(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
12 décembre 2024 (12.12.2024)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2024/252084 A1

(51) Classification internationale des brevets :
F03H 1/00 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2024/050693

(22) Date de dépôt international :
30 mai 2024 (30.05.2024)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
FR2305876 09 juin 2023 (09.06.2023) FR

(71) Déposant : **EXOTRAIL** [FR/FR] ; 3 rue Galvani, 91300 MASSY (FR).

(72) Inventeurs : **GUGLIELMI, Alexandre** ; 77 rue de Gravigny, 91380 CHILLY MAZARIN (FR). **LASCOMBES, Paul** ; 2 rue André Chenier, 92260 FONTENAY AUX ROSES (FR).

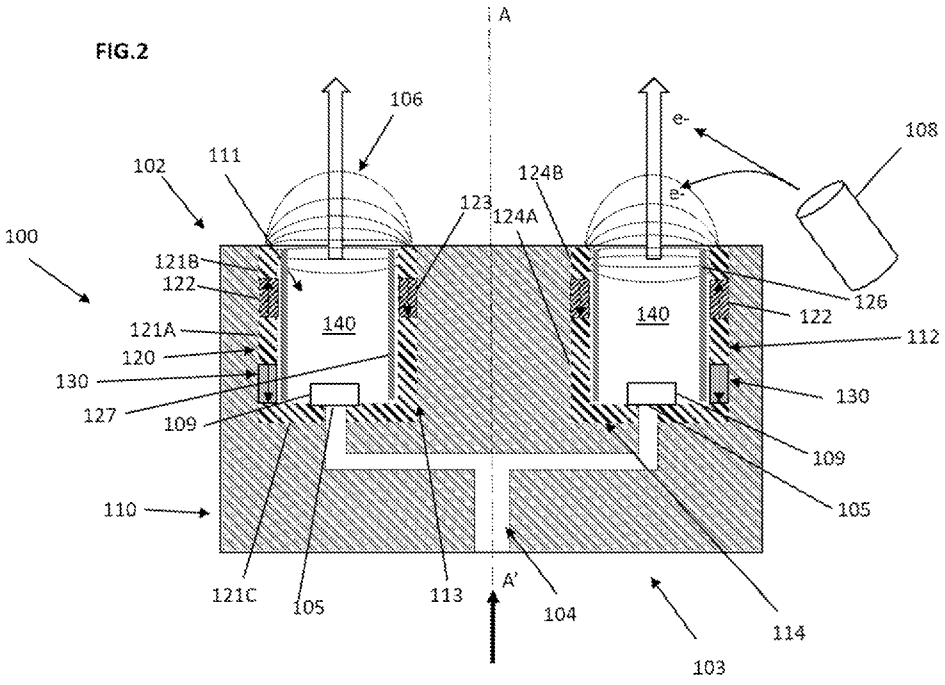
(74) Mandataire : **PLASSERAUD IP** ; 104 rue de Richelieu, 75002 PARIS (FR).

(81) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible)* : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH,

(54) **Title:** HALL-EFFECT PROPULSION DEVICE WITH MAGNETIC COMPENSATION

(54) **Titre :** DISPOSITIF DE PROPULSION À EFFET HALL AVEC COMPENSATION MAGNETIQUE

FIG.2



(57) **Abstract:** The invention relates to a Hall-effect propulsion device (100) comprising: - a support body (110) extending between a first end (102) and a second end (103), the body comprising an annular outer wall (112) and an annular inner wall (113) arranged coaxially around a longitudinal axis AA' to form an annular channel (111), the first end (102) having an annular opening forming an ion outlet; - a magnetic circuit (120) arranged in the annular channel (111) and configured to generate a radial magnetic barrier in the annular channel close to the first end of the channel (102); - at least one magnetic compensation magnetic element (130) arranged in the magnetic circuit and configured to compensate for at least a fraction of an absolute value of the residual magnetic moment generated by the magnetic circuit (120).

