

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 0 662 195 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:

28.08.1996 Bulletin 1996/35

(21) Numéro de dépôt: **93913165.2**

(22) Date de dépôt: **21.06.1993**

(51) Int Cl.⁶: **F03H 1/00**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR93/00612

(87) Numéro de publication internationale:
WO 95/00758 (05.01.1995 Gazette 1995/02)

(54) **MOTEUR A PLASMA DE LONGUEUR REDUITE A DERIVE FERMEE D'ELECTRONS**

PLASMAMOTOR GERINGER LÄNGE MIT GESCHLOSSENEM ELEKTRONENDRIFT

REDUCED LENGTH PLASMA ENGINE WITH CLOSED ELECTRON DEVIATION

(84) Etats contractants désignés:
CH DE ES FR GB IT LI NL SE

(43) Date de publication de la demande:
12.07.1995 Bulletin 1995/28

(73) Titulaire: **SOCIETE EUROPEENNE DE
PROPULSION
F-92150 Suresnes (FR)**

(72) Inventeurs:

- **VALENTIAN, Dominique
F-78710 Rosny (FR)**
- **MOROZOV, Alexei
Moscow, 123098 (RU)**
- **BOUGROVA, Antonina
Moscow, 129041 (RU)**

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

(56) Documents cités:
EP-A- 0 541 309

- **SOVIET PHYSICS TECHNICAL PHYSICS, vol. 21,
no. 8 , August 1976 , NEW YORK, US; pages
987-988; DEM'YANENKO ET AL. 'Open
single-lens Hall-current accelerator'**
- **SOVIET PHYSICS TECHNICAL PHYSICS, vol. 23,
no. 9 , September 1978, NEW YORK, US; pages
1055-1057; BISHAEV ET AL. 'Local plasma
properties in a Hall-current accelerator with an
extended acceleration zone'**

EP 0 662 195 B1

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).

Description

Domaine de l'invention

La présente invention concerne les moteurs à plasma appliqués notamment à la propulsion spatiale et plus particulièrement les moteurs à plasma du type à dérive fermée d'électrons encore appelés moteurs à plasma stationnaire ou aux Etats-Unis d'Amérique "moteurs de Hall".

Art antérieur

Les moteurs électriques sont destinés essentiellement aux applications de propulsion spatiales. En tant que sources d'ions ou de plasma, ils sont aussi utilisés pour des applications terrestres, notamment pour l'usage ionique. Grâce à leur haute impulsion spécifique (de 1500 à 6000s) ils permettent des gains de masse considérables sur les satellites par rapport à des moteurs utilisant la propulsion chimique.

L'une des applications typiques de ce type de moteurs est le contrôle Nord-Sud des satellites géostationnaires, où il permet des gains de masse de 10 à 15%. Il peut être aussi utilisé en compensation de traînée en orbite basse, en maintien d'orbite heliosynchrone et en propulsion primaire interplanétaire.

Les propulseurs ioniques peuvent se répartir en plusieurs catégories.

Un premier type de propulseur ionique est ainsi constitué par un moteur à ionisation par bombardement encore appelé moteur Kaufman. Des exemples d'un tel type de propulseur sont décrits notamment dans les documents EP-A-0132065, WO 89/05404 et EP-A-0 468 706.

Dans un moteur à ionisation par bombardement, des atomes de gaz propulsif sont introduits sous faible pression dans une chambre de décharge où ils sont bombardés par des électrons émis par une cathode creuse et collectés par une anode. Le procédé d'ionisation est augmenté par la présence d'un champ magnétique. Un certain nombre de collisions atomes-électrons conduisent à la création d'un plasma dont les ions sont attirés par les électrodes d'accélération (grilles de sortie), elles-mêmes à un potentiel négatif par rapport au potentiel du plasma. Les électrodes concentrent et accélèrent les ions qui sortent du propulseur en un rayonnement large. Le rayonnement d'ions est ensuite neutralisé par un flux d'électrons émis à partir d'une cathode creuse externe, appelée neutraliseur.

Les impulsions spécifiques (I_{sp}) obtenues par ce type de propulseurs sont de l'ordre de 3000 secondes et au-delà.

La puissance nécessaire est de l'ordre de 30W par mN de poussée.

D'autres types de moteurs à ionisation sont constitués par des moteurs à ionisation par radiofréquence, des moteurs à ionisation par contact ou encore des mo-

teurs à émission de champ.

Ces divers moteurs à ionisation, y compris les moteurs à ionisation par bombardement, ont en commun d'avoir des fonctions d'ionisation et d'accélération des ions clairement séparées.

Il ont aussi en commun le fait de présenter une densité de courant dans l'optique ionique limitée par le phénomène de charge d'espace, densité limitée pratiquement à $2-3\text{mA/cm}^2$ pour les moteurs à ionisation par bombardement, donc de présenter une poussée aérodynamique assez faible.

De plus, ces moteurs, et les moteurs à bombardement en particulier, nécessitent un certain nombre d'alimentations électriques (entre 4 et 10), ce qui conduit à la réalisation de circuits électroniques de conversion et de contrôle assez complexes.

On connaît encore, notamment par un article de L. H. ARTSIMOVITCH et al. paru en 1974 concernant le programme de développement du moteur à plasma stationnaire (SPD) et ses essais sur le satellite "METEOR", des moteurs du type "à dérive fermée d'électrons" ou moteurs à plasma stationnaire qui se distinguent des autres catégories 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.

On décrira ci-après, en référence à la figure 2, un moteur à dérive fermée d'électrons tel qu'il a été proposé dans l'article précité de L.H. ARTSIMOVITCH et al.

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'électroaimant 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 d'alimentation en xenon 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 xenon 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.

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.

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 ca-

nal.

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

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

L'impulsion spécifique obtenue par des moteurs ioniques classiques à dérive fermée d'électrons fonctionnant au xenon est de l'ordre de 1000 à 2500 secondes.

Dans les moteurs ioniques classiques à dérive fermée d'électrons, la zone d'ionisation n'est pas organisée, ce qui a pour résultat qu'ils ne fonctionnent bien qu'au xenon, que le jet est divergent ($\pm 20^\circ$ d'ouverture de faisceau), et que le rendement est limité à environ 50%.

En outre, la divergence du jet entraîne une usure de la paroi du canal isolant dont le matériau est habituellement un mélange de nitrure de bore et d'alumine.

La durée de vie d'un tel moteur est d'environ 3000h.

On a encore proposé, notamment dans l'article intitulé "Open single lens hall accelerator" de V.N. Dem'Yanenko, L.P. Zudkov et A.I. Morozov paru en août 1976 dans la revue "Soviet Physics Technical Physics" vol 21, n° 8, pp. 987-988, de séparer les deux fonctions de l'anode en utilisant d'une part une anode cylindrique et d'autre part une distribution de gaz annulaire. Une telle configuration permet d'uniformiser le débit de gaz à ioniser au voisinage de l'anode. Afin que l'homogénéisation puisse se produire, l'anode et le distributeur de gaz annulaire sont séparés par une chambre tampon. Le moteur à plasma décrit dans l'article précité fonctionne toutefois en mode pulsé et avec une haute tension de décharge et reste d'une manière générale peu adapté à des applications spatiales.

Objet et description succincte de l'invention

La présente invention a pour but de remédier aux inconvénients des moteurs à plasma connus et plus particulièrement de modifier les moteurs à plasma à dérive fermée d'électrons afin d'améliorer leurs caractéristiques techniques et notamment de permettre une meilleure organisation de la zone d'ionisation sans créer pour autant de charge d'espace comme dans les moteurs ioniques à bombardement par exemple.

L'invention vise encore à réduire la divergence du faisceau et accroître la densité du faisceau d'ions, le rendement électrique, l'impulsion spécifique et la durée de vie.

L'invention a encore pour but de réduire la masse et les dimensions du moteur.

Ces buts sont atteints grâce à un moteur à plasma de longueur réduite à dérive fermée d'électrons, comprenant un canal annulaire principal d'ionisation et d'accélération délimité par des pièces en matériau isolant et ouvert à son extrémité aval, au moins une cathode creu-

se disposée à l'extérieur du canal annulaire principal du côté de la partie aval de celui-ci, une anode annulaire concentrique au canal annulaire principal et disposée à distance de l'extrémité aval ouverte, des premiers et deuxièmes 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 principal, et une chambre tampon annulaire qui présente dans le sens radial une dimension au moins égale à celle du canal annulaire principal et s'étend en amont de celui-ci au-delà de la zone dans laquelle est placée l'anode annulaire, les deuxièmes moyens d'alimentation en gaz ionisable débouchant dans la chambre tampon annulaire en amont de l'anode dans une zone distincte de la zone portant l'anode, en ce que les moyens de création d'un champ magnétique dans le canal principal sont adaptés pour produire dans ce canal principal un champ magnétique essentiellement radial à l'extrémité aval du canal et dont l'induction est maximale à ce niveau, ce champ magnétique présentant une induction minimale dans la zone de transition située au voisinage de l'anode, la valeur absolue de l'induction de ce champ augmentant à nouveau en amont de l'anode, au niveau de la chambre tampon pour réaliser un effet de miroir magnétique, les lignes de champ magnétique présentant entre l'anode et l'extrémité aval du canal, une concavité dirigée vers l'aval provoquant une focalisation des ions, avec une région de densité d'ionisation maximale située en aval de l'anode, en ce que les moyens de création d'un champ magnétique comprennent plusieurs moyens distincts de création d'un champ magnétique et des pièces polaires radiales planes interne et externe disposées au niveau de la face de sortie de part et d'autre du canal principal et reliées entre elles par un âme centrale, une culasse et un circuit magnétique périphérique disposé axialement à l'extérieur du canal principal, la culasse étant constituée par des éléments radiaux situés au voisinage immédiat de l'anode et traversant la chambre tampon annulaire en ménageant entre eux des espaces de communication entre la chambre tampon annulaire et le canal principal.

Avantageusement, la chambre tampon présente dans le sens radial une dimension qui est comprise entre une fois et deux fois la dimension radiale du canal principal.

De façon plus particulière, les moyens distincts de création d'un champ magnétique comprennent un premier moyen disposé autour et à l'extérieur du canal principal au voisinage de l'extrémité aval de celui-ci, un deuxième moyen disposé autour de l'âme centrale dans une zone faisant face à l'anode et s'étendant partiellement en face de la chambre tampon pour la création de l'effet miroir magnétique, et un troisième moyen disposé autour de l'âme centrale entre le deuxième moyen et l'extrémité aval du canal principal.

Selon un mode de réalisation possible, Les premier, deuxième et troisième moyens de création d'un champ

magnétique peuvent être constitués par des bobines d'induction.

Grâce notamment à la séparation physique de l'anode et du distributeur de gaz ionisable, à l'existence d'une chambre tampon et à la réalisation d'un champ magnétique de profil particulier, le moteur à plasma selon l'invention présente l'ensemble des avantages suivants :

- a) - ionisation plus efficace, d'où un rendement plus élevé,
- b) - possibilité d'ioniser facilement des gaz propulsifs divers tels que le Xénon, l'Argon, etc... grâce à une amélioration du processus d'ionisation,
- c) - obtention d'équipotentielle électrostatiques réduisant la divergence du faisceau d'où

- c1) une intégration plus facile au satellite,
- c2) une usure plus faible du canal d'accélération,

De façon plus particulière, la réalisation d'un profil de champ magnétique particulier dans le canal d'accélération et en amont de l'anode, au sein même de la chambre tampon, permet :

- d'améliorer l'homogénéité du plasma et ainsi de diminuer la distortion des équipotentielles électrostatiques dans la zone d'accélération, ce qui contribue à limiter les pertes d'ions sur les parois et à augmenter la focalisation du faisceau,
- de mieux localiser la région de formation des ions, ce qui contribue à restreindre la dispersion d'énergie des ions, et
- d'effectuer un confinement immatériel du plasma en amont de l'anode par un effet de miroir magnétique.

