



(11)

EP 3 344 873 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
22.07.2020 Bulletin 2020/30

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

(21) Numéro de dépôt: **16760449.5**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/EP2016/070412

(22) Date de dépôt: **30.08.2016**

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2017/037062 (09.03.2017 Gazette 2017/10)

(54) **PROPULSEUR IONIQUE A GRILLE AVEC AGENT PROPULSIF SOLIDE INTEGRE**

GITTER-IONENANTRIEB MIT INTEGRIERTEM FESTTREIBSTOFF

GRIDDED ION THRUSTER WITH INTEGRATED SOLID PROPELLANT

(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: **31.08.2015 FR 1558071**

(43) Date de publication de la demande:
11.07.2018 Bulletin 2018/28

(73) Titulaires:
• **Ecole Polytechnique**
91120 Palaiseau (FR)
• **Centre National de la Recherche Scientifique**
75016 Paris (FR)

(72) Inventeurs:
• **RAFALSKYI, Dmytro**
91400 Orsay (FR)
• **AANESLAND, Ane**
75014 Paris (FR)

(74) Mandataire: **Jacobacci Coralie Harle**
32, rue de l'Arcade
75008 Paris (FR)

(56) Documents cités:
EP-A1- 0 781 921 US-A- 5 924 277
US-A1- 2007 056 262 US-A1- 2009 066 256
US-A1- 2013 067 883 US-B1- 6 609 363
US-B2- 7 059 111 US-B2- 8 610 356

- **MICHAEL KEIDAR ET AL: "Electric propulsion for small satellites", PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION, IOP, BRISTOL, GB, vol. 57, no. 1, 28 novembre 2014 (2014-11-28), page 14005, XP020276224, ISSN: 0741-3335, DOI: 10.1088/0741-3335/57/1/014005 [extrait le 2014-11-28] cité dans la demande**
- **KURT A. POLZIN ET AL: "Iodine Hall Thruster Propellant Feed System for a CubeSat", 50TH AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE, 28 juillet 2014 (2014-07-28), XP055292310, Reston, Virginia DOI: 10.2514/6.2014-3915 ISBN: 978-1-62410-303-2 cité dans la demande**
- **Kurt A Polzin ET AL: "Propulsion System Development for the Iodine Satellite (iSAT) Demonstration Mission", IEPC-2015-09ISTS-2015-b-09 Presented at Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, 4 juillet 2015 (2015-07-04), XP055292349, Extrait de l'Internet: URL: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/2015Presentations/IEPC-2015-09_ISTS-2015-b-09.pdf [extrait le 2016-07-29]**
- **Éditions Larousse: "Encyclopédie Larousse en ligne - propergol", , 29 juillet 2016 (2016-07-29), XP055292191, Extrait de l'Internet: URL: <http://www.larousse.fr/encyclopedia/divers/propargol/83601> [extrait le 2016-07-29]**
- **Éditions Larousse: "Encyclopédie Larousse en ligne - propulsion ionique", , 29 juillet 2016 (2016-07-29), XP055292188, Extrait de l'Internet: URL: www.larousse.fr/encyclopedia/divers/pr propulsion_ionique/62525 [extrait le 2016-07-29]**

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 3 344 873 B1

- Trevor Alain Lafleur ET AL: "Proof-of-concept demonstration of the PEGASES plasma thruster / Paper IEPC-2015-114／ISTS-2015-b-114", Presented at Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, 4 juillet 2015 (2015-07-04), XP055292513, Extrait de l'Internet: URL:http://erps.spacegrant.org/uploads/images/2015Presentations/IEPC-2015-114_ISTS-2015-b-114.pdf [extrait le 2016-08-01]

Description

[0001] L'invention concerne un propulseur plasma comportant un propergol solide intégré.

[0002] L'invention concerne plus précisément un propulseur ionique, à grille, comportant un propergol solide intégré.

[0003] L'invention pourra trouver application pour un satellite ou une sonde spatiale.

[0004] Plus particulièrement, l'invention pourra trouver application pour des petits satellites. Typiquement, l'invention trouvera une application pour des satellites présentant une masse comprise entre 6kg et 100kg, pouvant éventuellement aller jusqu'à 500kg. Un cas particulièrement intéressant d'application concerne le « CubeSat » dont un module (U) de base fait moins d'1kg et présente des dimensions de 10cm*10cm*10cm. Le propulseur plasma selon l'invention peut en particulier être intégré dans un module 1U ou un demi-module (1/2U) et utilisé dans des empilements de plusieurs modules par 2 (2U), 3 (3U), 6 (6U), 12 (12U) ou plus.

[0005] Le terme "propergol" est ici utilisé pour désigner un agent propulsif dans un propulseur ionique, et non pas un produit constitué par un ou plusieurs ergols apte à fournir par réaction chimique l'énergie de propulsion d'un moteur-fusée.

[0006] Un propulseur plasma à propergol solide a déjà été proposé. On peut les classer en deux catégories, selon qu'ils mettent en œuvre une chambre à plasma ou non.

[0007] Dans l'article de Keidar & al., « Electric propulsion for small satellites », Plasma Phys. Control. Fusion, 57 (2015) (D1), différentes techniques sont décrites pour générer un plasma à partir d'un propergol solide, toutes basées sur une ablation d'un propergol solide. Le propergol solide donne directement sur l'espace extérieur, à savoir l'espace pour des satellites ou sondes spatiales, sans chambre plasma.

[0008] Selon une première technique, on dispose du téflon (propergol solide) entre une anode et une cathode entre lesquelles on réalise une décharge électrique. Cette décharge électrique provoque l'ablation du téflon son ionisation et son accélération principalement par voie électromagnétique pour générer un faisceau d'ions directement dans l'espace externe.

[0009] Selon une deuxième technique, on utilise un faisceau laser pour réaliser l'ablation et l'ionisation d'un propergol solide, par exemple du PVC ou du Kapton®. L'accélération des ions est généralement réalisée par voie électromagnétique.

[0010] Selon une troisième technique, on dispose un isolant entre une anode et une cathode, le tout étant sous vide. La cathode, métallique, sert de matériau d'ablation pour générer des ions. L'accélération s'effectue par voie électromagnétique.

[0011] Les techniques décrites dans ce document permettent d'obtenir un propulseur relativement compact. En effet, le propergol solide est ablaté, ionisé et les ions sont accélérés pour assurer la propulsion avec un dispositif tout-en-un.

[0012] Toutefois, la conséquence est qu'il n'y a pas de contrôle séparé de la sublimation du propergol solide, du plasma et du faisceau d'ions.

[0013] En particulier, le faisceau d'ions est plus ou moins contrôlé du fait qu'il n'y a pas de moyens séparés pour contrôler la densité du plasma induit par l'ablation du propergol solide et la vitesse des ions. En conséquence, la poussée et l'impulsion spécifique du propulseur ne peuvent pas être contrôlées séparément.

[0014] On n'a généralement pas ce type d'inconvénients lorsqu'une chambre à plasma est mise en œuvre.

[0015] L'article de Polzin & al., « Iodine Hall Thruster Propellant Feed System for a CubeSat », American Institute of Aeronautics and Astronautics (D2) propose un système d'alimentation en propergol solide pour un propulseur fonctionnant par effet Hall.

[0016] Ce système d'alimentation est utilisable pour tout propulseur mettant en œuvre une chambre à plasma.

[0017] En effet, dans l'article D2, le propergol solide (iode I_2 , en l'occurrence) est stocké dans un réservoir. Un moyen de chauffage est associé au réservoir. Ce moyen de chauffage peut être un élément apte à recevoir un rayonnement externe, placé sur l'extérieur du réservoir. Ainsi, lorsque le réservoir est chauffé, le diiode est sublimé. Le diiode à l'état de gaz sort du réservoir et est dirigé vers une chambre, située à distance du réservoir, où il est ionisé pour former un plasma. L'ionisation est réalisée, dans le cas d'espèce, par effet Hall. Le débit de gaz entrant dans la chambre plasma est contrôlé par une valve disposée entre le réservoir et cette chambre. On peut ainsi réaliser un meilleur contrôle de la sublimation du diiode et des caractéristiques du plasma, par rapport aux techniques décrites dans le document D1.

[0018] Par ailleurs, les caractéristiques du faisceau d'ions sortant de la chambre peuvent alors être contrôlées par un moyen d'extraction et d'accélération des ions séparés des moyens mis en œuvre pour sublimer le propergol solide et générer le plasma.

[0019] Ce système présente donc de nombreux avantages par rapport à ceux décrits dans le document D1.

[0020] Toutefois, dans le document D2, la présence d'un tel système d'alimentation rend le propulseur plasma peu compact et en conséquence, peu envisageable pour des petits satellites, en particulier pour un module de type « CubeSat ».

[0021] Dans US 8 610 356 (D3), il est également proposé un système utilisant un propergol tel que l'iode (I_2) stocké dans un réservoir situé à distance d'une chambre plasma. Le contrôle du débit de gaz de diiode sortant du réservoir est réalisé par des capteurs de température et pression installés en sortie du réservoir et reliés à une boucle de contrôle

de la température du réservoir.

[0022] Là également, le système est peu compact.

[0023] Dans le même type de système que ceux proposés dans les documents D2 ou D3, on peut encore citer le document US 6 609 363 (D4), qui décrit un propulseur ionique selon le préambule de la revendication 1.

[0024] Il convient de noter qu'un propulseur plasma à propergol intégré dans une chambre plasma a déjà été proposé dans US 7 059 111 (D5). Ce propulseur plasma, basé sur l'effet Hall, est donc susceptible d'être plus compact que celui proposé dans les documents D2, D3 ou D4. Il est également susceptible de mieux contrôler l'évaporation du propergol, le plasma et l'extraction des ions, par rapport au document D1. Toutefois, le propergol est stocké à l'état liquide et utilise un système additionnel d'électrodes pour contrôler le débit de gaz sortant du réservoir.

[0025] Un objectif de l'invention est de pallier l'un au moins des inconvénients précités.

[0026] Pour atteindre cet objectif, l'invention propose un propulseur ionique, comprenant :

- une chambre,
- un réservoir comprenant un propergol solide, ledit réservoir étant logé dans la chambre et comportant une enveloppe conductrice munie d'au moins un orifice ;
- un ensemble de moyens pour former un plasma ions-électrons dans la chambre, ledit ensemble étant apte à sublimer le propergol solide dans le réservoir pour former un propergol à l'état de gaz, puis à générer ledit plasma dans la chambre à partir du propergol à l'état de gaz provenant du réservoir à travers ledit au moins orifice ;
- un moyen d'extraction et d'accélération d'au moins les ions du plasma hors de la chambre, ledit moyen d'extraction et d'accélération comprenant :

- soit une électrode logée dans la chambre à laquelle est associée une grille située à une extrémité de la chambre, ladite électrode présentant une surface plus importante que la surface de la grille,
- soit un ensemble d'au moins deux grilles situées à une extrémité de la chambre ;

- une source de tension continue ou une source de tension alternative radiofréquence disposée en série avec un condensateur et adaptée pour générer un signal dont la radiofréquence est comprise entre la fréquence plasma des ions et la fréquence plasma des électrons, ladite source de tension continue ou alternative radiofréquence étant connectée, par l'une de ses sorties, au moyen d'extraction et d'accélération d'au moins les ions du plasma hors de la chambre, et plus précisément:

- soit à l'électrode,
- soit à l'une des grilles dudit ensemble d'au moins deux grilles,

la grille associée à l'électrode ou, selon le cas, l'autre grille dudit ensemble d'au moins deux grilles étant soit mise à un potentiel de référence, soit connectée à l'autre des sorties de ladite source de tension alternative radiofréquence ; ledit moyen d'extraction et d'accélération et ladite source de tension continue ou alternative radiofréquence permettant de former, en sortie de la chambre, un faisceau comportant au moins des ions.

[0027] Le propulseur pourra également comprendre l'une au moins des caractéristiques suivantes, prises seules ou en combinaison :

- la source de tension connectée au moyen d'extraction et d'accélération est une source de tension alternative radiofréquence, et l'ensemble de moyens pour former le plasma ions-électrons comprend au moins une bobine alimentée par cette même source de tension alternative radiofréquence par l'intermédiaire d'un moyen pour gérer le signal fourni par ladite source de tension radiofréquence en direction d'une part, de ladite au moins une bobine et d'autre part, du moyen d'extraction et d'accélération, pour former un faisceau d'ions et d'électrons en sortie de la chambre ;
- l'ensemble de moyens pour former le plasma ions -électrons comprend au moins une bobine alimentée par une source de tension alternative radiofréquence différente de la source de tension continue ou alternative radiofréquence connectée au moyen d'extraction et d'accélération ou au moins une antenne micro-ondes alimentée par une source de tension alternative micro-ondes ;
- la source de tension connectée au moyen d'extraction et d'accélération est une source de tension alternative radiofréquence, pour former, en sortie de la chambre, un faisceau d'ions et d'électrons ;
- le moyen d'extraction et d'accélération est un ensemble d'au moins deux grilles situées à une extrémité de la chambre, l'électronneutralité du faisceau d'ions et d'électrons est obtenue au moins en partie par réglage de la durée d'application des potentiels positifs et/ou négatifs issus de la source de tension alternative radiofréquence connectée au moyen d'extraction et d'accélération ;
- le moyen d'extraction et d'accélération est un ensemble d'au moins deux grilles situées à une extrémité de la

chambre, l'électroneutralité du faisceau d'ions et d'électrons est obtenue au moins en partie par réglage de l'amplitude des potentiels positifs et/ou négatifs issus de la source de tension alternative radiofréquence connectée au moyen d'extraction et d'accélération ;

- la source de tension connectée au moyen d'extraction et d'accélération est une source de tension continue, pour former, en sortie de la chambre, un faisceau d'ions, le propulseur comprenant en outre des moyens pour injecter des électrons dans ledit faisceau d'ions afin d'assurer une électroneutralité ;
- le réservoir comporte une membrane située entre le propergol solide et l'enveloppe munie d'au moins un orifice, ladite membrane comportant au moins un orifice, la surface de la ou chaque orifice de la membrane étant plus grande que la surface de la ou chaque orifice de l'enveloppe du réservoir ;
- la ou chaque grille présente des orifices dont la forme est choisie parmi les formes suivantes : circulaires, carrés, rectangles ou en formes de fentes, notamment de fentes parallèles ;
- la ou chaque grille présente des orifices circulaires, dont le diamètre est compris entre 0,2mm et 10mm, par exemple entre 0,5mm et 2mm ;
- lorsque le moyen d'extraction et d'accélération hors de la chambre comprend un ensemble d'au moins deux grilles situées à l'extrémité de la chambre, la distance entre les deux grilles est comprise entre 0,2mm et 10mm, par exemple entre 0,5mm et 2mm ;
- le propergol solide est choisi parmi : le diode, le diode mélangé à d'autres composants chimiques, le ferrocène, l'adamantane ou l'arsenic.

