIEBWERK mit einer IONENSTRAHLFOKUSIERUNGSVORRICHTUNG

Ion thruster with a DEVICE FOR CONCENTRATING ION BEAMS

(84) Etats contractants désignés:
DE FR GB IT

(43) Date de publication de la demande:
12.05.1999 Bulletin 1999/19

(73) Titulaire: **Société Nationale d'Etude et de
Construction de Moteurs d' Aviation
75015 Paris (FR)**

(72) Inventeurs:
• **LATISCHEV, Leonid Aleckseevich
Moscow, 107066 (RU)**
• **IAKUBOV, Akhmet Mialikovich
Moscow, 111539 (RU)**
• **JACOUPOV, Aidar Beksultanovich
Alma Ata, 480117 (KZ)**
• **KHARTOV, Sergey Anatolievich
Moscow, 129164 (RU)**

• **VALENTIAN, Dominique
F-78170 Rosny (FR)**

(74) Mandataire: **Thévenet, Jean-Bruno et al
Cabinet Beau de Loménie
158, rue de l'Université
75340 Paris Cédex 07 (FR)**

(56) Documents cités:
WO-A-89/05404 WO-A-95/00758
GB-A- 2 271 044 US-A- 4 466 242

• **Artsimovich L.A. et al: 'Development of a steady
plasma engine (SPE) and its use on a 'Meteor'
artificial satellite', Kosmicheske Issledovaniya
(USSR), vol. 12(3) May-June 1974, pages
451-468; cité dans la demande**

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 0 914 560 B1

Description

Domaine de l'invention

[0001] La présente invention concerne les moteurs électro-ioniques à plasma appliqués notamment à la propulsion spatiale, mais également à des procédés industriels au sol, et plus particulièrement les propulseurs à plasma du type à dérive fermée d'électrons encore appelés propulseurs à plasma stationnaire (SPT), propulseurs de Hall ou propulseurs à couche anodique (ALT).

Art antérieur

[0002] On connaît déjà notamment par un article de L. A. ARTSIMOVICH et al ("Development of a steady plasma engine (SPE) and its use on a 'Meteor' artificial satellite"; Kosmicheske Issledovaniya (URSS), Vol. 12 (3) mai-juin 1974, pages 451-468) concernant le programme de développement du propulseur à plasma stationnaire (SPT) et ses essais sur le satellite "METEOR", des propulseurs du type à dérive fermée d'électrons ou propulseurs à plasma stationnaire qui se distinguent des autres catégories de propulseurs ioniques par le fait que l'ionisation et l'accélération ne sont pas différenciées et que la zone d'accélération comporte un nombre d'ions et d'électrons égal, ce qui permet d'éliminer tout phénomène de charge d'espace.

[0003] On décrira ci-après, en référence à la figure 6, un propulseur à dérive fermée d'électrons tel qu'il a été proposé dans l'article précité de L.A. ARTSIMOVICH et al.

[0004] Un canal annulaire 1 défini par une pièce 2 en matériau isolant est placé dans un électro-aimant comprenant des pièces polaires annulaires externe 3 et interne 4 placées respectivement à l'extérieur et à l'intérieur de la pièce 2 en matériau isolant, une culasse magnétique 12 disposée à l'amont du moteur et des bobines d'électro-aimant 11 qui s'étendent sur toute la longueur du canal 1 et sont montées en série autour de noyaux magnétiques 10 reliant la pièce polaire externe 3 à la culasse 12. Une cathode creuse 7, connectée à la masse, est couplée à un dispositif 17 d'alimentation en xénon pour former un nuage de plasma devant la sortie aval du canal 1. Une anode annulaire 5 reliée au pôle positif d'une source d'alimentation électrique par exemple de 300 volts est disposée dans la partie amont fermée du canal annulaire 1. Un tube d'injection de xénon 6, coopérant avec un isolateur thermique et électrique 8 débouche dans un canal de distribution annulaire 9 disposé immédiatement au voisinage de l'anode annulaire 5.

[0005] Les électrons d'ionisation et de neutralisation proviennent de la cathode creuse 7. Les électrons d'ionisation sont attirés dans le canal annulaire isolant 1 par le champ électrique régnant entre l'anode 5 et le nuage de plasma issu de la cathode 7.

[0006] Sous l'effet du champ électrique E et du champ magnétique B créé par les bobines 11, les électrons d'ionisation prennent une trajectoire de dérive en azimuth nécessaire pour maintenir le champ électrique dans le canal.

[0007] Les électrons d'ionisation dérivent alors selon des trajectoires fermées à l'intérieur du canal isolant, d'où le nom du propulseur.

[0008] Le mouvement de dérive des électrons augmente considérablement la probabilité de collision des électrons avec les atomes neutres, phénomène produisant les ions (ici de xénon).

[0009] Le champ magnétique est défini par la forme des pièces 3, 4. Les lignes 13 du champ magnétique sont essentiellement radiales dans le plan de sortie 14 du propulseur.

[0010] Les propulseurs à dérive fermée d'électrons mettent ainsi en jeu des accélérations d'ions dans un plasma. Les ions ne sont pas mono-énergétiques. En première approximation, le faisceau d'ions présente deux composantes :

- une composante assez étroite, de haute énergie, qui provient de la région d'ionisation en amont du canal d'accélération 1, et
- une composante fortement divergente, de faible énergie, qui apparaît à partir de la sortie du canal d'accélération 1 et se développe dans le volume situé immédiatement en aval du plan de sortie 14 du propulseur.

[0011] Les figures 8a et 8b montrent la distribution du courant d'ions du faisceau ionique en fonction de l'énergie pour propulseur ionique fonctionnant à une tension de décharge V_{ca} de 300 V.

[0012] La figure 8a comporte six courbes correspondant à des angles respectivement de 0° , $7^\circ 30'$, 15° , $22^\circ 30'$, 30° et $37^\circ 30'$ par rapport à l'axe du propulseur. On peut constater que le courant ionique présente un pic correspondant à 270 eV, dont l'amplitude décroît fortement quand la valeur de l'angle par rapport à l'axe du propulseur augmente. Ce pic principal est dû aux ions primaires. Des ions secondaires produits au niveau du plan de sortie du propulseur forment par ailleurs un pic secondaire correspondant à une énergie de 20 à 30 eV. L'amplitude du pic secondaire est pratiquement indépendante de la valeur de l'angle de divergence par rapport à l'axe du propulseur.

[0013] La figure 8b montre avec une échelle agrandie, cinq courbes correspondant à des angles respectivement de $37^\circ 30'$, 45° , $52^\circ 30'$, 60° et $67^\circ 30'$. On peut observer que la densité des ions à haute énergie décroît très fortement pour les valeurs élevées de l'angle de divergence par rapport à l'axe de l'appareil. Toutefois, il subsiste encore pour un angle de divergence $67^\circ 30'$ un pourcentage non négligeable d'ions ayant une énergie supérieure à 100 eV. Ces ions sont capables de causer un dommage par leur projection.

[0014] La figure 9 montre la distribution angulaire des ions de faible énergie et de haute énergie et donne une représentation d'ensemble du profil du faisceau. La courbe en traits pleins 31 donne la valeur du courant d'ions mesuré dans un collecteur à 30 V en fonction de l'angle de divergence par rapport à l'axe du propulseur et la courbe en traits discontinus 32 donne la valeur du courant d'ions mesuré dans un collecteur à 50 V également en fonction de l'angle de divergence par rapport à l'axe du propulseur.

[0015] On voit sur la figure 9 que le pic de densité 33, 34 centré à 0° est la contribution des ions de haute énergie provenant du front d'ionisation situé à l'intérieur du canal d'accélération tandis que la distribution étalée de faible densité correspond aux ions de faible énergie.

[0016] La figure 7 montre une partie de propulseur à dérive fermée d'électrons classique du genre de celui décrit en référence à la figure 6. On voit sur cette figure 7 des flèches 52 donnant l'orientation des vecteurs de vitesse des ions, ainsi qu'une courbe en pointillés 51 représentant la distribution de densité des ions, juste à la sortie du canal d'accélération 1. Les lignes de champ magnétique 113 à la sortie du canal d'accélération 1 créées par les pièces polaires 3, 4 et les bobines 11, 15 sont également représentées en superposition à la représentation de la distribution des ions. On voit que les trajectoires des ions sont perpendiculaires aux lignes de champ magnétique. Il s'ensuit que les trajectoires 54, 56 des ions en des points 53, 55 situés à la périphérie du canal d'accélération 1 en aval du plan de sortie 14 sont pratiquement perpendiculaires à l'axe Z du propulseur.

[0017] La trajectoire des ions de la composante de faible énergie et fortement divergente du faisceau d'ions, qui est gouvernée par les lignes de champ magnétique correspondant à des équipotentielles, peut avoir un effet très dommageable sur la surface de l'engin spatial sur lequel est monté le propulseur.