La transition entre la valeur minimale du champ magnétique au voisinage de l'anode et la valeur maximale en sortie du canal d'accélération (de l'ordre de 300 Oe) permet d'obtenir dans tous les cas une zone où la probabilité d'ionisation est maximale.

La géométrie de la chambre tampon permet l'extension du plasma en amont de l'anode et sa contention par l'effet de miroir magnétique.

Le fait que, selon l'invention, la culasse de liaison entre l'âme centrale et le circuit magnétique périphérique soit située au voisinage immédiat de l'anode et pénètre dans la chambre tampon annulaire, permet de réduire la longueur, et donc la masse de l'ensemble du circuit magnétique, ce qui conduit à la réalisation d'un moteur dont la masse et les dimensions sont sensiblement réduites par rapport à des modes de réalisation dans lesquels la culasse de liaison entre l'âme centrale et le circuit magnétique périphérique est située en amont de la chambre tampon.

La culasse de liaison qui traverse la chambre tampon en ménageant des espaces de communication

avec le canal principal peut être réalisée de diverses manières.

Ainsi, la culasse peut comprendre des éléments radiaux constitués par des barreaux magnétiques cylindriques traversant la chambre tampon annulaire.

Dans ce cas, les barreaux magnétiques peuvent être constitués par des barreaux métalliques isolés électriquement par des gaines en deux parties solidaires respectivement des parois du canal principal et des parois de la chambre tampon.

Selon un mode de réalisation possible les barreaux magnétiques sont réunis à leur partie périphérique externe par une couronne magnétique continue servant de pièce structurale de fixation du moteur sur la structure d'un satellite.

Les barreaux magnétiques peuvent encore être constitués par des barreaux métalliques isolés électriquement de la masse par des pièces en ferrite constituant respectivement ledit circuit magnétique périphérique disposé axialement à l'extérieur du canal principal et ladite âme centrale, les barreaux magnétiques pouvant être polarisés au potentiel de l'anode .

Selon encore une autre forme de réalisation possible les barreaux magnétiques sont constitués d'un matériau ferrite isolant permettant une implantation directe dans la chambre tampon .

Le circuit magnétique périphérique peut comprendre un ensemble de barreaux de liaison entre la pièce polaire radiale externe et la culasse, ou peut encore être constitué par une virole.

La culasse de liaison peut comprendre des barreaux orientés radialement dans un plan sensiblement perpendiculaire à l'axe de la chambre tampon et du canal principal.

Toutefois, selon un autre mode de réalisation possible, la culasse comprend des barreaux orientés radialement selon les génératrices d'un tronç de cône dont l'extrémité de plus petite section est reliée à l'âme centrale, l'extrémité de plus grande section est reliée au circuit magnétique périphérique et l'axe correspond sensiblement à celui de la chambre tampon et du canal principal .

Selon encore un autre mode de réalisation particulière la culasse comprend une pièce tronconique en ferrite dont l'extrémité de plus petite section est reliée à l'âme centrale et l'extrémité de plus grande section est reliée à une virole constituant le circuit magnétique périphérique, des canaux ménagés axialement dans ladite pièce tronconique constituant lesdits espaces de communication entre la chambre tampon annulaire et le canal principal.

L'invention concerne également un moteur à plasma dans lequel la chambre tampon comprend plusieurs alvéoles qui débouchent dans le canal d'accélération au voisinage de l'anode, sont répartis autour de l'axe du moteur et sont délimités par des cloisons parallèles à l'axe du moteur qui définissent entre les alvéoles voisins des passages pour des barreaux magnétiques cylindri-

ques constituant la culasse sans pénétrer dans la chambre tampon alvéolée.

Une telle chambre tampon peut être monobloc.

Selon un mode particulier de réalisation possible, les deuxièmes moyens d'alimentation en gaz ionisable débouchent dans la chambre tampon annulaire en amont de l'anode à travers un distributeur annulaire.

Dans le cas d'une chambre tampon alvéolaire, le distributeur annulaire est associé à des cols soniques débouchant dans les différents alvéoles de la chambre tampon alvéolée.

Selon un autre mode particulier de réalisation possible, les deuxièmes moyens d'alimentation en gaz ionisable débouchent dans la chambre tampon annulaire en amont de l'anode à travers un col sonique unique monté tangentiellement selon le plus grand diamètre de la chambre tampon de manière à créer un écoulement vortex.

Dans le cas où le diamètre moyen du moteur est important vis-à-vis de la largeur du canal, selon un mode particulier de réalisation, la cathode creuse est placée dans l'axe du moteur à l'intérieur de l'âme centrale tubulaire et isolée thermiquement de cette âme centrale par un écran superisolant.

Brève description des dessins

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 élévation et en demi-coupe axiale d'un exemple de moteur à plasma à dérive fermée d'électrons conforme à la présente invention,
- la figure 2 est une vue en coupe axiale montrant un exemple de moteur à plasma à dérive fermée d'électrons selon l'art antérieur,
- la figure 3 est une vue éclatée en perspective d'une partie des éléments constitutifs d'un moteur à plasma selon l'invention montrant une culasse à barreaux métalliques isolés électriquement par des gaines en deux parties,
- la figure 3a montre un détail de réalisation d'un barreau isolé mis en oeuvre dans le mode de réalisation de la figure 3,
- la figure 4 est une vue en demi-coupe axiale d'un moteur à plasma selon l'invention, semblable à celui de la figure 1 mais avec des moyens de liaison à la plaque de support différents,
- la figure 5 est une vue en coupe axiale d'une variante de réalisation du moteur à plasma selon l'invention avec une culasse à barreaux de liaison en ferrite,
- la figure 6 est une vue en coupe axiale d'une variante de réalisation du moteur à plasma selon l'in-

vention avec des barreaux de liaison métalliques et des parties de circuit magnétique en ferrite,

- la figure 7 est une vue en coupe axiale d'un exemple particulier de réalisation du moteur à plasma selon l'invention, dans lequel la culasse de liaison est constituée par des barreaux disposés selon un cône,
- la figure 8 est une vue en coupe axiale d'un exemple particulier de réalisation du moteur à plasma selon l'invention, dans lequel la culasse de liaison est constituée par une virole conique percée de canaux de liaison axiaux,
- la figure 9 est une vue en coupe axiale d'un exemple particulier de réalisation du moteur à plasma selon l'invention comprenant une chambre tampon qui constitue un prolongement cylindrique du canal d'accélération sans augmentation du diamètre extérieur,
- la figure 10 est une vue en coupe axiale d'un exemple particulier de réalisation du moteur à plasma selon l'invention, comprenant une chambre tampon qui présente une longueur réduite et est associée à un injecteur de gaz tangential,
- la figure 11 est une demi-coupe selon le plan XI-XI de la figure 10,
- la figure 12 est une vue en coupe axiale d'un exemple particulier de réalisation de moteur à plasma selon l'invention, comprenant une chambre tampon divisée en plusieurs alvéoles entre lesquels sont disposés des barreaux magnétiques,
- la figure 13 est une vue éclatée en perspective montrant une chambre tampon monobloc et un ensemble de barreaux magnétiques pouvant être incorporés dans le moteur à plasma de la figure 12, et
- la figure 14 est une vue en coupe axiale d'un exemple particulier de réalisation d'un moteur à plasma selon l'invention, qui présente un diamètre moyen important vis-à-vis de la largeur du canal d'accélération, et comprenant une cathode creuse qui est disposée à l'intérieur d'une pièce polaire centrale en forme de tube creux.

Description détaillée des modes particuliers de réalisation

On voit sur la figure 1 un exemple de moteur à plasma 20 à dérive fermée d'électrons conforme à l'invention, qui comprend un ensemble de pièces 22 en matériau isolant délimitant un canal annulaire 21 formé, en amont, d'une première partie constituée par une chambre tampon 23 et, en aval, d'une deuxième partie constituée par un canal d'accélération 24.

La chambre annulaire 23 présente de préférence une dimension dans le sens radial qui est de l'ordre du simple au double de la dimension dans le sens radial du canal annulaire d'accélération 24. Dans le sens axial, la chambre tampon 23 peut être un peu plus courte que le canal d'accélération 24 et présente avantageusement

une longueur qui est de l'ordre de une fois à une fois et demie la dimension d dans le sens radial du canal d'accélération 24.

Une anode 25, reliée par une ligne électrique 43 à une source de tension continue 44, qui peut être par exemple de l'ordre de 200 à 300 V, est disposée sur les pièces isolantes 22 délimitant le canal annulaire 21, dans une zone située immédiatement en aval de la chambre tampon 23, à l'entrée du canal d'accélération 24. La ligne 43 d'alimentation de l'anode 25 est disposée dans un tube isolant 45 qui traverse des pièces 223, 224 en matériau isolant délimitant la chambre tampon 23.

Un tube 26 d'alimentation en gaz ionisable tel que du xenon traverse également le fond 223 de la chambre tampon 23 pour déboucher dans un distributeur annulaire de gaz 27 placé dans le fond de la chambre tampon 23.

Le canal 21 délimité par l'ensemble des pièces isolantes 22 est placé dans un circuit magnétique composé essentiellement de trois bobines 31, 32, 33 et de pièces polaires 34, 35.

Des pièces polaires planes externe 34 et interne 35 sont placées dans le plan de sortie du moteur à l'extérieur du canal d'accélération 24 et déterminent des lignes de champ magnétique qui à la partie ouverte aval du canal d'accélération 24 sont sensiblement parallèles au plan de sortie 59 du moteur 20.

Le circuit magnétique constitué des pièces polaires 34 et 35 est fermé par un noyau central axial 38 et des barres de liaison 37 disposées à la périphérie du moteur selon une configuration essentiellement cylindrique, le noyau central 38 en matériau ferromagnétique et les barres de liaison 37 en matériau ferromagnétique étant en contact avec une culasse arrière de liaison 36 en matériau ferromagnétique. La culasse 36 est constituée par des éléments essentiellement radiaux qui sont situés au voisinage immédiat de l'anode 25 et pénètrent dans la chambre tampon 23 en ménageant entre eux des espaces de communication 136 entre la chambre tampon 23 et le canal annulaire 24.

Un écran 39 antipollution ou antirayonnement peut être également disposé entre les pièces isolantes 22 et les barres de liaison 37. Les barres de liaison 37 et l'écran 39 pouvant toutefois être remplacés par une virole cylindrique ou cylindroconique qui joue à la fois le rôle de fermeture du circuit magnétique et d'écran antipollution.

Les électrons nécessaires au fonctionnement du moteur sont fournis par une cathode creuse 40 qui peut être de conception classique. La cathode 40, qui est reliée électriquement par une ligne 42 au pôle négatif de la source de tension 44, comporte un circuit 41 d'alimentation en gaz ionisable tel que du xenon, et se trouve placée en aval de la zone de sortie du canal d'accélération 24.

La cathode creuse 40 fournit un plasma 29 sensiblement au potentiel de référence d'où sont extraits les électrons se dirigeant vers l'anode 25 sous l'effet du

champ électrostatique E dû à la différence entre l'anode 25 et la cathode 40.

