



(11)

EP 2 798 209 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
28.09.2016 Bulletin 2016/39

(51) Int Cl.:
F03H 1/00 ^(2006.01) **H01J 27/18** ^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **12819095.6**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR2012/052983

(22) Date de dépôt: **19.12.2012**

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2013/098505 (04.07.2013 Gazette 2013/27)

(54) **PROPULSEUR PLASMIQUE ET PROCEDE DE GENERATION D'UNE POUSSEE PROPULSIVE PLASMIQUE**

PLASMATRIEBWERK UND VERFAHREN ZUR ERZEUGUNG EINES PLASMAANTRIEBSSCHUBS
PLASMA THRUSTER AND METHOD FOR GENERATING PROPULSIVE PLASMA THRUST

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

(30) Priorité: **29.12.2011 FR 1162545**

(43) Date de publication de la demande:
05.11.2014 Bulletin 2014/45

(73) Titulaire: **Office National d'Etudes et de
Recherches
Aérospatiales (ONERA)
91120 Palaiseau (FR)**

(72) Inventeur: **LARIGALDIE, Serge
F-92290 Chatenay Malabry (FR)**

(74) Mandataire: **Cabinet Plasseraud
66, rue de la Chaussée d'Antin
75440 Paris Cedex 09 (FR)**

(56) Documents cités:
US-B1- 6 195 980

- "Resonance Electron-Cyclotron Throttleable Rocket", , 22 décembre 2009 (2009-12-22), XP055038206, Extrait de l'Internet:
URL:<http://www.reiszenrgs.com/space.php4>
[extrait le 2012-09-14]

- "Electron-Cyclotron Resonance Thruster", , 22 décembre 2009 (2009-12-22), XP055038205, Extrait de l'Internet:
URL:<http://nextbigfuture.com/2009/12/electron-cyclotron-resonance-thruster.html> [extrait le 2012-09-14]
- BRAINERD J J ET AL: "Bimodal velocity profile measured by laser-induced fluorescence in the jet of an ECR thruster", 44TH AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE AND EXHIBIT (44TH AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE AND EXHIBIT 20080721 TO 20080723 HARTFORD, CT), AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, USA, 21 juillet 2008 (2008-07-21), pages 1-10, XP008156126, ISBN: 978-1-56347-943-4
- JEROME J. BRAINERD ET AL: "Electrodeless Experimental Thruster", AIP CONFERENCE PROCEEDINGS, 1 janvier 2009 (2009-01-01), pages 126-132, XP055037983, DOI: 10.1063/1.3115486
- ROVEY J L ET AL: "Plasma properties in the magnetic nozzle of an electron cyclotron resonance plasma source", 44TH AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE AND EXHIBIT (44TH AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE AND EXHIBIT 20080721 TO 20080723 HARTFORD, CT), AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, USA, 1 janvier 2008 (2008-01-01), pages 1-12, XP008156149, ISBN: 978-1-56347-943-4

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

EP 2 798 209 B1

- **STALLARD B W ET AL: "Whistler-driven, electron-cyclotron-resonance-heated thruster: experimental status", JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS. NEW YORK, US, vol. 12, no. 4, 1 juillet 1996 (1996-07-01), pages 814-816, XP008133752, ISSN: 0748-4658 cité dans la demande**

Description

[0001] L'invention concerne un propulseur plasmique et un procédé pour la génération d'une poussée propulsive au moyen dudit propulseur plasmique.

[0002] Les satellites artificiels utilisent généralement des moteurs d'appoint ou propulseurs pour effectuer des manoeuvres de correction de trajectoire ou d'attitude. De la même manière, les sondes spatiales destinées à l'exploration du système solaire disposent de propulseurs leur permettant de se positionner très précisément autour d'une planète, voire de se poser sur un astéroïde pour en prélever des échantillons de matière.

[0003] En règle générale, ces propulseurs, dits chimiques ou à ergols, fournissent des poussées de quelques newtons au plus en utilisant des propergols liquides comme l'hydrazine (N_2H_2) où le peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée). Lors de la décomposition de ces propergols, l'énergie chimique est convertie en chaleur puis en poussée au cours de la détente des gaz chauds dans une tuyère. Les inconvénients principaux de ces propulseurs chimiques sont que leur impulsion spécifique est limitée, que les ergols nécessaires à leur fonctionnement représentent la moitié de la masse totale du satellite et que leur consommation importante d'ergol limite la durée de vie de ce dernier.

[0004] Pour permettre des missions spatiales plus lointaines et de plus longue durée, ces dernières années ont vu l'émergence de propulseurs plasmiques qui présentent l'avantage, par rapport aux propulseurs chimiques, d'offrir des impulsions spécifiques supérieures, d'augmenter significativement la masse de la charge utile par rapport à la masse du système propulsif ainsi que la durée de vie du satellite. Leurs principaux inconvénients, comme nous allons le voir, sont le manque de fiabilité de l'amorçage, notamment lorsque la pression de gaz propulsif est faible, leur durée de vie limitée par le bombardement ionique de certains éléments, et leurs contraintes de miniaturisation pour leur emploi par exemple sur des satellites miniatures. Il est à noter que si leur rendement énergétique, bien que meilleur que celui des propulseurs chimiques, était amélioré, des missions encore plus lointaines ou longues pourraient être envisagées.

[0005] Les propulseurs plasmiques peuvent être classés de différentes manières selon que l'on considère leur mode d'amorçage du plasma ou le mode d'accélération du plasma vers la sortie de la tuyère. Il est à noter que ces deux critères sont relativement indépendants l'un de l'autre et tout aussi important l'un que l'autre. En effet, le mode d'amorçage conditionne la complétude de l'ionisation du gaz propulsif et la fiabilité de cet amorçage donc celle du propulseur et peut conditionner la taille de la chambre de décharge du plasma, l'encombrement, le poids et le rendement énergétique du propulseur. Quant au mode d'accélération du plasma, il conditionne la poussée, l'impulsion spécifique, le rendement énergétique et peut conditionner l'encombrement, le poids, et la durée de vie du propulseur.

[0006] Si l'on considère comme critère de classification leur mode d'amorçage du plasma, une première catégorie de propulseur plasmique est le propulseur dit « arc-jet », comme décrit par la demande de brevet US 5 640 843, dont le principe est l'amorçage du plasma par un arc électrique dans le jet de gaz propulsif. L'avantage de cette catégorie de propulseur est de fournir, toutes choses égales par ailleurs, des poussées plus élevées que celles des autres types de propulseurs plasmiques, mais elle présente les inconvénients majeurs suivants : ces propulseurs ont une faible impulsion spécifique comparée à celle des autres propulseurs plasmiques ; consomment beaucoup de courant électrique ; ont une durée de vie limitée par le bombardement des électrodes et des parois internes de la chambre de décharge par les ions et les électrons qui atteignent des températures de l'ordre de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de degrés ; nécessitent d'évacuer le surplus de chaleur dans l'espace ce qui conduit à un mauvais rendement énergétique. Par ailleurs, l'amorçage du plasma lorsque la pression partielle de gaz propulsif est faible, manque de fiabilité.

[0007] Selon ce même critère, une deuxième catégorie de propulseur plasmique est celle des propulseurs plasmiques amorçant leur plasma par la seule résonance d'une onde électromagnétique (EM), souvent microonde, dans une chambre de décharge contenant un gaz propulsif à ioniser. L'inconvénient majeur des propulseurs de cette catégorie est le rendement énergétique relativement faible puisque seule une petite fraction de l'énergie EM est absorbée par le plasma. Par ailleurs, l'ionisation du gaz propulsif est rarement complète, notamment lorsque le débit de gaz propulsif est important, et l'amorçage du plasma manque de fiabilité lorsque la pression partielle de gaz propulsif est faible.

[0008] Selon ce même critère, une troisième catégorie de propulseur plasmique est celle des propulseurs plasmiques à « résonance gyromagnétique » des électrons libres magnétisés du plasma ou ECR (« Electron Cyclotron Résonance » suivant la dénomination anglo-saxonne). L'application d'un champ magnétique au plasma conduisant ses électrons libres à tourner dans un même sens et à une même fréquence déterminés, le plasma peut théoriquement y être amorcé puis entretenu avec un rendement énergétique égal à 1 par l'absorption totale d'une onde électromagnétique dont le champ électrique tourne à la même vitesse et dans le même sens que ces électrons magnétisés. Pour maximiser en pratique ce rendement énergétique, la longueur de la chambre de décharge est sensiblement égale à un nombre entier de demi-longueur de l'onde électromagnétique dans le vide, ce qui pose le problème de la miniaturisation de la chambre de décharge et donc du propulseur. En effet, pour pouvoir augmenter la fréquence de résonance de l'onde EM tout en ayant les conditions de l'ECR, il faut augmenter corrélativement l'intensité du champ magnétique, ce qui suppose rapidement l'emploi de bobines magnétiques puissantes or l'encombrement et le poids

de ces bobines va à l'encontre de l'objectif de miniaturisation du propulseur. Ce problème de miniaturisation est par ailleurs compliqué par la multiplicité des sources devant émettre dans la chambre de décharge : source de gaz propulsif, source d'onde EM et source de champ magnétique. Le brevet EP 0 505 327 décrit un tel propulseur. D'autres domaines techniques utilisent également des sources de plasma ECR, comme par exemple celui de la production de circuits intégrés. La demande de brevet US 2005 0 287 décrit une source d'ions à résonance ECR, munie de bobines magnétiques, pour l'implantation ionique en micro-électronique. L'utilisation de bobines magnétiques conduit à un poids et à un encombrement important pour un rendement énergétique relativement faible du fait des pertes par effet Joule, ce qui est mal adapté pour une utilisation comme propulseur spatial. Par ailleurs, l'ionisation du gaz propulsif est rarement complète, notamment lorsque le débit de gaz propulsif est important, et l'amorçage du plasma manque de fiabilité lorsque la pression partielle de gaz propulsif est faible. Enfin, ces propulseurs déplorent souvent l'existence de jets parasites de plasma vers l'amont connu sous le nom d'effet de pompe ionique.

[0009] Quelle que soit la façon dont est amorcé leur plasma, les propulseurs plasmiques peuvent également être classés selon le second critère qu'est le mode d'accélération du plasma dans la tuyère.

[0010] Selon ce second critère, une première famille est celle des propulseurs plasmiques dits « électrostatiques », qui se caractérise par la nature électrostatique de la force accélérant le plasma vers la sortie de la tuyère. Cette famille peut à son tour être divisée en trois catégories : les propulseurs à grille accélératrice, les propulseurs à effet Hall et les propulseurs à effet de champ.

[0011] La catégorie des propulseurs à grille accélératrice est caractérisée par le fait que les ions issus d'une chambre à décharge sont accélérés par un système de grilles polarisées électriquement. Il est à noter que le plasma éjecté n'est pas électriquement neutre. Les propulseurs à grille accélératrice présentent les inconvénients suivants qui en limitent l'efficacité et la durée de vie : les faisceaux d'ions positifs traversant la grille accélératrice l'érodent ce qui limite la durée de vie de ces propulseurs ; les ions éjectés se recombinaient avec les électrons éjectés et génèrent des dépôts de matière occultants sur les panneaux solaires des satellites sur lesquels ils sont montés ; la chambre de décharge doit être de grand volume ; le rendement énergétique est relativement faible en raison de fuites du plasma au niveau des parois de la chambre de décharge et de la grille d'accélération ; et la poussée est limitée par la limitation de la densité des ions à l'intérieur des grilles du fait des électrons secondaires. Des exemples de propulseurs à grille accélératrice sont donnés dans les demandes de brevet JP 01 310179 et US 2004/161579 A1, dans le brevet US 7 400 096 B1, et dans l'article de MORRISON N.A. et al « High rate deposition of ta-C:H using an elec-

tron cyclotron wave resonance plasma source », publié dans THIN SOLID FILMS, ELSEVIER-SEQUOIA SA LAUSANNE, CH, vol. 337, n° 1-2, 11 janvier 1999 pages 71-73, XP004197099, ISSN : 0040-6090, DOI : 10.1016/S0040-6090(98)01187-0 et l'article de NISHIYAMA K ET AL : "Microwave power absorption coefficient of an ECR Xenon ion thruster", SURFACE AND COATINGS TECHNOLOGY, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol.202, no. 22-23, 30 août 2008 (2008-08-30), pages 5262-5265, XP025875510, ISSN : 0257-8972, DOI : 10.1016/J.SURFCOAT.2008.06.069.