[0028] L'invention concerne également un satellite comprenant un propulseur selon l'invention et une source d'énergie, par exemple une batterie ou un panneau solaire, connectée à la ou chaque source de tension continue ou alternative du propulseur.

[0029] L'invention concerne également une sonde spatiale comprenant un propulseur selon l'invention et une source d'énergie, par exemple une batterie ou un panneau solaire, connectée à la ou chaque source de tension continue ou alternative du propulseur.

[0030] L'invention sera mieux comprise et d'autres buts, avantages et caractéristiques de celle-ci apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui suit et qui est faite au regard des figures annexées, sur lesquelles :

- la figure 1 est une vue schématique d'un propulseur plasma selon un premier mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 2 est une vue schématique d'une variante au premier mode de réalisation représenté sur la figure 1 ;
- la figure 3 est une vue schématique d'une autre variante au premier mode de réalisation représenté sur la figure 1 ;
- la figure 4 est une vue schématique d'une autre variante au premier mode de réalisation représenté sur la figure 1 ;
- la figure 5 est une vue schématique d'un propulseur plasma selon un deuxième mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 6 est une vue schématique d'une variante au deuxième mode de réalisation représenté sur la figure 5 ;
- la figure 7 est une vue schématique d'une autre variante au deuxième mode de réalisation représenté sur la figure 5 ;
- la figure 8 est une vue schématique d'une autre variante au deuxième mode de réalisation représenté sur la figure 5 ;
- la figure 9 est une vue schématique d'une variante de réalisation du propulseur plasma représenté sur la figure 8
- la figure 10 est une vue schématique d'un troisième mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 11 est une vue en coupe d'un réservoir à propergol solide susceptible d'être employé dans un propulseur plasma selon l'invention, quel que soit le mode de réalisation envisagé, avec son environnement permettant son montage à l'intérieur de la chambre plasma ;
- la figure 12 est une vue éclatée du réservoir représenté sur la figure 9 ;
- la figure 13 est une courbe fournissant, dans le cas du diode (I_2) utilisé comme propergol solide, l'évolution de la pression de vapeurs de diode en fonction de la température ;
- la figure 14 représente, de façon schématique, un satellite comportant un propulseur plasma selon l'invention ;
- la figure 15 représente, de façon schématique, une sonde spatiale comportant un propulseur plasma selon l'invention.

[0031] Un premier mode de réalisation d'un propulseur ionique 100 selon l'invention est représenté sur la figure 1.

[0032] Le propulseur 100 comporte une chambre 10 à plasma et un réservoir 20 de propergol solide PS logé dans la chambre 10. Plus précisément, le réservoir 20 comporte une enveloppe conductrice 21 comportant le propergol solide PS, cette enveloppe 21 étant munie d'un ou plusieurs orifices 22. Le fait de loger le réservoir 20 de propergol solide dans la chambre 10 confère au propulseur une compacité plus grande.

[0033] Le propulseur 100 comporte également une source de tension alternative radiofréquence 30 et une ou plusieurs bobines 40 alimentée(s) par la source de tension alternative radiofréquence 30. La ou chaque bobine 40 peut présenter un ou plusieurs enroulement(s). Sur la figure 1, une seule bobine 40 comportant plusieurs enroulements est prévue.

[0034] La bobine 40, alimentée par la source de tension alternative radiofréquence 30, induit un courant dans le réservoir 20, lequel est conducteur (courant de Foucault). Le courant induit dans le réservoir provoque un effet Joule qui chauffe le réservoir 20. La chaleur ainsi produite se transmet au propergol solide PS par conduction thermique et/ou

rayonnement thermique. Le chauffage du propergol solide PS permet alors de sublimer celui-ci, le propergol étant ainsi mis à l'état de gaz. Puis, le propergol à l'état de gaz passe ensuite à travers la ou les orifice(s) 22 du réservoir 20, en direction de la chambre 10. Ce même ensemble 30, 40 permet par ailleurs de générer un plasma dans la chambre 10 en ionisant le propergol à l'état de gaz qui est dans la chambre 10. Le plasma ainsi formé sera généralement un plasma ions-électrons (il convient de noter que, la chambre plasma comprendra également des espèces neutres - propergol à l'état de gaz - car, généralement, tout le gaz n'est pas ionisé pour former le plasma).

[0035] Une même source 30 de tension alternative radiofréquence est donc utilisée pour sublimer le propergol solide PS et créer le plasma dans la chambre 10. Dans le cas d'espèce, une seule bobine 40 est également employée à cet effet. Toutefois, il est envisageable de prévoir plusieurs bobines, par exemple une bobine pour sublimer le propergol solide PS et une bobine pour créer le plasma. En utilisant plusieurs bobines 40, il est alors possible d'augmenter la longueur de la chambre 10.

[0036] Plus précisément, la chambre 10 et le réservoir 20 sont initialement à une même température.

[0037] Lorsque la source 30 est mise en œuvre, la température du réservoir 20, chauffé par la ou les bobine(s) 40, augmente. La température du propergol solide PS augmente également, le propergol étant en contact thermique avec l'enveloppe 21 du réservoir.

[0038] Cela provoque une sublimation du propergol solide PS, au sein du réservoir 20, et par suite une augmentation de la pression P1 de propergol à l'état de gaz au sein du réservoir 20 accompagnant l'augmentation de température T1 dans ce réservoir.

[0039] Puis, sous l'effet de la différence de pression entre le réservoir 20 et la chambre 10, le propergol à l'état de gaz passent à travers le ou chaque orifice 22 en direction de la chambre 10.

[0040] Lorsque les conditions de température et de pression sont suffisamment importantes dans la chambre 10, l'ensemble formé par la source 30 et la ou les bobine(s) 40 permet de générer le plasma dans la chambre 10. A ce stade, le propergol solide PS est alors plus amplement chauffé par les particules chargées du plasma, la ou les bobine(s) étant écrantées par la présence de la gaine dans le plasma (effet de peau) ainsi que par la présence des particules chargées elles-mêmes au sein du plasma.

[0041] En présence du plasma (propulseur en fonctionnement), il convient de noter que la température du réservoir 20 peut être mieux contrôlée par la présence d'un échangeur thermique (non représenté) connecté au réservoir 20.

[0042] On peut prévoir un ou plusieurs orifice(s) 22 sur le réservoir 20, cela n'a pas d'importance. Seule la surface totale de l'orifice ou, si plusieurs orifices sont prévus, de l'ensemble de ces orifices a une importance. Leur dimensionnement dépendra de la nature du propergol solide employé, et des paramètres de fonctionnement souhaités pour le plasma (température, pression).

[0043] Ce dimensionnement s'effectuera donc au cas par cas.

[0044] De manière générale, le dimensionnement du propulseur selon l'invention reprendra les étapes suivantes.

[0045] Le volume de la chambre 10 est tout d'abord défini, ainsi que la pression P2 de fonctionnement nominal souhaitée dans cette chambre 10 et le débit massique m' d'ions positifs souhaité en sortie de la chambre 10. Ces données peuvent être obtenues par modélisation numérique ou par des essais de routine. Il est à noter que ce débit massique (m') est correspond sensiblement à celui qu'on retrouve entre le réservoir 20 et la chambre 10.

[0046] Ensuite, la température T1 souhaitée pour le réservoir 20 est choisie.

[0047] Cette température T1 étant fixée, on peut connaître la pression de propergol à l'état de gaz correspondante, à savoir la pression P1 de ce gaz dans le réservoir 20 (cf. figure 13 dans le cas du diiode I_2).

[0048] Connaissant ainsi P2, m' , P1 et T1, il est possible d'en déduire la surface A de l'orifice ou, si plusieurs orifices sont prévus, de l'ensemble des orifices. Avantagusement, on prévoira cependant plusieurs orifices pour assurer une répartition plus homogène du propergol à l'état de gaz au sein de la chambre 10.

[0049] Un exemple de dimensionnement est cependant fourni plus loin.

[0050] Il est ensuite possible d'estimer la fuite de propergol à l'état de gaz entre le réservoir 20 et la chambre 10 lorsque le propulseur 100 est à l'arrêt. En effet, dans ce cas, la surface A des orifices est connue, tout comme P1, T1 et P2, ce qui permet d'obtenir m' (débit de fuite). En pratique, il s'avère qu'à l'arrêt, la fuite est minime par rapport au débit de propergol à l'état de gaz passant du réservoir 20 vers la chambre 10 en cours d'utilisation. C'est pourquoi, dans le cadre de l'invention, la présence de valves au niveau des orifices n'est pas obligatoire.

[0051] Pour le propergol solide, on peut envisager : du diiode (I_2), un mélange de diiode (I_2) avec d'autres composants chimiques, de l'adamantane (formule chimique brute : $C_{10}H_{16}$) ou du ferrocène (formule chimique brute : $Fe(C_5H_5)_2$). De l'arsenic peut également être employé, mais sa toxicité en fait un propergol solide dont l'utilisation est moins envisagée.

[0052] Avantagusement, on utilisera du diiode (I_2) comme propergol solide.

[0053] Ce propergol présente en effet plusieurs avantages. On a représenté sur la figure 13, une courbe fournissant, dans le cas du diiode (I_2), l'évolution de la pression P du gaz diiode en fonction de la température T. Cette courbe peut être approchée par la formule suivante :

$$\text{Log}(P) = - 3512,8 \cdot (1/T) - 2,013 \cdot \log(T) + 13,374 \quad (\text{F1})$$

avec :

P, la pression en Torr ;

T, la température en Kelvins.

[0054] Cette formule peut être obtenue dans « The Vapor Pressure Iodine », G.P. Baxter, C.H. Hickey, W.C. Holmes, J. Am. Chem. Soc., 1907, 29(2) pp. 12-136. Cette formule est également citée dans « The normal Vapor Pressure of Crystalline Iodine », L.J. Gillespie, & al., J. Am. Chem Soc., 1936, vol. 58(11), pp 2260-2263. Cette formule a fait l'objet de vérifications expérimentales, par différents auteurs.

[0055] Lorsque le propulseur passe d'un mode arrêt à un mode de fonctionnement nominal, on peut considérer que la température augmente d'environ 50K. Dans la gamme de température comprise entre 300K et 400K, on relève sur cette figure 13 que la pression du gaz diode augmente pratiquement d'un facteur 100, pour une augmentation de température de 50K.

[0056] Aussi, lorsque le propulseur est en mode arrêt, la fuite de gaz diode à travers le ou chaque orifice 22 est très faible, et de l'ordre de 100 fois inférieure à la quantité de gaz diode traversant le ou les orifice(s) 22 en direction de la chambre 10, lorsque le propulseur 100 est en fonctionnement nominal.

[0057] Une différence plus importante entre la température de fonctionnement nominale du propulseur selon l'invention et sa température à l'arrêt ne fera que diminuer les pertes relatives par fuite de propergol à l'état de gaz.

[0058] En conséquence, un propulseur 100 selon l'invention utilisant du diode (I_2) comme propergol n'a pas besoin de mettre en œuvre une valve pour le ou chaque orifice et ce, contrairement au document D2. Ceci simplifie d'autant la conception du propulseur et en assure une bonne fiabilité. Le contrôle du débit de propergol à l'état de gaz s'effectue par le contrôle de la température du réservoir 20, par l'intermédiaire de la puissance fournie à la bobine 40 par la source de tension alternative radiofréquence 30 et éventuellement, comme précisé précédemment, par la présence d'un échangeur thermique connecté au réservoir 20. Le contrôle est donc différent de celui qui est effectué dans le document D3.

[0059] Le propulseur 100 comprend également un moyen 50 d'extraction et d'accélération des particules chargées du plasma, ions positifs et électrons, hors de la chambre 20 pour former un faisceau 70 de particules chargées en sortie de la chambre 20. Sur la figure 1, ce moyen 50 comprend une grille 51 située à une extrémité E (sortie) de la chambre 10 et une électrode 52 logée à l'intérieur de la chambre 10, cette électrode 52 présentant par construction une surface plus importante que celle de la grille 51. Dans certains cas, l'électrode 52 peut être formée par la paroi elle-même, conductrice, du réservoir 20.

[0060] L'électrode 52 est isolée de la paroi de la chambre par un isolant électrique 58.

[0061] La grille 51 pourra présenter des orifices de différentes formes, par exemple circulaires, carrés, rectangles ou en formes de fentes, notamment de fentes parallèles. En particulier, dans le cas d'orifices circulaires, le diamètre d'un orifice pourra être compris entre 0,2mm et 10mm, par exemple entre 0,5mm et 2mm.

[0062] Pour assurer cette extraction et accélération, le moyen 50 est connecté à la source de tension alternative radiofréquence 30. La source de tension alternative radiofréquence 30 assure donc, en plus, le contrôle du moyen 50 d'extraction et d'accélération des particules chargées hors de la chambre 10. Ceci est particulièrement intéressant car cela permet d'augmenter encore un peu plus la compacité du propulseur 100. De plus, ce contrôle du moyen 50 d'extraction et d'accélération par la source 30 de tension alternative radiofréquence permet de mieux contrôler le faisceau 70 de particules chargées et ce, contrairement aux techniques proposées dans l'article D1 notamment. Enfin, ce contrôle permet aussi d'obtenir un faisceau avec une très bonne électroneutralité en sortie de la chambre 10, sans mettre en œuvre un quelconque dispositif externe à cet effet. Autrement dit, l'ensemble formé par le moyen 50 d'extraction et d'accélération des particules chargées du plasma et la source de tension alternative radiofréquence 30 permet donc également d'obtenir une neutralisation du faisceau 70 en sortie de la chambre 10. La compacité du propulseur 100 est ainsi augmentée, ce qui est particulièrement avantageux pour l'utilisation de ce propulseur 100 pour un petit satellite (<500kg), notamment un micro-satellite (10kg-100kg) ou un nano-satellite (1kg-10kg), par exemple de type « CubeSat ».