[Suite sur la page suivante]

WO 2024/252084 A1

TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) **États désignés** *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible)* : ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— *avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))*

(57) Abrégé : Un dispositif de propulsion à effet Hall (100) comprenant : - un corps de support (110) s'étendant entre une première extrémité (102) et une seconde extrémité (103), ledit corps comportant une paroi externe annulaire (112) et une paroi interne annulaire (113) agencées coaxialement autour d'un axe longitudinal AA' pour former un canal annulaire (111), ladite première extrémité (102) présentant une ouverture annulaire formant une sortie d'ions; - un circuit magnétique (120) agencé dans le canal annulaire (111) et configuré pour générer une barrière magnétique radiale dans le canal annulaire, à proximité de la première extrémité du canal (102); - au moins un élément magnétique de compensation magnétique (130) agencé dans ledit circuit magnétique et configuré pour compenser au moins une fraction d'une valeur absolue du moment magnétique résiduel généré par ledit circuit magnétique (120).

Description

DISPOSITIF DE PROPULSION A EFFET HALL AVEC COMPENSATION MAGNETIQUE

Domaine technique

[0001] La présente divulgation concerne le domaine des dispositifs d'éjection d'ions, notamment pour former des propulseurs plasmiques ou propulseurs électriques.

[0002] La présente divulgation concerne plus particulièrement un dispositif de propulsion plasmique à Effet Hall avec compensation magnétique.

Technique antérieure

[0003] Dans le domaine de la propulsion spatiale, il est bien connu d'utiliser des propulseurs électriques ou plasmiques pour maintenir un satellite en orbite géostationnaire, ou pour déplacer un satellite entre deux orbites, ou pour compenser des forces de traînée sur des satellites placés sur une orbite dite basse, ou encore pour les missions nécessitant des poussées faibles sur des temps très longs lors d'une mission interplanétaire. En effet, les propulseurs plasmiques permettent de générer une impulsion spécifique généralement plus élevée que les propulseurs chimiques, ce qui implique une réduction de la consommation du carburant (aussi appelé ergol) avec pour conséquence une augmentation de la durée de vie et/ou de la charge utile des satellites.

[0004] Il existe plusieurs types de propulseurs plasmiques selon leur mode d'amorçage du plasma et le mode d'accélération du plasma vers la sortie du canal d'éjection. On peut notamment classer les propulseurs plasmiques en trois grandes catégories : les propulseurs électrothermiques, les propulseurs électrostatiques et les propulseurs électromagnétiques.

[0005] Les propulseurs électrothermiques utilisent l'effet Joule pour chauffer le gaz qui est ensuite accéléré. Le propulseur dit « arc-jet » utilise des arcs électriques formés entre une cathode centrale et une anode externe pour chauffer le gaz et créer l'amorçage du plasma. On peut également citer le propulseur à Radio Fréquence (RF) qui appartient à cette catégorie.

[0006] Les propulseurs électromagnétiques utilisent la force de Lorentz pour accélérer le plasma. Dans cette catégorie, on peut citer par exemple le propulseur dit magnétoplasmadynamique qui est constitué d'une source de décharge coaxiale métallique dont le conducteur central est la cathode et le conducteur externe est l'anode. La différence de potentiel appliquée entre l'anode et la cathode permet d'initier un plasma entre ces électrodes. Simultanément, le fort courant les traversant induit un champ magnétique azimutal autour de chaque électrode. Ainsi, le couplage entre le champ électrique radial et

le champ magnétique azimutal dans la cavité crée une force de Lorentz qui propulse le plasma axialement vers la sortie.

[0007] Dans la famille de propulseurs électromagnétiques, on peut également citer les propulseurs sans cathode à tuyère magnétique. On peut citer par exemple le propulseur à « résonance gyromagnétique » des électrons libres magnétisés du plasma ou ECR (« Electron Cyclotron Resonance » suivant la dénomination anglo-saxonne). Dans cette famille, le plasma est accéléré par le concept de tuyère magnétique.

[0008] Les propulseurs électrostatiques sont basés sur l'accélération des ions d'un plasma à l'aide d'un gradient de champ électrique vers la sortie du canal d'éjection. Les propulseurs plasmiques dits à effet Hall appartiennent à cette catégorie.

[0009] Tous ces propulseurs utilisent généralement des bobines et/ou des aimants permanents pour produire un champ magnétique qui participe au processus d'accélération en confinant les électrons dans la cavité appelée la chambre d'ionisation.

[0010] A titre d'exemple et en référence à la figure 1, le fonctionnement et la structure d'un ensemble propulseur plasmique à effet Hall conventionnel 1 est décrit plus en détail ci-dessous.

[0011] L'ensemble propulseur à effet Hall 1 comprend un circuit magnétique 20 et un corps de support 10.