[0018] Dans le cas d'applications industrielles, notamment dans des installations de pulvérisation par faisceau ionique, le fait de ne pas disposer d'un faisceau aux frontières bien délimitées cause aussi des problèmes, car le faisceau s'étale au-delà de la cible et frappe les parois de l'enceinte du dispositif, introduisant ainsi une contamination du revêtement.

Objet et description succincte de l'invention

[0019] L'invention vise à remédier aux inconvénients précités et à permettre la production d'un faisceau ionique de sortie du propulseur présentant un contour bien défini et une densité d'ions dont la répartition est optimisée pour éviter des agressions dues aux ions de faible énergie situés à la périphérie du faisceau.

[0020] Ces buts sont atteints grâce à un propulseur à plasma à dérive fermée d'électrons, comprenant :

- un canal annulaire d'ionisation et d'accélération dé-

fini par des pièces en matériau isolant et présentant une ouverture à son extrémité aval,

- au moins une cathode creuse disposée à l'extérieur dudit canal annulaire et en aval de celui-ci,
- une anode annulaire concentrique au canal annulaire et disposée en amont de l'ouverture dudit canal à distance de celle-ci,
- des premier et deuxième moyens d'alimentation en gaz ionisable associés respectivement à la cathode creuse et à l'anode annulaire,
- un circuit magnétique de création d'un champ magnétique dans le canal annulaire, ce circuit magnétique comprenant plusieurs moyens distincts de création d'un champ magnétique, une culasse, un circuit magnétique périphérique disposé axialement à l'extérieur du canal annulaire et des pièces polaires périphérique et centrale reliées entre elles par ledit circuit magnétique périphérique et ladite culasse et disposées de part et d'autre du canal annulaire pour produire un champ magnétique essentiellement radial dans un plan de sortie perpendiculaire à l'axe dudit canal annulaire,

caractérisé en ce qu'il comprend en outre :

- une pièce polaire magnétique évasée essentiellement tronconique ouverte à ses deux extrémités, coaxiale avec l'axe du canal annulaire, située en aval dudit plan de sortie et s'évasant vers l'aval; et
- au moins un circuit magnétique périphérique additionnel reliant l'extrémité aval de ladite pièce polaire magnétique évasée à la pièce polaire périphérique située à l'extérieur du canal annulaire, la pièce polaire magnétique évasée coopérant avec le circuit magnétique périphérique additionnel et les pièces polaires situées de part et d'autre du canal annulaire pour définir la forme du champ magnétique en aval du canal annulaire de manière à contraindre le faisceau d'ions émis par le canal annulaire à rester à l'intérieur d'une zone essentiellement conique dont l'angle au sommet prédéterminé est défini par l'angle au sommet de la pièce polaire évasée.

[0021] Ainsi, selon l'invention, le faisceau ionique en sortie du canal annulaire d'accélération est contraint de rester à l'intérieur d'un cône dont le demi-angle au sommet est défini par le demi-angle au sommet de la pièce polaire évasée, sans toutefois que le demi-angle au sommet du faisceau ionique conique soit nécessairement rigoureusement égal à celui de la pièce polaire évasée.

[0022] La pièce polaire évasée située en aval du plan de sortie habituel du canal d'accélération a essentiellement pour rôle de conformer le champ magnétique en aval du plan de sortie et par là-même de modifier les équipotentielles à l'extérieur du propulseur et la trajectoire des ions, de manière à rendre le trajet des ions plus directif et éviter tout risque d'endommagement des pa-

rois extérieures situées au voisinage du faisceau ionique.

[0023] On notera que la pièce polaire évasée est elle-même protégée contre des agressions par les ions puisque les trajectoires des ions périphériques sont essentiellement tangentes à cette pièce polaire évasée.

[0024] Le demi-angle au sommet (α) défini entre l'axe du canal annulaire (1) du propulseur et l'évasement de la pièce polaire évasée essentiellement tronconique est compris entre 30° et 60°.

[0025] Avantagusement, le demi-angle au sommet (α) défini entre l'axe du canal annulaire (1) du propulseur et l'évasement de la pièce polaire évasée essentiellement tronconique est de 45°.

[0026] Selon un mode particulier de réalisation, la pièce polaire évasée présente une courbe telle que l'angle formé par ladite pièce et l'axe du propulseur augmente lorsque l'on s'éloigne du plan de sortie vers l'aval, de manière à permettre un épanouissement progressif des lignes de champ magnétique.

[0027] Selon une caractéristique avantageuse, la pièce polaire évasée est recouverte d'un revêtement destiné à accroître l'émissivité de la surface de ladite pièce, à réaliser une isolation électrique ou à constituer une protection contre une contamination entre le canal annulaire et la pièce polaire évasée.

[0028] Le revêtement peut être réalisé en un matériau identique à celui des pièces délimitant le canal annulaire et peut être constitué par l'un au moins des matériaux suivants : aluminium, nitrure de bore, silice, nitrure d'aluminium, nitrure de silicium, Al_2O_3 - TiO_2 et TiN.

[0029] Selon un mode de réalisation possible, le circuit magnétique périphérique additionnel est constitué par un anneau ferromagnétique unique.

[0030] De façon plus particulière, la cathode creuse est incorporée dans un trou formé dans la pièce polaire évasée et est munie d'un écran ferromagnétique de protection face au champ magnétique local.

[0031] Le circuit magnétique périphérique additionnel peut encore comprendre des barreaux ferromagnétiques.

[0032] Dans ce cas, selon une réalisation particulièrement avantageuse, lesdits barreaux ferromagnétiques sont constitués en fer doux et sont entourés de bobines dont le sens d'enroulement est tel que le flux magnétique créé dans le circuit magnétique périphérique additionnel est dirigé dans un sens opposé à celui du flux magnétique créé dans ledit circuit magnétique périphérique disposé axialement à l'extérieur du canal annulaire.

Brève description des dessins

[0033] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description suivante de modes particuliers de réalisation, donnés à titre d'exemples non limitatifs en référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une vue en coupe axiale d'une partie d'un propulseur à plasma à dérive fermée d'électrons équipé d'un dispositif de conformation de faisceau selon un premier mode particulier de réalisation de l'invention,
- la figure 2 est une vue schématique en coupe axiale de l'ensemble d'un propulseur à plasma à dérive fermée d'électrons équipé d'un dispositif de conformation du faisceau selon un deuxième mode particulier de réalisation de l'invention,
- la figure 3 est une vue axiale d'une partie d'un propulseur à plasma à dérive fermée d'électrons équipé d'un dispositif de conformation de faisceau selon l'invention dans lequel est incorporée la cathode creuse,
- la figure 4 est une vue en coupe axiale montrant une variante de réalisation d'un dispositif de conformation de faisceau selon l'invention appliqué à un propulseur à plasma à dérive fermée d'électrons,
- la figure 5 montre des histogrammes comparatifs de profil du faisceau ionique pour un propulseur à plasma standard et pour deux modes de réalisation différents de propulseurs équipés de dispositifs de conformation de faisceau selon l'invention,
- la figure 6 est une vue en coupe axiale montrant un exemple de propulseur à plasma à dérive fermée d'électrons selon l'art antérieur,
- la figure 7 est une vue en coupe axiale d'une partie d'un propulseur à plasma à dérive fermée d'électrons selon l'art antérieur, montrant la distribution de densité des ions superposée aux lignes de champ magnétique à l'extérieur du canal d'accélération,
- les figures 8a et 8b montrent des courbes donnant la distribution du courant ionique en fonction de l'énergie selon différentes orientations par rapport à l'axe du propulseur pour un propulseur à plasma de l'art antérieur, et
- la figure 9 montre le profil de l'ensemble d'un faisceau d'ions à la sortie d'un propulseur à plasma de l'art antérieur pour deux collecteurs ayant des tensions différentes.

Description détaillée de modes particuliers de réalisation

[0034] La figure 1 est une vue similaire à celle de la figure 7 et montre un exemple de mise en oeuvre de moyens de conformation d'un faisceau ionique qui, conformément à l'invention, sont disposés en aval du plan de sortie 14 d'un moteur à plasma à dérive fermée d'électrons.

[0035] On voit sur la figure 1 la partie aval du canal d'accélération annulaire 1 délimité par des pièces 2 en matériau isolant représentées en pointillés, et la partie aval du circuit magnétique principal de création d'un champ magnétique dans le canal 1. Le circuit magnétique principal comprend une pièce polaire centrale 4 et

une pièce polaire annulaire périphérique 3 situées au voisinage du plan de sortie 14 ainsi qu'un circuit magnétique périphérique 10, des bobines d'électro-aimant périphériques 11 et des bobines d'électro-aimant coopérant avec la pièce polaire centrale 4, ainsi qu'une culasse analogue à la culasse 12 de la figure 6 mais non représentée sur la figure 1. Les éléments 1 à 4, 10, 11, 15 de la figure 1 peuvent être réalisés d'une manière similaire aux éléments correspondants de la figure 7 qui correspond à une réalisation de l'art antérieur.