[0063] A cet effet, la grille 51 est connectée à la source de tension radiofréquence 30 par l'intermédiaire d'un moyen 60 pour gérer le signal fourni par ladite source de tension radiofréquence 30 et l'électrode 52 est connectée à la source de tension radiofréquence 30, en série, par l'intermédiaire d'un condensateur 53 et du moyen 60 pour gérer le signal fourni par ladite source de tension radiofréquence 30. La grille 51 est par ailleurs mise à un potentiel de référence 55, par exemple la masse. De même, la sortie de la source de tension alternative radiofréquence 30, non connectée au moyen 60, est également mise au même potentiel de référence 55, la masse selon l'exemple.

[0064] En pratique, pour des applications dans le domaine spatial, le potentiel de référence pourra être celui de la sonde spatiale ou du satellite sur lequel le propulseur 100 est monté.

[0065] Le moyen 60 pour gérer le signal fourni par ladite source de tension radiofréquence 30 forme donc un moyen

60 qui permet de transmettre le signal fourni par la source 30 de tension alternative radiofréquence en direction d'une part, du ou de chaque bobine 40 et d'autre part, du moyen 50 d'extraction et d'accélération des ions et électrons hors de la chambre 10.

[0066] La source 30 (RF - radiofréquences) est réglée pour définir une pulsation ω_{RF} telle que $\omega_{pi} \leq \omega_{RF} \leq \omega_{pe}$, où :

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{e_0^2 n_p}{\varepsilon_0 m_e}} \quad \text{est la pulsation plasma des électrons et} \quad \omega_{pi} = \sqrt{\frac{e_0^2 n_p}{\varepsilon_0 m_i}} \quad \text{la pulsation plasma des ions positifs ; avec :}$$

e_0 , la charge de l'électron,
 ε_0 , la permittivité du vide,
 n_p , la densité du plasma,
 m_i , la masse des ions et
 m_e , la masse des électrons.

[0067] Il convient de noter que $\omega_{pi} \ll \omega_{pe}$ du fait que $m_i \gg m_e$.

[0068] De manière générale, la fréquence du signal fourni par la source 30 peut être comprise entre quelques MHz et quelques centaines de MHz, en fonction du propergol employé pour la formation du plasma dans la chambre 10 et ce, pour être comprise entre la fréquence plasma des ions et la fréquence plasma des électrons. Une fréquence de 13,56MHz est généralement bien adaptée, mais on peut également envisager les fréquences suivantes : 1MHz, 2MHz ou encore 4 MHz.

[0069] L'électroneutralité du faisceau 70 est assurée par la nature capacitive du système 50 d'extraction et d'accélération car, du fait de la présence du condensateur 53, il y en a en moyenne autant d'ions positifs que d'électrons qui sont extraits au cours du temps.

[0070] Dans ce cadre, la forme du signal produit par la source 30 de tension alternative radiofréquence peut être arbitraire. On pourra cependant prévoir que le signal fourni par la source 30 de tension alternative radiofréquence à l'électrode 52 soit rectangulaire ou sinusoïdal.

[0071] Le principe de fonctionnement pour l'extraction et l'accélération des particules chargées du plasma (ions et électrons) avec le premier mode de réalisation est le suivant.

[0072] Par construction, l'électrode 52 présente une surface supérieure, et généralement nettement supérieure, à celle de la grille 51 située en sortie de la chambre 10.

[0073] De manière générale, l'application d'une tension RF sur une électrode 52 présentant une surface plus grande que la grille 51 a pour effet de générer au niveau de l'interface entre l'électrode 52 et le plasma d'une part, et au niveau de l'interface entre la grille 51 et le plasma d'autre part, une différence de potentiel additionnelle, s'ajoutant à la différence de potentiel RF. Cette différence de potentiel totale se répartit sur une gaine. La gaine est un espace qui est formé entre la grille 51 ou l'électrode 52 d'une part et le plasma d'autre part où la densité d'ions positifs est plus élevée que la densité d'électrons. Cette gaine présente une épaisseur variable en raison du signal RF, variable, appliqué à l'électrode 52.

[0074] En pratique, la majeure partie de l'effet de l'application d'un signal RF sur l'électrode 52 est cependant située dans la gaine de la grille 51 (on peut voir le système électrode-grille comme un condensateur avec deux parois asymétriques, dans ce cas la différence de potentiel s'applique sur la partie de plus faible capacitance donc de plus faible surface).

[0075] En présence du condensateur 53 en série avec la source RF, 30 l'application du signal RF a pour effet de convertir la tension RF en tension constante DC en raison de la charge du condensateur 53, principalement au niveau de la gaine de la grille 51.

[0076] Cette tension constante DC dans la gaine de la grille 51 implique que les ions positifs sont constamment extraits et accélérés (en continu). En effet, cette différence de potentiel DC a pour effet de rendre le potentiel plasma positif. En conséquence, les ions positifs du plasma sont constamment accélérés en direction de la grille 51 (à un potentiel de référence) et donc extraits de la chambre 10 par cette grille 51. L'énergie des ions positifs correspond à cette différence de potentiel DC (énergie moyenne).

[0077] La variation de la tension RF permet de faire varier la différence de potentiel RF + DC entre le plasma et la grille 51. Au niveau de la gaine de la grille 51, cela se traduit par une évolution de l'épaisseur de cette gaine. Lorsque cette épaisseur devient inférieure à une valeur critique, ce qui arrive pendant un laps de temps à intervalles réguliers donnés par la fréquence du signal RF, la différence de potentiel entre la grille 51 et le plasma approche la valeur zéro (donc le potentiel plasma approche le potentiel de référence), ce qui permet d'extraire des électrons.

[0078] En pratique, le potentiel plasma en-dessous duquel les électrons peuvent être accélérés et extraits (= potentiel critique) est donné par la loi de Child, laquelle relie ce potentiel critique à l'épaisseur critique de la gaine en-dessous de laquelle cette gaine disparaît (« sheath collapse » selon la terminologie anglo-saxonne).

[0079] Tant que le potentiel plasma est inférieur au potentiel critique, alors il y a une accélération et une extraction

simultanée des électrons et des ions.

[0080] Une bonne électroneutralité du faisceau 70 d'ions positifs et d'électrons en sortie de la chambre 10 plasma peut ainsi être obtenue.

[0081] Sur la figure 2, on a représenté une variante de réalisation au premier mode de réalisation représenté sur la figure 1.

[0082] Les mêmes références désignent les mêmes composants.

[0083] La différence entre le propulseur représenté sur la figure 2 par rapport au propulseur illustré sur la figure 1 réside dans le fait que l'électrode 52 logée à l'intérieur de la chambre 10 est supprimée et qu'une grille 52' est ajoutée au niveau de l'extrémité E (sortie) de la chambre 10.

[0084] En d'autres termes, le moyen 50 d'extraction et d'accélération des particules chargées du plasma comporte un ensemble d'au moins deux grilles 51, 52' situées à une extrémité E (sortie) de la chambre 10, l'une 51 au moins de l'ensemble d'au moins deux grilles 51, 52' étant connectée à la source de tension radiofréquence 30 par l'intermédiaire du moyen 60 pour gérer le signal fourni par ladite source de tension radiofréquence 30 et l'autre 52' au moins de l'ensemble d'au moins deux grilles 51, 52' étant connectée à la source de tension radiofréquence 30, en série, par l'intermédiaire d'un condensateur 53 et du moyen 60 pour gérer le signal fourni par ladite source de tension radiofréquence 30.

[0085] La connexion de la grille 52' à la source 30 de tension radiofréquence est, sur la figure 2, identique à la connexion de l'électrode 52 à cette source 30, sur la figure 1.

[0086] Chaque grille 51, 52' pourra présenter des orifices de formes différentes, par exemple circulaires, carrés, rectangles ou en forme de fentes, notamment de fentes parallèles. En particulier, dans le cas d'orifices circulaires, le diamètre d'un orifice pourra être compris entre 0,2mm et 10mm, par exemple entre 0,5mm et 2mm.

[0087] Par ailleurs, la distance entre les deux grilles 52', 51 peut être comprise entre 0,2mm et 10mm, par exemple entre 0,5mm et 2mm (le choix exact dépend de la tension DC et de la densité du plasma).

[0088] Dans cette variante, le fonctionnement de l'extraction et de l'accélération des ions positifs et des électrons est le suivant.

[0089] Lorsqu'on applique une tension RF par l'intermédiaire de la source 30, le condensateur 53 se charge. La charge du condensateur 53 produit alors une tension DC continue aux bornes du condensateur 53. On obtient alors, aux bornes de l'ensemble formé par la source 30 et le condensateur 53, une tension RF + DC. La partie constante de la tension RF + DC, permet alors de définir un champ électrique entre les deux grilles 52', 51, la valeur moyenne du seul signal RF étant nulle. Cette valeur DC permet donc d'extraire et d'accélérer les ions positifs à travers les deux grilles 51, 52', en continu.

[0090] Par ailleurs, lorsqu'on applique cette tension RF, le plasma suit le potentiel imprimé à la grille 52', qui est en contact avec le plasma, à savoir RF + DC. Quant à l'autre grille 51 (potentiel de référence 55, par exemple la masse), elle est également en contact avec le plasma, mais seulement pendant les brefs intervalles temporels pendant lesquels les électrons sont extraits avec les ions positifs, à savoir lorsque la tension RF + DC est inférieure à une valeur critique en dessous de laquelle la gaine disparaît. Cette valeur critique est définie par la loi de Child.

[0091] L'électroneutralité du faisceau 70 en sortie de la chambre 10 est ainsi assurée.

[0092] Il convient par ailleurs de noter que, pour cette réalisation de la figure 2, l'électroneutralité du faisceau 70 d'ions et d'électrons peut être obtenue au moins en partie par réglage de la durée d'application des potentiels positifs et/ou négatifs issus de la source de tension alternative radiofréquence 30. Cette électroneutralité du faisceau 70 d'ions et d'électrons peut également être obtenue au moins en partie par réglage de l'amplitude des potentiels positifs et/ou négatifs issus de la source de tension alternative radiofréquence 30.

[0093] L'intérêt de cette variante est, par rapport au mode de réalisation illustré sur la figure 1 et mettant en œuvre une grille 51 à l'extrémité E de la chambre 10 et une électrode 52 logée dans la chambre de surface plus grande que la grille 51 de fournir un meilleur contrôle de la trajectoire des ions positifs. Ceci est lié au fait qu'une différence de potentiel DC (continue) est générée entre les deux grilles 52', 51, sous l'action de la source 30 de tension alternative radiofréquence et du condensateur 53 en série et non au niveau de la gaine entre le plasma et la grille 51 (cf. précédemment) dans le cas du premier mode de réalisation de la figure 1.

[0094] De ce fait, avec la variante de réalisation représentée sur la figure 2, on s'assure que beaucoup plus d'ions positifs passent à travers les orifices de la grille 52', sans toucher la paroi de cette grille 52', par référence à ce qui se passe dans le cas du premier mode de réalisation illustré sur la figure 1.

[0095] De plus, les ions positifs passant par les orifices de la grille 52' ne viennent pas plus toucher la paroi de la grille 51 qui n'est visible, du point de vue de ces ions, qu'à travers les orifices de la grille 52'. En conséquence, la durée de vie des grilles 52', 51 selon cette variante de réalisation est améliorée par rapport à celle de la grille 51 du premier mode de réalisation de la figure 1.

[0096] La durée de vie du propulseur 100 résultante est donc améliorée.

[0097] Enfin, l'efficacité est améliorée car les ions positifs peuvent être focalisés par l'ensemble d'au moins deux grilles 51, 52', le flux d'espèces neutres étant quant à lui réduit du fait que la transparence à ces espèces neutres augmente.

[0098] La figure 3 représente une autre variante du premier mode de réalisation de la figure 1, pour laquelle la grille 51 est connectée, par ses deux extrémités à la source 30 de tension alternative radiofréquence.

[0099] Tout le reste est identique et fonctionne de la même façon.

[0100] La figure 4 représente une variante de réalisation à la variante représentée sur la figure 2, pour laquelle la grille 51 est connectée, par ses deux extrémités, à la source de tension alternative radiofréquence.

[0101] Tout le reste est identique et fonctionne de la même façon.

[0102] Les variantes illustrées sur les figures 3 et 4 n'impliquent donc pas la mise en œuvre d'un potentiel de référence pour la grille 51. Dans le domaine spatial, une telle connexion assure une absence de courants parasites circulant entre d'une part, les parties conductrices externes de la sonde spatiale ou du satellite sur lequel le propulseur 100 est monté et d'autre part, le moyen 50 d'extraction et d'accélération des particules chargées proprement dit.

[0103] La figure 5 représente un deuxième mode de réalisation d'un propulseur ionique selon l'invention.

[0104] Il s'agit d'une alternative au premier mode de réalisation représenté sur la figure 1 et pour laquelle il est prévu une première source 30 de tension alternative radiofréquence pour gérer l'extraction et l'accélération des particules chargées du plasma hors de la chambre 10 et une deuxième source 30' de tension alternative, distincte de la première source 30 de tension alternative radiofréquence.

[0105] Le reste est identique et fonctionne de la même façon.

[0106] Dans ce cas, le moyen 60 pour gérer le signal fourni par une source unique de tension alternative radiofréquence 30 telle que proposée à l'appui des figures 1 à 4 ne présente plus d'intérêt.

[0107] Cette alternative permet d'avoir plus de flexibilité.

[0108] En effet, si la source 30 utilisée pour l'extraction et l'accélération des particules chargées hors du plasma reste une source de tension alternative radiofréquence dont la fréquence est comprise entre la fréquence plasma des ions et la fréquence plasma des électrons, la source 30' peut générer un signal différent.

[0109] Par exemple, la source 30' peut générer un signal de tension alternatif radiofréquence, associé à une ou plusieurs bobine(s) 40 pour chauffer l'enveloppe 21 du réservoir 20 conducteur (réalisé en un matériau métallique par exemple), évaporer le propergol solide puis générer un plasma dans la chambre 10, dont la fréquence est différente de celle de la fréquence de fonctionnement de la source 30. La fréquence de fonctionnement de la source 30' peut notamment être supérieure à celle de la fréquence de fonctionnement de la source 30.