Ces électrons ont une trajectoire de dérive en azimut dans le canal d'accélération 24 sous l'effet du champ électrique E et du champ magnétique B .

Typiquement, le champ à la sortie du canal 24 est de $1,2-1,6 \cdot 10^4 \text{ Am}^{-1}$ (150 à 200 Oe).

Les électrons primaires sont accélérés par le champ électrostatique E , ils heurtent alors la paroi de l'isolateur 22, ce qui fournit des électrons secondaires d'énergie plus faible.

Les électrons entrent en collision avec les atomes neutres de xenon issus de la chambre tampon 23.

Les ions xénon ainsi formés sont accélérés par le champ électrostatique E dans le canal d'accélération 24.

Il n'y a pas de charge d'espace dans le canal d'accélération 24 en raison de la présence des électrons.

La neutralisation du faisceau d'ions est assurée par une partie des électrons issus de la cathode creuse 40.

La maîtrise du gradient de champ magnétique radial obtenue grâce à la disposition des bobines 31 à 33 et des pièces polaires 34 et 35 permet de séparer les fonctions d'accélération des ions de la fonction ionisation obtenue dans une zone proche de l'anode 25. Cette zone d'ionisation peut s'étendre partiellement dans la chambre tampon 23.

Une caractéristique importante du moteur selon l'invention réside dans l'existence d'une chambre tampon 23 qui permet d'optimiser la zone d'ionisation.

Dans les moteurs classiques à dérive fermée d'électrons, une partie notable de l'ionisation est localisée dans la partie médiane. Une partie des ions percute les parois, ce qui est une cause d'usure rapide des parois et diminue ainsi la durée de vie du propulseur. La chambre tampon 23 favorise la réduction du gradient de concentration du plasma selon le rayon ainsi que le refroidissement des électrons à l'entrée du canal d'accélération 24, ce qui réduit la divergence du faisceau ionique sur les parois et ainsi évite des pertes d'ions par collision avec ces dernières, ce qui a pour effet d'augmenter le rendement et de réduire la divergence du faisceau à la sortie du moteur.

Une autre caractéristique importante du moteur selon l'invention réside dans la présence de trois bobines 31 à 33 qui peuvent présenter des dimensions différentes et permettent d'optimiser le champ magnétique grâce à leur localisation spécifique.

Ainsi, une première bobine 31 est disposée autour et à l'extérieur du canal principal 24 au voisinage de l'extrémité aval 225 de celui-ci. Une deuxième bobine 32 est disposée autour de l'âme centrale 38 dans une zone faisant face à l'anode 25 et pouvant s'étendre partiellement en face de la chambre tampon 23 de manière à permettre la création d'un effet de miroir magnétique (fig 7 et 8). Une troisième bobine 33 est disposée autour de l'âme centrale 38 entre la deuxième bobine 32 et l'extrémité aval 225 du canal principal d'accélération 24.

Les bobines 31,32,33 peuvent présenter des tailles différentes. La présence de trois bobines 31,32,33 bien différenciées a pour conséquence la création de lignes de champ mieux dirigées qui permettent d'obtenir un jet mieux canalisé et plus parallèle que sur les moteurs classiques. Le champ magnétique créé est essentiellement radial à l'extrémité 225 du canal principal d'accélération 24 et présente une induction maximale à ce niveau. Le champ magnétique présente une valeur minimale, pouvant être nulle, au voisinage de l'anode. La valeur absolue du champ magnétique augmente à nouveau en amont de l'anode 25 en particulier dans la chambre tampon 23. C'est cette disposition du champ magnétique qui réalise un effet de miroir magnétique empêchant la propagation du plasma dans la chambre tampon 23.

Selon une variante de réalisation, les bobines 31 à 33 de création d'un champ magnétique peuvent être remplacées au moins partiellement par des aimants permanents dont le point de Curie est supérieur à la température de fonctionnement du moteur.

La bobine annulaire 31 pourrait également être remplacée par un ensemble de bobines individuelles et disposées autour des différentes barres de liaison 37 constituant le circuit magnétique périphérique.

Le matériau magnétique du circuit constitué des pièces polaires 34,35, de l'âme centrale 38, des barres 37 et de la culasse 36 peut être du fer doux, du fer ultra-pur, ou encore un alliage fer-chrome à haute perméabilité magnétique.

A titre d'exemple, les pièces polaires 34 et 35 peuvent présenter une dimension de l'ordre d'une vingtaine de millimètres dans le sens axial.

Le nombre d'ampères-tours de chaque bobine 31, 32, 33 et le rapport entre la longueur et le diamètre de chacune de ces bobines sont déterminés de manière à produire dans le canal d'accélération un champ magnétique essentiellement radial dont le maximum est situé dans le plan de sortie 59 du moteur, dont les lignes de champ près de la sortie 225 sont essentiellement parallèles à la face de sortie 59 et dont les lignes de champ au voisinage de l'anode 25 sont essentiellement disposées de manière à favoriser l'ionisation du gaz propulsif dans cette région.

Des exemples de propulseur ionique selon l'invention combinant la présence d'une chambre tampon 23 et d'un ensemble de bobines 31, 32, 33 différenciées ont permis d'obtenir un rendement électrique de l'ordre de 50 à 70% soit une amélioration en moyenne de l'ordre de 10 à 25% par rapport aux systèmes antérieurement connus.

Par ailleurs, dans les réalisations conformes à l'invention, on a obtenu en sortie du moteur un jet quasi-cylindrique avec une très faible divergence du faisceau d'ions de l'ordre de $\pm 9^\circ$. Ainsi, avec un canal d'accélération du diamètre extérieur 80mm, on a à une distance de 80mm à l'extérieur du moteur par rapport au plan de sortie 59, 90% de l'énergie qui reste concentrée dans le

diamètre du canal d'accélération.

D'une manière générale, le moteur selon l'invention permet une plus forte densité de poussée (par exemple de l'ordre de 1 à 2mN/cm² de densité de poussée aréolaire), donc un moteur plus petit et plus léger à isopoussée, avec un excellent rendement.

En ce qui concerne la durée de vie, les moteurs connus montrent une durée de vie de l'ordre de 3000h.

Au contraire, un moteur à plasma conforme à la présente invention permet d'obtenir une durée de vie d'au moins 5000 à 6000 heures en raison de la plus faible érosion du canal 24 liée à la meilleure cylindricité du jet ionisé.

Le moteur plasma selon l'invention peut faire l'objet de nombreuses variantes de réalisation.

Dans le cas de la figure 1, on a représenté un circuit magnétique comprenant une pièce polaire externe 34, une pièce polaire interne 35, un noyau magnétique 38, une culasse de liaison 36 et des barreaux axiaux ferromagnétiques 32 qui s'étendent jusqu'à une couronne extérieure 36A qui fait partie de la culasse de liaison 36 et joue le rôle d'une pièce structurale qui pouvait être fixée directement sur la plaque de montage du moteur sur un satellite, de manière à créer une zone de fixation très proche du centre de gravité du moteur, ce qui améliore la tenue aux vibrations, ou, comme représenté sur la figure 1 est relié à la plaque de montage par une virole cylindrique non magnétique 69 qui constitue ainsi une interface de montage.

La culasse de liaison entre le noyau magnétique central 38 et les barreaux ferromagnétiques axiaux 37 est constituée par des barreaux radiaux 36 en matériau ferromagnétique qui traversent la chambre tampon 23 juste en amont du canal principal 24 et de l'anode 25, en ménageant entre eux de larges espaces de communication 136 entre la chambre tampon 23 et le canal principal 24, comme cela est représenté de façon plus claire sur la figure 3.

Le nombre de barreaux 36 peut être compris entre par exemple trois et neuf. La couronne extérieure 36A en forme de rondelle peut être réalisée d'une seule pièce avec les barreaux 36.

Sur le mode de réalisation des figures 1, 3, 3A, on a représenté des barreaux 36 isolés électriquement par des gaines isolantes 141, 142. Les gaines 141, 142 sont avantageusement réalisées en deux parties 141, 142 solidaires respectivement des parois 22 du canal principal 24 et des parois 224 de la chambre tampon 23. De façon plus particulière, dans l'exemple de réalisation des figures 3 et 3A, les barreaux 36 présentent une section de forme semi-cylindrique, chaque demi-gaine 141 présente une section épousant la forme semi-cylindrique d'un barreau 36 et chaque demi-gaine 142 présente une forme plane qui vient porter contre la face plane d'un barreau 36.

La figure 4 montre, en demi-coupe axiale et perspective une variante de réalisation, dans laquelle les barreaux 36 constituent des bras radiaux qui ne sont

pas reliés entre eux par une couronne 36A à leur extrémité externe. Les différents barreaux axiaux 37 sont alors reliés directement aux extrémités externes des barreaux radiaux 36. Chaque barreau 36 est par ailleurs relié par une entretoise 146 à la plaque de base 145 servant au montage sur un satellite. La pièce polaire centrale 38 est elle-même maintenue par une extension 147 de la plaque de base 145.

Par souci de clarté, on n'a pas représenté sur la figure 3, la figure 4 ou les figures 5 à 8 divers éléments représentés sur la figure 1, tels que les moyens d'alimentation électrique de l'anode 25.

Dans le mode de réalisation de la figure 5, les barreaux axiaux 37 ont été remplacés par une virole externe 37a en matériau ferromagnétique. Les barreaux radiaux 36 sont eux-mêmes réalisés en ferrite douce électriquement isolante. Les barreaux 36 n'ont donc pas besoin d'être entourés par des gaines isolantes 141, 142 comme dans le cas du mode de réalisation des figures 1, 3 et 4. Dans le cas de barreaux 36 réalisés en ferrite douce, il n'y a pas de perturbation du champ électrostatique à proximité des barreaux 36.

L'étanchéité entre les barreaux 36 et les parois 22 en céramique isolante du canal principal 24 peut être obtenue par utilisation d'un ciment ou d'un scellement aux verres, sous réserve que la céramique et la ferrite soient choisis de manière à présenter des coefficients de dilatation voisins.

A titre d'exemple, la configuration particulière de la figure 5 comprend sept barreaux cylindriques 36 radiaux en ferrite qui ferment le circuit magnétique entre la virole externe 37a et le noyau central 38.

Dans le mode de réalisation de la figure 6, les barreaux de liaison 36 sont réalisés en un matériau métallique ferromagnétique mais ne sont pas entourés de gaines isolantes. En revanche, le noyau central 38 et les pièces 37b qui constituent la partie de circuit magnétique externe axial et peuvent être sous la forme de barreaux ou d'une virole, sont réalisés en ferrite isolante électriquement.

Dans ce cas, les barreaux métalliques 36 peuvent être polarisés au potentiel de l'anode et peuvent jouer le rôle de l'anode 25 ou celui d'une anode complémentaire.

La figure 7 montre un mode de réalisation dans lequel les barreaux radiaux de liaison 36 ne sont pas disposés dans un plan perpendiculaire à l'axe du moteur mais sont disposés selon les génératrices d'un cône dont la base est tournée vers l'aval du moteur. La base du cône est ainsi reliée à une virole 37a constituant la partie de circuit magnétique axial externe tandis que le sommet du cône ou la plus petite section du tronc de cône sont reliés au noyau central 38 à travers la chambre tampon 23. Ce mode de réalisation permet de réaliser une bobine 32 de grande longueur au voisinage de la jonction entre la chambre tampon 23 et le canal principal 24.