[0036] De même, le propulseur à plasma à dérive fermée d'électrons de la figure 1 peut comprendre de façon classique, selon une réalisation pouvant être par exemple, du genre de celle représentée sur la figure 6, sans être nécessairement identique, une anode annulaire 5 concentrique au canal annulaire 1 et disposée à une certaine distance en amont de l'ouverture du canal 1, et des moyens 6 d'alimentation en gaz ionisable, tel que du xénon, associés à l'anode annulaire 5. Le propulseur à plasma selon l'invention comprend en outre une cathode creuse 7, non représentée sur la figure 1, mais visible sur la figure 2, qui est disposée à l'extérieur du canal 1 en aval de celui-ci et est associée à des moyens 17 d'alimentation en gaz ionisable tel que du xénon.

[0037] Le circuit magnétique principal produit un champ magnétique dont les lignes de champ 13 sont essentiellement radiales dans le plan de sortie 14 perpendiculaire à l'axe du propulseur. Il est important de noter que les modifications apportées à un propulseur à plasma selon l'invention ne modifient pas la forme des lignes de champ 13 à l'intérieur du canal annulaire 1, lesquelles lignes de champ 13 à l'intérieur du canal 1 sont identiques dans le cas du propulseur connu de la figure 7 et dans celui du propulseur selon l'invention représenté sur la figure 1. En revanche, les lignes de champ magnétique 113a en aval du plan de sortie 14 sont fortement modifiées dans le cas de la réalisation de la figure 1, par rapport aux lignes de champ 113 de la figure 7.

[0038] Le propulseur à plasma de la figure 1 est en effet équipé d'un circuit magnétique périphérique additionnel 60 reliant à la pièce polaire périphérique 3 située à l'extérieur du canal annulaire 1 une pièce polaire magnétique évasée essentiellement tronconique 63 qui est ouverte à ses deux extrémités, est coaxiale à l'axe du canal annulaire 1 en étant située en aval du plan de sortie 14, et s'évase vers l'aval.

[0039] La pièce polaire tronconique 63 coopère avec le circuit magnétique périphérique additionnel 60 et les pièces polaires 3, 4 situées de part et d'autre du canal 1 pour définir la forme du champ magnétique en aval du canal annulaire 1.

[0040] De façon plus particulière, la pièce polaire 63 essentiellement tronconique peut présenter un demi-angle au sommet α compris entre 30° et 60° et par exemple de l'ordre de 45° .

[0041] La pièce polaire additionnelle 63 peut être reliée au circuit magnétique principal 10, 3, au niveau du

plan de sortie 14, par des barreaux 60. Ces barreaux 60 peuvent être constitués par de simples pièces ferromagnétiques sans adjonction d'élément actif sur le plan magnétique (aimant permanent, bobine d'électro-aimant) ni au niveau de la pièce polaire 63, ni au niveau des barreaux 60 constituant le circuit magnétique périphérique additionnel.

[0042] Toutefois, de préférence, des éléments actifs sur la plan magnétique sont incorporés dans le circuit magnétique périphérique additionnel. Ainsi, les barreaux 60 peuvent être constitués par des aimants permanents.

[0043] Selon un mode de réalisation avantageux, les barreaux 60 sont constitués en fer doux et, comme représenté sur la figure 1, sont entourés de bobines 61 dont le sens d'enroulement est tel que le flux magnétique créé dans le circuit magnétique périphérique additionnel est dirigé dans un sens opposé à celui du flux magnétique créé dans le circuit magnétique 10 disposé à l'extérieur du canal annulaire 1 parallèlement à l'axe du propulseur.

[0044] La figure 2 représente un autre mode de réalisation de l'invention, dans lequel le circuit magnétique périphérique additionnel 80 est constitué par un anneau ferromagnétique unique.

[0045] De façon plus particulière, sur la figure 2, on a représenté un mode de réalisation dans lequel l'ensemble de la pièce polaire 63 essentiellement tronconique et du circuit magnétique périphérique additionnel 80 est constitué par une pièce unique fixée par exemple par boulonnage ou par soudage, sur les pièces polaires périphériques situées à l'extérieur du canal annulaire 1.

[0046] La pièce polaire tronconique 63, les barreaux 60 ou l'anneau ferromagnétique 80 peuvent être réalisés en une ferrite isolante électriquement.

[0047] Comme on peut le voir sur le mode de réalisation de la figure 3, dans un propulseur à plasma à dérive fermée d'électrons conforme à l'invention, la cathode creuse 7 peut être incorporée dans un trou 163 formé dans la pièce polaire évasée 63. Dans ce cas, la cathode creuse 7 est équipée d'un écran ferromagnétique 164 de protection face au champ magnétique local. L'écran ferromagnétique 164 de protection peut être disposé autour d'une électrode d'allumage 72 qui entoure elle-même le corps 71 de la cathode creuse 7 alimentée en gaz ionisable. L'électrode d'allumage 72 et le tube 164 contribuent ainsi tous deux à constituer un écran protecteur contre la chaleur pour le corps 71. La cathode creuse 7 peut être montée sur les pièces polaires 3 et 63 par une bride 73. L'axe de la cathode 7 est approximativement parallèle aux lignes de champ magnétique local.

[0048] La pièce polaire 63 formant divergent peut être recouverte d'un revêtement 263 (Fig 3) pouvant jouer plusieurs rôles. Ainsi, le revêtement 263 peut accroître l'émissivité de la surface de la pièce de manière à accroître le flux de rayonnement et ainsi abaisser la température de fonctionnement du propulseur.

[0049] Le revêtement 263 peut encore assurer une isolation électrique.

[0050] Enfin le revêtement 263 peut constituer une protection contre une contamination entre le canal annulaire 1 et la pièce polaire évasée 63.

[0051] Une même couche de revêtement peut répondre à ces trois objectifs. Le revêtement 263 peut également se prolonger par un revêtement 263b réalisé sur les côtés du propulseur (Fig 3).

[0052] Le revêtement 263, 263b peut être réalisé en un matériau identique à celui des pièces délimitant le canal annulaire 1.

[0053] A titre d'exemple, le revêtement 263, 263b peut être réalisé par l'un des matériaux suivants, ou une combinaison de ces matériaux : aluminium, nitrure de bore, silice, nitrure d'aluminium, nitrure de silicium, $Al_2O_3-TiO_2$ et TiN.

[0054] La figure 4 montre une variante de réalisation de l'invention selon laquelle la pièce polaire additionnelle 63 ne présente pas une forme exactement tronconique, mais plutôt une forme évasée à la manière d'une tulipe, la pièce polaire évasée 63 présentant une courbure 363 telle que l'angle formé par cette pièce et l'axe du moteur augmente lorsque l'on s'éloigne du plan de sortie 14 vers l'aval, de manière à permettre un épanouissement progressif des lignes de champ magnétique.

[0055] Si l'on se reporte à nouveau à la figure 1, on voit que les lignes 113a du champ magnétique à l'extérieur du canal annulaire 1 sont moins convexes que les lignes 113 de la figure 7 tandis que les lignes de champ magnétique 13 à l'intérieur du canal 1 sont pratiquement inchangées.

[0056] Les ions formés et accélérés à l'extérieur du canal 1 sont forcés de rester à l'intérieur d'un cône défini par la pièce polaire additionnelle 63. En effet, cette pièce polaire additionnelle 63, le circuit magnétique additionnel associé 60, 61 et les pièces polaires 3, 4 coopèrent pour conformer le champ magnétique, et donc les lignes équipotentielles 113a en aval du plan de sortie 14 du moteur. Un ion créé en un point 53a est accéléré selon un vecteur 54a selon une direction normale à une équipotentielle, qui correspond de très près à une ligne de champ magnétique. On constate ainsi que les ions accélérés à la périphérie du faisceau ionique sont pratiquement parallèles à la pièce 63 et peuvent rester à l'intérieur d'un cône dont le demi-angle au sommet est conditionné par le demi-angle au sommet α de la pièce tronconique 63 ou de la pièce évasée assimilable à un tronc de cône.

[0057] D'une manière générale, dans un propulseur à plasma conforme à l'invention, la densité des ions est augmentée au voisinage de l'axe et est fortement diminuée dans la zone excentrée. Le faisceau ionique est ainsi mieux collimaté, ce qui optimise son utilisation dans des applications industrielles et dans tous les cas réduit les risques de contamination.

[0058] On a représenté sur la figure 5 trois histogram-

mes donnant le profil d'un faisceau ionique à une distance de 500 mm de la sortie du propulseur pour les trois cas suivants :

- 5 S) avec un propulseur à plasma standard de l'art antérieur,
- P) avec un propulseur à plasma selon l'invention équipé d'un circuit passif de conformation du champ magnétique à la sortie du propulseur, un tel circuit passif comprenant une pièce polaire 63 et un circuit magnétique additionnel 60 sans éléments magnétiques actifs tels que des aimants permanents ou des électro-aimants,
- 10 A) avec un propulseur à plasma selon un mode de réalisation préférentiel de l'invention, le circuit de conformation de champ 60, 63 à la sortie du propulseur étant de type actif et comprenant des éléments magnétiques actifs tels que des aimants permanents ou des électro-aimants.