[0110] Selon un autre exemple, la source 30' peut générer un signal de tension alternatif dans des fréquences correspondant aux micro-ondes, associé à une ou plusieurs antenne(s) micro-ondes 40.

[0111] La figure 6 représente une variante au deuxième mode de réalisation représenté sur la figure 5.

[0112] La différence entre le propulseur 100 représenté sur la figure 5 et celui qui est illustré sur la figure 1 réside dans le fait que l'électrode 52 logée à l'intérieur de la chambre 10 est supprimée et qu'une grille 52' est ajoutée au niveau de l'extrémité E (sortie) de la chambre 10.

[0113] Le reste est identique et fonctionne de la même façon.

[0114] En d'autres termes, la différence entre la variante représentée sur la figure 6 et le deuxième mode de réalisation de la figure 5 est la même que celle qui a été présenté précédemment entre la variante représentée sur la figure 2 et le premier mode de réalisation de la figure 1.

[0115] La figure 7 représente une autre variante du deuxième mode de réalisation de la figure 5, pour laquelle la grille 51 est connectée à la source 30 de tension alternative radiofréquence.

[0116] Tout le reste est identique et fonctionne de la même façon.

[0117] La figure 8 représente une variante de réalisation à la variante représentée sur la figure 6, pour laquelle la grille 51 est connectée à la source 30 de tension alternative radiofréquence.

[0118] Tout le reste est identique et fonctionne de la même façon.

[0119] Les variantes illustrées sur les figures 7 et 8 n'impliquent donc pas la mise en œuvre d'un potentiel de référence 55 pour la grille 51. Comme expliqué précédemment, dans le domaine spatial, une telle connexion assure une absence de courants parasites circulant entre d'une part, les parties conductrices externes de la sonde spatiale ou du satellite sur lequel le propulseur 100 est monté et d'autre part, le moyen 50 d'extraction et d'accélération des particules chargées proprement dit.

[0120] La figure 9 représente une variante de réalisation au propulseur 100 illustré sur la figure 8.

[0121] Cette variante de réalisation diffère de celle qui est représenté sur la figure 8 par le fait que le réservoir 20 comprend deux étages E1, E2 d'injection de propergol à l'état de gaz vers la chambre 10 plasma.

[0122] En effet, sur la figure 8, et d'ailleurs sur l'ensemble des figures 1 à 7, le réservoir 20 comprend une enveloppe 21 dont une paroi est munie d'un ou plusieurs orifice(s) 22, définissant de ce fait un réservoir avec un unique étage.

[0123] Au contraire, dans la variante représentée sur la figure 9, le réservoir comporte, en outre, une membrane 22' comportant au moins un orifice 22" et séparant le réservoir en deux étages E1, E2. Plus précisément, le réservoir 20 comporte une membrane 22' située entre le propergol solide PS et l'enveloppe 21 munie d'au moins un orifice 22, ladite membrane 22' comportant au moins un orifice 22", la surface de la ou chaque orifice 22" de la membrane 22' étant plus grande que la surface de la ou chaque orifice 22 de l'enveloppe 21 du réservoir 20.

[0124] Cette variante présente un intérêt lorsque, compte tenu du dimensionnement du ou de chaque orifice 22 sur l'enveloppe 21 du réservoir 20 pour obtenir notamment la pression P2 de fonctionnement souhaitée dans la chambre 10 plasma, on aboutit à définir des orifices trop petits. Ces orifices peuvent alors ne pas être réalisables techniquement. Ces orifices peuvent aussi, bien que réalisables techniquement, trop petits pour s'assurer que des poussières de prop

[0125] Dans ce cas, on dimensionne le ou chaque orifice 22' de la membrane 22' de sorte qu'il soit plus grand que le ou chaque orifice 22 réalisé sur l'enveloppe 21 du réservoir 20, le ou chaque orifice 22 restant dimensionné pour obtenir la pression P2 de fonctionnement souhaitée dans la chambre 10 à plasma.

[0126] Bien entendu, un réservoir 20 à double étage peut être envisagé pour l'ensemble des réalisations décrites à l'appui des figures 1 à 7.

[0127] La figure 10 représente un troisième mode de réalisation d'un propulseur ionique selon l'invention.

[0128] Cette figure se présente comme une variante à la réalisation de la figure 8 (grilles 52' et 51' toutes deux reliées à la source de tension). Cependant, elle s'applique également en tant que variante à la figure 6 (grille 52' reliée à la source et grille 51 reliée à la masse), à la figure 7 (électrode 52 et grille 51 toutes deux reliées à la source de tension), à la figure 5 (électrode 52 reliée à la source et grille 51 reliée à la masse) et à la figure 9.

[0129] Le propulseur 100 présenté ici permet de former un faisceau 70' d'ions positifs en sortie de la chambre 10 plasma. Pour cela, la source de tension alternative radiofréquence 30 est remplacée par une source 30" de tension continu (DC). Afin d'assurer l'électroneutralité du faisceau 70', des électrons sont injectés dans le faisceau 70' par un dispositif externe 80, 81 à la chambre 10. Ce dispositif comprend une source de puissance 80 alimentant un générateur d'électrons 81. Le faisceau d'électrons 70" sortant du générateur d'électrons 81 est dirigé vers le faisceau 70' d'ions positifs pour assurer l'électroneutralité.

[0130] Les figures 11 et 12 représentent une conception envisageable pour une chambre plasma 10 et son environnement pour un propulseur 100 conforme aux réalisations de la figure 1, de la figure 3, de la figure 5 ou de la figure 7.

[0131] Sur ces figures, on reconnaît la chambre 10 plasma, le réservoir 20 avec son enveloppe 21 et les orifices 22. Le réservoir 20 sert également d'électrode 52. Dans le cas d'espèce, on a représenté trois orifices 22, équirépartis autour de l'axe de symétrie AX du réservoir 20. L'enveloppe 21 est réalisée en un matériau conducteur, par exemple métallique (Aluminium, Zinc ou un matériau métallique recouvert par le l'or, par exemple) ou en un alliage métallique (inox ou laiton, par exemple). De ce fait, des courants de Foucault et par suite, un effet Joule peuvent être produits dans l'enveloppe 21 du réservoir 20 sous l'action de la source de tension alternative 30, 30' et de la bobine 40 ou, selon le cas, de l'antenne micro-ondes 40. La transmission de la chaleur entre l'enveloppe 21 du réservoir 20 et le propergol solide PS peut s'effectuer par conduction thermique et/ou rayonnement thermique.

[0132] La chambre 10 est enserrée entre deux anneaux 201, 202, montés ensembles par l'intermédiaire de tiges 202, 204, 205 s'étendant le long de la chambre 10 (axe longitudinal AX). La chambre 10 est réalisée en un matériau diélectrique, par exemple en céramique. La fixation des anneaux et des tiges peut s'effectuer par des boulons/écrous (non représentés). Les anneaux peuvent être réalisés en un matériau métallique, par exemple de l'aluminium. Quant aux tiges, elles sont par exemple réalisées en céramique ou en un matériau métallique.

[0133] L'ensemble ainsi formé par les anneaux 201, 203 et les tiges 202, 204, 205 permet la fixation de la chambre 10 et de son environnement, par l'intermédiaire de pièces additionnelles 207, 207', lesquelles prennent en sandwich l'un 203 des anneaux, sur un système (non représenté sur les figures 11 et 12) destiné à accueillir le propulseur, par exemple un satellite ou une sonde spatiale.

Exemple de dimensionnement.

[0134] Un propulseur ionique 100 conforme à celui représenté sur la figure 1 a été testé.

[0135] La chambre 10 plasma et son environnement sont conformes à ce qui a été décrit à l'appui des figures 11 et 12. Les matériaux ont été choisis pour une température maximum acceptable de 300°C.

[0136] Le propergol solide PS utilisé est du diiode (I_2 , masse sèche d'environ 50g).

[0137] Plusieurs orifices 22 ont été prévus sur l'enveloppe 21 conductrice du réservoir 20 pour faire passer le gaz diiode depuis le réservoir 20 vers la chambre 10 à plasma (réservoir 20 à étage unique).

[0138] Une température de référence T1 pour le réservoir 20 a été fixée à 60°C. Ceci peut être obtenu avec une puissance de 10W au niveau de la source de tension alternative radiofréquence 30. La fréquence du signal fourni par la source 30 est choisie pour être entre la fréquence plasma des ions et la fréquence plasma des électrons, en l'occurrence 13,56MHz.

[0139] La pression P1 du gaz diiode dans le réservoir 20 est alors connue par la figure 13 (cas du I_2 ; cf. la formule F1 correspondante), celle-ci fournissant le lien entre P1 et T1. Dans le cas d'espèce, P1 est de 10 Torr (environ 1330 Pa).

[0140] Pour obtenir une efficacité optimale, la pression P2 dans la chambre 10 doit alors être comprise entre 7Pa et 15Pa avec un débit massique m' de gaz diiode inférieur à 15sccm ($\approx 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ kg.s}^{-1}$) entre le réservoir 20 et la chambre 10.

[0141] On peut alors estimer que le diamètre de l'orifice (circulaire) équivalent est d'environ 50 microns. Lorsque

l'orifice est unique, il présentera donc un diamètre de 50 microns. Lorsque plusieurs orifices sont prévus, ce qui est le cas dans le test effectué, il convient alors de déterminer la surface de cette orifice et de répartir cette surface sur plusieurs orifices afin d'obtenir le diamètre de chacun des orifices, qui sera avantageusement le même.

[0142] Toutefois, afin de donner quelques éléments de dimensionnement supplémentaires correspondants aux valeurs numériques fournies ci-dessus, on peut noter les points suivants, dans le cas d'un orifice 22 de surface A.

[0143] Le débit volumique à travers l'orifice 22 peut être estimé par la relation :

$$Q = \frac{v}{4} A (P_1 - P_2) \quad (R1)$$

où :

P_1 est la pression dans le réservoir 20;

P_2 est la pression dans la chambre 10 ; et

v est la vitesse moyenne des molécules de gaz de diode, déterminée par la relation :

$$v = \sqrt{\frac{8kT_1}{\pi m}} \quad (R2)$$

où:

T_1 est la température dans le réservoir 20;

k est la constante de Boltzmann ($k \approx 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$); et

m est la masse d'une molécule du gaz diode ($m(I_2) \approx 4.25 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$).

[0144] Le débit massique m' de gaz de diode à travers l'orifice 22 est alors obtenu par la relation :

$$m' [kg / s] = \frac{MQ}{RT_1} \quad (R3)$$

où:

M est la masse molaire du diode (for I_2 , $M \approx 254 \text{ u}$); et

R est la constante molaire des gaz ($R \approx 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$).

[0145] En combinant les relations (R1) et (R3), on en déduit la surface A de l'orifice 22 par la relation:

$$A = \frac{4m' RT_1}{vM(P_1 - P_2)} \quad (R4)$$

[0146] L'orifice 22 est alors dimensionné.

[0147] Comme on peut le constater dans la relation (R4), la température T_2 dans la chambre 10 à plasma n'intervient pas. Une modélisation plus précise pourrait être obtenue en prenant en compte cette température T_2 . Pour des données plus générales sur ce dimensionnement, on pourra se référer à : A User Guide To Vacuum Technology, third ed., Johan F. O'Hanlon (John Wiley & Sons Inc., 2003).

[0148] Une fois que la surface A de l'orifice 22 est dimensionné, le débit massique m'_{leak} (kg/s) de fuite de gaz de diode lorsque le propulseur 100 est à l'arrêt peut être déterminé par la relation :

$$m'_{leak} [kg / s] \propto \frac{AP_0 M v_0}{4RT_0} \quad (R5)$$

où:

T_0 est la température du propulseur 100 à l'arrêt;

P_0 est la pression du gaz dans le réservoir 20 lorsque le propulseur est à l'arrêt, cette pression étant fournie par la formule F1 (cf. figure 13) à la température T_0 ; et

v_0 est obtenue en utilisant la relation (R2) en substituant T_1 par T_0 .

Fin de l'exemple.

[0149] Il convient de noter que le positionnement du ou de chaque orifice, représenté sur les figures annexés sur une face de l'enveloppe du réservoir 20 faisant face à la chambre 10 plasma pourrait être différent. En particulier, il est tout à fait envisageable de disposer le ou chaque orifice sur la face opposée du réservoir 20.

[0150] Enfin, le propulseur 100 selon l'invention peut en particulier être utilisé pour un satellite S ou une sonde spatiale SP.

[0151] Ainsi, la figure 14 représente, de façon schématique, un satellite S comprenant un propulseur 100 selon l'invention et une source d'énergie SE, par exemple une batterie ou un panneau solaire, connectée à la ou chaque source de tension continue 30" ou alternative 30, 30' (radiofréquence ou micro-ondes, selon le cas) du propulseur 100.

[0152] Quant à la figure 15, elle représente de façon schématique, une sonde spatiale SS comprenant un propulseur 100 selon l'invention et une source d'énergie SE, par exemple une batterie ou un panneau solaire, connectée à la ou chaque source de tension continue 30" ou alternative 30, 30' (radiofréquence ou micro-ondes, selon le cas) du propulseur 100.

Revendications

1. Propulseur (100) ionique, comprenant :

- une chambre (10),
- un réservoir (20) comprenant un agent propulsif solide (PS), ledit réservoir comportant une enveloppe conductrice (21) munie d'au moins un orifice (22) ;
- un ensemble de moyens (30, 30', 40) pour former un plasma ions-électrons dans la chambre (10), ledit ensemble étant apte à sublimer l'agent propulsif solide dans le réservoir (20) pour former un agent propulsif à l'état de gaz, puis à générer ledit plasma dans la chambre (10) à partir de l'agent propulsif à l'état de gaz provenant du réservoir (20) à travers ledit au moins orifice (22) ;
- un moyen (50) d'extraction et d'accélération d'au moins les ions du plasma hors de la chambre (10), ledit moyen (50) d'extraction et d'accélération comprenant :

- soit une électrode (52) logée dans la chambre (10) à laquelle est associée une grille (51) située à une extrémité (E) de la chambre (10), ladite électrode (52) présentant une surface plus importante que la surface de la grille (51),
- soit un ensemble d'au moins deux grilles (52', 51) situées à une extrémité (E) de la chambre (10) ;

- une source de tension continue (30") ou une source de tension alternative radiofréquence (30) disposée en série avec un condensateur (53) et adaptée pour générer un signal dont la radiofréquence est comprise entre la fréquence plasma des ions et la fréquence plasma des électrons, ladite source de tension continue (30") ou alternative radiofréquence étant connectée, par l'une de ses sorties, au moyen (50) d'extraction et d'accélération d'au moins les ions du plasma hors de la chambre (10), et plus précisément:

- soit à l'électrode (52),
- soit à l'une (52') des grilles dudit ensemble d'au moins deux grilles (51, 52'),

la grille (51) associée à l'électrode (52) ou, selon le cas, l'autre grille (51) dudit ensemble d'au moins deux grilles (52', 51) étant soit mise à un potentiel de référence (55), soit connectée à l'autre des sorties de ladite source de tension alternative radiofréquence (30) ;

ledit moyen (50) d'extraction et d'accélération et ladite source de tension (30, 30") continue ou alternative radiofréquence permettant de former, en sortie de la chambre (10), un faisceau (70, 70') comportant au moins des ions; **caractérisé en ce que** ledit réservoir (20) est logé dans la chambre (10).