[0012] La catégorie des propulseurs à effet Hall est caractérisée par une anode cylindrique et un plasma chargé négativement. Les propulseurs à effet Hall utilisent la dérive des particules chargées dans des champs magnétiques et électriques croisés. Leurs inconvénients sont d'une part la présence d'un champ électrique continu qui implique des électrodes polarisées et d'autre part la limitation en densité de plasma qui est liée à la formation de gaines autour de ces électrodes qui s'opposent à la pénétration du champ électrique continu au sein du plasma, contrairement au champ hyperfréquence qui pénètre facilement à l'intérieur du milieu ionisé, d'où l'intérêt des décharges hyper fréquence (HF). Le document US 2006/290287 décrit un tel propulseur.

[0013] La catégorie des propulseurs à effet de champ est caractérisée par l'ionisation d'un liquide métallique, son accélération puis sa neutralisation électrique.

[0014] Selon ce second critère, une deuxième famille est celle des propulseurs plasmiques dits « électromagnétiques ». Cette famille peut être divisée en six catégories : les propulseurs à induction pulsée, les propulseurs magnétoplasma-dynamiques, les propulseurs sans électrode, les propulseurs électrothermiques, les propulseurs à double couche hélicon et les propulseurs mugradB.

[0015] La catégorie des propulseurs à induction pulsée est caractérisée par une accélération durant des intervalles de temps discontinus.

[0016] La catégorie des propulseurs magnétoplasma-dynamiques est caractérisée par des électrodes qui ionisent le gaz propulsif et y créent un courant qui a son tour crée un champ magnétique qui accélère le plasma via la force de Lorentz.

[0017] La catégorie des propulseurs sans électrode est caractérisée par l'absence d'électrode ce qui supprime un point faible pour la durée de vie des propulseurs plasmiques. Le gaz propulsif y est ionisé dans une première chambre par une onde EM puis transféré dans une seconde chambre où le plasma est accéléré par des champs électrique et magnétique inhomogènes et oscillants générant une force dite pondéromotrice. Le brevet US 7 461 502 décrit un tel propulseur. Un inconvénient de cette catégorie de propulseurs est leur utilisation de bobines magnétiques pour générer le champ magnétique oscillant, car leur encombrement, leur poids et leur perte énergétique par effet joule, relativement élevés, sont mal adaptés aux applications spatiales.

[0018] La catégorie des propulseurs électrothermiques est caractérisée par le chauffage du plasma à des températures de l'ordre du million de degrés puis la conversion partielle de cette température en vitesse axiale. Ces propulseurs nécessitent des bobines magnétiques de forte puissance pour générer des champs magnétiques très intenses afin de pouvoir confiner un plasma dont les électrons ont des vitesses très élevées du fait de leur température. Outre l'encombrement et le poids de ces bobines, leur dissipation thermique par effet joule dégrade notablement le rendement énergétique de ces propulseurs. Le brevet US 6 293 090 décrit un tel propulseur, plus précisément il s'agit d'un propulseur à Radio Fréquence (RF) en résonance hybride basse (absorption d'énergie par couplage d'une onde HF très basse fréquence via une oscillation combinée des ions et des électrons du plasma) de type VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket), où le plasma n'est pas chauffé par résonance de ses électrons comme c'est généralement le cas pour les propulseurs de cette catégorie mais par excitation de ses ions par une onde EM de forte puissance.

[0019] La catégorie des propulseurs à double couche hélicon est caractérisée par l'injection du gaz propulsif dans une chambre tubulaire autour de laquelle est enroulée une antenne émettant une onde électromagnétique de puissance suffisamment élevée pour ioniser le gaz puis générer, dans le plasma ainsi créé, une onde hélicon qui augmente encore la température du plasma. La catégorie des propulseurs « mugradB », dits encore « à champ de charge d'espace » est caractérisée par la nature diamagnétique de sa force. Le chapitre 5.1 du livre « Physique des plasmas, cours et application » de J.-M. Rax expose rigoureusement la théorie du mouvement d'un électron animé par un champ électromagnétique HF dans un champ magnétique statique ou lentement variable. Il y est écrit en particulier page 152 la présence d'une convergence ou d'une divergence des lignes de champ induit et donc d'une force le long de la direction de ce champ, force qui est proportionnelle au moment magnétique mu et au gradient de ce champ magnétique. Cette force est appelée « mugradB » ou force diamagnétique. Le propulseur objet de la présente demande de brevet s'appuie effectivement sur les principes physiques tout à fait « classiques » exposés au cours de ce chapitre, les hypothèses d'adiabaticité évoquées page 153 pour l'invariance du moment magnétique mu étant largement satisfaites dans le cas de l'invention. Ce livre ne divulgue cependant pas comment concevoir un propulseur plasmique à entretien du plasma par ECR dont la taille puisse être réduite par rapport à la demi longueur d'onde de l'onde électromagnétique et dont la fiabilité de l'amorçage est améliorée même dans des conditions de très basse pression partielle de gaz propulsif. L'article de STALLARD B W ET AL : « Whistler-driver, electron-cyclotron-resonance-heated thruster : experimental status », JOURNAL OF PROPULSION AND POWER 1996 JUL-AUG AIAA, vol. 12, no. 4, juillet

1996 (1996-07), pages 814-816, XP008133752 décrit un propulseur à force diamagnétique, dont le plasma est amorcé et entretenu par des ondes électroniques générées par une onde EM, d'une fréquence inférieure à la fréquence gyromagnétique, émise par deux antennes enroulées en hélice, et par un champ magnétique, généré par des bobines magnétiques, d'une intensité supérieure à l'intensité de résonance ECR. Le gaz propulsif est injecté dans une zone où le champ magnétique a décru au dessous de l'intensité de résonance ECR. Il soulève le problème de l'ionisation incomplète du gaz propulsif de ce propulseur. Pour limiter cette incomplétude de cette ionisation, la chambre à gaz est segmentée. Malgré cette précaution, bien qu'il soit expliqué que l'ionisation devient plus complète lorsque le débit de gaz diminue, elle reste incomplète même pour de faibles débits. Il ne divulgue pas non plus d'améliorer la fiabilité de l'amorçage pour de très faibles débits de gaz propulsif ni de moyen de réduire la taille de ce propulseur.

[0020] La page Internet <http://www.reiszen-grs.com/space.php4>, "Resonance Electron-Cyclotron Throttleable Rocket", XP055038206, décrit un propulseur ECR et un procédé correspondant pour la génération d'une poussée propulsive. Le propulseur comprend une cavité intérieure, une buse d'injection de gaz, un générateur d'onde électromagnétique à la fréquence ECR, et un générateur de champ magnétique ayant un maximum local près de l'extrémité de sortie de la buse d'injection.

[0021] Aucun des propulseurs plasmiques de l'état de l'art ne réunit à la fois les avantages d'un amorçage fiable (allumage systématique et instantané) et d'une ionisation complète dans toutes les conditions de fonctionnement de puissance de l'onde électromagnétique et de flux de gaz propulsif, notamment pour de très faibles débit et pression partielle de gaz propulsif; d'absence de jet parasite de plasma vers l'amont; d'une chambre de décharge de taille réduite par rapport à la demi longueur d'onde de l'onde EM utilisée pour l'entretien du plasma ; pouvant fonctionner avec des intensités de champ magnétique autorisant l'utilisation d'aimants permanents évitant ainsi l'encombrement, le poids et les pertes par effet Joule des bobines magnétiques; permettant une variation maîtrisée de la poussée et de l'impulsion spécifique ; pouvant atteindre un rendement énergétique proche de 1; accélérant un plasma neutre, donc ne nécessitant pas de neutraliseur ; et dont la durée de vie n'est pas limitée par l'usure de pièces par le plasma ni par le dépôt de gaz propulsif sur les panneaux solaires.

[0022] La présente invention a pour but de réaliser un propulseur pouvant avoir un rendement énergétique proche de 1, comme les propulseurs à amorçage ECR, et être de taille inférieure aux propulseurs à amorçage ECR de l'état de l'art. Comme nous le verrons dans la description qui suit, les inventeurs constateront que ce propulseur réunit tous les avantages cités ci-dessus, notamment grâce à la mise en oeuvre d'un nouveau type d'amorçage du plasma résultant de la conjonction des

configurations géométriques particulières des lignes de champ magnétique, de l'injection de gaz propulsif et de l'émission d'onde EM.

[0023] Le principe de l'invention, est de réduire la taille d'un propulseur plasmique ECR d'une part en réduisant la longueur de sa chambre de décharge et d'autre part en injectant la gaz propulsif au moyen de l'antenne émettant l'onde EM, la réduction de la longueur de la chambre de décharge étant obtenue par l'utilisation d'une zone de plasma en résonance électronique, confiné par un champ magnétique, comme cavité résonante de l'onde EM, puisque l'indice de réfraction du plasma en résonance ECR est 5 à 10 fois supérieur à celui de la chambre de décharge que l'état de l'art des propulseurs plasmiques utilise comme cavité résonante de l'onde EM.

[0024] Plus précisément, l'invention a pour objet un propulseur plasmique selon la revendication 1 et un procédé pour la génération d'une poussée propulsive au moyen d'un propulseur plasmique selon la revendication 9.

[0025] Notons que ledit minimum local d'intensité du champ magnétique fonctionne comme un piège à électrons qui va permettre l'amorçage du plasma par micro-décharge à cathode creuse même à très basse pression.

[0026] Notons également l'importance de la forme des lignes de champ magnétique qui conduisent à une position de la surface ECR juste en sortie (à une distance de l'ordre du millimètre) de la buse d'injection du gaz propulsif ionisé par la micro-décharge à cathode creuse. Cette position contribue à ce que tout le gaz neutre sortant de la buse d'injection soit ionisé en traversant la surface ECR.

[0027] Notons également que l'injection du gaz propulsif et de l'onde électromagnétique (EM) par le même moyen permet d'une part d'avoir une chambre de décharge plus compacte et d'autre part de garantir que l'onde EM irradie une zone où la densité de gaz est maximale, ce qui maximise le taux de ionisation du gaz neutre sortant de la buse d'injection, ce qui était l'un des problèmes du propulseur « mu.gradB » décrit par STALLARD B W ET AL.

[0028] Notons enfin que la conjonction des positions de l'antenne d'émission d'onde EM et de la surface ECR permet de concentrer l'irradiation dans le volume délimité par la surface ECR où l'onde EM rentre en résonance, ce qui maximise l'absorption de l'énergie EM par le plasma et donc maximise le rendement énergétique du propulseur.

[0029] Suivant des modes particuliers de réalisation, le propulseur plasmique comporte une ou plusieurs des caractéristiques des revendications dépendantes.

[0030] L'intérêt du manchon est expliqué ci-après. Le propulseur plasmique "mu.gradB" comportant une cavité ouverte de dimensions très inférieures à la longueur d'onde incidente, une perte de puissance importante liée à la diffraction de l'onde EM dans l'orifice et rayonnement à l'extérieur du moteur pourrait, en absence de manchon, survenir dans la phase d'allumage du moteur.

[0031] De plus, en absence de manchon, seule la fraction de l'onde EM correspondant à la polarisation circulaire droite serait utilisée pour la résonance ECR avec le plasma à l'intérieur du moteur, le reste de l'onde EM retournant vers le générateur EM ou rayonnant à l'extérieur par diffraction dans l'orifice de sortie. La présence d'un manchon caractérisé comme ci-dessus permet que la totalité de la puissance EM arrivant sur le manchon soit réfléchi vers l'intérieur du moteur, la partie qui remonte vers le générateur pouvant alors être à nouveau renvoyée vers la cavité du propulseur au moyen dudit circulateur disposé à la sortie dudit générateur EM. Lors de son entrée dans la cavité, une fraction de la puissance réfléchi par le circulateur est à son tour polarisée de manière circulaire droite et absorbée par le plasma en résonance ECR, la fraction d'onde EM non absorbée à cette étape subissant de nouveau le même cycle de circulation jusqu'à ce que toute l'énergie EM soit absorbée par le plasma en résonance ECR. L'association d'un tel manchon couplé avec à un tel circulateur permet d'obtenir un rendement énergétique proche de l'unité dans toutes les configurations de fonctionnement du propulseur. Notons qu'un manchon peut être réalisé en grillage métallique fin et être donc léger.