La figure 8 montre un mode de réalisation dans le-

quel la culasse de liaison 36 n'est pas réalisée à l'aide de barreaux distincts mais est constituée par une pièce conique en ferrite dont la grande base est tournée vers l'aval et reliée à la virole cylindrique 37a constituant la partie de circuit magnétique externe axial, et le sommet est relié au noyau central 38, la pièce conique 36 traversant la chambre tampon 23 en amont de l'anode 25. La chambre tampon 23 est ainsi divisée en deux cavités qui communiquent par des canaux 136 percés axialement à travers la pièce conique 36. Les canaux 136 sont en nombre suffisant, ou de section suffisamment grande, pour présenter une impédance négligeable au passage du gaz.

Comme dans le cas du mode de réalisation de la figure 7, la mise en oeuvre d'une culasse de liaison 36 de forme conique traversant la chambre tampon 23 en amont de l'anode 25 permet de disposer une bobine 32 de relativement grande longueur au voisinage de la jonction entre la chambre tampon 23 et le canal principal 24.

La figure 9 montre un moteur à plasma conforme à l'invention, dans lequel la chambre tampon 23 constitue un prolongement cylindrique du canal d'accélération 24. Dans ce cas, la dimension transversale de la chambre tampon 23, et le diamètre extérieur de celle-ci sont les mêmes que pour le canal d'accélération 24.

L'ensemble des pièces 222, 223, 224 définissant le canal annulaire 21 comprenant successivement la chambre tampon 23 et le canal d'accélération 24 présente sur la face externe de sa paroi 224, perpendiculairement à l'axe du moteur, un talon 323 de montage sur une bride 145 d'interface contre laquelle vient porter la virole 37a constituant la partie du circuit magnétique axial externe. Le plan d'interface au niveau duquel peut s'effectuer la fixation du moteur sur la structure support d'un satellite est repéré par la référence 245.

La structure du moteur de la figure 9 peut être par ailleurs conforme par exemple à la réalisation de la figure 5. Le distributeur annulaire 27 pour l'alimentation en gaz ionisable peut cependant de préférence être situé près du fond 223 de la chambre tampon 23 au voisinage de la pièce interne 222 qui délimite à la fois la chambre tampon 23 et le canal d'accélération 24.

Les figures 10 et 11 montrent un moteur à plasma selon l'invention dans lequel la chambre tampon 23 présente dans le sens longitudinal une longueur réduite, qui peut même être légèrement inférieure à la dimension transversale du canal d'accélération 24.

Dans ce cas, le distributeur annulaire 27 est remplacé par un injecteur de gaz tangentiel 227 qui comprend un col sonique permettant l'introduction tangentielle de gaz dans la chambre tampon 23 avec un effet de vortex qui permet une homogénéisation du flux de gaz malgré la faible dimension longitudinale de la chambre tampon 23. Les autres éléments du moteur des figures 10 et 11 peuvent être réalisés par exemple selon le mode de réalisation de la figure 6 et ne seront pas décrits à nouveau.

La figure 12 montre un mode de réalisation particulier de moteur à plasma selon l'invention dans lequel la chambre tampon 23, vue en perspective sur la figure 13, comprend plusieurs alvéoles qui débouchent dans le canal d'accélération 24 au voisinage de l'anode 25, sont répartis autour de l'axe du moteur et sont délimités par des cloisons parallèles à l'axe du moteur. Les cloisons essentiellement parallèles à l'axe du moteur définissent entre les alvéoles voisins des passages 423 pour des barreaux magnétiques 36 constituant la culasse. Dans ce cas, les barreaux magnétiques 36 ne pénètrent pas physiquement dans la chambre tampon 23 qui peut être monobloc et être réalisée par exemple par des techniques de soufflage du verre ou du quartz. La chambre tampon 23, qui est en quelque sorte moulée autour des barreaux peut être réalisée à l'aide d'un moule plutôt que par soufflage. Les parois 223 de la chambre tampon alvéolée 23 sont réalisées en un matériau différent de celui de la partie cylindrique 22 du canal d'accélération 24. La jonction entre l'extrémité aval des parois 223 de la chambre tampon alvéolée 23 et l'extrémité amont des parois 22 du canal annulaire 21 portant l'anode 25 est référencée 523.

Le distributeur annulaire 27 peut être monté à l'avance sur la paroi de la chambre tampon 23. Le distributeur annulaire 27 est associé à des cols soniques 127 qui débouchent dans les différents alvéoles de la chambre tampon alvéolée 23. Comme on peut le voir sur la figure 12, l'injection peut avantageusement se faire en direction de l'amont, le distributeur annulaire 27 étant lui-même placé en aval de la chambre tampon 23. L'injection proprement dite en gaz ionisable s'effectue dans tous les cas à une certaine distance en amont de l'anode 25.

La chambre tampon 23 peut comprendre par exemple de trois à neuf alvéoles, des barreaux magnétiques 36 en nombre égal à celui des alvéoles étant disposés dans les passages 423.

L'ensemble du circuit magnétique constitué par les pièces 36, 38, 35 ainsi que les bobines 32 et 33 peut être introduit par l'arrière de la chambre tampon 23.

La figure 14 montre un mode particulier de réalisation de l'invention applicable à un moteur à plasma dont le diamètre moyen du canal d'accélération 24 est important vis-à-vis de la largeur de ce canal. Dans ce cas, la pièce polaire centrale 38 peut être réalisée de façon tubulaire en ménageant un espace central libre dans lequel il est possible d'insérer la cathode creuse 40 qui est alors disposée selon l'axe du moteur. Afin d'éviter une surchauffe des bobines 32, 33 par la cathode 40, un écran superisolant 140, par exemple de forme conique s'ouvrant vers l'aval est disposé autour de la cathode 40 de manière à n'autoriser un rayonnement de la cathode 40 que vers l'espace. La cathode 40 est maintenue en position par rapport à la pièce polaire centrale tubulaire 38 par un support mécanique 240.

Sur les figures 12 et 14 on a représenté la bride d'interface 145 située au voisinage de la liaison entre les

barreaux 36 et la virole externe 37a, et servant au montage sur un satellite.

Dans tous les modes de réalisation décrits, le fait que le circuit magnétique ne se prolonge pas jusqu'au fond du moteur en amont de la chambre tampon 23 permet de réduire la masse et la longueur totale du moteur, sans pour autant gêner le fonctionnement de celui-ci.

10 Revendications

1. Moteur à plasma de longueur réduite à dérive fermée d'électrons, comprenant un canal annulaire principal d'ionisation et d'accélération (24) délimité par des pièces (22) en matériau isolant et ouvert à son extrémité aval (225), au moins une cathode creuse (40) disposée à l'extérieur du canal annulaire principal (24) du côté de la partie aval de celui-ci, une anode annulaire (25) concentrique au canal annulaire principal (24) et disposée à distance de l'extrémité aval ouverte (225), des premiers et deuxièmes moyens (41, 26) d'alimentation en gaz ionisable associés respectivement à la cathode creuse (40) et à l'anode annulaire (25), un circuit magnétique (31 à 33, 34 à 38) de création d'un champ magnétique dans le canal annulaire principal (24), et une chambre tampon annulaire (23) qui présente dans le sens radial une dimension au moins égale à celle du canal annulaire principal (24) et s'étend en amont de celui-ci au-delà de la zone dans laquelle est placée l'anode annulaire (25), les deuxièmes moyens (26) d'alimentation en gaz ionisable débouchant dans la chambre tampon annulaire (23) en amont de l'anode (25) dans une zone distincte de la zone portant l'anode (25), **caractérisé** en ce que les moyens (31 à 33, 34 à 38) de création d'un champ magnétique dans le canal principal (24) sont adaptés pour produire dans ce canal principal (24) un champ magnétique essentiellement radial à l'extrémité aval (225) du canal (24) et dont l'induction est maximale à ce niveau, ce champ magnétique présentant une induction minimale dans la zone de transition située au voisinage de l'anode (25), la valeur absolue de l'induction de ce champ augmentant à nouveau en amont de l'anode (25), au niveau de la chambre tampon (23) pour réaliser un effet de miroir magnétique, les lignes de champ magnétique présentant entre l'anode (25) et l'extrémité aval (225) du canal (24) une concavité dirigée vers l'aval provoquant une focalisation des ions, avec une région de densité d'ionisation maximale située en aval de l'anode (25), et en ce que les moyens de création d'un champ magnétique comprennent plusieurs moyens distincts (31 à 33) de création d'un champ magnétique et des pièces polaires radiales planes (34, 35) interne (35) et externe (34) disposées au niveau de la face de sortie de part et d'autre du canal principal (24) et reliées entre

- elles par une âme centrale (38), une culasse (36) et un circuit magnétique périphérique (37) disposé axialement à l'extérieur du canal principal (24), la culasse (36) étant constituée par des éléments radiaux situés au voisinage immédiat de l'anode (25) et traversant la chambre tampon annulaire (23) en ménageant entre eux des espaces de communication (13) entre la chambre tampon annulaire (23) et le canal principal (24).
- 5
2. Moteur à plasma selon la revendication 1, caractérisé en ce que la chambre tampon (23) présente dans le sens radial une dimension qui est comprise entre une fois et deux fois la dimension radiale du canal principal (24).
- 10
3. Moteur à plasma selon la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens distincts (31 à 33) de création d'un champ magnétique comprennent un premier moyen (31) disposé autour et à l'extérieur du canal principal (24) au voisinage de l'extrémité aval (225) de celui-ci, un deuxième moyen (32) disposé autour de l'âme centrale (38) dans une zone faisant face à l'anode (25) et s'étendant partiellement en face de la chambre tampon (23) pour la création de l'effet miroir magnétique et un troisième moyen (33) disposé autour de l'âme centrale (38) entre le deuxième moyen (32) et l'extrémité aval (225) du canal principal (24).
- 15
4. Moteur à plasma selon la revendication 3, caractérisé en ce que les premier, deuxième et troisième moyens (31, 32, 33) de création d'un champ magnétique sont constitués par des bobines d'induction.
- 20
5. Moteur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que la chambre tampon (23) comprend plusieurs alvéoles qui débouchent dans le canal d'accélération (24) au voisinage de l'anode (25), sont répartis autour de l'axe du moteur et sont délimités par des cloisons parallèles à l'axe du moteur qui définissent entre les alvéoles voisins des passages (423) pour des barreaux magnétiques cylindriques constituant la culasse (36) sans pénétrer dans la chambre tampon alvéolée (23).
- 25
6. Moteur à plasma selon la revendication 5, caractérisé en ce que la chambre tampon alvéolée (23) est monobloc.
- 30
7. Moteur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que la culasse (36) comprend des éléments radiaux constitués par des barreaux magnétiques cylindriques traversant la chambre annulaire (23).
- 35
8. Moteur à plasma selon la revendication 7, caractérisé en ce que les barreaux magnétiques (36) sont constitués par des barreaux métalliques isolés électriquement par des gaines en deux parties (141, 142) solidaires respectivement des parois (22) du canal principal (24) et des parois (224) de la chambre tampon (23).
- 40
9. Moteur à plasma selon la revendication 7 ou la revendication 8, caractérisé en ce que les barreaux magnétiques (36) sont réunis à leur partie périphérique externe par une couronne magnétique (36A) continue servant de pièce structurale de fixation du moteur sur la structure d'un satellite.
- 45
10. Moteur à plasma selon la revendication 7, caractérisé en ce que les barreaux magnétiques (36) sont constitués par des barreaux métalliques isolés électriquement de la masse par des pièces en ferrite (37b, 38b) constituant respectivement ledit circuit magnétique périphérique (37) disposé axialement à l'extérieur du canal principal (24) et ladite âme centrale (38), les barreaux magnétiques (36) pouvant être polarisés au potentiel de l'anode (25).
- 50
11. Moteur à plasma selon la revendication 7, caractérisé en ce que les barreaux magnétiques (36) sont constitués d'un matériau ferrite isolant permettant une implantation directe dans la chambre tampon (23).
- 55
12. Moteur à plasma selon l'une quelconque des revendications 7 à 10, caractérisé en ce que le circuit magnétique périphérique (37) comprend un ensemble de barreaux de liaison entre la pièce polaire radiale externe (34) et la culasse (36).
13. Moteur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que le circuit magnétique périphérique (37) est constitué par une virole.
14. Moteur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que la culasse (36) comprend des barreaux orientés radialement dans un plan sensiblement perpendiculaire à l'axe de la chambre tampon (23) et du canal principal (24).
15. Moteur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que la culasse (36) comprend des barreaux orientés radialement selon les génératrices d'un tronc de cône dont l'extrémité de plus petite section est reliée à l'âme centrale (38), l'extrémité de plus grande section est reliée au circuit magnétique périphérique (37) et l'axe correspond sensiblement à celui de la chambre tampon (23) et du canal principal (24).