2. Propulseur (100) selon la revendication 1, dans lequel :

- la source de tension connectée au moyen (50) d'extraction et d'accélération est une source de tension alternative radiofréquence (30),
- l'ensemble de moyens (30, 40) pour former le plasma ions-électrons comprend au moins une bobine (40) alimentée par cette même source de tension alternative radiofréquence (30) par l'intermédiaire d'un moyen (60) pour gérer le signal fourni par ladite source de tension radiofréquence (30) en direction d'une part, de ladite au moins une bobine (40) et d'autre part, du moyen (50) d'extraction et d'accélération pour former un faisceau (70) d'ions et d'électrons en sortie de la chambre (10).

3. Propulseur (100) selon la revendication 1, dans lequel l'ensemble de moyens (30, 40, 30') pour former le plasma ions-électrons comprend :

- au moins une bobine (40) alimentée par une source de tension alternative radiofréquence (30') différente de la source de tension continue (30") ou alternative radiofréquence (30) connectée au moyen (50) d'extraction et d'accélération ; ou
- au moins une antenne (40) micro-ondes alimentée par une source de tension alternative micro-ondes (30').

4. Propulseur (100) selon la revendication précédente, dans lequel la source de tension connectée au moyen (50) d'extraction et d'accélération est une source de tension alternative radiofréquence (30), pour former, en sortie de la chambre (10), un faisceau (70) d'ions et d'électrons.

5. Propulseur (100) selon l'une des revendications 2 ou 4, dans lequel, lorsque le moyen (50) d'extraction et d'accélération est un ensemble d'au moins deux grilles (52', 51) situées à une extrémité (E) de la chambre (10), l'électroneutralité du faisceau (70) d'ions et d'électrons est obtenue au moins en partie par réglage de la durée d'application des potentiels positifs et/ou négatifs issus de la source de tension alternative radiofréquence (30) connectée au moyen (50) d'extraction et d'accélération.

6. Propulseur (100) selon l'une des revendications 2 ou 4, dans lequel, lorsque le moyen (50) d'extraction et d'accélération est un ensemble d'au moins deux grilles (52', 51) situées à une extrémité (E) de la chambre (10), l'électroneutralité du faisceau (70) d'ions et d'électrons est obtenue au moins en partie par réglage de l'amplitude des potentiels positifs et/ou négatifs issus de la source de tension alternative radiofréquence (30) connectée au moyen (50) d'extraction et d'accélération.

7. Propulseur (100) selon la revendication 3, dans lequel la source de tension connectée au moyen (50) d'extraction et d'accélération est une source de tension continue (30"), pour former, en sortie de la chambre (10), un faisceau (70') d'ions, le propulseur (100) comprenant en outre des moyens (80, 81) pour injecter des électrons dans ledit faisceau (70') d'ions afin d'assurer une électroneutralité.

8. Propulseur (100) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le réservoir (20) comporte une membrane (22') située entre l'agent propulsif solide (PS) et l'enveloppe (21) munie d'au moins un orifice (22), ladite membrane (22') comportant au moins un orifice (22"), la surface du ou de chaque orifice (22") de la membrane (22') étant plus grande que la surface du ou de chaque orifice (22) de l'enveloppe (21) du réservoir (20).

9. Propulseur (100) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la ou chaque grille (51, 52') présente des orifices dont la forme est choisie parmi les formes suivantes : circulaires, carrés, rectangles ou en formes de fentes, notamment de fentes parallèles.

10. Propulseur (100) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la ou chaque grille (51, 52') présente des orifices circulaires, dont le diamètre est compris entre 0,2mm et 10mm, par exemple entre 0,5mm et 2mm.

11. Propulseur (100) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel, lorsque le moyen (50) d'extraction et d'accélération hors de la chambre (10) comprend un ensemble d'au moins deux grilles (52', 51) situées à l'extrémité (E) de la chambre (10), la distance entre les deux grilles (52', 51) est comprise entre 0,2mm et 10mm, par exemple entre 0,5mm et 2mm.

12. Propulseur (10) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'agent propulsif solide (PS) est choisi parmi : le diiode, le diiode mélangé à d'autres composants chimiques, le ferrocène, l'adamantane ou l'arsenic.

13. Satellite (S) comprenant un propulseur (100) selon l'une des revendications précédentes et une source d'énergie (SE), par exemple une batterie ou un panneau solaire, connectée à la ou chaque source de tension continue (30") ou alternative (30, 30') du propulseur (100).

14. Sonde spatiale (SS) comprenant un propulseur (100) selon l'une des revendications 1 à 12 et une source d'énergie (SE), par exemple une batterie ou un panneau solaire, connectée à la ou chaque source de tension continue (30") ou alternative (30, 30') du propulseur (100).

Patentansprüche

1. Ionen-Antrieb (100) mit

- einer Kammer (10),
- einem einen Festtreibstoff (PS) enthaltenden Tank (20), wobei der Tank eine mit wenigstens einem Loch (22) versehene leitende Hülle (21) aufweist,
- einer Gesamtheit von Mitteln (30, 30', 40) zum Bilden eines Ionen-Elektronen-Plasmas in der Kammer (10), wobei die Gesamtheit dazu ausgelegt ist, den Festtreibstoff im Tank (20) zu sublimieren, um einen Treibstoff im Gaszustand zu bilden, dann von dem durch das wenigstens eine Loch (22) aus dem Tank (20) kommenden Treibstoff im Gaszustand ausgehend das Plasma in der Kammer (10) zu bilden,
- einem Mittel (50) zum Extrahieren und Beschleunigen von wenigstens den Ionen des Plasmas aus der Kammer (10) heraus, wobei das Extraktions- und Beschleunigungsmittel (50)

- entweder eine in der Kammer (10) gelegene Elektrode (52), die mit einem an einem Ende (E) der Kammer (10) gelegenen Gitter (51) assoziiert ist, wobei die Elektrode (52) eine größere Oberfläche als die Oberfläche des Gitters (51) aufweist,
- oder eine Gesamtheit aus wenigstens zwei an einem Ende (E) der Kammer (10) gelegenen Gittern (52', 51)

aufweist,

- einer Gleichspannungsquelle (30") oder einer mit einem Kondensator (30) in Reihe angeordneten Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle (30), die dazu ausgelegt ist, ein Signal zu erzeugen, dessen Hochfrequenz zwischen der Plasmafrequenz der Ionen und der Plasmafrequenz der Elektronen liegt, wobei die Gleichspannungsquelle (30") oder die Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle über einen ihrer Ausgänge mit dem Mittel (50) zum Extrahieren und Beschleunigen von wenigstens den Ionen des Plasmas aus der Kammer (10) heraus verbunden ist, und zwar genauer gesagt

- entweder mit der Elektrode (52)
- oder mit einem (52') der Gitter der Gesamtheit aus wenigstens zwei Gittern (51, 52'),

wobei das mit der Elektrode (52) assoziierte Gitter (51) oder, je nach Fall, das andere Gitter (51) der Gesamtheit von wenigstens zwei Gittern (52', 51) entweder auf ein Bezugspotential (55) gelegt ist oder mit dem anderen der Ausgänge der Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle (30) verbunden ist, wobei das Mittel (50) zum Extrahieren und Beschleunigen und die Gleichspannungsquelle (30") oder die Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle ermöglichen, am Ausgang der Kammer (10) einen Strahl (70, 70') zu bilden, der wenigstens Ionen aufweist,

dadurch gekennzeichnet, daß der Tank (20) in der Kammer (10) angeordnet ist.

2. Antrieb (100) gemäß Anspruch 1, bei dem

- die mit dem Mittel (50) zum Extrahieren und Beschleunigen verbundene Spannungsquelle eine Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle (30) ist,
- die Gesamtheit von Mitteln (30, 40) zum Bilden des Ionen-Elektronen-Plasmas wenigstens eine Spule (40) aufweist, die durch diese Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle (30) über ein Mittel (60) zum Steuern des Signals, das von der Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle (30) einerseits zur wenigstens einen Spule (40) hin und andererseits zum Extraktions- und Beschleunigungsmittel (50) zum Bilden eines Strahls (70) aus Ionen und Elektronen am Ausgang der Kammer (10) hin abgegeben wird, versorgt wird.

3. Antrieb (100) gemäß Anspruch 1, bei dem die Gesamtheit von Mitteln (30, 40, 30') zum Bilden des Ionen-Elektronen-Plasmas

- wenigstens eine durch eine von der mit dem Extraktions- und Beschleunigungsmittel (50) verbundenen Gleichspannungsquelle (30'') oder Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle (30) verschiedenen Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle (30') versorgte Spule (40) oder
- wenigstens eine durch eine Mikrowellen-Wechselspannungsquelle (30') versorgte Mikrowellenantenne (40)

aufweist.

4. Antrieb (100) gemäß dem vorangehenden Anspruch, bei dem die mit dem Extraktions- und Beschleunigungsmittel (50) verbundene Spannungsquelle eine Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle (30) zum Bilden eines Strahls (70) aus Ionen und Elektronen am Ausgang der Kammer (10) ist.
5. Antrieb (100) gemäß einem der Ansprüche 2 oder 4, bei dem die Elektroneutralität des Strahls (70) aus Ionen und Elektronen dann, wenn das Extraktions- und Beschleunigungsmittel (50) eine Gesamtheit von wenigstens zwei an einem Ende (E) der Kammer (10) gelegenen Gittern (52', 51) ist, wenigstens teilweise durch Regelung der Dauer des Anlegens der von der mit dem Extraktions- und Beschleunigungsmittel (50) verbundenen Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle (30) abgegebenen positiven und/oder negativen Potentiale erhalten wird.
6. Antrieb (100) gemäß einem der Ansprüche 2 oder 4, bei dem die Elektroneutralität des Strahls (70) aus Ionen und Elektronen dann, wenn das Extraktions- und Beschleunigungsmittel (50) eine Gesamtheit von wenigstens zwei an einem Ende (E) der Kammer (10) gelegenen Gittern (52', 51) ist, wenigstens teilweise durch Regelung der Amplitude der von der mit dem Extraktions- und Beschleunigungsmittel (50) verbundenen Hochfrequenz-Wechselspannungsquelle (30) abgegebenen positiven und/oder negativen Potentiale erhalten wird.
7. Antrieb (100) gemäß Anspruch 3, bei dem die mit dem Extraktions- und Beschleunigungsmittel (50) verbundene Spannungsquelle eine Gleichspannungsquelle (30'') zum Bilden eines Ionenstrahls (70') am Ende der Kammer (10) ist, wobei der Antrieb (100) außerdem Mittel (80, 81) zum Einbringen von Elektronen in den Ionenstrahl (70') aufweist, um eine Elektroneutralität zu gewährleisten.
8. Antrieb (100) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei dem der Tank (20) eine zwischen dem Festtreibstoff (PS) und der mit wenigstens einer Öffnung (22) versehenen Hülle (21) liegende Membrane (22') aufweist, wobei die Membrane (22') wenigstens eine Öffnung (22'') aufweist, wobei die Fläche der oder jeder Öffnung (22'') der Membrane (22') größer als die Fläche der oder jeder Öffnung (22) der Hülle (21) des Tanks (20) ist.
9. Antrieb (100) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei dem das oder jedes Gitter (51, 52') Öffnungen aufweist, deren Form unter den folgenden Formen ausgewählt ist: kreisförmig, quadratisch, rechteckig oder schlitzförmig, insbesondere in Form von parallelen Schlitzfen.
10. Antrieb (100) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei dem das oder jedes Gitter (51, 52') kreisförmige Öffnungen aufweist, deren Durchmesser zwischen 0,2 mm und 10 mm beträgt, zum Beispiel zwischen 0,5 mm und 2 mm.
11. Antrieb (100) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei dem dann, wenn das Mittel (50) zum Extrahieren und Beschleunigen nach außerhalb der Kammer (10) eine Gesamtheit von wenigstens zwei am Ende (E) der Kammer (10) gelegenen Gittern (52', 51) aufweist, der Abstand zwischen den Gittern (52', 51) zwischen 0,2 mm und 10 mm beträgt, zum Beispiel zwischen 0,5 mm und 2 mm.
12. Antrieb (100) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei dem der Festtreibstoff (PS) unter folgendem ausgewählt ist: Dijod, Dijod mit anderen chemischen Komponenten vermischt, Ferrocen, Adamantan oder Arsen.
13. Satellit (S) mit einem Antrieb (100) gemäß einem der vorangehenden Ansprüche und einer Energiequelle (SE), zum Beispiel einer Batterie oder einem Sonnensegel, die bzw. das mit der oder jeder Gleichspannungsquelle (30'') oder Wechselspannungsquelle (30, 30') des Antriebs (100) verbunden ist.
14. Raumsonde (SS) mit einem Antrieb (100) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12 und einer Energiequelle (SE), zum Beispiel einer Batterie oder einem Sonnensegel, die bzw. das mit der oder jeder Gleichspannungsquelle (30'') oder Wechselspannungsquelle (30, 30') des Antriebs (100) verbunden ist

Claims

1. Ion thruster (100) comprising:

5 - a chamber (10),
 - a tank (20) comprising a solid propellant (PS), said tank (20) comprising a conductive jacket (21) provided with at least one orifice (22);
 - a set of means (30, 30', 40) for forming an ion-electron plasma in the chamber (10), said set being able to sublime the solid propellant in the tank (20) in order to form a propellant in the gaseous state, then to generate
 10 said plasma in the chamber (10) from the propellant in the gaseous state coming from the tank (20) through said at least one orifice (22);
 - a means (50) for extracting and accelerating at least the ions of the plasma out of the chamber (10), said means (50) for extracting and accelerating comprising:

- 15 • either an electrode (52) housed in the chamber (10) to which is associated a grid (51) located at one end (E) of the chamber (10), said electrode (52) having a surface that is greater than the surface of the grid (51),
 • or a set of at least two grids (52', 51) located at one end (E) of the chamber (10);

20 - a DC voltage source (30'') or a radiofrequency AC voltage source (30) arranged in series with a capacitor (53) and adapted for generating a signal of which the radiofrequency is between the plasma frequency of the ions and the plasma frequency of the electrons, said DC (30'') or radiofrequency AC voltage source being connected, by one of its outputs, to the means (50) for extracting and accelerating at least the ions of the plasma out of the chamber (10), and more precisely:

- 25 • either to the electrode (52),
 • or to one (52') of the grids of said set of at least two grids (51, 52'),

30 with the grid (51) associated with the electrode (52) or, according to the case, the other grid (51) of said set of at least two grids (52', 51) being either set to a reference potential (55), or connected to the other of the outputs of said radiofrequency AC voltage source (30);

said means (50) for extracting and accelerating and said DC or radiofrequency AC voltage source (30, 30'') making it possible to form, at the output of the chamber (10), a beam (70, 70') comprising at least ions;

characterised in that said tank (20) is housed in the chamber (10).