[0032] Notons que l'amorçage du plasma n'est pas réalisé par ECR comme c'est communément le cas dans l'état de l'art des propulseurs à force diamagnétique, mais par micro-décharge à cathode creuse. Une fois que le plasma est amorcé et positionné dans le volume dit d'amorçage à la sortie de la buse d'injection, ce plasma est mis en résonance ECR via l'onde électromagnétique, ce qui multiplie d'un facteur 5 à 10 son indice de réfraction et rend alors possible l'utilisation de ce volume comme cavité résonante de l'onde électromagnétique accroissant alors le rendement énergétique. Cet indice de réfraction du milieu de résonance de l'onde EM, plus élevé que dans l'état de l'art, permet d'une part de réduire la longueur de la chambre de décharge, puisque l'amorçage du plasma et son entretien ne nécessitent plus que la longueur de la chambre de décharge soit égale à un nombre entier de demi longueur d'onde de l'onde EM dans le vide, et d'autre part d'utiliser un champ magnétique d'intensité plus faible, atteignable avec un simple aimant permanent, puisque une fréquence plus faible de l'onde EM peut être utilisée.

[0033] L'amorçage du plasma par micro-décharge à cathode creuse procure un amorçage systématique et quasi instantané quelles que soient les conditions opérationnelles, notamment de débit de gaz et de puissance EM, et donc accroît nettement la fiabilité du propulseur. Le propulseur selon l'invention appartient donc à une nouvelle catégorie de propulseur plasmique.

[0034] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en se référant aux dessins, sur lesquels :

- la figure 1 est une vue en coupe axiale d'un propul-

- seur plasmique selon l'invention ;
- la figure 2 est une vue agrandie d'une partie de la figure 1 représentant les lignes de champ du champ magnétique généré par un générateur du propulseur plasmique selon l'invention ;
- la figure 3 est un diagramme des étapes du procédé selon l'invention ;
- La figure 4 est une vue en coupe axiale d'un propulseur selon une variante de réalisation de l'invention ; et
- La figure 5 est un graphe représentant le champ magnétique le long de l'axe A-A du propulseur.

[0035] En référence à la figure 1, le propulseur plasmique 2 selon l'invention comporte un corps de support 4 supportant une chambre de décharge 6 débouchant sur une ouverture de sortie 48.

[0036] Le corps de support 4 est un corps creux amagnétique ouvert à chacune de ses extrémités 9, 11. Il comporte une cavité intérieure 14 cylindrique d'axe de révolution A-A, ci-après appelé axe prédéfini A-A.

[0037] Cette cavité 14 comporte un canal d'injection central 10 coaxial à l'axe prédéfini A-A. Ce canal d'injection central 10 est par exemple constitué par un conduit métallique magnétique. Il présente un diamètre extérieur inférieur au diamètre de la cavité 14 de sorte qu'il forme avec le corps de support 4, un canal d'injection périphérique 12 aménagé entre la paroi interne du corps de support 4 et la paroi externe du canal d'injection central 10.

[0038] En particulier, le canal d'injection central 10 présente un diamètre intérieur compris entre 0,5 et 2 mm, et de préférence compris entre 1 mm et 1,5 mm. Le canal d'injection périphérique 12 présente un diamètre extérieur compris entre 3 et 20 mm, et de préférence compris entre 6 mm et 12 mm, le diamètre intérieur du canal d'injection périphérique 12 étant le diamètre extérieur du canal d'injection central 10.

[0039] Dit autrement, le canal d'injection central 10 présente une section intérieure comprise entre 0,7 millimètres carrés et 3 millimètres carrés. En variante, le canal d'injection central 10 et le canal d'injection périphérique 12, présentent une section carrée.

[0040] Le canal d'injection central 10 est fixé au corps de support 4 par l'intermédiaire d'un bloc isolant 16 et d'une bague de serrage 20. En particulier, une portion du canal d'injection central 10 est emmanchée dans un trou traversant du bloc isolant 16. Le bloc isolant 16 est agencé et fixé dans la cavité 14 entre un épaulement 18 du corps de support 4 et une face d'appui 21 de la bague de serrage 20. La bague de serrage 20 est vissée sur le pourtour extérieur de l'extrémité 9 du corps de support 4.

[0041] Un premier joint torique 22 est interposé entre le bloc isolant 16 et l'épaulement 18. Un deuxième joint torique 24 est interposé entre le bloc isolant 16 et la face d'appui 21 de la bague de serrage 20.

[0042] Le canal d'injection central 10 et le canal d'injection périphérique 12 forment deux moyens d'injection de gaz propulsif dans la chambre 6, au sens de l'inven-

tion.

[0043] A cet effet, une extrémité du canal d'injection central 10 est reliée, par une conduite 28, à une source de gaz propulsif 30. Une ouverture 31 est aménagée dans le corps de support 4. Cette ouverture 31 débouche dans le canal d'injection périphérique 12. Cette ouverture 31 est reliée par une conduite 44 à la source de gaz propulsif 30 pour alimenter le canal d'injection périphérique 12 en gaz propulsif, lors du fonctionnement du propulseur plasmique dans un second mode de fonctionnement dit « arc-jet », comme décrit ci-après.

[0044] Cette source 30 est munie d'un dispositif 32 de commande du débit du gaz.

[0045] Dans un premier mode de fonctionnement dit « classique », le débit du gaz propulsif est compris entre 0,1 gramme par heure et 40 gramme par heure.

[0046] Dans un second mode de fonctionnement dit « arc jet », le débit du gaz propulsif est compris entre 1 gramme par heure et 400 gramme par heure, et de préférence compris entre 10 gramme par heure et 400 gramme par heure.

[0047] L'autre extrémité du canal d'injection central 10 comprend une pointe 36, par exemple, formée par un biseautage de l'arrête annulaire du canal.

[0048] La pointe 36 s'étend à l'extérieur du corps de support 4, dans la chambre de décharge 6. Elle contribue à l'ionisation du gaz propulsif par un effet appelé « effet de pointe ». L'effet de pointe permet de concentrer le champ magnétique dans un volume de la chambre de décharge, appelé volume d'amorçage. Il ne s'agit pas d'une décharge par ionisation Corona, laquelle concentre les lignes du champ électrique, mais d'une micro-décharge à cathode creuse entre les deux maxima mentionnés d'intensité du champ magnétique à proximité immédiate d'une sortie d'une buse d'injection.

[0049] Il est à noter que la présence d'un maximum local de l'intensité du champ magnétique dans le volume d'amorçage et donc à l'intérieur du tube d'injection est possible pour deux raisons. Premièrement, parce que le présent propulseur à force diamagnétique constitue une cavité ouverte pour le champ magnétique, ou plus précisément un système coaxial ouvert à une extrémité. Deuxièmement, parce que le circuit magnétique complexe du propulseur comporte des pièces dont le rôle est justement de canaliser une grande partie du champ magnétique dans ce volume via notamment le canal d'injection 10 en matériau magnétique et surtout via sa pointe 36.

[0050] Dans le présent exemple, le volume d'amorçage est compris entre 0,5 mm³ et 5 mm³. Il est disposé de 12 mm à 15 mm en aval de la pointe 36 du canal d'injection central 10.

[0051] Le canal d'injection central 10 est, en outre, propre à émettre des ondes électromagnétiques en particulier des microondes. Pour cela, le canal d'injection central 10 est réalisé dans un matériau conducteur électrique et est connecté électriquement à un générateur d'onde électromagnétique 38 par l'intermédiaire d'un connec-

teur 40 fixé, par exemple par vissage, au corps de support 4. Le connecteur 40 est, par exemple, un connecteur de type SMA (Marque déposée).

[0052] Le générateur d'onde électromagnétique 38 est apte à irradier le gaz propulsif présent dans la chambre de décharge 6 avec au moins une onde électromagnétique dont le champ électrique tourne dans le même sens et à la même fréquence que les électrons magnétisés du gaz propulsif, de manière à obtenir une absorption totale de l'énergie électromagnétique par les électrons ECR. Plus précisément, le champ électrique a une polarisation circulaire droite et une fréquence égale à la fréquence de résonance gyromagnétique des électrons du gaz propulsif magnétisés par le générateur de champ magnétique.

[0053] Le générateur d'onde électromagnétique 38 est muni d'un dispositif 42 de modulation de puissance électromagnétique. Il est propre à générer des ondes électromagnétiques de puissance comprise entre 0,5 et 300 Watts, et de préférence comprise entre 0,5 et 30 Watts dans un premier mode de fonctionnement dit « classique », et des ondes électromagnétiques de puissance comprise entre 50 et 500 Watts, et de préférence comprise entre 200 et 500 Watts dans le second mode de fonctionnement dit « arc jet ».

[0054] La puissance des ondes électromagnétiques est suffisamment importante pour obtenir l'ECR et éjecter les électrons avant qu'ils n'aient le temps de rayonner, mais pas trop élevée de manière à éviter tout rayonnement de ces électrons avant éjection, ce qui permet d'éviter tout échauffement par rayonnement et de conserver un rendement énergétique optimal. La puissance électromagnétique que peut absorber le propulseur sans dégrader le rendement énergétique est liée à la taille du rayon de Larmor R_b des électrons dans le plasma. Celui-ci doit rester sensiblement inférieur au rayon de la cavité pour que les électrons ne percutent à aucun moment la paroi interne du propulseur (plasma dit en "lévitation magnétique"). Toutefois, pour un électron, de charge électrique q_e et de masse m_e , dans un champ magnétique B_0 de l'ordre de 0,1 Tesla (1000 gauss), un rayon de giration R_b de 1 millimètre correspondrait à une vitesse des électrons $v_e = R_b \cdot q_e \cdot B_0 / m_e = 1,76 \cdot 10^7$ m/s dans une direction perpendiculaire au champ magnétique. Expressée en électronvolts, l'énergie cinétique correspondant à la rotation des électrons serait alors de l'ordre de $0,92 \cdot 10^5$ eV. Comparée à l'énergie d'ionisation du gaz de l'ordre de 10 à 20 eV par exemple, une telle limite paraît difficilement atteignable avec les puissances électromagnétiques de quelques dizaines à quelques centaines de watts où l'on se situe.

[0055] On remarquera également que dans un processus adiabatique, l'accélération des électrons dans la tuyère conserve le moment magnétique $\mu = q_e^2 \cdot R_b^2 \cdot B_0 / 2 m_e$. Une diminution de B_0 d'un facteur 10 par exemple n'induirait donc qu'un accroissement d'un facteur 3 environ du rayon de giration électronique R_b .

[0056] Enfin, si une puissance électromagnétique

beaucoup plus importante devait être utilisée, on peut sans en augmenter les dimensions, augmenter la limite supérieure de fonctionnement du moteur, en accroissant corrélativement le champ magnétique B_0 et la fréquence de l'onde EM excitatrice. Des aimants environ dix fois plus puissants que ceux utilisés dans nos expériences sont déjà disponibles sur le marché.

[0057] La chambre de décharge 6 comporte un générateur du champ magnétique 46 fixé, par exemple par vissage, à l'extrémité 11 du corps de support 4. Ce générateur 46 comprend une source 50 de champ magnétique ayant deux pôles, une rondelle 52 solidaire d'une surface d'extrémité constituant un pôle de ladite source 50, un écrou de serrage 54 en contact avec la rondelle 52, et une rondelle 58 solidaire d'une surface d'extrémité constituant l'autre pôle de ladite source 50.

[0058] La chambre de décharge 6 comprend en outre une ouverture de sortie 48 du plasma.

[0059] La source de champ magnétique 50 est constituée, par exemple, par un aimant permanent de forme torique coaxial à l'axe prédéfini A-A. Pour simplifier la description, elle est appelée ci-après aimant 50.

[0060] Le champ magnétique émis par l'aimant 50 présente une intensité comprise entre 0.05 Tesla et 1 Tesla, et de préférence comprise entre 0.085 Tesla et 0.2 Tesla.

[0061] La rondelle 52 et l'écrou de serrage 54 forment un premier élément magnétique et la rondelle 58 forme un second élément magnétique au sens de l'invention.

[0062] Les rondelles 52, 58 sont chacune solidaires d'une face annulaire de l'aimant 50. La rondelle 52 est en outre fixée, par exemple par vissage, sur le pourtour extérieur de l'extrémité 11 du corps de support.