16. Moteur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que la culasse (36) comprend une pièce tronconique en ferrite dont l'extrémité de plus petite section est reliée à l'âme centrale (38) et l'extrémité de plus grande section est reliée à une virole (37a) constituant le circuit magnétique périphérique (37), des canaux (136) ménagés axialement dans ladite pièce tronconique constituant lesdits espaces de communication entre la chambre tampon annulaire (23) et le canal principal (24). 5
17. Moteur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les deuxièmes moyens (26) d'alimentation en gaz ionisable débouchant dans la chambre tampon annulaire (23) en amont de l'anode (25) à travers un distributeur annulaire (27). 10
18. Moteur à plasma selon la revendication 5 et la revendication 17, caractérisé en ce que le distributeur annulaire (27) est associé à des cols soniques (127) débouchant dans les différents alvéoles de la chambre tampon alvéolée (23). 15
19. Moteur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les deuxièmes moyens (26) d'alimentation en gaz ionisable débouchent dans la chambre tampon annulaire (23) en amont de l'anode (25) à travers un col sonique unique (227) monté tangentiellement selon le plus grand diamètre de la chambre tampon de manière à créer un écoulement vortex. 20
20. Moteur à plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 19, caractérisé en ce que la cathode creuse (40) est placée dans l'axe du moteur à l'intérieur de l'âme centrale tubulaire (38) et isolée thermiquement de cette âme centrale (38) par un écran superisolant (140). 25

Patentansprüche

1. Plasmaantrieb mit reduzierter Länge und geschlossener Elektronendrift mit einem Hauptkanal zur Ionisierung und Beschleunigung (24), der durch Teile (22) aus isolierendem Material begrenzt ist und der an seinem stromabgelegenen Ende (225) offen ist, mindestens einer Hohlkathode (40), die außerhalb des Hauptringkanals (24) auf dessen stromabgelegener Seite angeordnet ist, einer Ringanode (25), die konzentrisch zum Hauptringkanal (24) und mit Abstand zum offenen stromabgelegenen Ende (225) angeordnet ist, ersten und zweiten Mitteln (41, 26) zur Speisung mit ionisierbarem Gas, die jeweils an die Hohlkathode (40) und an die Ringanode (25) angeschlossen sind, einem Magnetkreis 35

(31 bis 33, 34 bis 38) zur Bildung eines Magnetfeldes in dem Hauptringkanal (24) und einer ringförmigen Pufferkammer (23), die in radialer Richtung mindestens genauso groß ist wie der Hauptringkanal (24) und die sich stromauf bezüglich diesem oberhalb des Bereiches erstreckt, in dem die Ringanode (25) angeordnet ist, wobei die zweiten Mittel (26) zur Speisung ionisierbaren Gases in der ringförmigen Pufferkammer (23) stromauf der Anode (25) münden, in einen Bereich, der getrennt ist von dem Bereich, in dem die Anode (25) angeordnet ist, dadurch gekennzeichnet, 40

daß die Mittel (31 bis 33, 34 bis 38) zur Bildung eines Magnetfeldes im Hauptkanal (24) so ausgebildet sind, daß sie in diesem Hauptkanal (24) ein Magnetfeld produzieren, welches im wesentlichen radial zum stromabgelegenen Ende (225) des Kanals (24) orientiert ist und dessen Induktion an dieser Stelle maximal ist, wobei das Magnetfeld eine minimale Induktion in dem Übergangsbereich aufweist, der in der Nähe der Anode (25) gelegen ist, und der Absolutwert der Induktion dieses Feldes erneut stromauf bezüglich der Anode (25) auf der Höhe der Pufferkammer (25) ansteigt, um einen magnetischen Spiegeleffekt zu erzeugen und wobei die Magnetfeldlinien zwischen der Anode (25) und dem stromabgelegenen Ende (225) des Kanals (24) eine stromab ausgerichtete Konkavität bilden, die eine Fokussierung der Ionen erzeugt mit einem maximalen Ionisationsdichtebereich, der stromab der Anode (25) gelegen ist, und dadurch, daß die Mittel zur Erzeugung eines Magnetfeldes mehrere getrennte Mittel (31 bis 33) zur Erzeugung eines Magnetfeldes und radiale ebene innere (35) und äußere (34) Polstücke aufweisen, die auf der Höhe der Ausgangsseite zu beiden Seiten des Hauptkanals (24) angeordnet sind und untereinander durch eine zentrale Seele (38), einem Magnetjoch (36) und einem peripheren Magnetkreis (37), der axial außerhalb des Hauptkanals (24) angeordnet ist, verbunden sind, wobei das Magnetjoch (36) aus radialen Elementen besteht, die in unmittelbarer Nähe der Anode (25) angeordnet sind und die ringförmige Pufferkammer (23) durchqueren und zwischen ihnen Verbindungsräume (13) zwischen der ringförmigen Pufferkammer (23) und dem Hauptkanal (24) bilden. 45

2. Plasmaantrieb nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Pufferkammer (23) in radialer Richtung Abmessungen hat, die zwischen dem Einfachen und dem Doppelten der radialen Abmessungen des Hauptkanals (24) liegen. 50

3. Plasmaantrieb nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die getrennten Mittel (31 bis 33) zur Bildung eines Magnetfeldes ein erstes Mittel (31) aufweisen, welches außerhalb und um den Haupt-

- kanal (24) herum in der Nähe seines stromabgelegenen Endes (225) angeordnet ist, ein zweites Mittel (32), welches um die mittlere Seele (38) in einem Bereich angeordnet ist, der gegenüber der Anode (25) liegt und teilweise gegenüber der Pufferkammer (23) zur Erzeugung eines magnetischen Spiegeleffekts liegt und ein drittes Mittel (33), welches um die zentrale Seele (38) zwischen dem zweiten Mittel (32) und dem stromabgelegenen Ende (225) des Hauptkanals (24) liegt.
- 5
4. Plasmaantrieb nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die ersten, zweiten und dritten Mittel (31, 32,33) zur Bildung eines Magnetfelds aus Induktionsspulen bestehen.
- 10
5. Plasmaantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Pufferkammer (23) mehrere Zellen aufweist, die in den Beschleunigungskanal (24) in der Nähe der Anode (25) münden, welche um die Antriebsachse verteilt sind und die durch zur Antriebsachse parallel ausgerichtete Trennwände abgegrenzt sind, die zwischen benachbarten Zellen Durchgänge (423) für zylinderförmige magnetische Stangen bilden, die das Joch (36) bilden, ohne in die in Zellen unterteilte Pufferkammer (23) einzudringen.
- 15
6. Plasmaantrieb nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die in Zellen unterteilte Pufferkammer (23) einstückig geformt ist.
- 20
7. Plasmaantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Joch (36) radiale Elemente aufweist, die aus zylinderförmigen Magnetstäben bestehen, die die Ringkammer (23) durchqueren.
- 25
8. Plasmaantrieb nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetstangen (36) aus Metallstäben bestehen, die elektrisch durch zweiteilige Schutzhüllen (141, 142) isoliert sind, die jeweils mit den Wänden (22) des Hauptkanals (24) und den Wänden (224) der Pufferkammer (23) fest verbunden sind.
- 30
9. Plasmaantrieb nach Anspruch 7 oder Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetstangen (36) an ihrem äußeren Rand durch eine magnetische durchgehende Krone (36A) verbunden sind, die als Strukturhalteteil des Antriebs auf der Struktur eines Satelliten dient.
- 35
10. Plasmaantrieb nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetstangen (36) aus elektrisch gegenüber der Masse durch Ferritstücke (37b, 38b) isolierte Metallstäbe bestehen, die jeweils den äußeren magnetischen Kreis (37) bilden
- 40
- und axial außerhalb des Hauptkanals (24) und der zentralen Seele (38) angeordnet sind, wobei die Magnetstangen (36) auf das Potential der Anode (25) polarisiert sein können.
- 45
11. Plasmaantrieb nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetstangen (36) aus einem isolierenden Ferritmaterial bestehen, die das unmittelbare Einsetzen in die Pufferkammer (23) erlauben.
- 50
12. Plasmaantrieb nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der äußere Magnetkreis (37) eine Anordnung von Verbindungsstäben aufweist, die zwischen den radialen äußeren Polarmustücken (34) und dem Joch (36) angeordnet sind.
- 55
13. Plasmaantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß der äußere Magnetkreis (37) aus einem Ring besteht.
14. Plasmaantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß das Joch (36) Stangen aufweist, die radial in einer Ebene angeordnet sind, die im wesentlichen senkrecht zur Achse der Pufferkammer (23) und zum Hauptkanal (24) verläuft.
15. Plasmaantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß das Joch (36) Stangen aufweist, die radial entlang den Erzeugenden eines Kegelstumpfes angeordnet sind, dessen Ende mit kleinerem Querschnitt mit der zentralen Seele (38) verbunden ist und dessen Ende mit dem größeren Querschnitt an den äußeren Magnetkreis (37) angeschlossen ist, und wobei dessen Achse im wesentlichen mit der Achse der Pufferkammer (23) und der des Hauptkanals übereinstimmt.
16. Plasmaantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Joch (36) ein kegelstumpfförmiges Teil aus Ferrit aufweist, dessen Ende mit dem kleineren Querschnitt mit der zentralen Seele (38) verbunden ist und dessen Ende mit dem größeren Querschnitt an einen Ring (37a) angeschlossen ist, der den äußeren Magnetkreis (37) darstellt, und daß axial in das kegelstumpfförmige Teil eingearbeitete Kanäle (136) die Verbindungsräume zwischen der ringförmigen Pufferkammer (23) und dem Hauptkanal (24) bilden.
17. Plasmaantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die zweiten Mittel (26) zur Speisung mit ionisierbarem Gas in der ringförmigen Pufferkammer (23) stromauf zur Anode (25) durch einen ringförmigen Verteiler (27) münden.

18. Plasmaantrieb nach Anspruch 5 und Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß der ringförmige Verteiler (27) mit Düsen (127) verbunden ist, die in den verschiedenen Zellen der aufgeteilten Pufferkammer (23) münden.
19. Plasmaantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die zweiten Mittel (26) zur Speisung mit ionisierbarem Gas in der ringförmigen Pufferkammer (23) stromauf bezüglich der Anode (25) durch eine einzelne Düse (227) münden, die tangential entlang dem größeren Durchmesser der Pufferkammer angeordnet ist, um einen spiralförmigen Fluß zu bilden.
20. Plasmaantrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Hohlkathode (40) in der Antriebsachse im Inneren der zentralen rohrförmigen Seele (38) angeordnet und gegenüber dieser thermisch durch einen superisolierenden Schild (140) isoliert ist.