35 2. Thruster (100) according to claim 1, wherein:

- 40 • the voltage source connected to the means (50) for extracting and accelerating is a radiofrequency AC voltage source (30),
 • the set of means (30, 40) for forming the ion-electron plasma comprises at least one coil (40) powered by this same radiofrequency AC voltage source (30) by the intermediary of a means (60) for managing the signal supplied by said radiofrequency voltage source (30) in the direction on the one hand, of said at least one coil (40) and on the other hand, of the means (50) for extracting and accelerating

45 in order to form a beam (70) of ions and of electrons at the output of the chamber (10).

3. Thruster (100) according to claim 1, wherein the set of means (30, 40, 30') for forming the ion-electron plasma comprises:

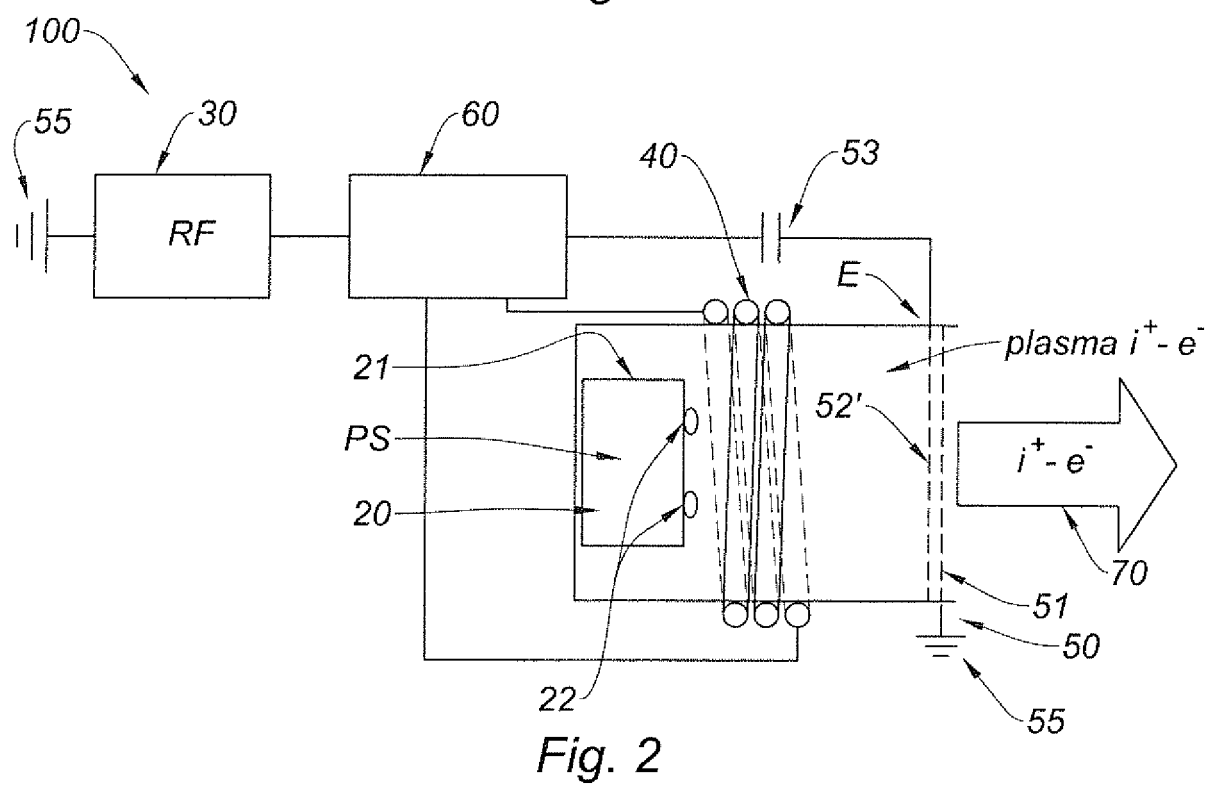
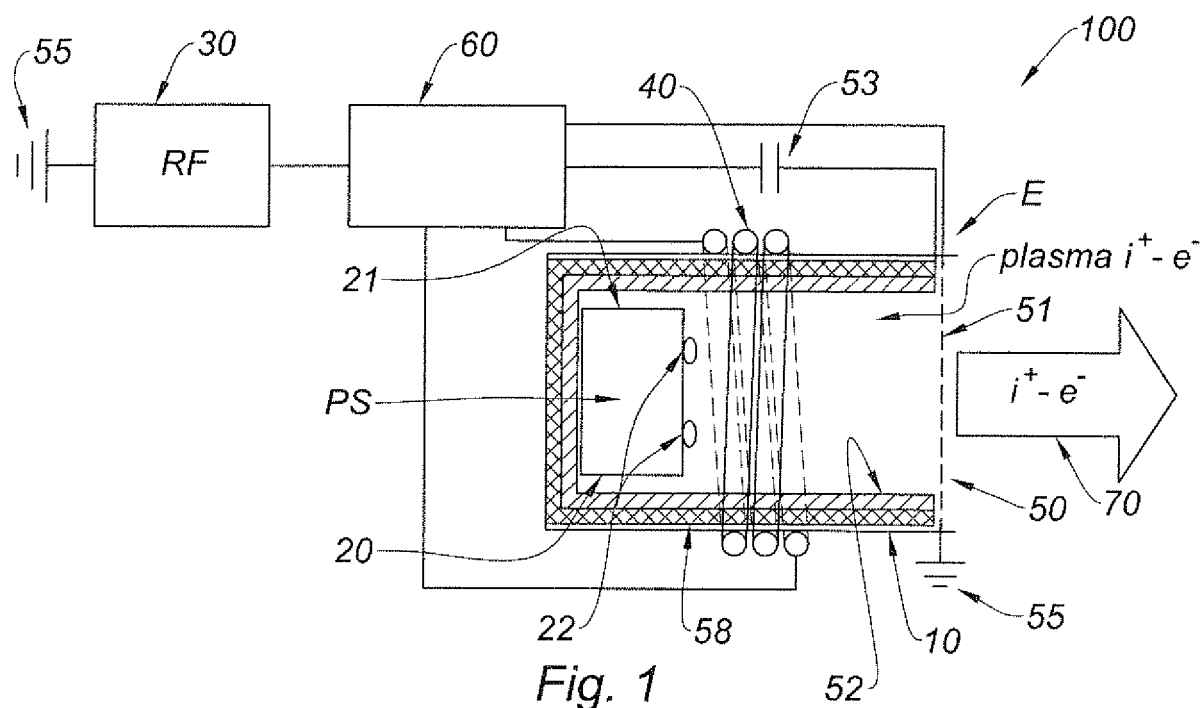
- 50 • at least one coil (40) powered by a radiofrequency AC voltage source (30') different from the DC (30'') or radiofrequency AC (30) voltage source connected to the means (50) for extracting and accelerating; or
 • at least one microwave antenna (40) powered by a microwave AC voltage source (30').

4. Thruster (100) as claimed in the preceding claim, wherein the voltage source connected to the means (50) for extracting and accelerating is a radiofrequency AC voltage source (30), in order to form, at the output of the chamber (10), a beam (70) of ions and of electrons.

5. Thruster (100) according to one of claims 2 or 4, wherein, when the means (50) for extracting and accelerating is a set of at least two grids (52', 51) located at one end (E) of the chamber (10), the electroneutrality of the beam (70)

of ions and electrons is obtained at least partially by adjusting the application duration of the positive and/or negative potentials coming from the radiofrequency AC voltage source (30) connected to the means (50) for extracting and accelerating.

- 5 **6.** Thruster (100) according to one of claims 2 or 4, wherein, when the means (50) for extracting and accelerating is a set of at least two grids (52', 51) located at one end (E) of the chamber (10), the electroneutrality of the beam (70) of ions and electrons is obtained at least partially by adjusting the amplitude of the positive and/or negative potentials coming from the radiofrequency AC voltage source (30) connected to the means (50) for extracting and accelerating.
- 10 **7.** Thruster (100) according to claim 3, wherein the voltage source connected to the means (50) for extracting and accelerating is a DC voltage source (30"), in order to form, at the output of the chamber (10), a beam (70') of ions, with the thruster (100) further comprising means (80, 81) for injecting electrons into said beam (70') of ions in order to provide electroneutrality.
- 15 **8.** Thruster (100) according to one of the preceding claims, wherein the tank (20) comprises a membrane (22') located between the solid propellant (PS) and the jacket (21) provided with at least one orifice (22), said membrane (22') comprising at least one orifice (22"), with the surface of the or of each orifice (22") of the membrane (22') being larger than the surface of the or of each orifice (22) of the jacket (21) of the tank (20).
- 20 **9.** Thruster (100) according to one of the preceding claims, wherein the or each grid (51, 52') has orifices of which the shape is chosen from the following shapes: circular, square, rectangle or in the form of slots, in particular parallel slots.
- 10.** Thruster (100) according to one of the preceding claims, wherein the or each grid (51, 52') has circular orifices, of which the diameter is between 0.2 mm and 10 mm, for example between 0.5 mm and 2 mm.
- 25 **11.** Thruster (100) according to one of the preceding claims, wherein, when the means (50) for extracting and accelerating out of the chamber (10) comprise a set of at least two grids (52', 51) located at the end (E) of the chamber (10), the distance between the two grids (52', 51) is between 0.2 mm and 10 mm, for example between 0.5 mm and 2 mm.
- 30 **12.** Thruster (10) according to one of the preceding claims, wherein the solid propellant (PS) is chosen from: diatomic iodine, diatomic iodine mixed with other chemical components, ferrocene, adamantane or arsenic.
- 13.** Satellite (S) comprising a thruster (100) according to one of the preceding claims and a source of energy (SE), for example a battery or a solar panel, connected to the or to each DC (30") or AC (30, 30') voltage source of the thruster (100).
- 35 **14.** Space probe (SS) comprising a thruster (100) according to one of claims 1 to 12 and a source of energy (SE), for example a battery or a solar panel, connected to the or to each DC (30") or AC (30, 30') voltage source of the thruster (100).
- 40
- 45
- 50
- 55