[0059] Si l'on considère l'histogramme S montrant la divergence d'un faisceau ionique issu d'un propulseur à plasma standard, on constate que la densité d'ions sur les bords est non négligeable tandis que la densité d'ions au voisinage de l'axe reste modérée.

[0060] L'histogramme P montre l'amélioration obtenue lorsque l'on utilise un propulseur à plasma équipé selon l'invention de moyens additionnels 63, 60 de conformation de champ magnétique, tels que par exemple les moyens 63, 60 de la figure 1, les bobines 61 n'étant pas excitées, ce qui correspond à des moyens de conformation de type passif. On constate dans ce cas une augmentation de la densité des ions au voisinage de l'axe et une diminution de la densité des ions sur les bords.

[0061] L'histogramme A correspond à la mise en oeuvre de moyens additionnels de conformation de champ magnétique 63, 60 de type actif, c'est-à-dire par exemple au mode de réalisation de la figure 1 avec des bobines 61 excitées. Dans ce cas, on constate que la densité des ions au voisinage de l'axe est multipliée pratiquement par un facteur de trois tandis que la densité sur les côtés est tout à fait négligeable.

Revendications

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

- 50 - un canal annulaire d'ionisation et d'accélération (1) défini par des pièces (2) en matériau isolant et présentant une ouverture à son extrémité aval,
- 55 - au moins une cathode creuse (7) disposée à l'extérieur dudit canal annulaire (1) et en aval de celui-ci,
- une anode annulaire (5) concentrique au canal

- annulaire (1) et disposée en amont de l'ouverture dudit canal à distance de celle-ci,
- des premier (17) et deuxième (6) moyens d'alimentation en gaz ionisable associés respectivement à la cathode creuse (7) et à l'anode annulaire (5),
 - un circuit magnétique (3, 4, 10, 12) de création d'un champ magnétique dans le canal annulaire (1), ce circuit magnétique comprenant plusieurs moyens distincts (10; 11, 15) de création d'un champ magnétique, une culasse (12), un circuit magnétique périphérique (10) disposé axialement à l'extérieur du canal annulaire (1) et des pièces polaires périphérique (3) et centrale (4) reliées entre elles par ledit circuit magnétique périphérique (10) et ladite culasse (12) et disposées de part et d'autre du canal annulaire (1) pour produire un champ magnétique essentiellement radial dans un plan de sortie (14) perpendiculaire à l'axe dudit canal annulaire (1),

caractérisé en ce qu'il comprend en outre :

- une pièce polaire magnétique évasée essentiellement tronconique (63) ouverte à ses deux extrémités, coaxiale avec l'axe du canal annulaire (1), située en aval dudit plan de sortie (14) et s'évasant vers l'aval, et
 - au moins un circuit magnétique périphérique additionnel (60 ; 80) reliant l'extrémité aval de ladite pièce polaire magnétique évasée (63) à la pièce polaire (3) périphérique située à l'extérieur du canal auxiliaire (1), la pièce polaire magnétique évasée (63) coopérant avec le circuit magnétique périphérique additionnel (60 ; 80) et les pièces polaires (3, 4) situées de part et d'autre du canal annulaire (1) pour définir la forme du champ magnétique en aval du canal annulaire (1) de manière à contraindre le faisceau d'ions émis par le canal annulaire (1) à rester à l'intérieur d'une zone essentiellement conique dont l'angle au sommet prédéterminé est défini par l'angle au sommet de la pièce polaire évasée (63).
2. Propulseur à plasma selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** le demi-angle au sommet (α) défini entre l'axe du canal annulaire (1) du propulseur et l'évasement de la pièce polaire évasée (63) essentiellement tronconique est compris entre 30° et 60°.
 3. Propulseur à plasma selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** le demi-angle au sommet (α) défini entre l'axe du canal annulaire (1) du propulseur et l'évasement de la pièce polaire évasée (63) essentiellement tronconique est de 45°.

4. Propulseur à plasma selon la revendication 1 ou la revendication 2, **caractérisé en ce que** la pièce polaire évasée (63) présente une courbe telle que l'angle formé par ladite pièce et l'axe du moteur augmente lorsque l'on s'éloigne du plan de sortie (14) vers l'aval, de manière à permettre un épanouissement progressif des lignes de champ magnétique.
5. Propulseur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, **caractérisé en ce que** la pièce polaire évasée (63) est recouverte d'un revêtement (263) destiné à accroître l'émissivité de la surface de ladite pièce, à réaliser une isolation électrique ou à constituer une protection contre une contamination entre le canal annulaire (1) et la pièce polaire évasée (63).
6. Propulseur à plasma selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** ledit revêtement (263) est réalisé en un matériau identique à celui des pièces (2) délimitant ledit canal annulaire (1).
7. Propulseur à plasma selon la revendication 5 ou la revendication 6, **caractérisé en ce que** ledit revêtement (263) est constitué par l'un au moins des matériaux suivants : aluminium, nitrure de bore, silice, nitrure d'aluminium, nitrure de silicium, Al_2O_3 - TiO_2 et TiN.
8. Propulseur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** la pièce polaire évasée (63) et le circuit magnétique périphérique additionnel (60 ;80) sont réalisés en matériau ferromagnétique sans adjonction d'aimant permanent ou de bobine d'électro-aimant.
9. Propulseur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce que** l'un au moins des éléments constitués par la pièce polaire évasée (63) et le circuit magnétique périphérique additionnel (60 ;80) sont réalisés en ferrite isolante électriquement.
10. Propulseur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce que** le circuit magnétique périphérique additionnel (80) est constitué par un anneau ferromagnétique unique.
11. Propulseur à plasma selon la revendication 10, **caractérisé en ce que** la pièce polaire évasée (63) et le circuit magnétique périphérique additionnel (80) sont constitués par une pièce unique fixée sur la pièce polaire périphérique (3) située à l'extérieur du canal annulaire (1).
12. Propulseur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, **caractérisé en ce que** la cathode creuse (7) est incorporée dans un trou (163)

formé dans la pièce polaire évasée (63) et est munie d'un écran ferromagnétique (164) de protection face au champ magnétique local.

13. Propulseur à plasma selon la revendication 12, **caractérisé en ce que** l'écran ferromagnétique (164) de protection est disposé autour d'une électrode d'allumage (72) qui entoure elle-même le corps (71) de la cathode creuse (7). 5
14. Propulseur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** le circuit magnétique périphérique additionnel (60) comprend des barreaux ferromagnétiques. 10
15. Propulseur à plasma selon la revendication 14, **caractérisé en ce que** lesdits barreaux ferromagnétiques sont constitués par des aimants permanents. 15
16. Propulseur à plasma selon la revendication 14, **caractérisé en ce que** lesdits barreaux ferromagnétiques sont constitués en fer doux et sont entourés de bobines (61) dont le sens d'enroulement est tel que le flux magnétique créé dans le circuit magnétique périphérique additionnel (60) est dirigé dans un sens opposé à celui du flux magnétique créée dans ledit circuit magnétique périphérique (10) disposé axialement à l'extérieur du canal annulaire (1). 20 25 30

Patentansprüche

1. Plasmatriebwerk mit geschlossener Elektrendrift, umfassend: 35
 - einen ringförmigen Ionisierungs- und Beschleunigungskanal (1), welcher von Teilen (2) aus Isolationsmaterial gebildet ist und an seinem stromabwärtigen Ende eine Öffnung aufweist, 40
 - wenigstens eine Hohlkathode (7), die außerhalb des ringförmigen Kanals (1) und stromabwärts dessen angeordnet ist,
 - eine Ringanode (5), welche zu dem ringförmigen Kanal (1) konzentrisch ist und stromaufwärts der Öffnung des Kanals mit Abstand zu dieser angeordnet ist, 45
 - erste (17) und zweite (6) Mittel zum Versorgen mit ionisierbarem Gas, die der Hohlkathode (7) bzw. der Ringanode (5) zugeordnet sind, 50
 - einen Magnetkreis (3, 4, 10, 12) zum Erzeugen eines Magnetfeldes in dem ringförmigen Kanal (1), wobei dieser Magnetkreis mehrere unterschiedliche Mittel (10; 11; 15) zum Erzeugen eines Magnetfeldes, ein Joch (12), einen axial außerhalb des ringförmigen Kanals (1) angeordneten peripheren Magnetkreis (10) sowie einen peripheren Polschuh (3) und einen mitt- 55

leren Poischuh (4), die über den peripheren Magnetkreis (10) und das Joch (12) miteinander verbunden und auf beiden Seiten des ringförmigen Kanals (1) angeordnet sind, aufweist, um ein im wesentlichen radiales Magnetfeld in einer zu der Achse des ringförmigen Kanals (1) senkrechten Austrittsebene (14) zu erzeugen,

dadurch gekennzeichnet, daß es weiterhin folgendes umfaßt:

- einen trichterförmig erweiterten, im wesentlichen kegelstumpfförmigen Magnetpolschuh (63), der an seinen beiden Enden offen ist, koaxial zu der Achse des ringförmigen Kanals (1) verläuft, stromabwärts der Austrittsebene (14) gelegen ist und sich stromabwärts ausbaucht, sowie
 - wenigstens einen zusätzlichen peripheren Magnetkreis (60; 80), welcher das stromabwärtige Ende des trichterförmig erweiterten Magnetpolschuhs (63) mit dem peripheren, außerhalb des Hilfskanals (1) befindlichen Polschuh (3) verbindet, wobei der trichterförmig erweiterte Magnetpolschuh (63) mit dem zusätzlichen peripheren Magnetkreis (60; 80) und den auf beiden Seiten des ringförmigen Kanals (1) befindlichen Polschuhen (3, 4) zusammenwirkt, um die Form des Magnetfeldes stromabwärts des ringförmigen Kanals (1) zu definieren, derart, daß der durch den ringförmigen Kanal (1) ausgesandte Ionenstrahl gezwungen wird, innerhalb eines im wesentlichen konischen Bereichs zu bleiben, dessen vorbestimmter Spitzenwinkel durch den Spitzenwinkel des trichterförmig erweiterten Polschuhs (63) definiert wird.
2. Plasmatriebwerk nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, daß** der halbe Spitzenwinkel (α), welcher zwischen der Achse des ringförmigen Kanals (1) des Triebwerks und der Ausbauchung des trichterförmig erweiterten, im wesentlichen kegelstumpfförmigen Polschuhs (63) gebildet wird, zwischen 30° und 60° liegt.
 3. Plasmatriebwerk nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, daß** der halbe Spitzenwinkel (α), welcher zwischen der Achse des ringförmigen Kanals (1) des Triebwerks und der Ausbauchung des trichterförmig erweiterten, im wesentlichen kegelstumpfförmigen Polschuhs (63) gebildet wird, 45° beträgt.
 4. Plasmatriebwerk nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, daß** der trichterförmig erweiterte Polschuh (63) eine derartige Krümmung aufweist, daß der durch den Schuh und die Achse des Motors gebildete Winkel größer wird,

wenn man sich von der Austrittsebene (14) stromabwärts entfernt, so daß ein zunehmendes Ausbreiten der Magnetfeldlinien ermöglicht wird.

5. Plasmatriebwerk nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, daß** der trichterförmig erweiterte Polschuh (63) mit einer Beschichtung (263) überzogen ist, welche dazu bestimmt ist, das Emissionsvermögen der Oberfläche des Schuhs zu erhöhen, eine elektrische Isolierung auszubilden oder einen Schutz gegen eine Kontamination zwischen dem ringförmigen Kanal (1) und dem trichterförmig erweiterten Polschuh (63) zu bilden. 5
6. Plasmatriebwerk nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Beschichtung (263) aus einem Material besteht, das mit demjenigen der Teile (2), welche den ringförmigen Kanal (1) begrenzen, identisch ist. 10
7. Plasmatriebwerk nach Anspruch 5 oder Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Beschichtung (263) aus wenigstens einem der folgenden Materialien besteht: Aluminium, Bornitrid, Kiesel- 15
erde, Aluminiumnitrid, Siliziumnitrid, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ und TiN. 20
8. Plasmatriebwerk nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, daß** der trichterförmig erweiterte Polschuh (63) und der zusätz- 25
liche periphere Magnetkreis (60; 80) aus ferromagnetischem Material ohne Hinzufügen eines Permanentmagneten oder einer Magnetspule gefertigt sind. 30
9. Plasmatriebwerk nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, daß** wenigstens eines der von dem trichterförmig erweiterten Pol- 35
schuh (63) und dem zusätzlichen peripheren Magnetkreis (60; 80) gebildeten Elemente aus elek- 40
trisch isolierendem Ferrit gefertigt ist.
10. Plasmatriebwerk nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, daß** der zusätz- 45
liche periphere Magnetkreis (80) von einem einzigen ferromagnetischen Ring gebildet ist.
11. Plasmatriebwerk nach Anspruch 10, **dadurch ge- 50**
kenntzeichnet, daß der trichterförmig erweiterte Polschuh (63) und der zusätzliche periphere Ma-
gnetkreis (80) von einem einzigen Teil gebildet sind, das an dem außerhalb des ringförmigen Kanals (1)
befindlichen peripheren Polschuh (3) befestigt ist. 55
12. Plasmatriebwerk nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Hohl-
kathode (7) in einem in dem trichterförmig erweiter-

ten Polschuh (63) gebildeten Loch (163) aufgenom-
men und mit einer ferromagnetischen Abschirmung
(164) zum Schutz gegen das lokale Magnetfeld ver-
sehen ist.

13. Plasmatriebwerk nach Anspruch 12, **dadurch ge- 5**
kenntzeichnet, daß der ferromagnetische Schutz-
schirm (164) um eine Zündelektrode (72) angeord-
net ist, die ihrerseits den Körper (71) der Hohlka-
thode (7) umgibt. 10
14. Plasmatriebwerk nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, daß** der zusätz- 15
liche periphere Magnetkreis (60) ferromagnetische
Stäbe aufweist.
15. Plasmatriebwerk nach Anspruch 14, **dadurch ge- 20**
kenntzeichnet, daß die ferromagnetischen Stäbe
von Permanentmagneten gebildet sind.
16. Plasmatriebwerk nach Anspruch 14, **dadurch ge- 25**
kenntzeichnet, daß die ferromagnetischen Stäbe
aus Weicheisen bestehen und von Spulen (61) um-
geben sind, deren Wicklungssinn derart ist, daß der
in dem zusätzlichen peripheren Magnetkreis (60)
erzeugte Magnetfluß in eine Richtung gerichtet ist,
die zu derjenigen des Magnetflusses, welcher in
dem axial außerhalb des ringförmigen Kanals (1)
angeordneten peripheren Magnetkreis (10) erzeugt
wird, entgegengesetzt ist. 30

Claims

1. A closed electron drift plasma thruster comprising: 35
 - an annular ionisation and acceleration channel (1) defined by pieces (2) of insulating material and having an opening at its downstream end;
 - at least one hollow cathode (7) disposed out- 40
side said annular channel (1) and downstream therefrom;
 - an annular anode (5) concentric with the annu-
lar channel (1) and disposed upstream from the
opening of said channel, and at a distance therefrom;
 - first and second ionisable gas feed means (17, 45
6) respectively associated with the hollow cath-
ode (7) and with the annular anode (5); and
 - a magnetic circuit (3, 4, 10, 12) for creating a
magnetic field in the annular channel (1), said
magnetic circuit comprising a plurality of dis-
tinct magnetic field creating means (10; 11, 15),
a yoke (12), a peripheral magnetic circuit (10) 50
disposed axially outside the annular channel
(1), and peripheral and central pole pieces (3,
4) connected to one another by said peripheral
magnetic circuit (10) and said yoke (12) and

disposed on either side of the annular channel (1) to produce an essentially radial magnetic field in an outlet plane (14) perpendicular to the axis of said annular channel (1);

the thruster being **characterised in that** it further comprises:

- an essentially frustoconical flared magnetic pole piece (63) open at both ends, coaxial about the axis of the annular channel (1), situated downstream from said outlet plane (14), and flaring downstream; and
 - at least one additional peripheral magnetic circuit (60; 80) connecting the downstream end of said flared magnetic pole piece (63) to the peripheral pole piece (3) situated outside the auxiliary channel (1), the flared magnetic pole piece (63) co-operating with the additional peripheral magnetic circuit (60; 80) and the pole pieces (3, 4) situated on either side of the annular channel (1) to define the shape of the magnetic field downstream from the annular channel (1) in such a manner as to constrain the ion beam emitted by the annular channel (1) to remain within an essentially conical zone whose determined angle at the apex is defined by the angle at the apex of the flared pole piece (63).
2. A plasma thruster according to claim 1, **characterised in that** the half angle at the apex (α) as defined between the axis of the annular channel (1) of the thruster and the flaring of the essentially frustoconical flared pole piece (63) lies in the range 30° to 60°.
 3. A plasma thruster according to claim 2, **characterised in that** the half-angle at the apex (α) as defined between the axis of the annular channel (1) of the thruster and the flaring of the essentially frustoconical flared pole piece (63) lies in the range 45°.
 4. A plasma thruster according to claim 1 or claim 2, **characterised in that** the flared pole piece (63) is curved such that the angle formed by said piece and the axis of the motor increases on going away from the outlet plane (14) in the downstream direction, thereby enabling the magnetic field lines to spread apart progressively.
 5. A plasma thruster according to any one of claims 1 to 4, **characterised in that** the flared pole piece (63) is covered in a coating (263) for increasing the emissivity of the surface of said piece, for providing electrical insulation, or for providing protection against contamination between the annular channel (1) and the flared pole piece (63).