[0012] Le corps de support 10 présente une forme de révolution autour d'un axe longitudinal AA'. Le corps de support 10 comprend un canal annulaire 11 dans lequel est reçu le circuit magnétique 20. L'ensemble propulseur comprend une première extrémité 2 ayant une ouverture annulaire et une seconde extrémité 3. Les surfaces intérieures du canal annulaire 11 sont pourvues de parois 26, 27 permettant de délimiter physiquement la zone d'ionisation et d'accélération. Les parois sont par exemple réalisées en matériau céramique.

[0013] Le circuit magnétique 20 est formé par des éléments à forte susceptibilité magnétique positive 21A, 21B, 24A, 24B et des aimants permanents générateurs de champ magnétique 22, 23 agencés dans le canal annulaire 11, autour d'un axe central longitudinal AA' pour former une chambre annulaire d'ionisation et d'accélération 40 dans le canal annulaire 11.

[0014] Un circuit d'alimentation en gaz propulsif 4 est positionné dans une partie inférieure du corps 10. La direction d'injection du gaz est représentée par une flèche à l'entrée du circuit sur la figure 1. L'ensemble propulseur comprend un ou plusieurs trous d'entrée de gaz formés dans le fond du canal annulaire reliés au circuit d'alimentation en gaz ionisable

4. Le gaz est introduit dans la chambre annulaire d'ionisation et d'accélération 40 à travers les trous d'alimentation en gaz. A titre d'exemple, sur la figure 1, deux trous d'alimentation 5 sont représentés.

[0015] La polarisation de chaque aimant permanent est choisie de manière à créer des lignes de champ magnétique 6, assurant le confinement des électrons fournis par la cathode 8. Leur configuration géométrique est responsable de l'effet de « lentille magnétique » au niveau de la première extrémité 2 du canal annulaire 11. Cette configuration spécifique des lignes de champ magnétique est désignée par le terme « lentille magnétique » ou « barrière magnétique » qui est essentielle au mode de fonctionnement d'un propulseur à effet Hall et est responsable de l'ionisation des atomes neutres et de l'accélération des ions.

[0016] L'ensemble propulseur comprend en outre une anode 9 positionnée à l'intérieur du canal annulaire 11, à proximité du fond du canal. L'anode 9 a généralement une fonction de diffusion du gaz propulsif et peut présenter une structure étagée comme proposé dans le document US10723489B2. Une cathode creuse 8 est située en dehors du canal annulaire 11, au niveau de la première extrémité aval ouverte 2 du canal 11. La cathode est orientée en direction de la première extrémité ouverte du canal afin d'éjecter des électrons en direction de l'axe principal AA' et de la zone située en aval de l'extrémité ouverte du canal. Lorsqu'une tension est appliquée entre la cathode et l'anode, la faible conductivité axiale des électrons provoquée par leur confinement dans la « barrière magnétique », génère un champ électrique dans la chambre d'ionisation 40 qui s'étend axialement par rapport l'axe longitudinal AA'.

[0017] Le fonctionnement d'un tel propulseur plasmique à effet Hall est brièvement décrit ci-dessous.

[0018] Les électrons éjectés par la cathode creuse 8 se dirigent en partie vers l'anode 9 et ils sont premièrement piégés et confinés par le champ magnétique radial intense au voisinage de la première extrémité 2 du canal annulaire. Les électrons entrent ensuite en collision avec les atomes ou molécules constituant l'ergol (injecté sous forme gazeuse depuis le fond du canal annulaire) et circulant de l'aval vers l'amont du canal pour atteindre l'anode 9. Ces électrons réalisent ainsi une ionisation partielle ou totale du gaz, et le mélange d'ions et d'électrons constituent alors l'état plasma. D'autre part, les électrons piégés par le champ magnétique créent le champ électrique axial responsable de l'accélération des ions entre l'anode et la sortie du canal, de telle sorte que ces ions sont éjectés à grande vitesse du canal, selon une direction d'éjection principalement parallèle à

l'axe longitudinal AA', générant ainsi une poussée dirigée vers l'amont. La direction d'éjection d'ions est représentée sur la figure 1 par des flèches.