Claims

1. A plasma engine of short length with closed electron drift, the engine comprising a main annular channel for ionization and acceleration (24) delimited by parts (22) of insulating material and open at its downstream end (225), at least one hollow cathode (40) disposed outside the main annular channel (24) adjacent to the downstream portion thereof, an annular anode (25) concentric with the main annular channel (24) and disposed at a distance from the open downstream end (225) thereof, first and second means (41, 26) for feeding ionizable gas and respectively associated with the hollow cathode (40) and with the annular anode (25), and means (31 to 33, 34 to 38) for creating a magnetic field in the main annular channel (24), and an annular buffer chamber (23) whose size in the radial direction is at least equal to that of the main annular channel (24) and which extends upstream therefrom beyond the zone in which the annular anode (25) is placed, the second means (26) for feeding an ionizable gas opening out in the annular buffer chamber (23) upstream from the anode (25) into a zone that is distinct from the zone including the anode (25),
- characterized in that the means (31 to 33, 34 to 38) for creating a magnetic field in the main channel (24) are adapted to produce in said main channel (24) a magnetic field that is essentially radial at the downstream end (225) of the channel (24), with maximum induction at this location, this magnetic field having a minimum induction in the transition zone situated in the vicinity of the anode (25), the absolute value of the induction of this field increasing again upstream from the anode (25), near the

buffer chamber (23) to create an effect of magnetic mirror, the magnetic field lines having, between the anode (25) and the downstream end (225) of the channel (24), a concavity facing the downstream end to cause a focussing of the ions, with a region of maximum ionization density downstream from the anode (25), and in that the means for creating a magnetic field comprise a plurality of distinct magnetic field creation means (31 to 33) and inner and outer plane radial pole pieces (35, 34) disposed level with the outlet face on either side of the main channel (24) and interconnected by a central core (38), a yoke (36), and a peripheral magnetic circuit (37) disposed axially outside the main channel (24), the yoke (36) being made up of radial elements situated in the immediate vicinity of the anode (25) and penetrating into the annular buffer chamber (23), communication spaces (13) between the annular buffer chamber (23) and the main channel (24) being left between the radial elements.

2. A plasma engine according to claim 1, characterized in that the size of the buffer chamber (23) in the radial direction is between once and twice the radial size of the main channel (24).
3. A plasma engine according to claim 1, characterized in that the distinct magnetic field creation means (31 to 33) comprise first means (31) disposed around and outside the main channel (24) in the vicinity of the downstream end (225) thereof, second means (32) disposed around the central core (38) in a zone facing the anode (25) and extending in part over the buffer chamber (23) for the creation of the effect of magnetic mirror, and third means (33) disposed around the central core (38) between the second means (32) and the downstream end (225) of the main channel (24).
4. A plasma engine according to claim 3, characterized in that the first, second, and third magnetic field creation means (31, 32, 33) are constituted by induction coils.
5. A plasma engine according to any one of claims 1 to 4, characterized in that the buffer chamber (23) comprises a plurality of alveoles which open out into the acceleration channel (24) in the vicinity of the anode (25), are distributed around the axis of the engine and are delimited by partitions which are parallel to the axis of the engine and define, between adjacent alveoles, passages (423) for cylindrical magnetic bars which constitute the yoke (36) without penetrating into the alveolate buffer chamber (23).
6. A plasma engine according to claim 5, characterized in that the alveolate buffer chamber (23) is

made in one piece.

7. A plasma engine according to anyone of claims 1 to 4, characterized in that the yoke (36) comprises radial elements which are constituted by cylindrical magnetic bars passing through the buffer chamber (23).
8. A plasma engine according to claim 7, characterized in that the magnetic bars (36) are constituted by metal bars that are electrically insulated by two-part sheaths (141, 142) which parts are respectively secured to the walls (22) of the main channel (24) and to the walls (224) of the buffer chamber (23).
9. A plasma engine according to claim 7 or claim 8, characterized in that the magnetic bars (36) are interconnected at their peripherally outer ends by a continuous magnetic ring (36A) constituting a structural part for fixing the engine to the structure of a satellite.
10. A plasma engine according to claim 7, characterized in that the magnetic bars (36) are constituted by metal bars that are electrically insulated from ground by ferrite parts (37b, 38b) respectively constituting said peripheral magnetic circuit (37) disposed axially outside the main channel (24) and said central core (38), the magnetic bars (36) being capable of being biased to the same potential as the anode (25).
11. A plasma engine according to claim 7, characterized in that the magnetic bars (36) are constituted by an insulating ferrite material enabling them to be directly implanted in the buffer chamber (23).
12. A plasma engine according to any one of claims 7 to 10, characterized in that the peripheral magnetic circuit (37) comprises a set of link bars between the radially outer pole piece (34) and the yoke (36).
13. A plasma engine according to any one of claims 1 to 11, characterized in that the peripheral magnetic circuit (37) is constituted by a shell.
14. A plasma engine according to any one of claims 1 to 12, characterized in that the yoke (36) comprises bars extending radially in a plane substantially perpendicular to the axis of the buffer chamber (23) and of the main channel (24).
15. A plasma engine according to any one of claims 1 to 12, characterized in that the yoke (36) comprises bars extending radially along the generating lines of a truncated cone whose smaller section end is connected to the central core (38), its larger section end being connected to the peripheral magnetic circuit (37), and its axis coinciding substantially with the axis of the buffer chamber (23) and of the main channel (24).
16. A plasma engine according to any one of claims 1 to 4, characterized in that the yoke (36) comprises a frustoconical ferrite part whose smaller section end is connected to the central core (38) and whose larger section end is connected to a shell (37a) constituting the peripheral magnetic circuit (37), channels (136) formed axially through said frustoconical part constituting said spaces for communication between the annular buffer chamber (23) and the main channel (24).
17. A plasma engine according to anyone of claims 1 to 4, characterized in that the second means (26) for feeding an ionizable gas open out in the annular buffer chamber (23) upstream from the anode (25) through an annular manifold (27).
18. A plasma engine according to claim 5 and to claim 17, characterized in that the annular manifold (27) is associated with sonic throats (127) opening out into the various alveoles of the annular buffer chamber (23).
19. A plasma engine according to anyone of claims 1 to 4, characterized in that the second means (26) for feeding an ionizable gas open out in the annular buffer chamber (23) upstream from the anode (25) through a single sonic throat (227) which is mounted tangentially along the largest diameter of the buffer chamber to create a vortex.
20. A plasma engine according to anyone of claims 1 to 19, characterized in that the hollow cathode (40) is located along the axis of the engine within the central tubular core (38) and is thermally insulated from this central core (38) through a superinsulating screen (140).

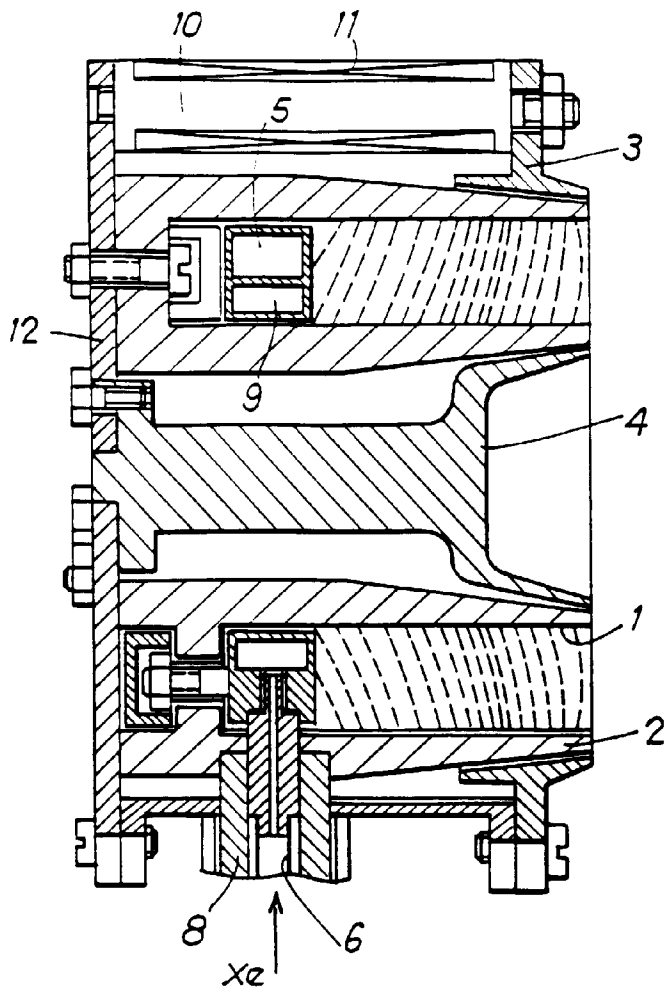


FIG. 2

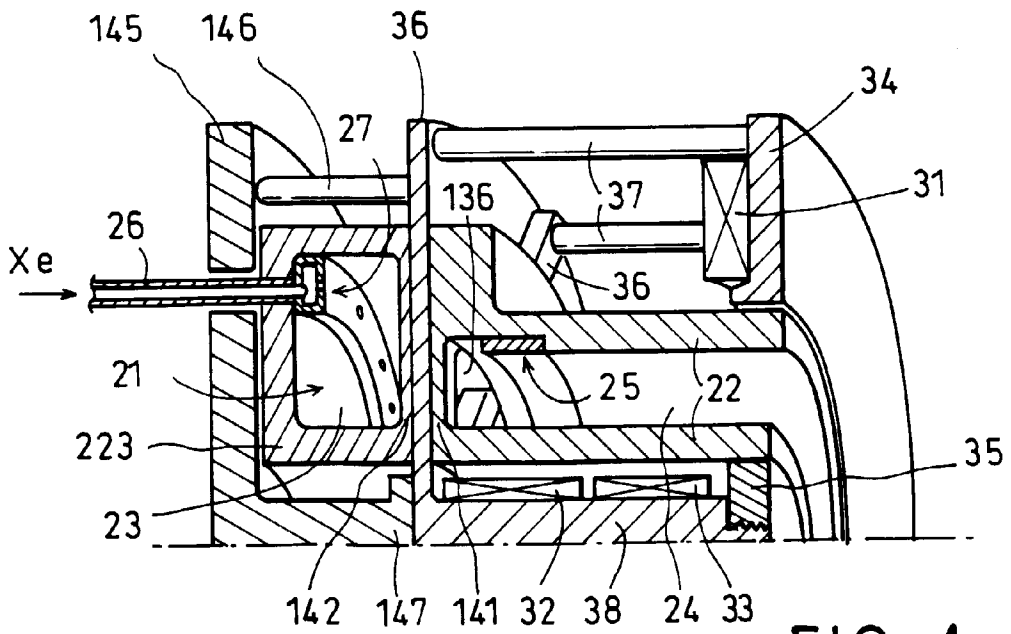
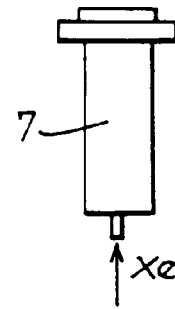