[0063] L'écrou de serrage 54 comporte une protubérance 62 sensiblement tronconique d'axe de révolution, l'axe prédéfini A-A. La protubérance 62 s'étend vers le canal d'injection central 10.

[0064] La rondelle 52, l'écrou de serrage 54 et la rondelle 58 sont constitués d'acier paramagnétique, et de préférence d'acier ferromagnétique.

[0065] En référence à la figure 2, comme la rondelle 52 et l'écrou de serrage 54 sont propres à conduire le champ magnétique émis par l'aimant permanent 50, la surface d'extrémité de la protubérance 62 la plus proche du canal d'injection central 10 forme un premier pôle magnétique 64 disposé en amont de la buse d'injection 65 en considérant le sens F1 d'écoulement du gaz propulsif, et à une première distance D1 de l'axe prédéfini A-A.

[0066] Comme la rondelle 58 est également propre à conduire le champ magnétique, la surface d'extrémité de la rondelle 58 la plus proche du canal d'injection central 10 forme un second pôle magnétique 66 disposé en aval de la buse d'injection 65 du canal d'injection central, en considérant le sens F1, et à une seconde distance D2 de l'axe prédéfini A-A; ladite seconde distance D2 étant plus longue que la première distance D1.

[0067] Les lignes de champ 68 du champ émis par le générateur de champ magnétique 46 présentent une forme de tuyère. Elles coupent la buse d'injection 65 du

canal d'injection central 10 et forment un angle compris entre 10° et 70° avec l'axe prédéfini A-A. Autrement dit, le champ magnétique émis par le générateur de champ magnétique 46 diverge. Au niveau de l'axe prédéfini A-A, le gradient de champ magnétique est parallèle à l'axe prédéfini A-A. De plus, ce gradient de champ magnétique est négatif de l'amont vers l'aval en considérant la direction d'éjection du gaz propulsif.

[0068] Le champ magnétique présente en outre un premier maximum local d'intensité du champ magnétique au niveau de la buse d'injection 65 du canal d'injection central. Cette intensité est suffisante pour ioniser complètement, par résonance ECR, le gaz propulsif sortant de ladite la buse d'injection 65. Cette intensité est par exemple comprise entre 0,087 Tesla (ECR pour une fréquence microonde de 2,45 GHz), et environ 0,5 Tesla (limite supérieure atteignable avec des aimants permanents). La forme particulière des lignes de champ 68 conduit à ce que la surface ECR soit très proche dudit premier maximum local d'intensité et à ce que cette surface ECR enveloppe l'extrémité de sortie 165 de la buse d'injection 65. Pour une fréquence d'onde EM de 2,45 GHz, la surface ECR est située à une distance de l'ordre du millimètre en aval de l'extrémité de sortie 165.

[0069] Dans cette demande de brevet, on appelle « surface ECR » une région de l'espace où la fréquence de giration des électrons libres dans le champ magnétique local, est sensiblement égale à la fréquence de l'onde électromagnétique excitatrice.

[0070] Le générateur de champ magnétique 46 est en outre apte à accélérer vers l'ouverture de sortie 48, par une force diamagnétique, le plasma amorcé au niveau de la buse d'injection 65, ledit plasma éjecté dudit propulseur étant électriquement neutre. Il est à noter que l'un des principaux intérêts des sources de plasma ECR réside dans la possibilité d'agir uniquement sur les électrons libres du plasma et pas sur les ions, ce qui ne nécessite que des champs magnétiques relativement réduits, environ 0,1 Teslas (1000 Gauss) dans notre exemple. La neutralité électrique du plasma est assurée très efficacement par le champ électrique ambipolaire, ou champ de charge d'espace, qui apparaît immédiatement au sein du plasma et contre tout déséquilibre entre les populations d'ions positifs et d'électrons. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser de neutraliseur. En l'absence de champ électrique appliqué par une éventuelle grille accélératrice, le champ électrique ambipolaire n'est pas perturbé et les électrons soumis à la seule force diamagnétique vont alors entraîner avec eux dans leur mouvement les ions positifs non magnétisés (d'où le caractère dit « diamagnétique » du plasma). Réciproquement, en sortie du propulseur, les électrons reliés aux ions par la charge d'espace vont pouvoir échapper au champ magnétique résiduel du fait de l'inertie de ces ions préalablement accélérés à l'intérieur du propulseur. Contrairement aux autres propulseurs de l'état de l'art, l'accélération du plasma dans la tuyère magnétique ne nécessite donc pas de dépense de puissance électrique supplé-

mentaire dans le cas où, comme dans cet exemple, la tuyère magnétique est générée par de simples aimants permanents. Cette économie de puissance électrique est un atout important pour une application spatiale.

5 [0071] Le canal d'injection central 10 débouche au début de la partie divergente du champ magnétique, en amont de la zone de résonance ECR.

[0072] Avantageusement, le canal d'injection central 10 sert à la fois d'antenne d'émission micro-onde 39 à l'intérieur de la chambre de décharge 6 et de buse d'injection 65 pour l'injection du gaz à ioniser. La buse d'injection 65 comprend une extrémité de sortie 165.

[0073] L'aimant 50, la rondelle 52, l'écrou de serrage 54 et la rondelle 58 forment la chambre de décharge 6. Celle-ci présente un diamètre compris entre 6 mm et 60 mm, et de préférence compris entre 12 mm et 30 mm. La chambre de décharge 6 présente ainsi une section intérieure comprise entre 0.7 centimètres carré et 30 centimètres carré.

20 [0074] La longueur, définie selon l'axe prédéfini A-A, de la cavité intérieure 14 de la chambre de décharge 6 est de 5 à 10 fois inférieure à la demi-longueur d'onde dans le vide de l'onde électromagnétique émise par le générateur d'onde électromagnétique 38.

25 [0075] Avantageusement, la chambre de décharge, présente une très faible dimension.

[0076] Le propulseur plasmique 2 comporte, en outre, une bride de fixation 70 et un contre-écrou 72 vissés sur le pourtour extérieur du corps de support 4. Un joint torique 74 est disposé en outre entre la bride de fixation 70 et le contre-écrou 72.

[0077] Avantageusement, le propulseur plasmique selon l'invention peut être utilisé au moyen d'aimants permanents ne consommant pas d'énergie.

35 [0078] Avantageusement, la chambre de décharge forme une cavité résonante haute fréquence ayant des dimensions de l'ordre du centimètre avec une fréquence relativement basse de l'ordre de 2,3 à 2,8 GHz. Ceci est possible car l'indice optique du plasma à l'ECR est très élevé, ce qui permet d'avoir une longueur d'onde relativement courte même avec une fréquence relativement basse. Comme la fréquence ECR est proportionnelle au champ magnétique, une cavité de cette taille est donc possible même avec un champ magnétique de l'ordre de 0,08 à 0,1 T, facilement réalisable par des aimants permanents annulaires de petites dimensions.

[0079] Le procédé de génération d'une poussée propulsive selon l'invention est réalisé au moyen d'un propulseur plasmique décrit ci-dessus. Dans le premier mode de fonctionnement dit « classique », il comporte, en référence à la figure 3, les étapes suivantes :

- génération 90 d'un champ magnétique 63 ;
- émission 100 des microondes par le générateur d'onde électromagnétique 38 ;
- injection 104 du gaz propulsif dans la chambre de décharge 6 par l'intermédiaire du canal d'injection central 10 ;

- amorçage 101 du plasma ;
- entretien 103 du plasma par ECR
- modulation 102 de la puissance de l'onde électromagnétique émis par le générateur d'onde électromagnétique 38, par le dispositif de modulation 42 ;
- réglage 106 du débit de gaz propulsif dans le canal d'injection central 10 par le dispositif de commande 32.

[0080] Avantageusement, l'étape d'émission 100 est mise en oeuvre avant l'étape d'injection 104 lorsque l'utilisateur souhaite économiser le gaz propulsif, et l'étape d'injection 104 est mise en oeuvre avant l'étape d'émission 100 lorsque l'utilisateur souhaite économiser de l'électricité.

[0081] Dans le second mode de fonctionnement dit « arc-jet », il comporte en outre les étapes suivantes :

- injection 108 de gaz propulsif supplémentaire par l'intermédiaire du canal d'injection périphérique 12 ;
- réglage 110 du débit de gaz propulsif dans le canal d'injection périphérique 12 par le dispositif de commande 32 ; et
- modulation, avec le dispositif de modulation 42 de la puissance des microondes émises par le générateur d'onde électromagnétique 38, pour fonctionner dans le second mode de fonctionnement dit « arc jet ».

[0082] Avantageusement, l'injection axiale du gaz propulsif est complétée dans ce mode de fonctionnement par une injection de gaz autour du conduit d'injection central. Celle-ci est généralement utilisée lors d'un fonctionnement temporaire à forte poussée du propulseur ici appelé second mode de fonctionnement dit « arc-jet ». Dans ce cas, la montée en pression de la chambre de décharge 6 permet d'y allumer un plasma de type arc électrique - très dense et très chaud sous l'effet de l'injection de microondes de fortes puissances (supérieure à une centaine de watts). Ceci permet de faire fonctionner le propulseur plasmique avec des poussées beaucoup plus importantes - de l'ordre de plusieurs centaines de milli-newtons, mais moyennant une dissipation calorifique beaucoup plus importante et un rendement énergétique plus réduit.

[0083] Avantageusement, il est possible d'optimiser, par exemple, sur l'ensemble de la mission, à la fois la consommation de gaz et celle d'énergie, en jouant sur une plage de réglage du débit de gaz dans le canal d'injection central et sur une plage de réglage de la puissance des ondes électromagnétiques, les deux faisant varier différemment l'impulsion spécifique et la poussée du propulseur, et le cas échéant, en jouant, sur une plage de réglage du débit de gaz dans le canal périphérique et sur une plage de réglage de la puissance des ondes électromagnétiques.

[0084] Avantageusement, il est possible d'utiliser chaque mode de propulsion indépendamment ou en combi-

naison, une combinaison permettant, par exemple, de réaliser des réglages fins de la poussée totale, même pour de fortes amplitudes de cette poussée.

[0085] Selon la variante de réalisation illustrée sur la figure 4, le propulseur plasmique 120 comporte en outre d'une part un circulateur 80 connecté au générateur d'onde électromagnétique 38 et au connecteur 40 vissé sur le corps de support 4 et d'autre part un manchon cylindrique 85 conducteur électrique, disposé en aval du plan de sortie du propulseur plasmique 120.

[0086] Le circulateur 80 est un dispositif, généralement en ferrite, qui est placé dans un circuit microonde pour protéger le générateur électromagnétique 38 ou un éventuel amplificateur contre un retour d'ondes EM, par exemple réfléchies par le plasma (qui est pour le générateur d'onde EM, la charge à irradier). Le flux d'ondes EM qui traverse le circulateur 80 en direction du plasma n'est pas absorbé par le circulateur. Le flux réfléchi en direction du générateur d'onde EM tourne dans le circulateur 80 et repart en direction du plasma de sorte que le générateur électromagnétique 38 est protégé et qu'il n'y a pas de perte de flux d'ondes EM par réflexion vers l'amont.

[0087] Le manchon 85 présente un diamètre supérieur au diamètre de l'aimant permanent 50 et un rebord 86 fixé contre la rondelle 58 du générateur de champ magnétique 46. En particulier, le manchon 85 est, par exemple, un tronçon de guide d'onde circulaire de diamètre égal à 1/2 longueur d'onde et de longueur égale à 1/4 ou 3/4 de longueur d'onde de l'onde EM dans le vide. Le manchon 85 bloque la propagation de l'onde EM qui autrement rayonnerait dans l'espace libre par diffraction à partir de l'orifice de sortie du propulseur. Au lieu d'être émis dans l'espace libre, le flux d'ondes EM hyperfréquence est ainsi réfléchi vers le plasma à l'intérieur du propulseur et sa partie non absorbée par le plasma se dirige vers le circulateur 80. Le circulateur 80 renvoie alors à son tour ce flux rétrograde vers le propulseur plasmique 120, et ainsi de suite... jusqu'à absorption complète du flux d'ondes EM par le plasma.

[0088] La figure 5 représente la variation du champ magnétique généré par le générateur 46 par rapport à la distance au plan de sortie D-D du propulseur plasmique le long de l'axe prédéfini A-A. Le zéro de l'axe des abscisses définit sur cette figure le plan de sortie D-D. Comme visible sur la figure 2, le plan de sortie est le plan parallèle au plan médian de la bride de fixation 70 situé au niveau de l'ouverture de sortie 48.