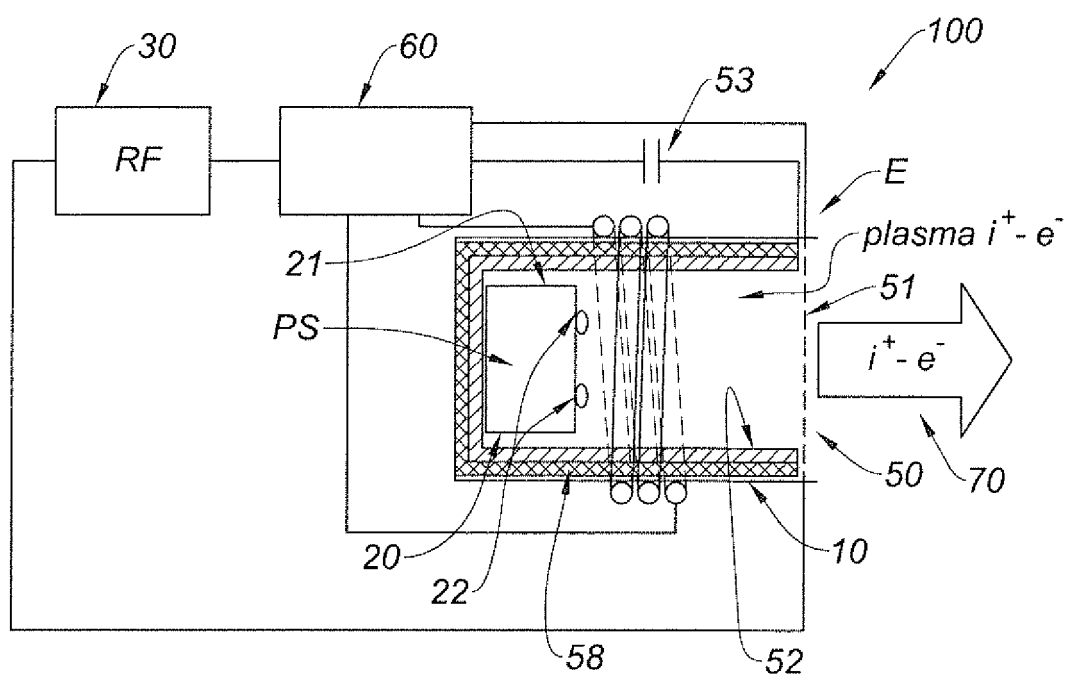


Fig. 3

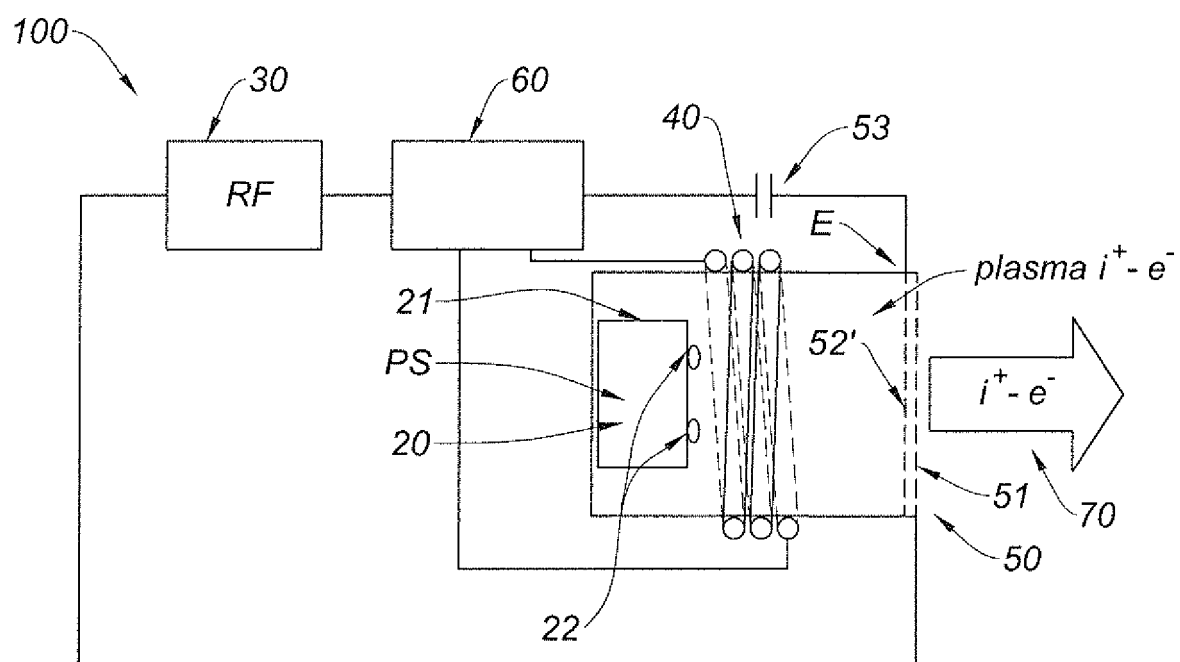
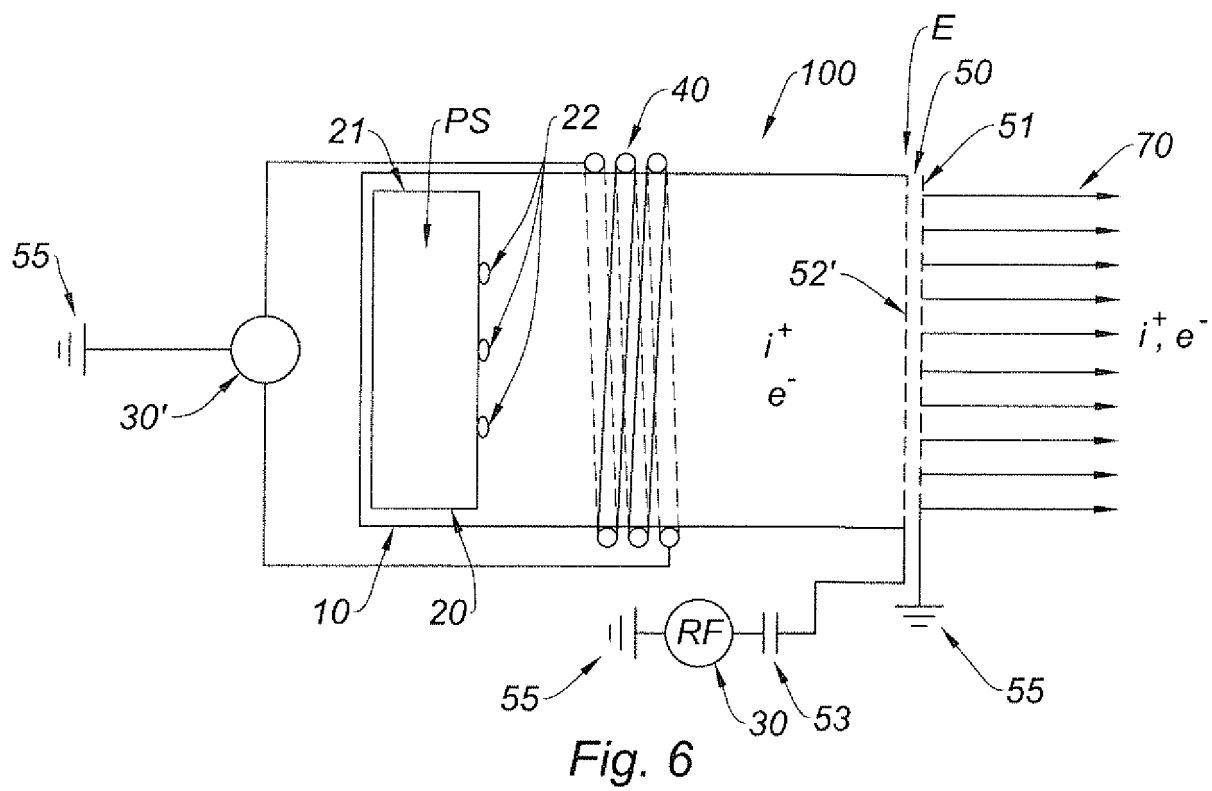
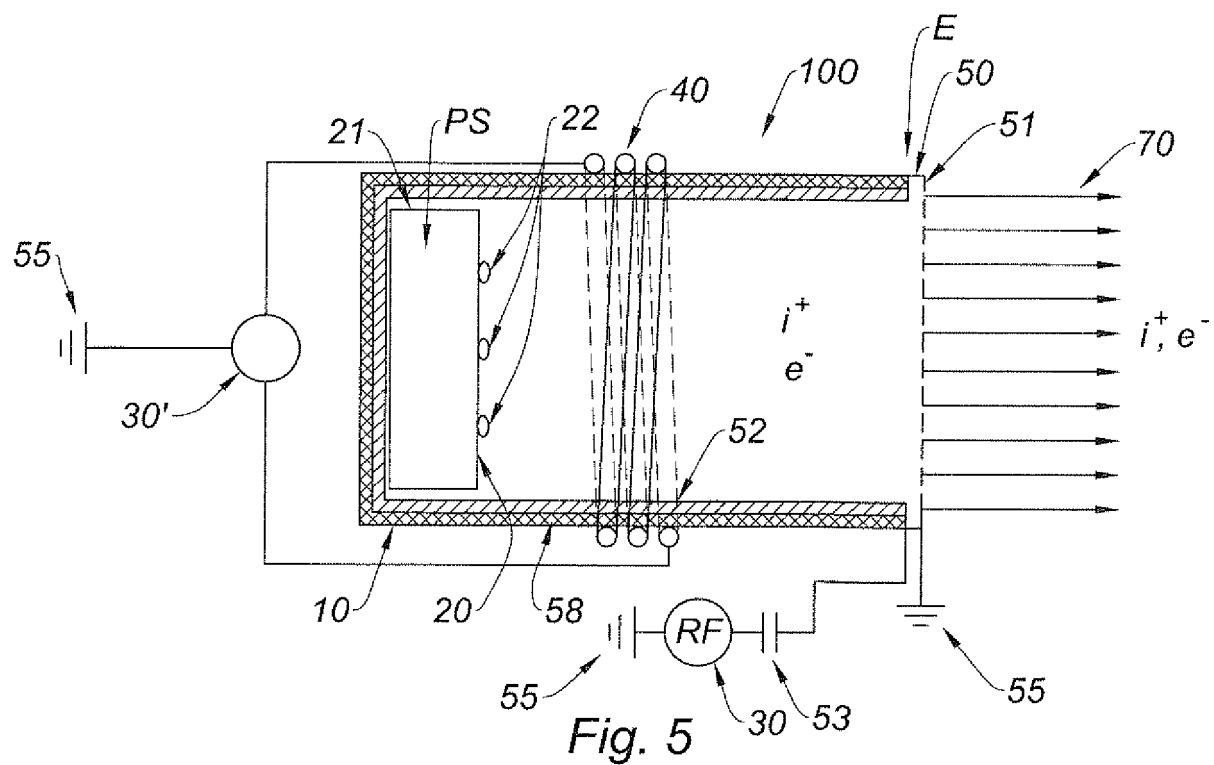