[0019] L'utilisation de bobines électromagnétiques et/ou d'aimants permanents pour former les circuits magnétiques 20 génèrent un moment magnétique résiduel dans le dispositif de propulsion. Lorsqu'un tel propulseur plasmique est implémenté dans les satellites, le moment magnétique résiduel du propulseur contribue au moment magnétique résiduel global du satellite. Dans le cas où les propulseurs sont destinés à des satellites en orbite terrestre basse (« Low Earth Orbit »), l'interaction entre le champ magnétique terrestre et le moment magnétique résiduel global du satellite est l'une des principales sources de désorientation et de perturbation au bon fonctionnement du satellite.

[0020] Première solution connue consiste à utiliser des dispositifs électromécaniques de stabilisation tels des roues à réaction ou actionneurs gyroscopiques pour réajuster l'attitude du satellite. Ces dispositifs permettent de garder le contrôle de l'orientation du satellite, mais de manière transitoire car il est nécessaire de dissiper l'énergie qu'ils ne font que stocker de manière transitoire. Ils sont aussi une source de consommation électrique. Traditionnellement, un satellite a toujours un dispositif d'orientation magnétique appelé magnéto-coupleur qui consiste en une bobine associée à une alimentation électrique. Ce système est actif seulement quand le satellite est opérationnel, consomme de l'électricité et contribue de manière significative à la masse du satellite. Il faut donc réduire sa taille en limitant les moments magnétiques parasites.

[0021] Une solution consiste en l'utilisation de bobines de génération de champ magnétique qui permettent de compenser le champ magnétique du propulseur et donc de minimiser, voire d'annuler le moment magnétique résiduel. Les documents WO2019229286A1 et US10752385 présentent des exemples de cette solution. Cette solution implique cependant une plus grande complexité dans l'alimentation électrique ainsi qu'une surconsommation électrique.

[0022] De manière générale, l'annulation, ou du moins la minimisation, du moment magnétique résiduel, peut se faire par l'ajout de dispositifs d'écrantage magnétique (blindage) et/ou par l'ajout de dispositifs magnétiques de compensation, qui seront dimensionnés et placés de manière à minimiser le moment magnétique résiduel. De telles solutions sont décrites dans les documents suivants : M de Soria-Santacruz et al., "An Approach to Magnetic Cleanliness for the Psyche Mission," (2020 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2020, pp. 1-15), Noel Sebastian Janes, " Small Satellite Design for High Sensitivity Magnetic Measurements", A. Lassakeur and C. Underwood, "Magnetic Cleanliness Program on CubeSats for Improved Attitude Stability," (2019 9th

International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 123-129).

[0023] Le document WO2021201871A1 décrit un ensemble propulseur à effet Hall qui comprend un propulseur à effet Hall et un ensemble de montage couplé à une extrémité du propulseur à effet Hall. L'ensemble de montage est configuré pour supporter le propulseur à effet Hall et pour fixer le propulseur à effet Hall sur un engin spatial. L'ensemble de montage comprend une pluralité d'éléments magnétiques qui peuvent être des bobines électromagnétiques ou des aimants permanents qui permettent de produire un moment dipolaire magnétique pour atténuer ou réduire le moment magnétique du propulseur à effet Hall. Les éléments magnétiques sont positionnés éloignés du propulseur à effet Hall afin de ne pas perturber le champ magnétique généré par le circuit magnétique à proximité de l'extrémité d'éjection des ions du propulseur.

[0024] Une telle solution n'est pas entièrement satisfaisante. Les aimants qui forment le circuit magnétique du propulseur sont proches de la chambre d'ionisation et subissent ainsi un échauffement important. Les parois formant la chambre d'ionisation peuvent atteindre généralement plus de 300°C, et les aimants plus de 200°C. Les propriétés magnétiques des aimants, en particulier leur rémanence, peuvent changer avec la température. La rémanence et donc le moment magnétique résiduel est différent selon que le propulseur est allumé, donc chaud, ou éteint, donc froid. En outre, cette rémanence peut décroître dans le temps de manière irréversible. Le fait de disposer d'un ou plusieurs aimants de compensation à des emplacements éloignés de la chambre d'ionisation, et donc dans une zone plus froide, ne permet pas de prendre en compte cette dépendance de la rémanence des aimants principaux en température. La compensation produite par les aimants de compensation n'est donc pas parfaite.

[0025] En outre, la compacité d'un tel propulseur à effet Hall n'est pas optimale car il nécessite un ensemble de montage permettant de supporter les aimants de compensation.