[0089] Comme visible sur cette figure, le champ magnétique présente un premier maximum local, A, et un deuxième maximum local, C, situé à l'intérieur de la buse d'injection 65, ainsi qu'un minimum local situé entre le premier maximum local A et le deuxième maximum local C.

[0090] Le premier maximum local A est situé à l'extrémité de sortie 165 de la buse d'injection 165. Le premier maximum local A est suffisant pour ioniser, par résonance cyclotronique des électrons du gaz propulsif sous l'effet de ladite onde électromagnétique, le gaz propulsif sor-

tant de ladite buse d'injection 65 .

[0091] Le premier maximum local A a une intensité supérieure à la valeur seuil B_{ECR} nécessaire pour obtenir une résonance cyclotronique définie par la formule suivante :

$$B_{ECR} = 2 \cdot \pi \cdot f_{ECR} \cdot m_e / q_e ,$$

[0092] Dans laquelle

- m_e est la masse d'un électron,
- q_e est la charge électrique d'un électron,
- f_{ECR} est la fréquence de résonance gyromagnétique.

[0093] Le générateur de champ magnétique 50 est apte à accélérer vers l'ouverture de sortie 48 par la force diamagnétique, les électrons libres du plasma amorcé au niveau de la buse d'injection (65), les ions positifs, non magnétisés, suivant ces électrons libres du fait du champ électrique ambipolaire, ou champ de charge d'espace, qui apparaît quasi immédiatement au sein du plasma et s'oppose à tout déséquilibre entre les populations d'ions positifs et d'électrons, ce champ électrique, qui n'est perturbé par aucun champ électrique appliqué, assurant de manière très efficace la neutralité électrique du plasma éjecté dudit propulseur.

[0094] La pointe 36 du moyen d'injection 10 permet, en y concentrant les lignes de champ magnétique, d'obtenir à partir du générateur de champ magnétique 50, d'une part le premier maximum local de l'intensité A, et d'autre part une micro-décharge à cathode creuse, entre le premier maximal local A et le minimum local B de l'intensité du champ magnétique. Cette micro-décharge est suffisante pour ioniser au moins une partie du gaz propulsif présent dans ladite buse d'injection 65 quel que soit son débit. Le générateur de champ magnétique 50 comprend par exemple des aimants permanents.

Revendications

1. Propulseur plasmique (2,120) comportant une chambre de décharge (6) comprenant une cavité intérieure (14) et une ouverture de sortie (48) ; au moins un moyen d'injection (10, 12) comprenant une buse d'injection (65) apte à injecter dans la chambre de décharge (6) un gaz propulsif selon un axe prédéfini (A-A) ; ladite buse d'injection (65) ayant une extrémité de sortie (165) ; un générateur de champ magnétique (50, 52, 54, 58) apte à mettre en rotation gyromagnétique des électrons du gaz propulsif présent dans la chambre de décharge (6) ; et un générateur d'onde électromagnétique (38) apte à irradier le gaz propulsif présent dans la chambre de décharge (6) par génération d'au moins une onde électro-

magnétique dont le champ électrique a une polarisation circulaire droite et une fréquence égale à la fréquence, f_{ECR} , de résonance gyromagnétique des électrons du gaz propulsif magnétisés par ledit générateur de champ magnétique (50, 52, 54, 58),

- ledit générateur de champ magnétique (50, 52, 54, 58) étant apte :

o d'une part, à générer un champ magnétique ayant des lignes de champ (68) qui déterminent une surface iso-champ, dite « surface ECR », d'intensité égale à celle permettant une résonance cyclotronique des électrons sous l'effet de ladite onde électromagnétique ;

o d'autre part, à donner auxdites lignes de champ (68) la forme d'une tuyère de manière à générer une force propulsive diamagnétique ;

- ledit moyen d'injection (10) étant réalisé dans un matériau conducteur électrique et étant connecté électriquement au générateur d'onde électromagnétique (38) de manière à fonctionner également comme une antenne électromagnétique (39) émettant ladite onde électromagnétique dans le gaz propulsif à la sortie de ladite buse d'injection (65) ;

dans lequel:

- ledit générateur de champ magnétique (50, 52, 54, 58) est apte :

o à générer un champ magnétique:

■ produisant une surface ECR enveloppant l'extrémité de sortie (165) de ladite buse d'injection (65), le volume délimité par cette surface ECR étant la cavité de résonance de l'onde électromagnétique ;

■ ayant à l'intérieur de la buse d'injection (65) et à l'extrémité de sortie (165) de la buse d'injection (65), un premier maximum local (A) de l'intensité ;

■ ayant un deuxième maximum local (C) de l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de la buse d'injection (65), séparé du premier maximum local (A) par un minimum local (B) de l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de ladite buse d'injection (65) ;

- ledit moyen d'injection (10) :

o est réalisé dans un matériau conducteur

- magnétique, permettant d'obtenir à l'intérieur de ce dernier, ledit deuxième maximum local (C) de l'intensité du champ magnétique ;
 ° comprend, à l'extrémité aval de ladite buse d'injection (65), un canal d'injection (10) de diamètre extérieur strictement compris entre 0,5 mm et 3 mm.
2. Propulseur plasmique (2, 120) selon la revendication précédente, dans lequel le générateur de champ magnétique (50, 52, 54, 58) comprend comme source de champ magnétique au moins un aimant permanent (50) de forme torique agencé de façon coaxiale à l'axe prédéfini (A-A) et ayant un premier pôle magnétique (64) et un second pôle magnétique (66), un premier élément magnétique (52, 54) solidaire du premier pôle magnétique (64) et un deuxième élément magnétique (58) solidaire du second pôle magnétique (66), lesdits premier (64) et second (66) pôles magnétiques étant disposés à une première distance (D1) et respectivement une seconde distance (D2) de l'axe prédéfini (A-A); la seconde distance (D2) étant plus longue que la première distance (D1), le premier pôle magnétique (64) et le second pôle magnétique (66) étant disposés en amont et respectivement en aval de la buse d'injection (65) en considérant le sens (F1) d'écoulement du gaz propulsif, les lignes de champ (68) coupant la buse d'injection (65) et formant un angle compris entre 10 ° et 70 ° avec ledit axe prédéfini (A-A).
 3. Propulseur plasmique (2, 120) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la longueur, définie selon l'axe prédéfini (A-A), de la cavité intérieure (14) de la chambre de décharge (6) est de 5 à 10 fois inférieure à la demi-longueur d'onde de ladite onde électromagnétique dans le vide, la chambre de décharge (6) présentant une section intérieure comprise entre 0.7 centimètres carré et 30 centimètres carré ; dans lequel le canal d'injection central (10) a une section intérieure comprise entre 0.7 millimètres carrés et 3 millimètres carrés.
 4. Propulseur plasmique (2, 120) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les intensités de champ magnétique desdits premier maximum local (A), minimum local (B) et deuxième maximum local (C) sont respectivement d'environ 0,18 Tesla, 0,01 Tesla et 0,05 Tesla.
 5. Propulseur plasmique (2, 120) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ladite onde électromagnétique est apte à se propager selon un axe parallèle à l'axe prédéfini (A-A) et dans lequel, au niveau de l'axe prédéfini (A-A), le gradient de champ magnétique est parallèle à l'axe prédéfini (A-A) ; ledit gradient de champ magnétique étant négatif de l'amont vers l'aval selon une direction défini par la direction d'éjection du gaz propulsif.
 6. Propulseur plasmique (2, 120) selon l'une des revendications précédentes, qui comprend un dispositif (42) de modulation de la puissance de l'onde électromagnétique et un dispositif (32) de commande du débit du gaz propulsif, ladite puissance de l'onde électromagnétique étant comprise entre 0.5 watt et 300 watts, et de préférence entre 0.5 watt et 30 watts dans un premier mode de fonctionnement.
 7. Propulseur plasmique (120) selon l'une des revendications précédentes, qui comporte d'une part un circulateur (80), disposé à la sortie dudit générateur (38) d'onde électromagnétique et d'autre part un manchon cylindrique (85) conducteur électrique, disposé en aval du plan défini par l'ouverture de sortie (48) dit plan de sortie (D-D) du propulseur plasmique (120), dont le diamètre est sensiblement égal au quart de la longueur d'onde de l'onde électromagnétique et dont la longueur est sensiblement égale aux trois quarts de la longueur d'onde de l'onde électromagnétique.
 8. Propulseur plasmique (2, 120) selon l'une des revendications précédentes, comprenant deux moyens d'injection (10, 12) coaxiaux à l'axe (A-A), l'un alimentant en gaz à ioniser la surface ECR, et l'autre augmentant la poussée par un débit de gaz et un fonctionnement arc-jet.
 9. Procédé pour la génération d'une poussée propulsive au moyen d'un propulseur plasmique (2, 120) comportant les étapes suivantes :
 - injection (104), dans une chambre de décharge (6) comprenant une cavité intérieure (14) et une ouverture de sortie (48), à l'aide d'au moins un moyen d'injection (10, 12) comprenant une extrémité de sortie appelée buse d'injection (65), d'un gaz propulsif selon un axe prédéfini (A-A) ;
 - génération (90), à l'aide d'un générateur de champ magnétique (50, 52, 54, 58), d'un champ magnétique (63) apte à mettre en rotation gyromagnétique des électrons du gaz propulsif présent dans la chambre de décharge (6), ladite génération (90) de champ magnétique étant telle que :
 - ° d'une part, le champ magnétique a des lignes de champ (68) qui déterminent une surface iso-champ, dite surface ECR, d'intensité égale à celle permettant une résonance cyclotronique des électrons sous l'effet de ladite onde électromagnétique ;
 - ° d'autre part, le champ magnétique don-

nant auxdites lignes de champs la forme d'une tuyère de manière à générer une force diamagnétique ;

- émission (100) dans le gaz propulsif présent dans la chambre de décharge (6), à l'aide d'un générateur d'onde électromagnétique (38), d'au moins une onde électromagnétique dont le champ électrique a une polarisation circulaire droite et une fréquence égale à la fréquence, F_{ECR} , de résonance gyromagnétique des électrons du gaz propulsif magnétisés par ledit générateur de champ magnétique (50, 52, 54, 58), l'injection (104) du gaz propulsif et l'émission (100) de l'onde électromagnétique étant effectuées par un même moyen d'injection (10, 12) et au même endroit de la chambre de décharge, ledit moyen d'injection (10, 12) étant réalisé dans un matériau conducteur électrique et connecté électriquement au générateur d'onde électromagnétique (50, 52, 54, 58) pour émettre l'onde électromagnétique dans le gaz propulsif à la sortie du gaz de ladite buse d'injection (65), de manière à maximiser le taux d'ionisation du gaz propulsif en sortant ;
- amorçage (101) du plasma par ionisation du gaz propulsif ;
- entretien (103) du plasma par résonance cyclotronique des électrons ;

dans lequel:

- l'amorçage (101) du plasma est réalisé par micro-décharge à cathode creuse grâce au moyen d'injection (10) qui est en matériau magnétique et comprend, à l'extrémité aval de sa buse d'injection (65), un canal d'injection (10) de diamètre extérieur **strictement compris entre 0,5 mm et 3 mm**;
- ladite génération (90) de champ magnétique est telle que le champ magnétique a :

- ladite surface ECR qui enveloppe l'extrémité de sortie (165) de ladite buse d'injection (65), le volume délimité par cette surface ECR étant la cavité de résonance de l'onde électromagnétique ;
- un premier maximum local (A) de l'intensité situé à l'intérieur de la buse d'injection (65) et à l'extrémité de sortie (165) de la buse d'injection (65) ;
- un deuxième maximum local (C) de l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de la buse d'injection (65), séparé du premier maximum local (A) par un minimum local (B) de l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de ladite buse d'injection (65);

- l'entretien (103) du plasma par résonance cyclotronique des électrons est réalisé par résonance de l'onde électromagnétique dans le volume délimité par la surface (ECR),

10. Procédé selon la revendication précédente, dans lequel le propulseur plasmique (2, 120) comporte en outre un dispositif (42) de modulation de la puissance de l'onde électromagnétique, un dispositif (32) de commande du débit de gaz, un canal d'injection périphérique (12) apte à injecter du gaz propulsif dans la chambre de décharge (6) ; et dans lequel le procédé comporte les étapes suivantes :

- injection (108) de gaz propulsif dans la chambre de décharge (6) par l'intermédiaire du canal d'injection périphérique (12) ;
- réglage (110) du débit de gaz propulsif injecté dans la chambre de décharge (6) par l'intermédiaire du canal d'injection périphérique (12) ;
- modulation (112) de la puissance de l'onde électromagnétique.