FIG. 4

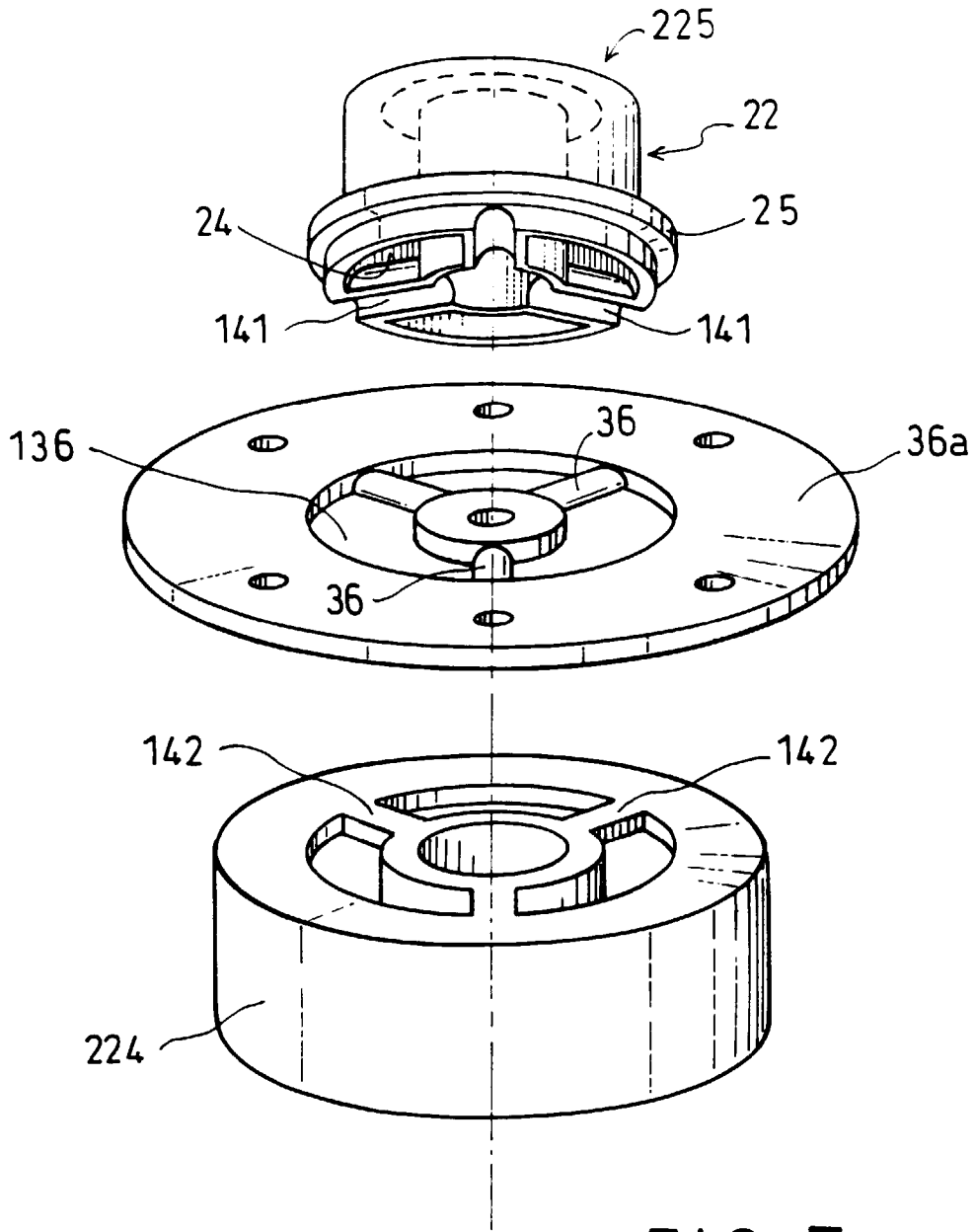


FIG. 3

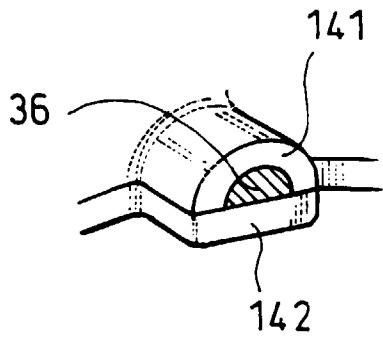
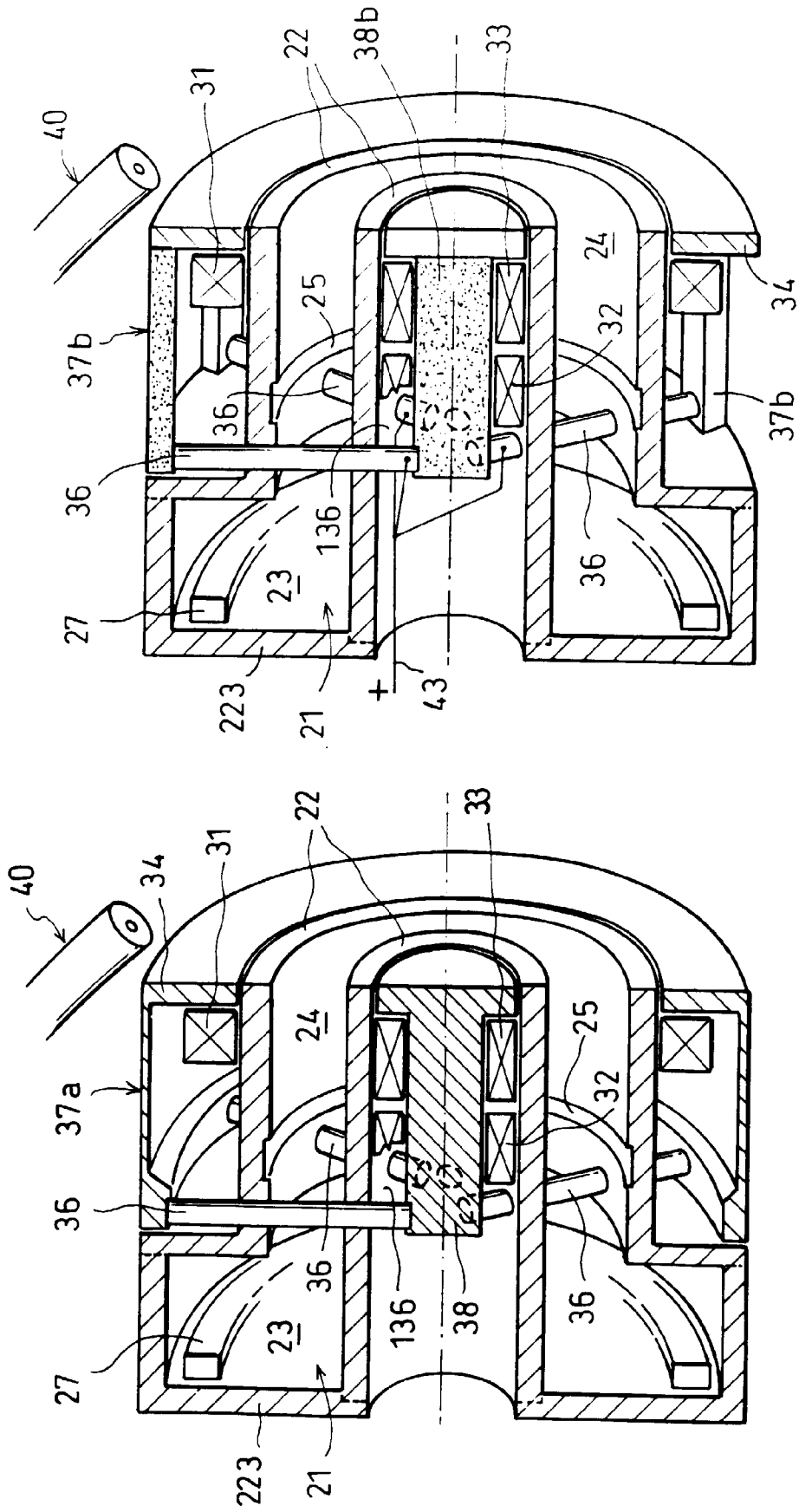
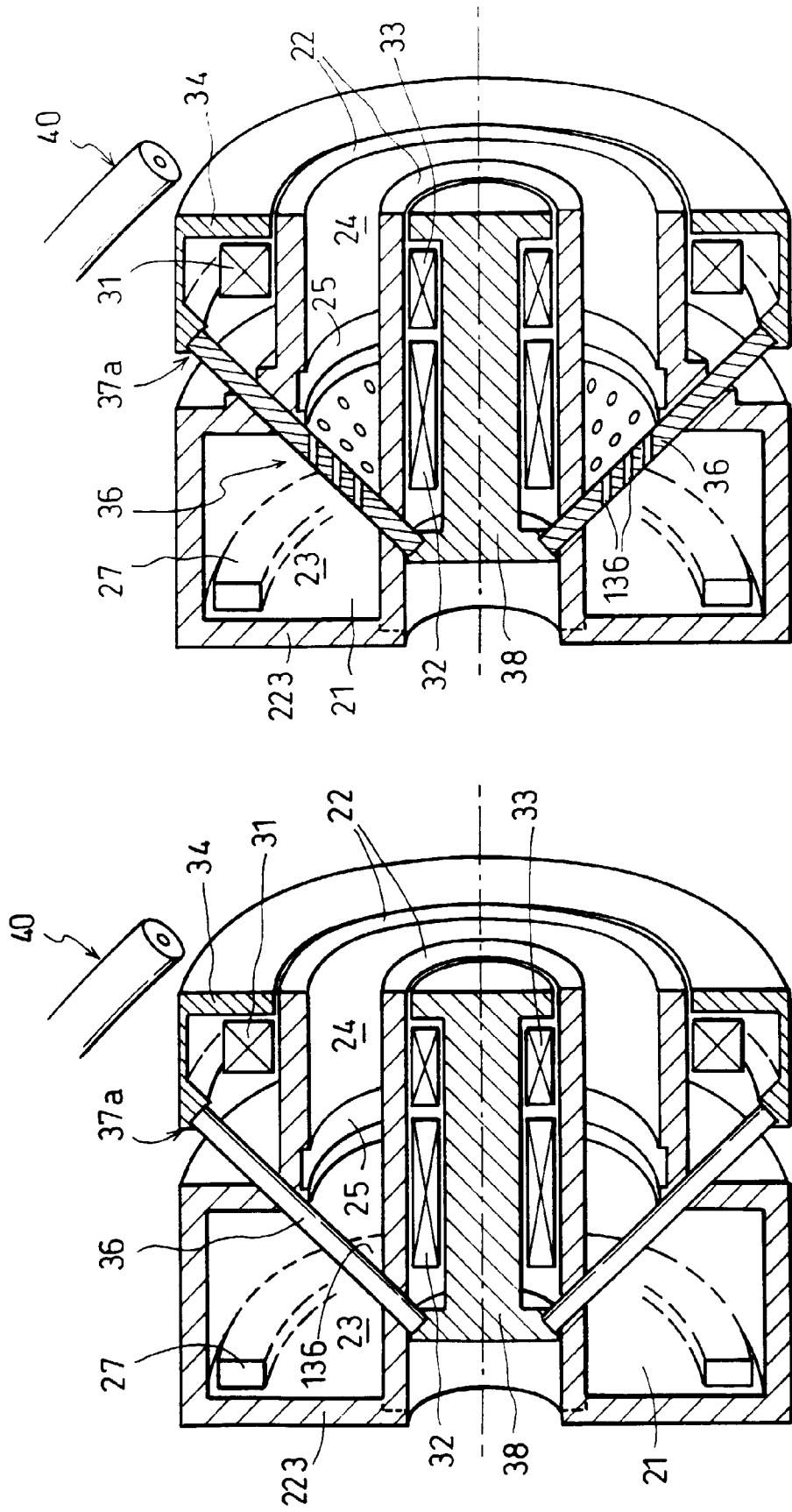