6. A plasma thruster according to claim 5, **characterised in that** said coating (263) is made of a material identical to that of the pieces (2) defining said annular channel (1).
7. A plasma thruster according to claim 5 or claim 6, **characterised in that** said coating (263) is constituted by at least one of the following materials: aluminium, boron nitride, silica, aluminium nitride, silicon nitride, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, and TiN.
8. A plasma thruster according to any one of claims 1 to 7, **characterised in that** the flared pole piece (63) and the additional peripheral magnetic circuit (60; 80) are made of ferromagnetic material without adding a permanent magnet or an electromagnet coil.
9. A plasma thruster according to any one of claims 1 to 8, **characterised in that** the flared pole piece (63) and the additional peripheral magnetic circuit (60; 80) are made of electrically insulating ferrite.
10. A plasma thruster according to any one of claims 1 to 9, **characterised in that** the additional peripheral magnetic circuit (80) is constituted by a single ferromagnetic ring.
11. A plasma thruster according to claim 10, **characterised in that** the flared pole piece (63) and the additional peripheral magnetic circuit (80) are together constituted by a single piece fixed on the peripheral pole piece (3) situated outside the annular channel (1).
12. A plasma thruster according to any one of claims 1 to 11, **characterised in that** the hollow cathode (7) is incorporated in a hole (163) formed in the flared pole piece (63) and is provided with a protective ferromagnetic screen (164) facing the local magnetic field.
13. A plasma thruster according to claim 12, **characterised in that** the protective ferromagnetic screen (164) is disposed around an ignition electrode (72) itself surrounding the body (71) of the hollow cathode (7).
14. A plasma thruster according to any one of claims 1 to 7, **characterised in that** the additional peripheral magnetic circuit (60) comprises ferromagnetic bars.
15. A plasma thruster according to claim 14, **characterised in that** said ferromagnetic bars are constituted by permanent magnets.
16. A plasma thruster according to claim 14, **characterised in that** said ferromagnetic bars are made

of soft iron and are surrounded by coils (61) wound in such a direction that the magnetic flux created in the additional peripheral magnetic circuit (60) is directed in a direction opposite that of the magnetic flux created in said peripheral magnetic circuit (10) disposed axially outside the annular channel (1).