25 Patentansprüche

1. Plasmatriebwerk (2, 120), umfassend eine Entladungskammer (6), die einen inneren Hohlraum (14) und eine Austrittsöffnung (48) aufweist; mindestens ein Einspritzmittel (10, 12), das eine Einspritzdüse (65) aufweist, die geeignet ist, ein Treibgas entlang einer vorgegebenen Achse (A-A) in die Entladungskammer (6) einzuspritzen; wobei die Einspritzdüse (65) ein Auslassende (165) aufweist; einen Magnetfeldgenerator (50, 52, 54, 58), der geeignet ist, Elektronen des Treibgases, die in der Entladungskammer (6) vorhanden sind, in gyromagnetische Drehung zu versetzen; und einen elektromagnetischen Wellengenerator (38), der geeignet ist, das Treibgas, das in der Entladungskammer (6) vorhanden ist, durch Erzeugen von mindestens einer elektromagnetischen Welle, deren elektrisches Feld eine rechtsdrehende Zirkularpolarisation und eine Frequenz aufweist, die gleich der gyromagnetischen Resonanzfrequenz f_{ECR} der Elektronen des Treibgases ist, die durch den Magnetfeldgenerator (50, 52, 54, 58) magnetisiert werden, zu bestrahlen,

- wobei der Magnetfeldgenerator (50, 52, 54, 58) geeignet ist:

- einerseits ein Magnetfeld zu erzeugen, das Feldlinien (68) aufweist, die eine Isofeldfläche, die "EZR-Fläche", von gleicher Intensität wie jene, die eine Zyklotronresonanz der Elektronen unter der Wirkung der elektromagnetischen Welle ermöglicht, bestimmen;

- andererseits den Feldlinien (68) die Form einer Düse derart zu verleihen, dass eine diamagnetische Antriebskraft erzeugt wird;
- wobei das Einspritzmittel (10) aus einem elektrisch leitenden Material hergestellt ist und elektrisch an dem elektromagnetischen Wellengenerator (38) derart angeschlossen ist, dass es auch als eine elektromagnetische Antenne (39) funktioniert, die die elektromagnetische Welle am Ausgang der Einspritzdüse (65) in das Treibgas emittiert;
- wobei
- der Magnetfeldgenerator (50, 52, 54, 58) geeignet ist:
- ein Magnetfeld zu erzeugen, das
- eine EZR-Fläche erzeugt, die das Auslassende (165) der Einspritzdüse (65) umhüllt, wobei das Volumen, das von dieser EZR-Fläche begrenzt ist, der Resonanzhohlraum der elektromagnetischen Welle ist;
- im Innern der Einspritzdüse (65) und am Auslassende (165) der Einspritzdüse (65) ein erstes lokales Maximum (A) der Intensität aufweist;
- ein zweites lokales Maximum (C) der Intensität des Magnetfelds im Inneren der Einspritzdüse (65) aufweist, das von dem ersten lokalen Maximum (A) durch ein lokales Minimum (B) der Intensität des Magnetfelds im Inneren der Einspritzdüse (65) getrennt ist;
- das Einspritzmittel (10):
- aus einem magnetischen leitenden Material hergestellt ist, das ermöglicht, im Inneren dieses Letzteren das zweite lokale Maximum (C) der Intensität des Magnetfelds zu erhalten;
- an dem nachgelagerten Ende der Einspritzdüse (65) einen Einspritzkanal (10) von einem Außendurchmesser aufweist, der unbedingt zwischen 0,5 mm und 3 mm beträgt.
2. Plasmatriebwerk (2, 120) nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei der Magnetfeldgenerator (50, 52, 54, 58) als Magnetfeldquelle mindestens einen Permanentmagneten (50) von torischer Form, der koaxial zu der vorgegebenen Achse (A-A) angeordnet ist und einen ersten Magnetpol (64) und einen zweiten Magnetpol (66) aufweist, ein erstes magnetisches Element (52, 54), das mit dem ersten Magnetpol (64) fest verbunden ist, und ein zweites magnetisches Element (58), das mit dem zweiten Magnetpol (66) fest verbunden ist, aufweist, wobei der erste (64) und zweite (66) Magnetpol jeweils in einem ersten Abstand (D1) und einem zweiten Abstand (D2) von der vorgegebenen Achse (A-A) angeordnet sind; wobei der zweite Abstand (D2) länger als der erste Abstand (D1) ist, wobei der erste Magnetpol (64) und der zweite Magnetpol (66) vorgelegt vor beziehungsweise nachgelagert nach der Einspritzdüse (65) unter Berücksichtigung der Strömungsrichtung (F1) des Treibgases angeordnet sind, wobei die Feldlinien (68) die Einspritzdüse (65) schneiden und einen Winkel, der zwischen 10° und 70° beträgt, mit der vorgegebenen Achse (A-A) bilden.
3. Plasmatriebwerk (2, 120) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Länge, die nach der vorgegebenen Achse (A-A) definiert ist, des inneren Hohlraums (14) der Entladungskammer (6) 5 bis 10 Mal niedriger als die halbe Wellenlänge der elektromagnetischen Welle im Vakuum ist, wobei die Entladungskammer (6) einen inneren Querschnitt aufweist, der zwischen 0,7 Quadratcentimetern und 30 Quadratcentimetern beträgt; wobei der mittlere Einspritzkanal (10) einen inneren Querschnitt aufweist, der zwischen 0,7 Quadratmillimetern und 3 Quadratmillimetern beträgt.
4. Plasmatriebwerk (2, 120) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Magnetfeldstärken des ersten lokalen Maximums (A), des lokalen Minimums (B) und des zweiten lokalen Maximums (C) jeweils etwa 0,18 Tesla, 0,01 Tesla und 0,05 Tesla betragen.
5. Plasmatriebwerk (2, 120) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die elektromagnetische Welle geeignet ist, sich entlang einer Achse parallel zu der vorgegebenen Achse (A-A) auszubreiten, und wobei an der vorgegebenen Achse (A-A) der Magnetfeldgradient parallel zu der vorgegebenen Achse (A-A) ist; wobei der Magnetfeldgradient von stromaufwärts in Richtung stromabwärts in einer Richtung, die durch die Ausstoßrichtung des Treibgases definiert ist, negativ ist.
6. Plasmatriebwerk (2, 120) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, der eine Vorrichtung (42) zum Modulieren der Leistung der elektromagnetischen Welle und eine Vorrichtung (32) zum Steuern des Durchsatzes des Treibgases aufweist, wobei die Leistung der elektromagnetischen Welle in einem ersten Betriebsmodus zwischen 0,5 Watt und 300 Watt und vorzugsweise zwischen 0,5 Watt und 30 Watt beträgt.

7. Plasmatriebwerk (120) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das einerseits einen Zirkulator (80), der am Ausgang des elektromagnetischen Wellengenerators (38) angeordnet ist, und andererseits eine elektrisch leitende zylindrische Muffe (85) aufweist, die nachgelagert nach der Ebene, die durch die Austrittsöffnung (48) des Plasmatriebwerks (120) definiert ist, die Austrittsebene (D-D) genannt wird, angeordnet ist, deren Durchmesser im Wesentlichen gleich dem Viertel der Wellenlänge der elektromagnetischen Welle ist und deren Länge im Wesentlichen gleich drei Vierteln der Wellenlänge der elektromagnetischen Welle ist. 5 10
8. Plasmatriebwerk (2, 120) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, umfassend zwei Einspritzmittel (10, 12), die coaxial zur Achse (A-A) sind, wobei das eine das zu ionisierende Gas der EZR-Fläche zuführt und das andere den Schub durch einen Durchsatz von Gas und einen Arcjet-Betriebsmodus erhöht. 15 20
9. Verfahren zur Erzeugung eines Antriebsschubs durch ein Plasmatriebwerk (2, 120), umfassend die folgenden Schritte: 25
- Einspritzen (104) eines Treibgases entlang einer vorgegebenen Achse (A-A) in eine Entladungskammer (6), die einen inneren Hohlraum (14) und eine Austrittsöffnung (48) aufweist, mit Hilfe von mindestens einem Einspritzmittel (10, 12), das ein Auslassende aufweist, das Einspritzdüse (65) genannt wird; 30
- Erzeugen (90) mittels eines Magnetfeldgenerators (50, 52, 54, 58) eines Magnetfelds (63), das geeignet ist, Elektronen des Treibgases, die in der Entladungskammer (6) vorhanden sind, in gyromagnetische Drehung zu versetzen, wobei das Erzeugen (90) des Magnetfelds derart ist, dass: 35 40
- o das Magnetfeld einerseits Feldlinien (68) aufweist, die eine Isosfeldfläche, die "EZR-Fläche", von gleicher Intensität wie jene, die eine Zyklotronresonanz der Elektronen unter der Wirkung der elektromagnetischen Welle ermöglicht, bestimmen, 45
- o das Magnetfeld andererseits den Feldlinien die Form einer Düse derart verleiht, dass eine diamagnetische Antriebskraft erzeugt wird; 50
- Emittieren (100) in das Treibgas, das in der Entladungskammer (6) vorhanden ist, mittels eines elektromagnetischen Wellengenerators (38) von mindestens einer elektromagnetischen Welle, deren elektrisches Feld eine rechtsdrehende Zirkularpolarisation und eine Frequenz 55

aufweist, die gleich der gyromagnetischen Resonanzfrequenz f_{ECR} der Elektronen des Treibgases ist, die durch den Magnetfeldgenerator (50, 52, 54, 58) magnetisiert werden, wobei das Einspritzen (104) des Treibgases und das Emittieren (100) der elektromagnetischen Welle durch ein gleiches Einspritzmittel (10, 12) und an der gleichen Stelle der Entladungskammer durchgeführt werden, wobei das Einspritzmittel (10, 12) aus einem elektrisch leitenden Material hergestellt ist und elektrisch an dem elektromagnetischen Wellengenerator (50, 52, 54, 58) angeschlossen ist, um die elektromagnetische Welle am Ausgang der Einspritzdüse (65) derart in das Treibgas zu emittieren, dass die Ionisationsrate des austretenden Treibgases maximiert wird; Zünden (101) des Plasmas durch Ionisieren des Treibgases; Aufrechterhalten (103) des Plasmas durch die Elektron-Zyklotron-Resonanz;

wobei

- das Zünden (101) des Plasmas durch Mikro-Entladung mit Hohlkathode dank des Einspritzmittels (10) durchgeführt wird, das aus magnetischem Material hergestellt ist und an dem nachgelagerten Ende der Einspritzdüse (65) einen Einspritzkanal (10) von einem Außendurchmesser aufweist, der unbedingt zwischen 0,5 mm und 3 mm beträgt;

- das Erzeugen (90) des Magnetfelds derart ist, dass das Magnetfeld:

die EZR-Fläche aufweist, die das Auslassende (165) der Einspritzdüse (65) umhüllt, wobei das Volumen, das von dieser EZR-Fläche begrenzt ist, der Resonanzhohlraum der elektromagnetischen Welle ist; ein erstes lokales Maximum (A) der Intensität aufweist, das im Inneren der Einspritzdüse (65) und am Auslassende (165) der Einspritzdüse (65) angeordnet ist; ein zweites lokales Maximum (C) der Intensität des Magnetfelds im Inneren der Einspritzdüse (65) aufweist, das von dem ersten lokalen Maximum (A) durch ein lokales Minimum (B) der Intensität des Magnetfelds im Inneren der Einspritzdüse (65) getrennt ist;

- das Aufrechterhalten (103) des Plasmas durch die Elektron-Zyklotron-Resonanz durch Resonanz der elektromagnetischen Welle in dem Volumen, das von der Fläche (EZR) begrenzt ist, durchgeführt wird.

10. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei das Plasmatriebwerk (2, 120) ferner eine Vorrichtung (42) zum Modulieren der Leistung der elektromagnetischen Welle, eine Vorrichtung (32) zum Steuern des Durchsatzes des Gases, einen peripheren Einspritzkanal (12) aufweist, der geeignet ist das Treibgas in die Entladungskammer (6) einzuspritzen; und wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

- Einspritzen (108) des Treibgases in die Entladungskammer (6) durch den peripheren Einspritzkanal (12);
- Einstellen (110) des Durchsatzes des Treibgases, das über den peripheren Einspritzkanal (12) in die Entladungskammer (6) eingespritzt wird;
- Modulieren (112) der Leistung der elektromagnetischen Welle.

Claims

1. Plasma thruster (2, 120) comprising a discharge chamber (6) comprising an internal cavity (14) and an outlet opening (48); at least one injection means (10, 12) comprising an injection nozzle (65) capable of injecting into the discharge chamber (6) a propellant gas along a predefined axis (A-A); said injection nozzle (65) having an outlet end (165); a magnetic field generator (50, 52, 54, 58) capable of setting electrons of the propellant gas present in the discharge chamber (6) in gyromagnetic rotation; and an electromagnetic wave generator (38) capable of irradiating the propellant gas present in the discharge chamber (6) by generating at least one electromagnetic wave the electric field of which has a right-hand circular polarization and a frequency equal to the frequency, F_{ECR} , of gyromagnetic resonance of the electrons of the propellant gas magnetized by said magnetic field generator (50, 52, 54, 58),

- said magnetic field generator (50, 52, 54, 58) is capable:

- on the one hand, of generating a magnetic field having field lines (68) which determine an iso-field surface, known as the "ECR surface", with an intensity equal to that allowing a cyclotron resonance of the electrons under the effect of said electromagnetic wave;
- on the other hand, of giving said field lines (68) the shape of a nozzle, so as to generate a diamagnetic propulsion force;

- said injection means (10) being produced from an electrically conductive material and being

electrically connected to the electromagnetic wave generator (38) so as to also operate as an electromagnetic antenna (39) emitting said electromagnetic wave into the propellant gas at the outlet of said injection nozzle (65); wherein said magnetic field generator (50, 52, 54, 58) is capable of generating a magnetic field

■ producing an ECR surface enveloping the outlet end (165) of said injection nozzle (65), the volume delimited by this ECR surface being the resonant cavity of the electromagnetic wave ;

■ having a first local maximum (A) of intensity inside the injection nozzle (65) and at the outlet end (165) of the injection nozzle (65);

■ having a second local maximum (C) of the intensity of the magnetic field inside the injection nozzle (65), separated from the first local maximum (A) by a local minimum (B) of the intensity of the magnetic field inside said injection nozzle (65);

- said injection means (10):

■ is produced from a magnetically conductive material, making it possible to achieve, inside the latter, said second local maximum (C) of the intensity of the magnetic field;

■ comprises, at the downstream end of said injection nozzle (65), an injection channel (10) with an external diameter strictly comprised between 0.5 and 3 mm.

2. Plasma thruster (2, 120) according to the previous claim, in which the magnetic field generator (50, 52, 54, 58) comprises as magnetic field source at least one permanent magnet (50) with a toric shape arranged coaxially to the predefined axis (A-A) and having a first magnetic pole (64) and a second magnetic pole (66), a first magnetic element (52, 54) integral with the first magnetic pole (64) and a second magnetic element (58) integral with the second magnetic pole (66), said first (64) and second (66) magnetic poles being arranged at a first distance (D1) and, respectively, a second distance (D2) from the predefined axis (A-A); the second distance (D2) being longer than the first distance (D1), the first magnetic pole (64) and the second magnetic pole (66) being arranged upstream and, respectively, downstream of the injection nozzle (65) with respect to the direction (F1) of flow of the propellant gas, the field lines (68) intersecting with the injection nozzle (65) and forming an angle comprised between 10° and 70° with said predefined axis (A-A).

3. Plasma thruster (2, 120) according to one of the previous claims, in which the length, defined along the predefined axis (A-A), of the internal cavity (14) of the discharge chamber (6) is 5 to 10 times smaller than the half-wavelength of said electromagnetic wave in a vacuum, the discharge chamber (6) having an internal cross-sectional area comprised between 0.7 square centimeters and 30 square centimeters; in which the central injection channel (10) has an internal cross-sectional area comprised between 0.7 square millimeters and 3 square millimeters. 5 10
4. Plasma thruster (2, 120) according to one of the previous claims, in which the magnetic field intensities of said first local maximum (A), local minimum (B) and second local maximum (C) are, respectively, approximately 0.18 tesla, 0.01 tesla and 0.05 tesla. 15
5. Plasma thruster (2, 120) according to one of the previous claims, in which said electromagnetic wave is capable of propagating along an axis parallel to the predefined axis (A-A) and in which, at the predefined axis (A-A), the magnetic field gradient is parallel to the predefined axis (A-A); said magnetic field gradient being negative from upstream to downstream in a direction defined by the direction in which the propellant gas is ejected. 20 25
6. Plasma thruster (2, 120) according to one of the previous claims, which comprises a device (42) for modulating the power of the electromagnetic wave and a device (32) for controlling the flow rate of the propellant gas, said power of the electromagnetic wave being comprised between 0.5 watts and 300 watts, and preferably between 0.5 watts and 30 watts in a first operating mode. 30 35
7. Plasma thruster (120) according to one of the previous claims, which comprises, on the one hand, a circulator (80), arranged at the outlet of said electromagnetic wave generator (38) and, on the other hand, an electrically conductive cylindrical sleeve (85), arranged downstream of the plane defined by the outlet opening (48) known as the outlet plane (D-D) of the plasma thruster (120), the diameter of which is substantially equal to one quarter of the wavelength of the electromagnetic wave and the length of which is substantially equal to three quarters of the wavelength of the electromagnetic wave. 40 45 50
8. Plasma thruster (2, 120) according to one of the previous claims, comprising two injection means (10, 12) coaxial to the axis (A-A), one supplying gas to be ionized to the ECR surface and the other increasing the thrust via a gas flow rate and an arcjet operation. 55
9. Method for generating a propulsion thrust by means

of a plasma thruster (2, 120) comprising the following steps:

■ injection (104), into a discharge chamber (6) comprising an internal cavity (14) and an outlet opening (48), using at least one injection means (10, 12) comprising an outlet end called the injection nozzle (65), of a propellant gas along a predefined axis (A-A);

- generation (90), using a magnetic field generator (50, 52, 54, 58), of a magnetic field (63) capable of setting electrons of the propellant gas present in the discharge chamber (6) in gyromagnetic rotation; said magnetic field generation (90) being such that:

◦ on the one hand, the magnetic field has field lines (68) which determine an iso-field surface, known as the ECR surface, with an intensity equal to that allowing a cyclotron resonance of the electrons under the effect of said electromagnetic wave,

◦ on the other hand, the magnetic field gives said field lines the shape of a nozzle, so as to generate a diamagnetic force;

- emission (100) into the propellant gas present in the discharge chamber (6), using an electromagnetic wave generator (38), of at least one electromagnetic wave the electric field of which has a right-hand circular polarization and a frequency equal to the gyromagnetic resonance frequency, F_{ECR} , of the electrons of the propellant gas magnetized by said magnetic field generator (50, 52, 54, 58), the injection (104) of the propellant gas and the emission (100) of the electromagnetic wave being carried out by one and the same injection means (10, 12) and at the same location in the discharge chamber, said injection means (10, 12) being produced from an electrically conductive material and electrically connected to the electromagnetic wave generator (50, 52, 54, 58) in order to emit the electromagnetic wave into the propellant gas at the outlet of the gas from said injection nozzle (65), so as to maximize the level of ionization of the propellant gas on exiting;

■ ignition (101) of the plasma by ionization of the propellant gas;

■ sustaining (103) of the plasma by cyclotron resonance of the electrons; wherein the ignition

(101) of the plasma is realized by microhollow cathode discharge using the injection means (10) which is made of magnetic material and comprises, at the downstream end of its injection nozzle (65), an injection channel (10) with an external diameter strictly comprised between 0.5 mm and 3 mm;

- said magnetic field generation (90) being such that the magnetic field has:

■ said ECR surface which envelops the outlet end (165) of said injection nozzle (65), the volume delimited by the ECR surface being the resonance cavity of the electromagnetic wave;

■ a first local maximum (A) of intensity situated inside the injection nozzle (65) and at the outlet end (165) of the injection nozzle (65);

■ a second local maximum (C) of the intensity of the magnetic field inside the injection nozzle (65), separated from the first local maximum (A) by a local minimum (B) of the intensity of the magnetic field inside said injection nozzle (65);

- the sustaining (103) of the plasma by cyclotron resonance of the electrons being realized by resonance of the electromagnetic wave in the volume delimited by the ECR surface.

10. Method according to the previous claim, in which the plasma thruster (2, 120) moreover comprises a device (42) for modulating the power of the electromagnetic wave, a device (32) for controlling the gas flow rate, a peripheral injection channel (12) capable of injecting the propellant gas into the discharge chamber (6); and in which the method comprises the following steps:

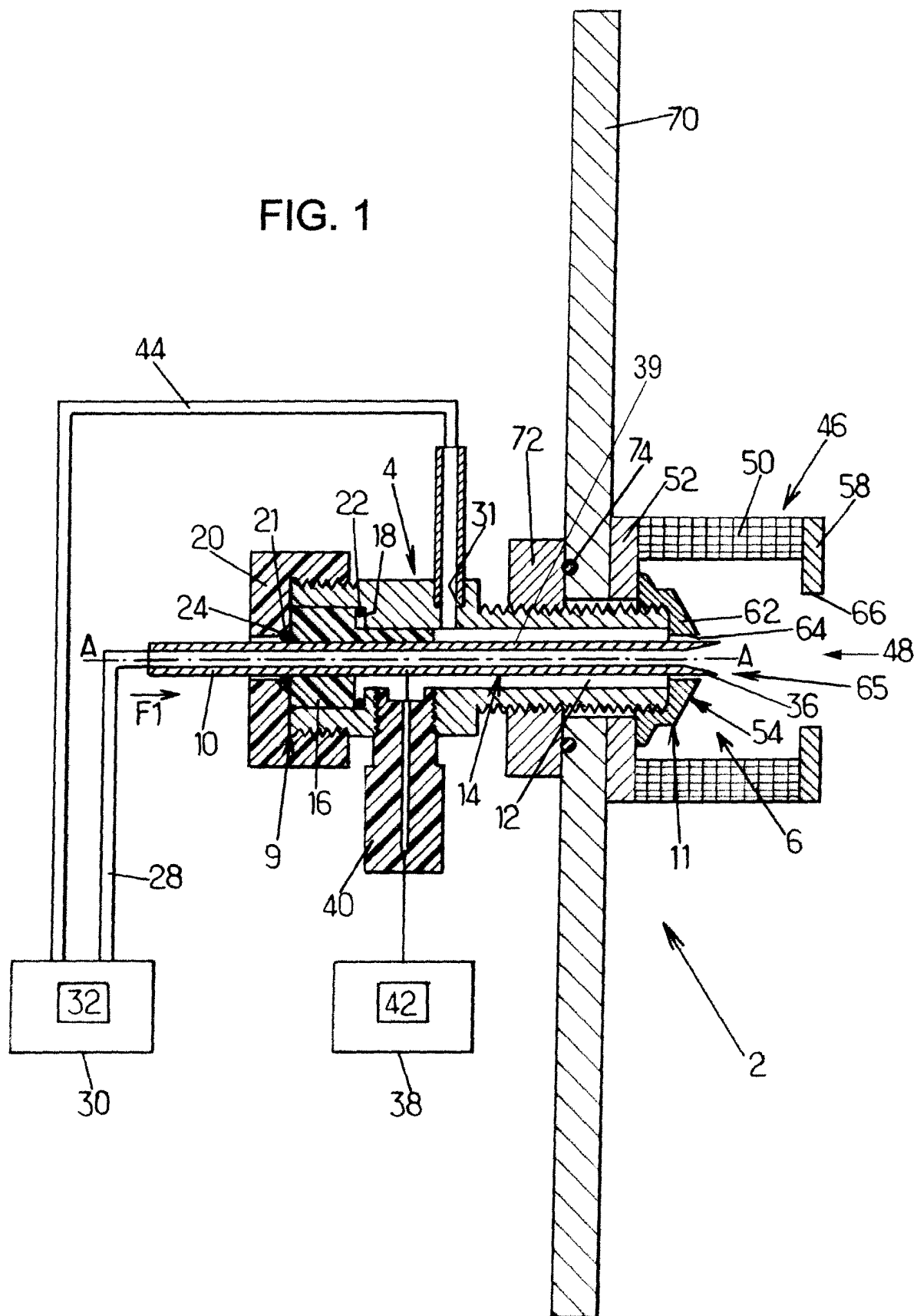
- injection (108) of propellant gas into the discharge chamber (6) via the peripheral injection channel (12);