FIG. 3A



FIG_5

FIG_6



FIG_8

FIG_7

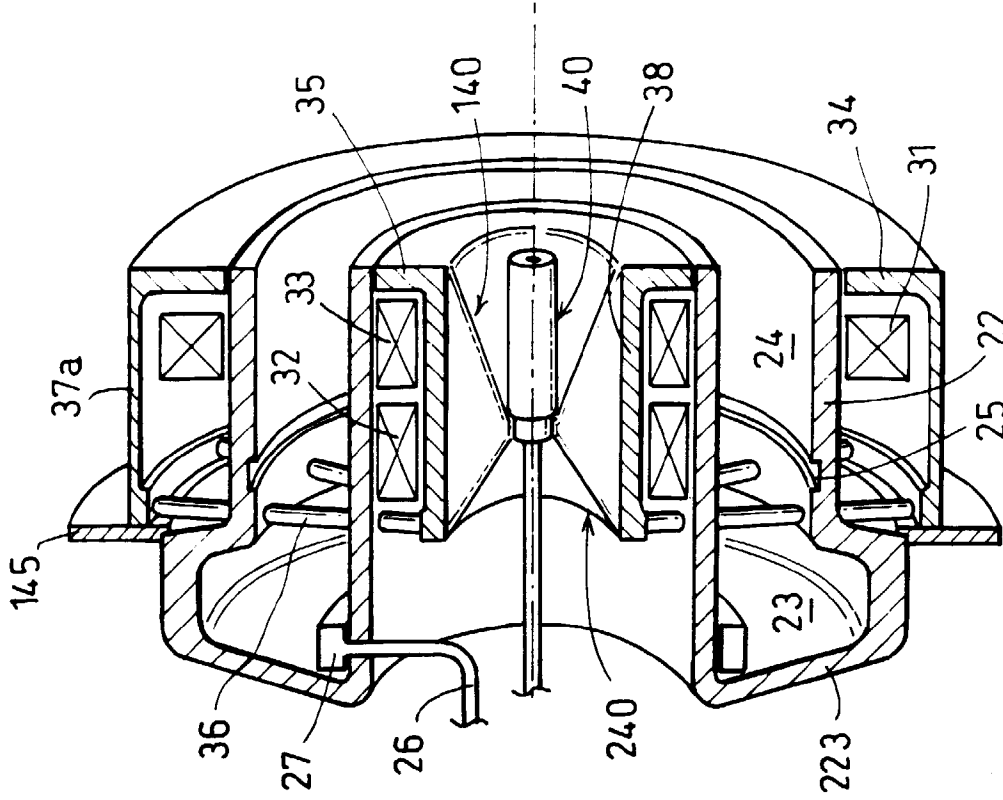


FIG. 14

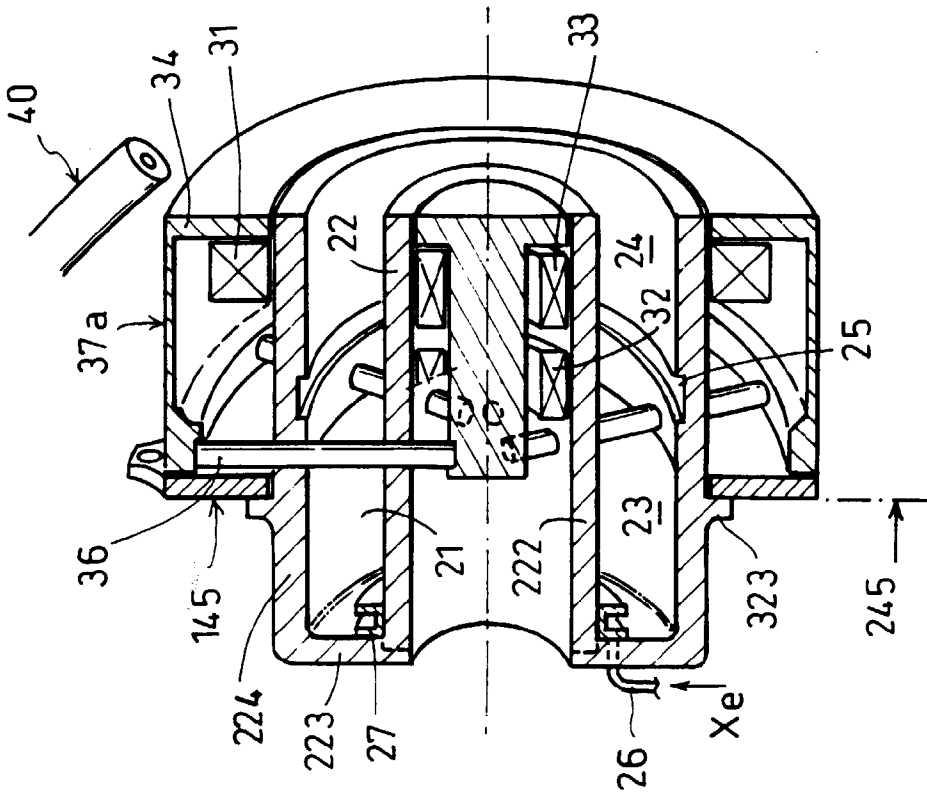


FIG. 9

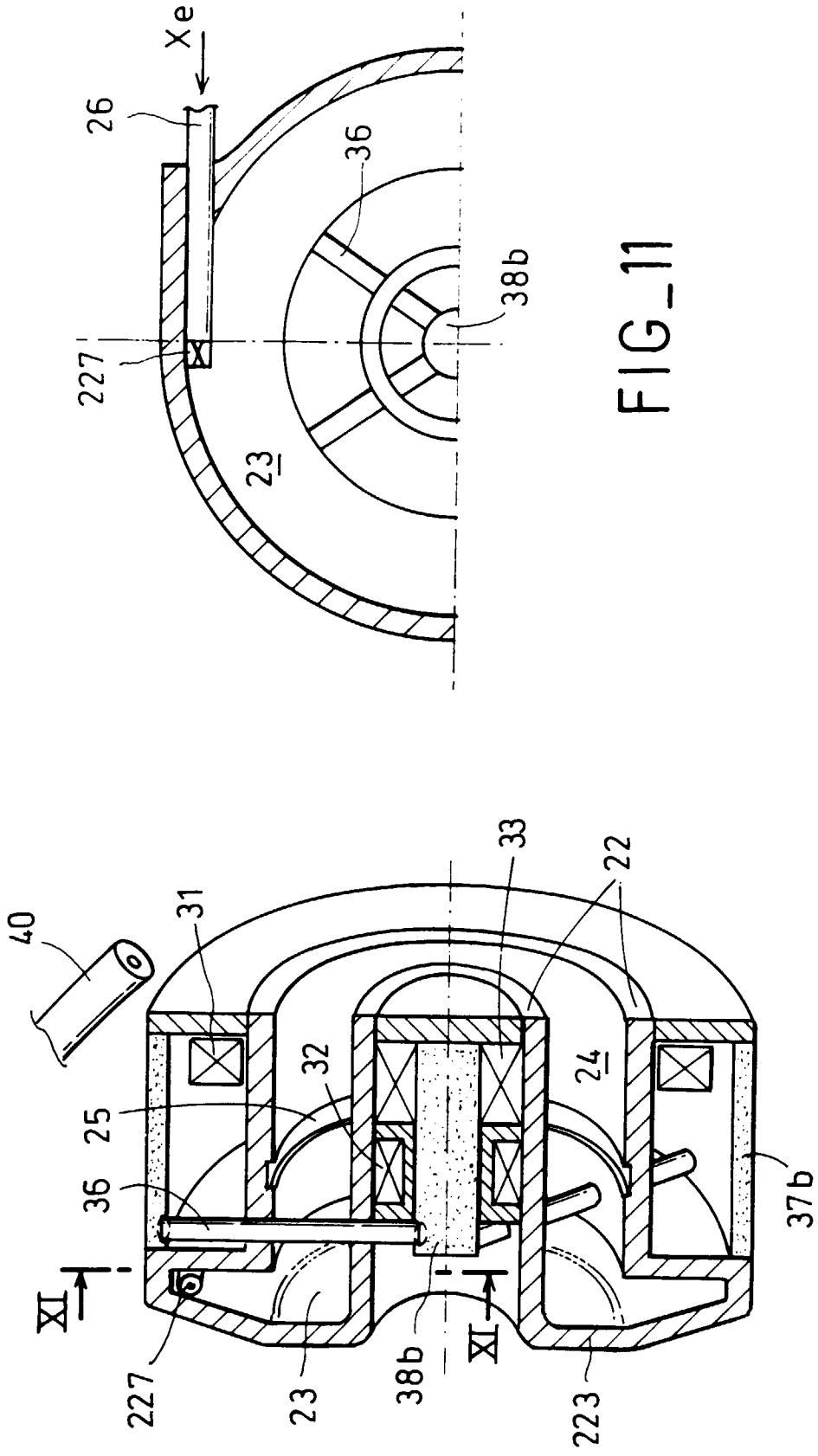
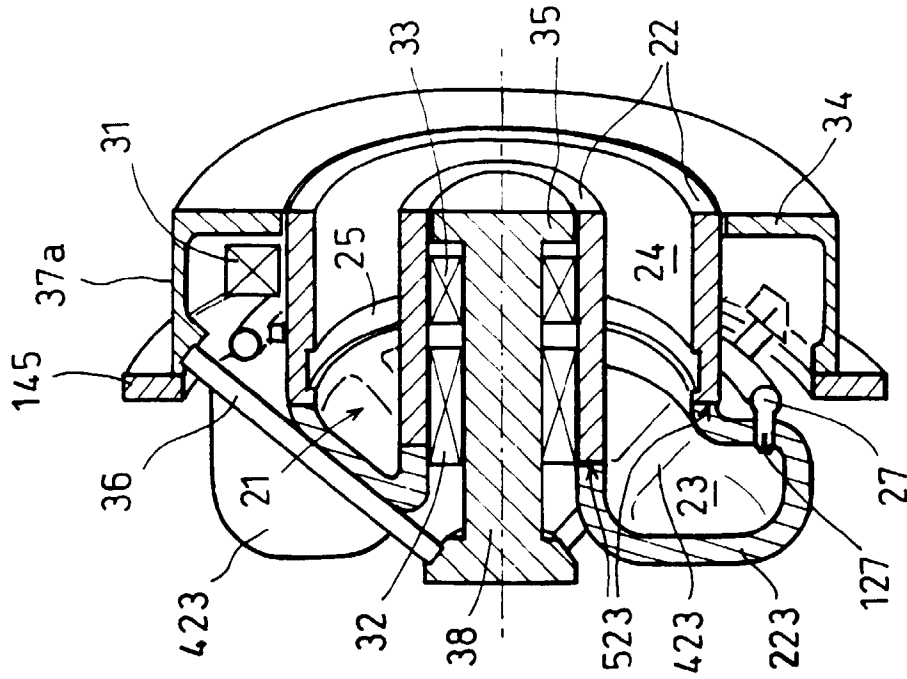


FIG-11

FIG-10



FIG_12

FIG_13