Fig. 4



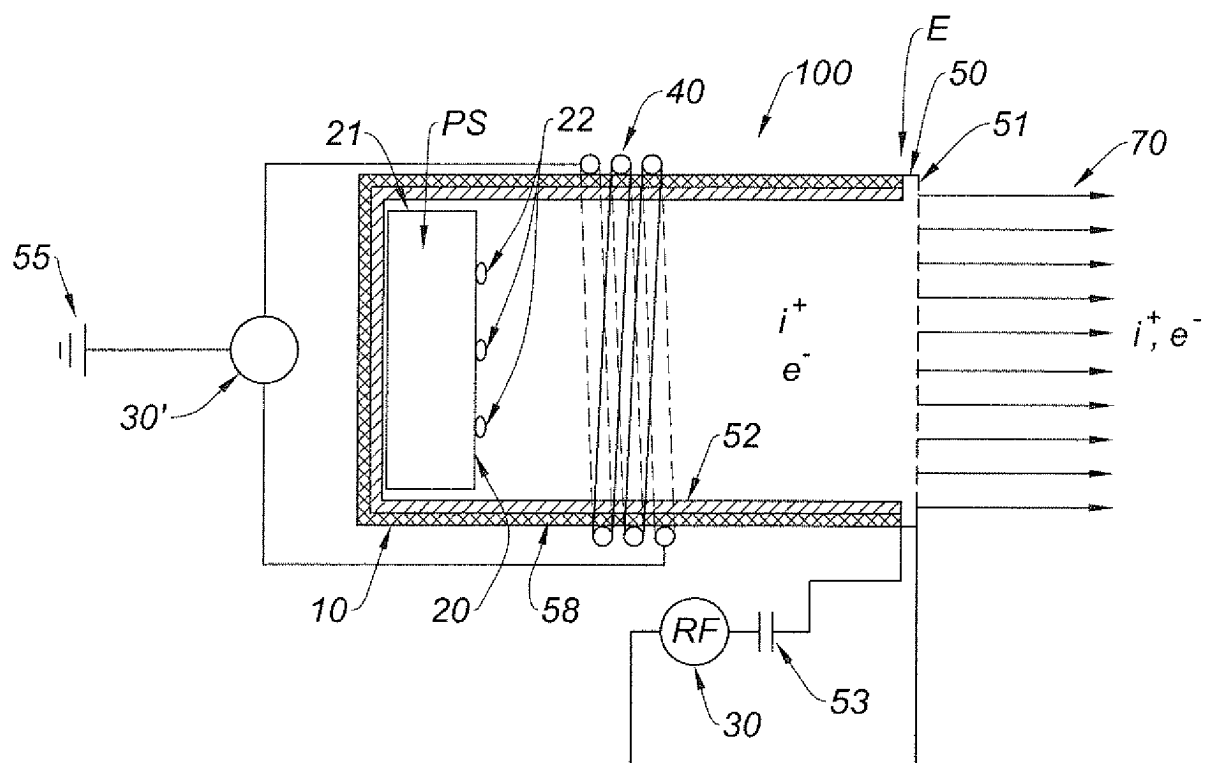


Fig. 7

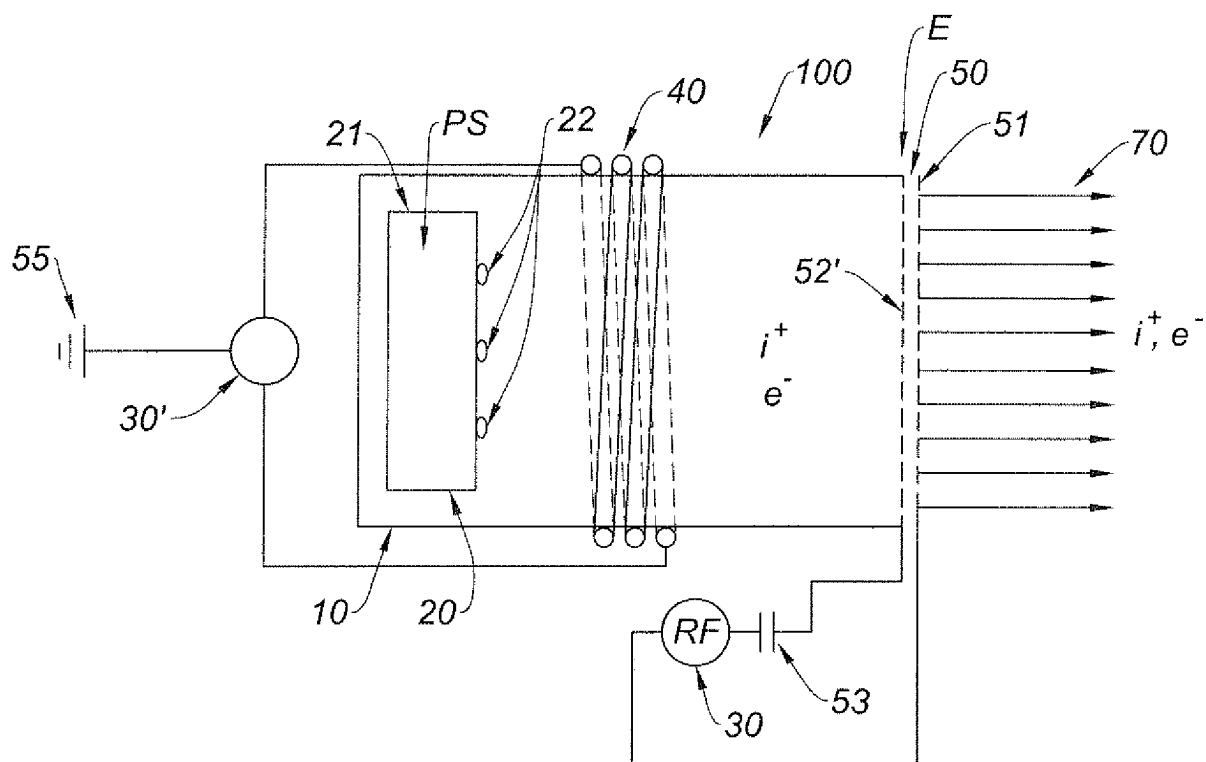


Fig. 8

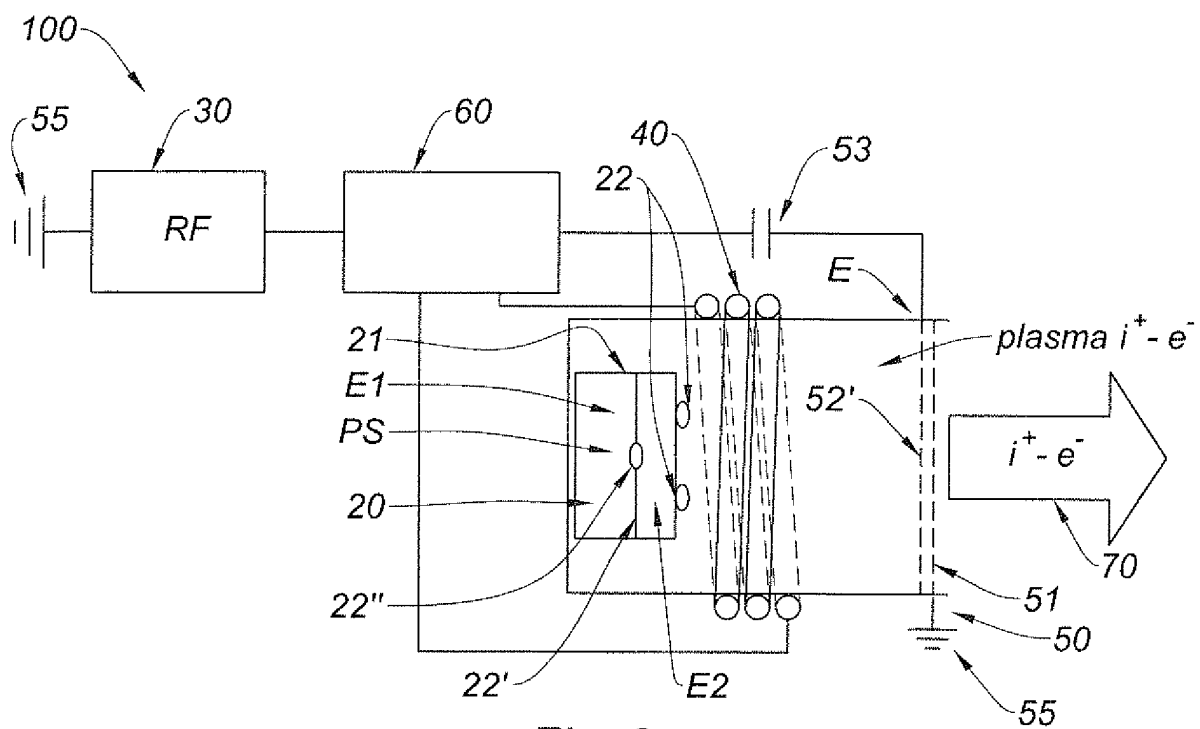


Fig. 9

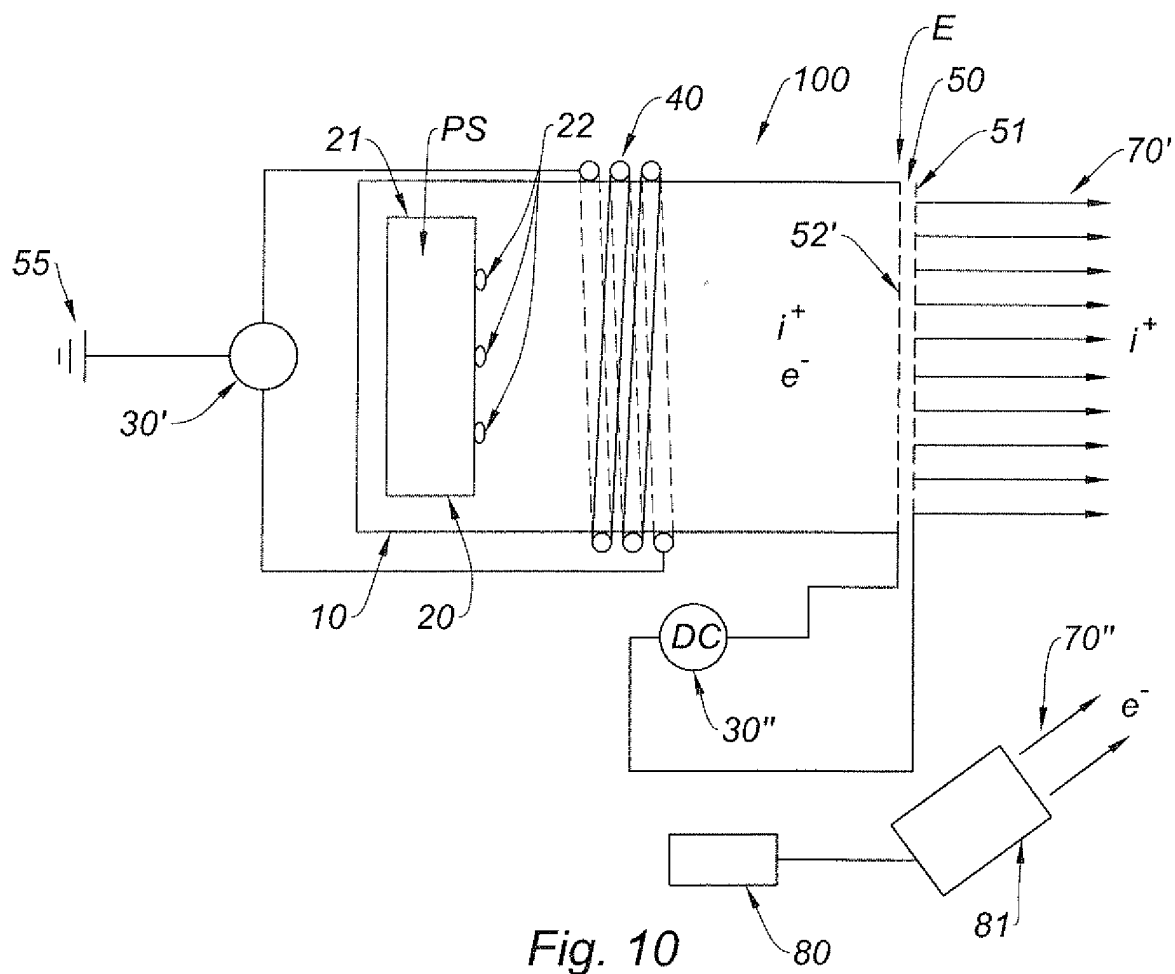
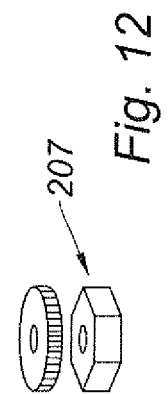
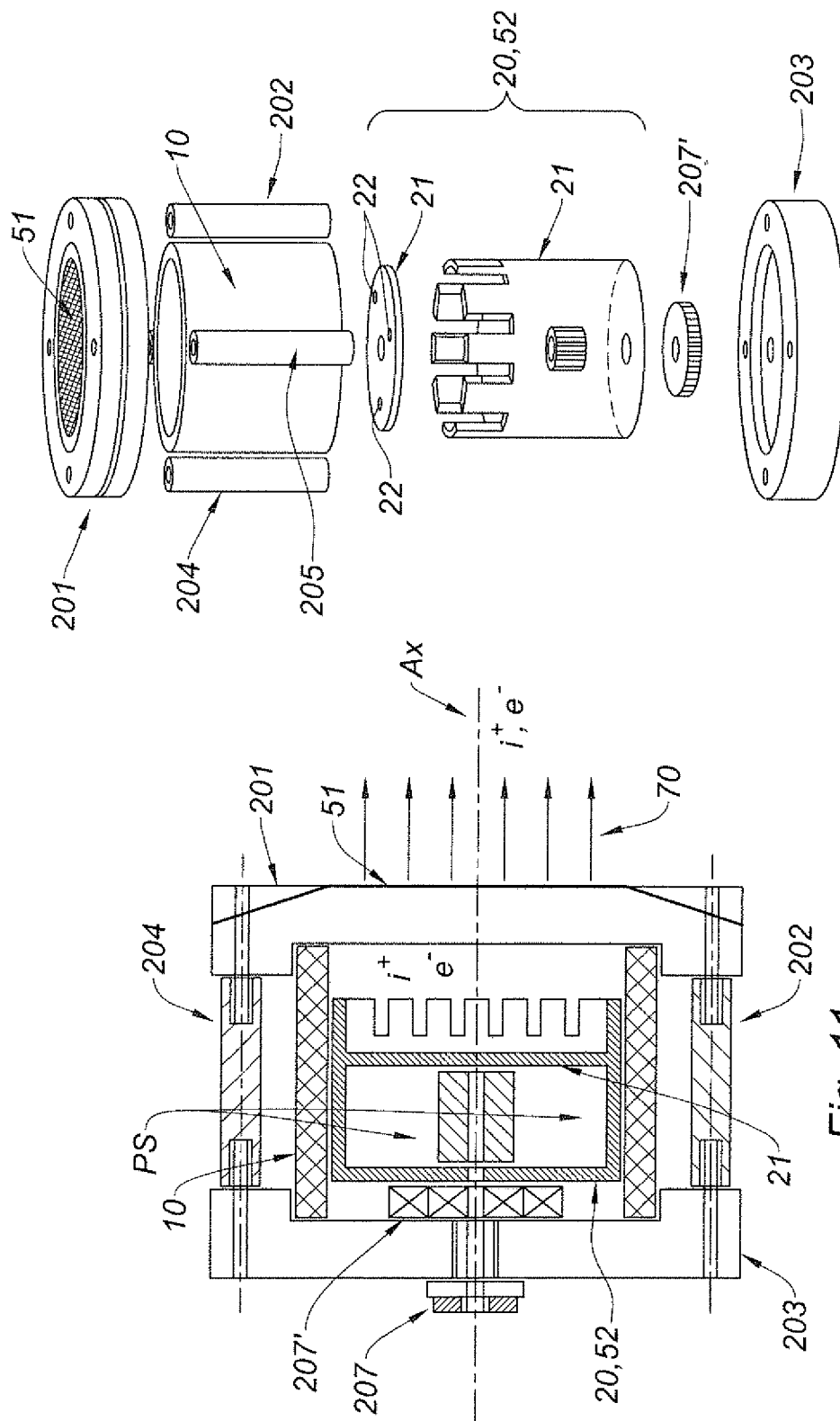


Fig. 10



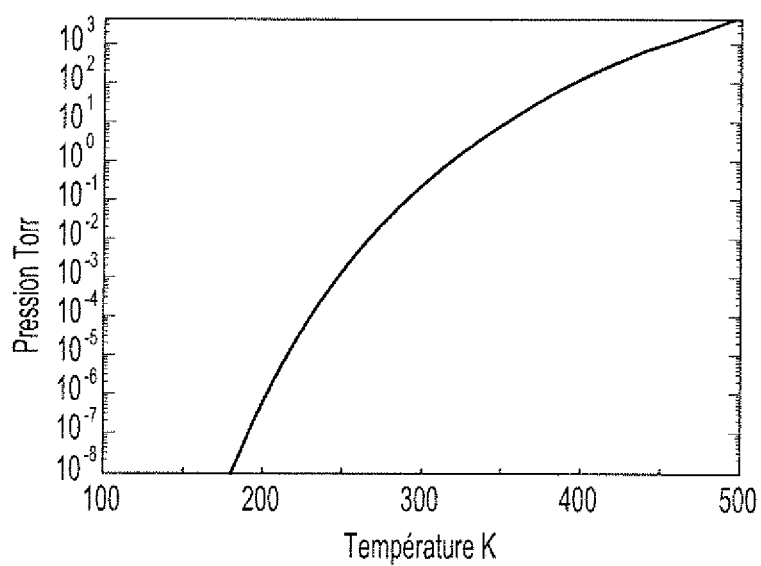


Fig. 13

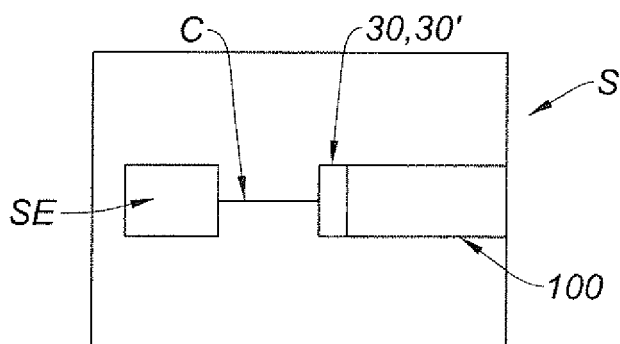


Fig. 14

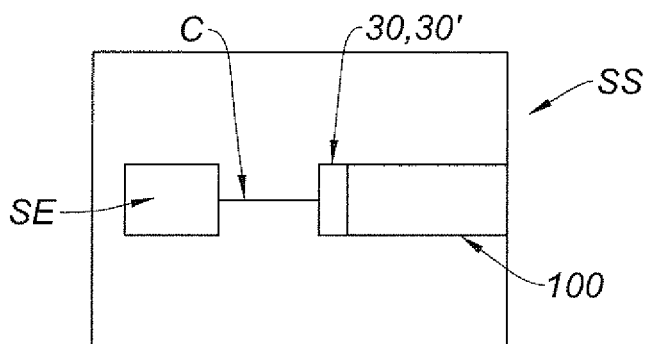


Fig. 15

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 8610356 B [0021]
- US 6609363 B [0023]
- US 7059111 B [0024]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **KEIDAR.** Electric propulsion for small satellites. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2015, vol. 57 [0007]
- **POLZIN.** Iodine Hall Thruster Propellant Feed System for a CubeSat. *American Institute of Aeronautics and Astronautics* [0015]
- **G.P. BAXTER ; C.H. HICKEY ; W.C. HOLMES.** The Vapor Pressure Iodine. *J. Am. Chem. Soc.*, 1907, vol. 29 (2), 12-136 [0054]
- **L.J. GILLESPIE.** The normal Vapor Pressure of Crystalline Iodine. *J. Am. Chem Soc.*, 1936, vol. 58 (11), 2260-2263 [0054]
- **JOHAN F. O'HANLON.** A User Guide To Vacuum Technology. John Wiley & Sons Inc, 2003 [0147]