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

FIG. 1

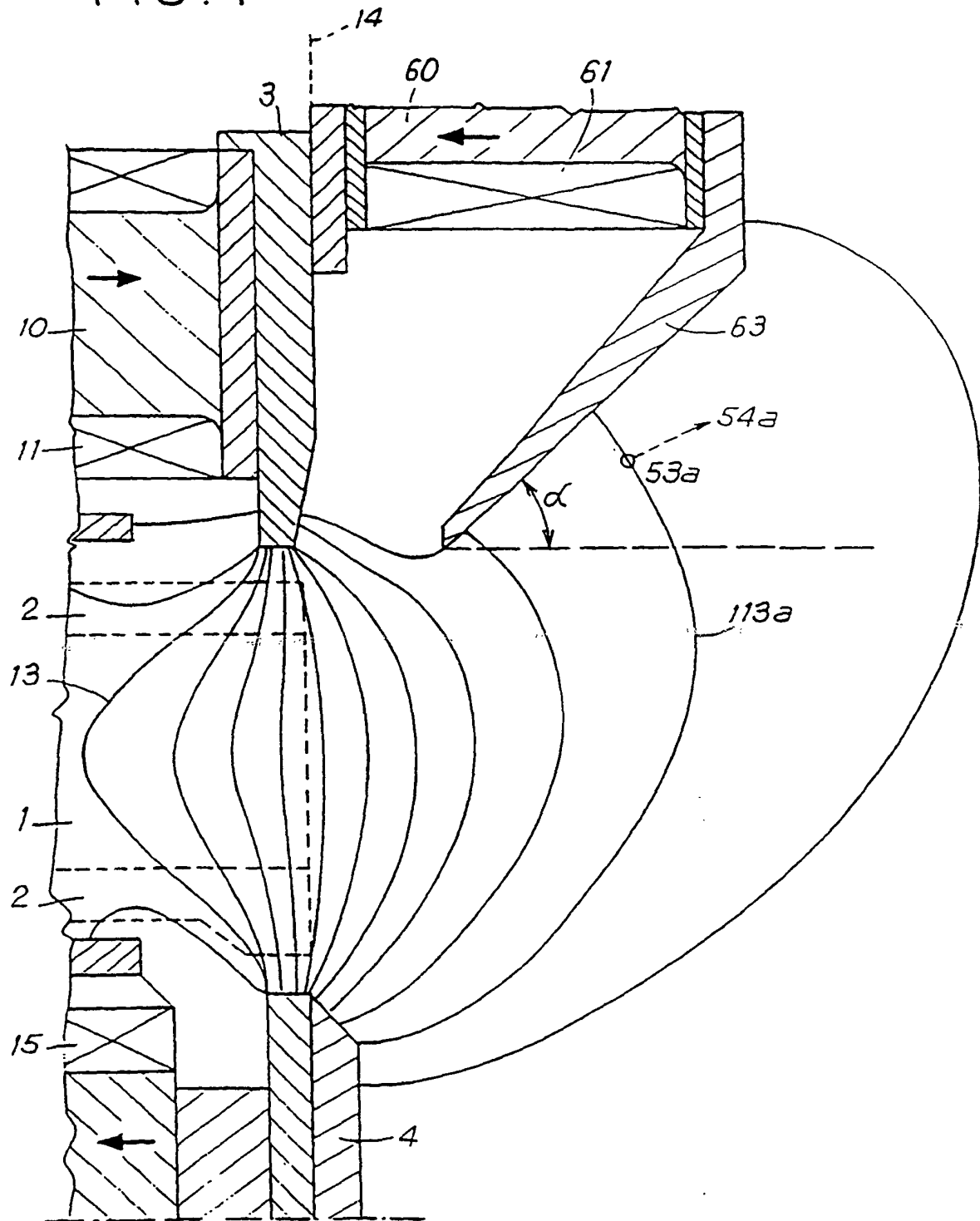


FIG. 2

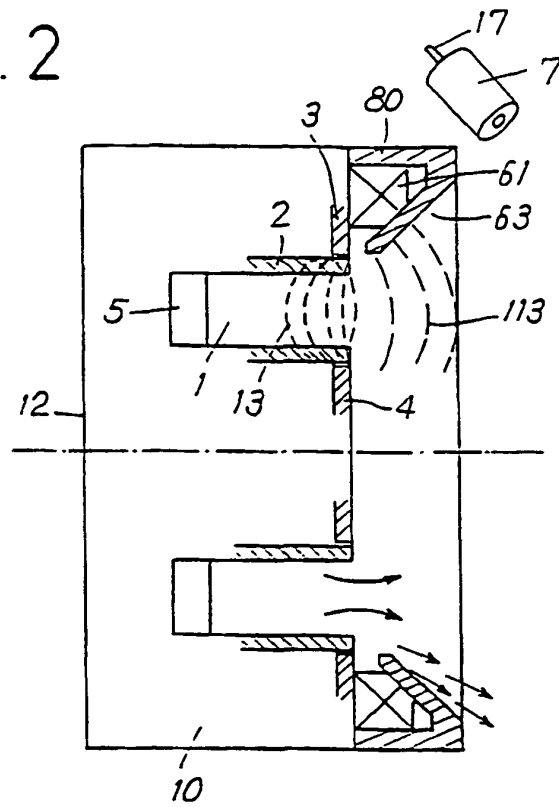


FIG. 4

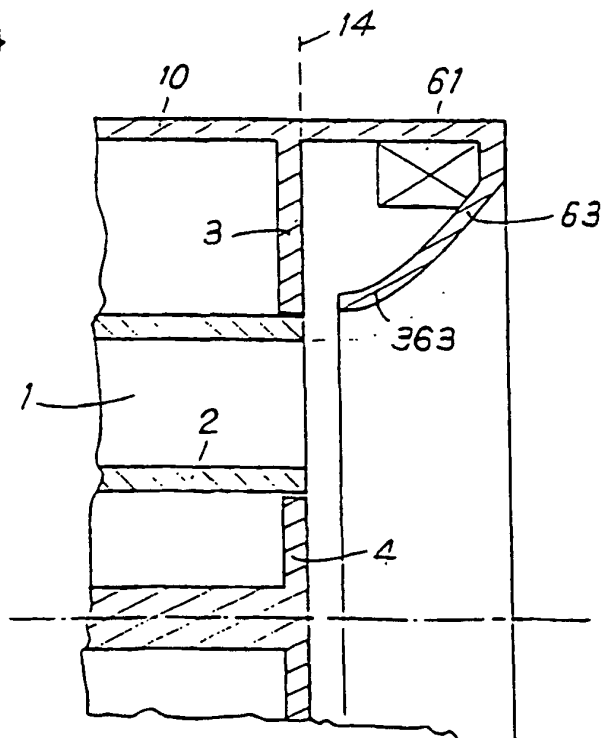


FIG. 3

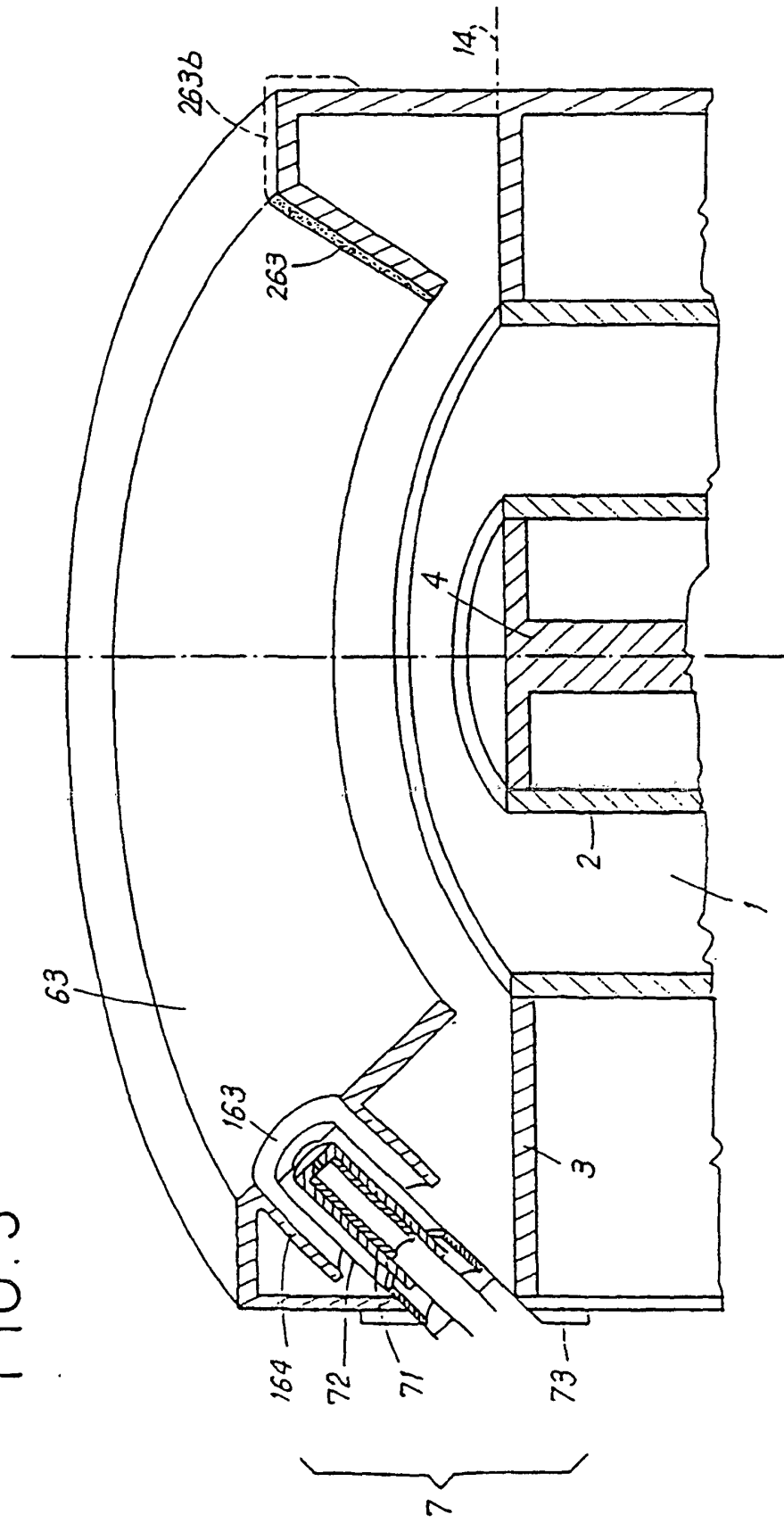


FIG. 5

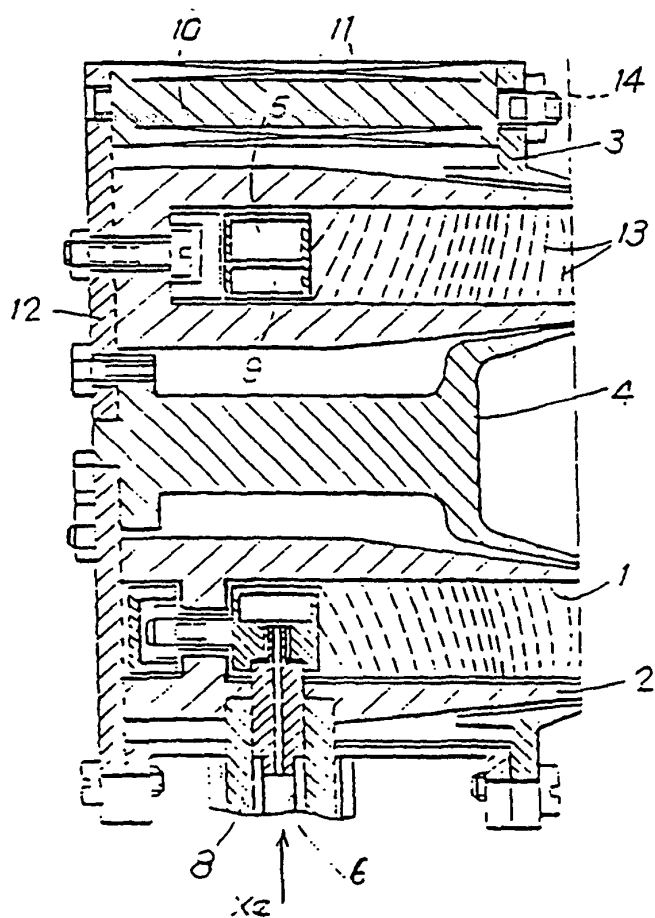
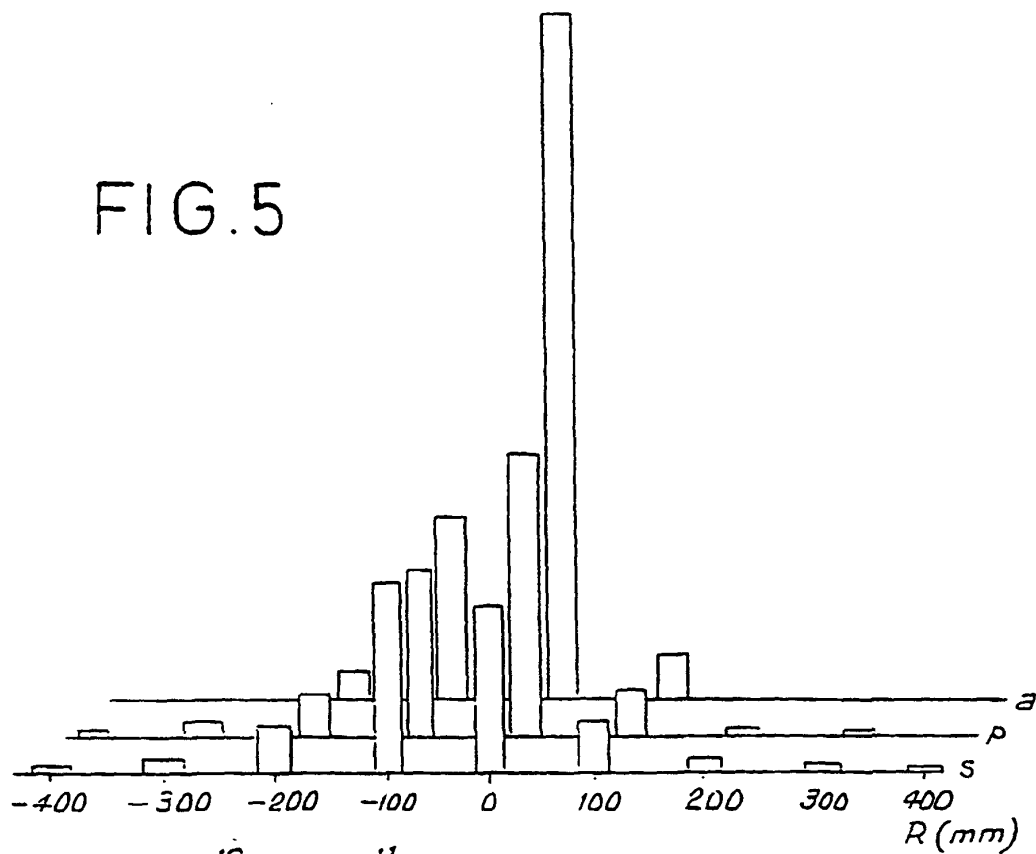