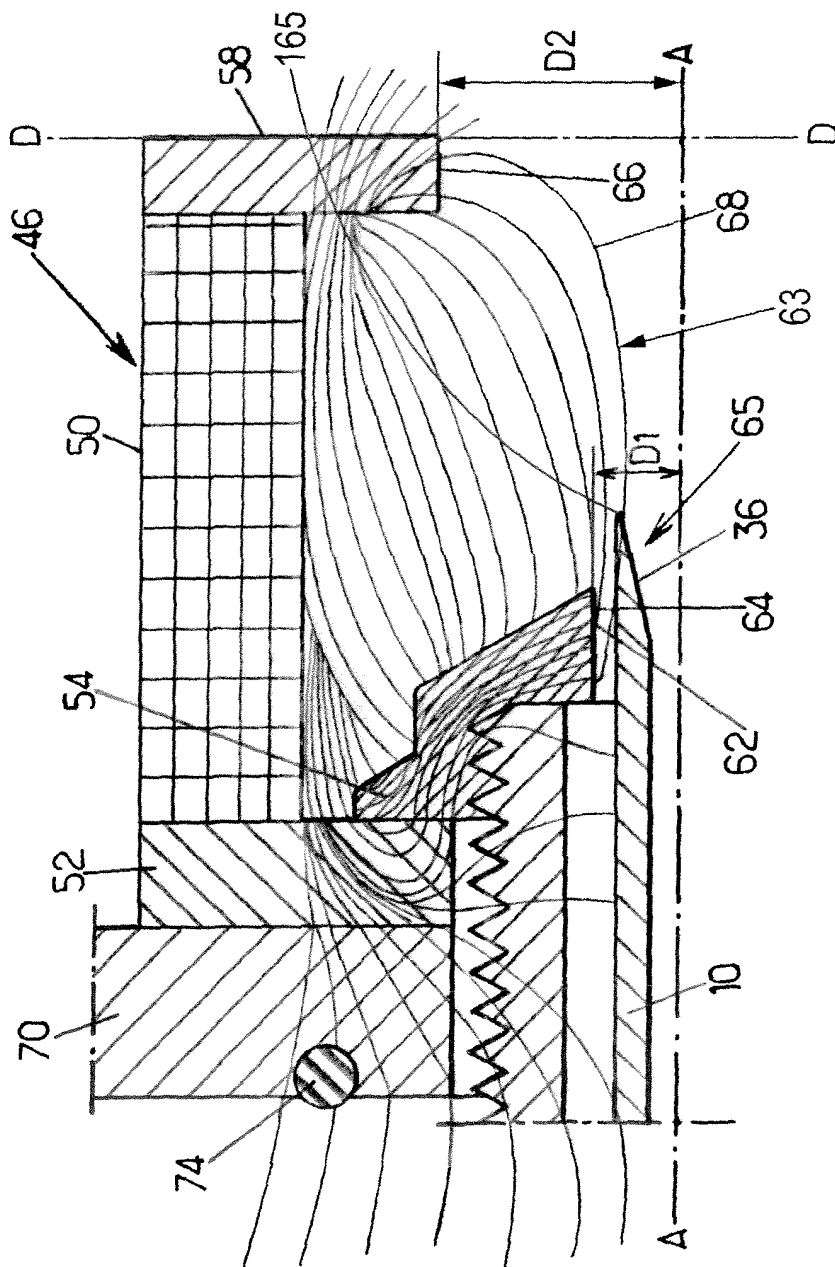
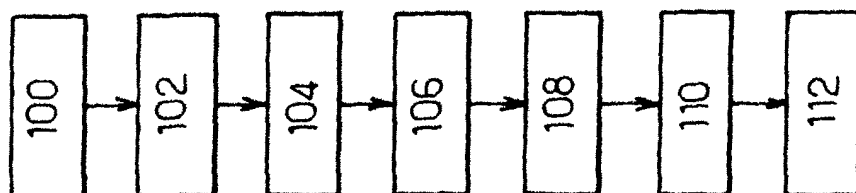
- regulation (110) of the flow rate of propellant gas injected into the discharge chamber (6) via the peripheral injection channel (12);

- modulation (112) of the power of the electromagnetic wave.

55

FIG. 1





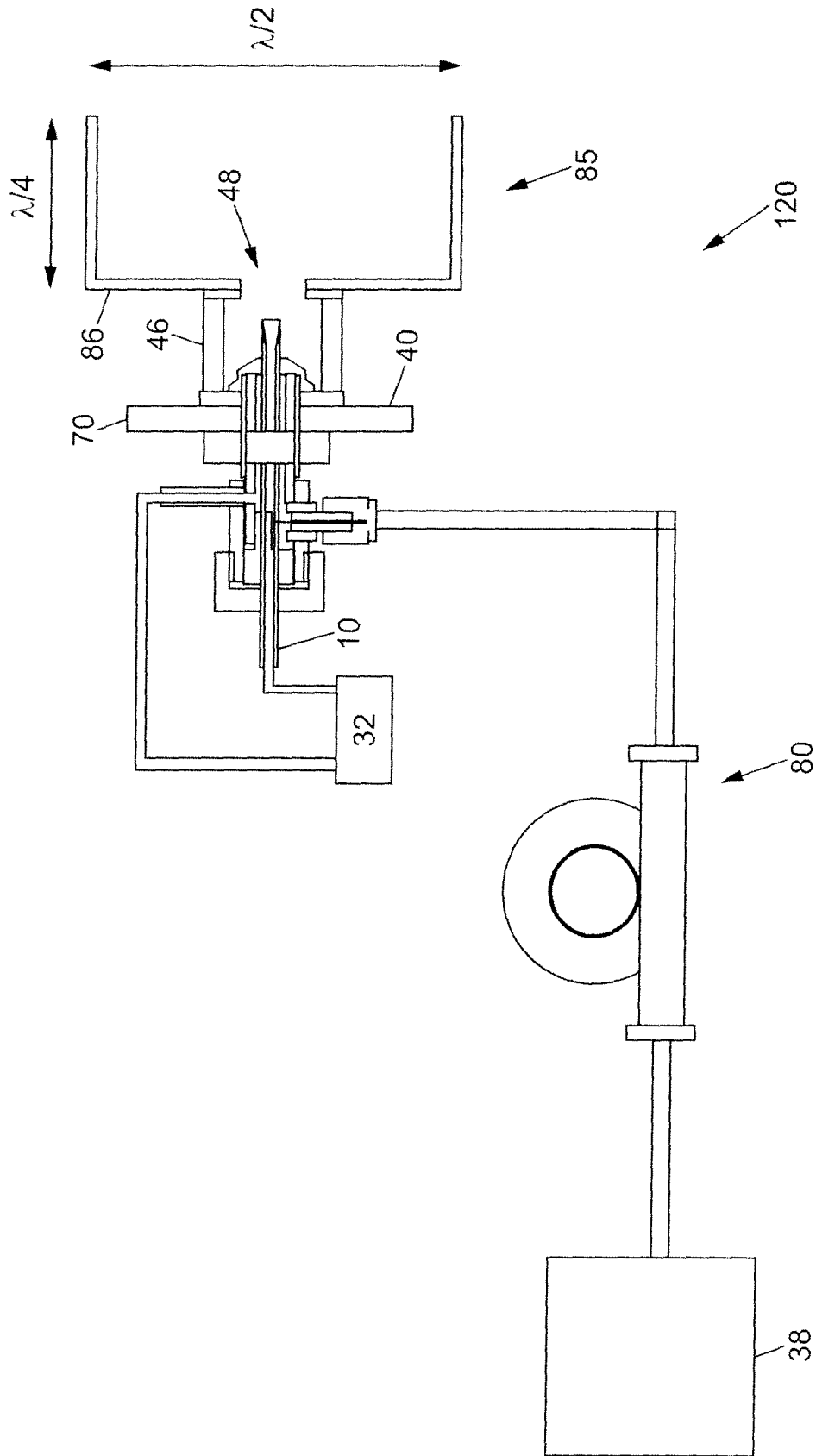


FIG. 4

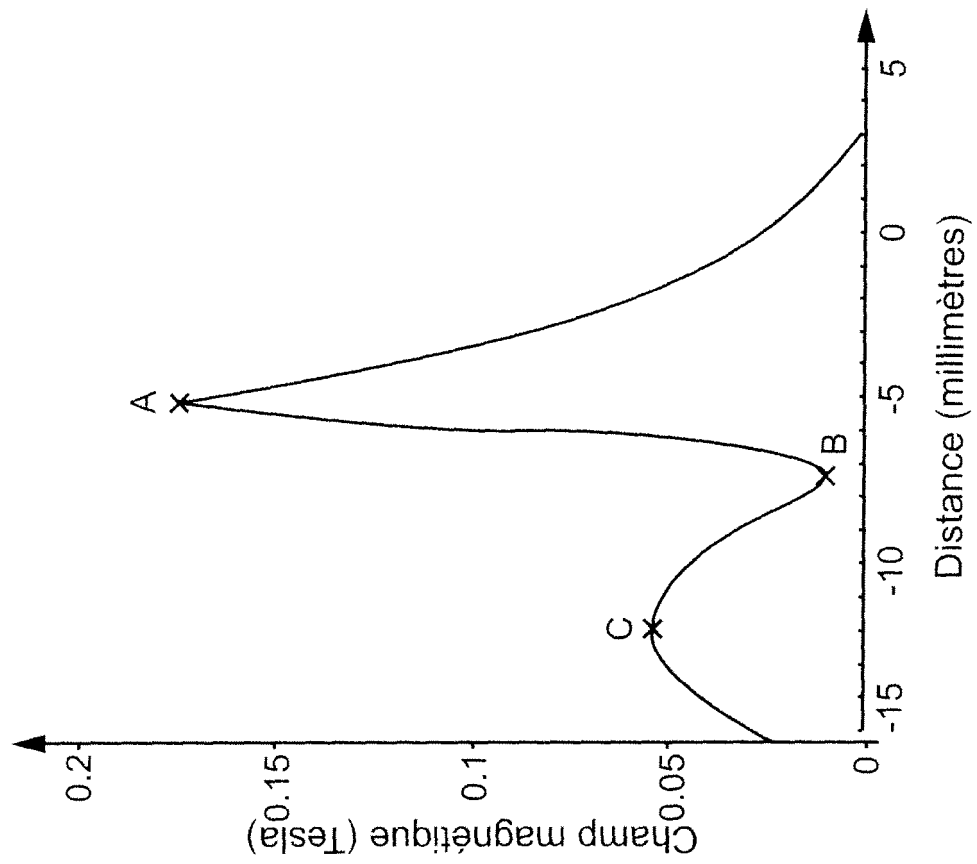


FIG. 5

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

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

Documents brevets cités dans la description

- US 5640843 A [0006]
- EP 0505327 A [0008]
- US 20050287 B [0008]
- JP 1310179 A [0011]
- US 2004161579 A1 [0011]
- US 7400096 B1 [0011]
- US 2006290287 A [0012]
- US 7461502 B [0017]
- US 6293090 B [0018]

Littérature non-brevet citée dans la description

- High rate deposition of ta-C:H using an electron cyclotron wave resonance plasma source. **MORRISON N.A et al.** THIN SOLID FILMS. ELSEVIER-SEQUOIA SA LAUSANNE, 11 Janvier 1999, vol. 337, 71-73 [0011]
- Microwave power absorption coefficient of an ECR Xenon ion thruster. **NISHIYAMA K et al.** SURFACE AND COATINGS TECHNOLOGY. ELSEVIER, 30 Août 2088, vol. 202, 5262-5265 [0011]
- **STALLARD B W et al.** Whistler-driver, electron-cyclotron-resonance-heated thruster : experimental status. *JOURNAL OF PROPULSION AND POWER* 1996 JUL-AUG AIAA, 04 Juillet 1996, vol. 12, 814-816 [0019]