FIG. 6

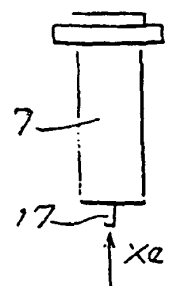


FIG. 7

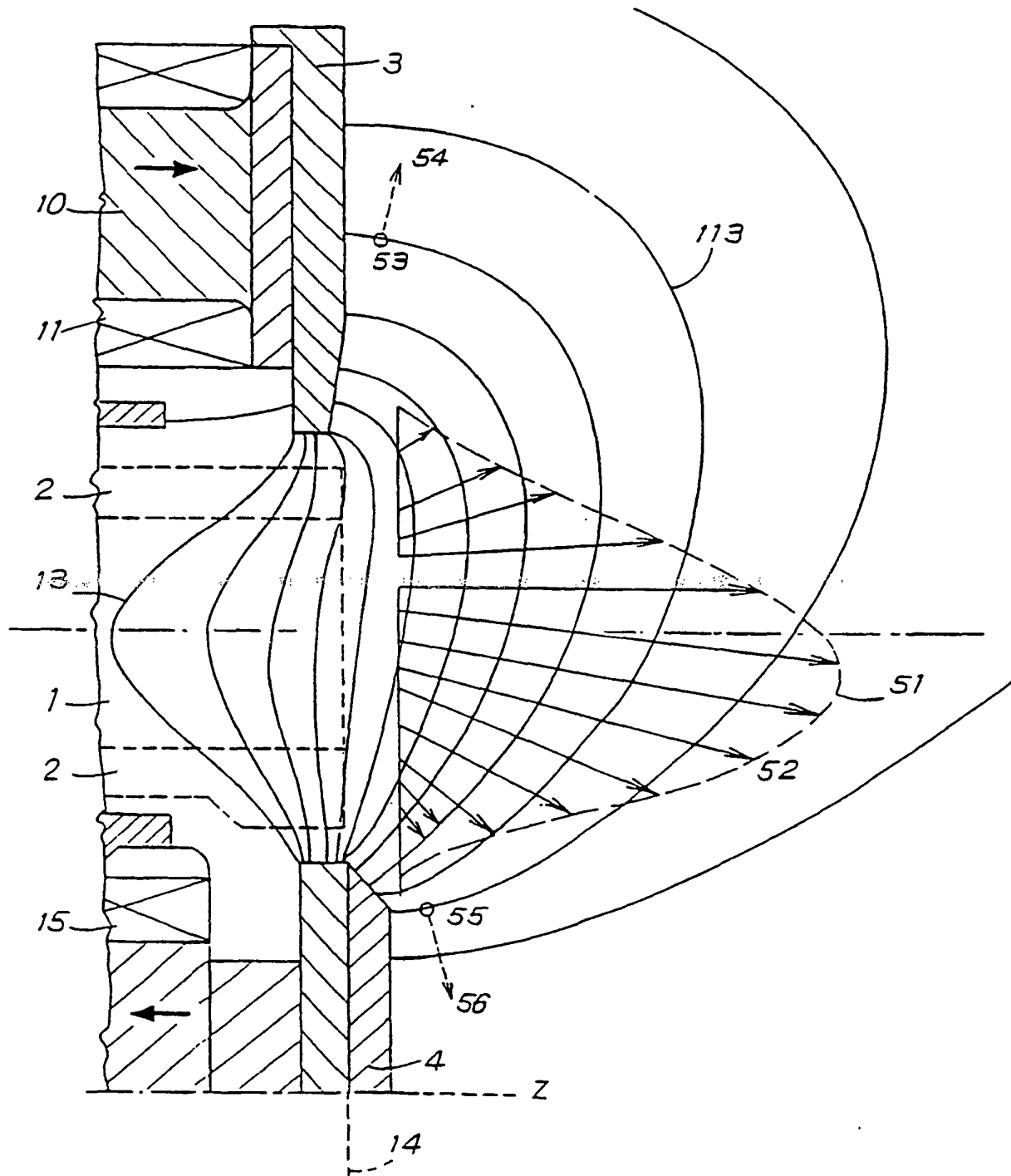


FIG. 8a

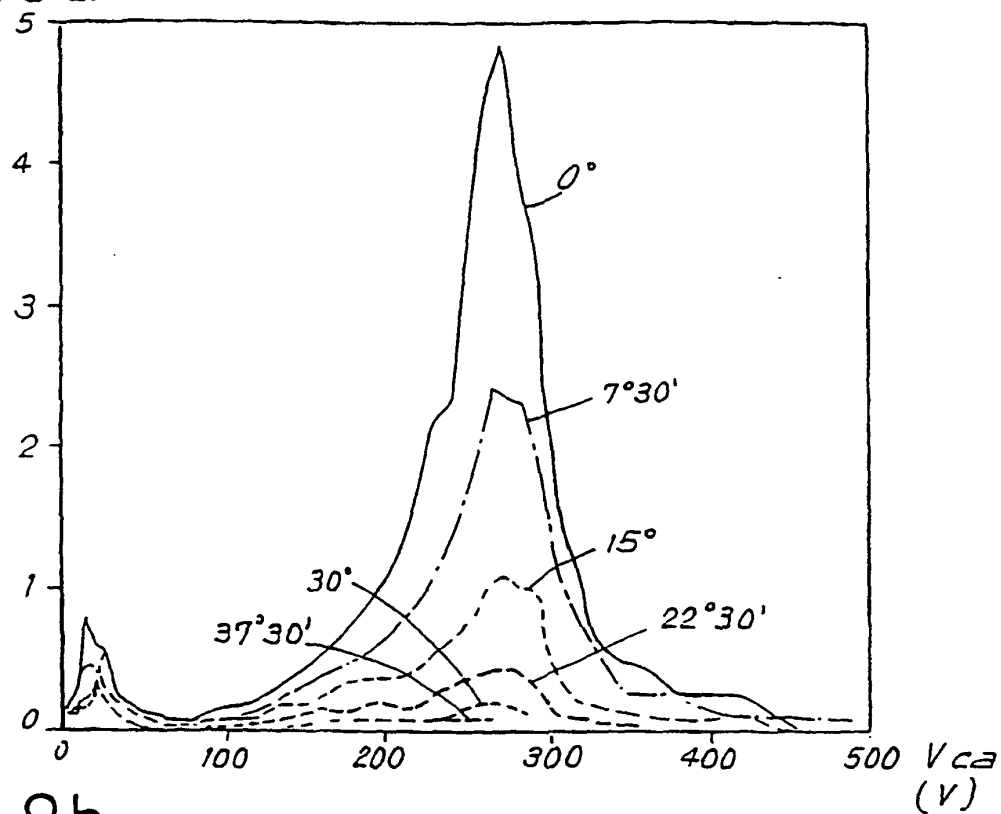


FIG. 8b

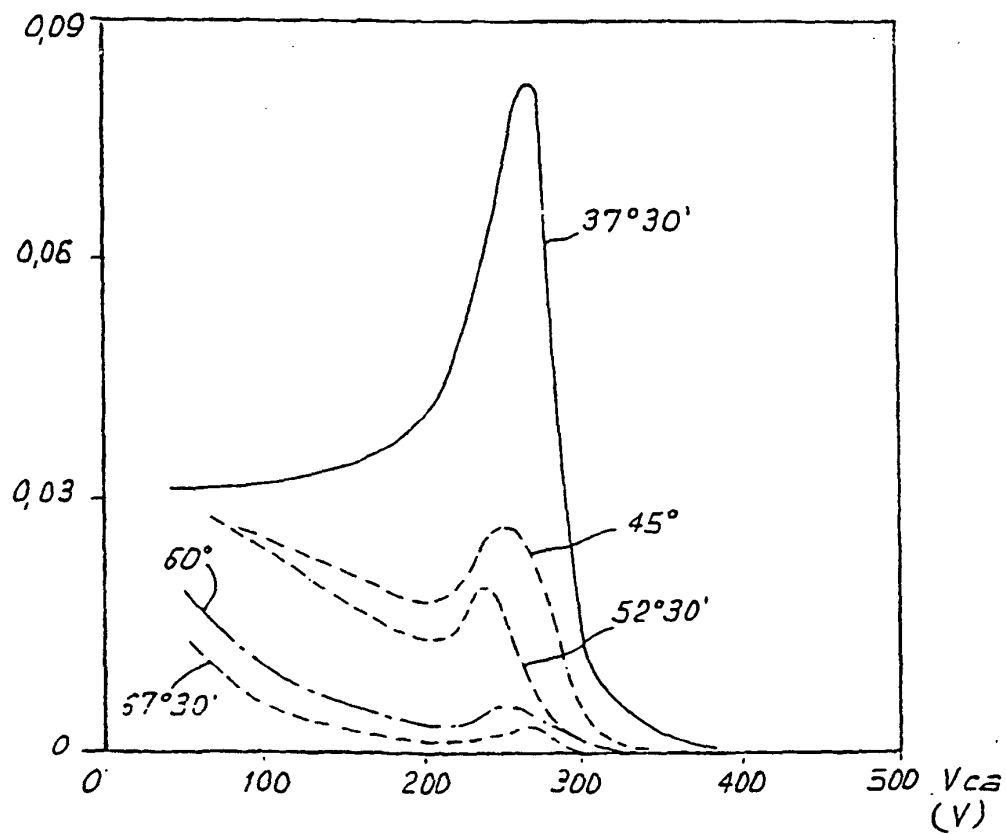


FIG. 9