[0026] Un but de la présente divulgation est de proposer un propulseur plasmique permettant de surmonter les inconvénients de l'art antérieur et en particulier offrant une solution simple à mettre en œuvre pour compenser le moment magnétique résiduel résultant du circuit magnétique du propulseur, tout en maintenant une configuration optimale du champ magnétique généré par le circuit magnétique afin de garantir les performances du propulseur et la durée de vie de ce dernier.

Résumé

[0027] La présente divulgation vient améliorer la situation.

[0028] Il est proposé un dispositif de propulsion à effet Hall comprenant :

- un corps de support s'étendant entre une première extrémité et une seconde extrémité, ledit corps comportant une paroi externe annulaire et une paroi interne annulaire agencées coaxialement autour d'un axe longitudinal AA' pour former un canal annulaire, ladite première extrémité présentant une ouverture annulaire formant une sortie d'ions;
- un circuit magnétique agencé dans le canal annulaire et configuré pour générer une barrière magnétique radiale dans le canal annulaire, à proximité de la première extrémité du canal;
- au moins un élément magnétique de compensation magnétique agencé dans ledit circuit magnétique et configuré pour compenser au moins une fraction d'une valeur absolue du moment magnétique résiduel généré par ledit circuit magnétique.

[0029] Selon un mode de réalisation, le circuit magnétique comprend au moins un élément à forte susceptibilité magnétique positive et au moins un élément magnétique générateur de champ magnétique configurés pour générer ladite barrière magnétique radiale, ledit au moins un élément magnétique de compensation étant positionné dans le circuit magnétique de sorte qu'il soit plus éloigné de la première extrémité que ledit au moins un élément magnétique générateur de champ magnétique.

[0030] Selon un mode de réalisation, ledit au moins un élément magnétique de compensation magnétique présente une forme annulaire continue.

[0031] Alternativement, ledit au moins un élément magnétique de compensation magnétique comprend une pluralité d'éléments magnétiques discrets positionnés circonférentiellement par rapport à l'axe longitudinal AA'.

[0032] Selon un autre mode de réalisation, ledit au moins un élément à forte susceptibilité magnétique positive comprend une pluralité d'éléments externes à forte susceptibilité magnétique positive agencés contre la paroi externe annulaire, ledit élément magnétique de compensation magnétique étant maintenu en position entre deux éléments externes à forte susceptibilité magnétique positive.

[0033] Selon encore un autre mode de réalisation, ledit au moins un élément à forte susceptibilité magnétique positive comprend une pluralité d'éléments externes à forte susceptibilité magnétique positive agencés contre la paroi externe annulaire, au moins un élément externe parmi la pluralité d'éléments externes à forte susceptibilité magnétique positive étant muni d'un logement adapté pour recevoir ledit au moins un élément magnétique de compensation.

[0034] Les caractéristiques exposées dans les paragraphes suivants peuvent, optionnellement, être mises en œuvre, indépendamment les unes des autres ou en combinant les unes avec les autres :

[0035] Ledit au moins un élément de compensation magnétique est réalisé en matériau choisi parmi les matériaux suivants : néodyme-fer-bore, samarium-cobalt ou hexaferrites.

[0036] Ledit au moins élément magnétique de compensation se présente sous la forme d'une bobine magnétique ou d'un aimant permanent.

[0037] Selon un mode de réalisation, le dispositif comprend en outre un circuit d'alimentation de gaz configuré pour injecter un gaz ionisable dans le canal annulaire.

[0038] Selon un autre mode de réalisation, le dispositif comprend en outre un circuit électrique configuré pour générer un champ électrique dans une partie du canal annulaire, ledit circuit électrique comprenant une anode annulaire agencée à l'intérieur du canal annulaire et au moins une cathode agencée en dehors du canal annulaire, à proximité de la première extrémité du canal annulaire.

[0039] De préférence, ledit au moins un élément magnétique de compensation magnétique est configuré de sorte que la valeur absolue du moment magnétique résiduel du circuit est au moins inférieure à 0,1A.m² sur une plage de température comprise entre 50 °C et 250 °C.

Brève description des dessins

[0040] D'autres caractéristiques, détails et avantages apparaîtront à la lecture de la description détaillée ci-après, et à l'analyse des dessins annexés, sur lesquels :

Fig. 1

[0041] [Fig. 1] La figure 1 représente schématiquement une vue en coupe d'un propulseur plasmique à effet Hall selon l'art antérieur.

Fig. 2

[0042] [Fig. 2] La figure 2 représente schématiquement une vue en coupe d'un ensemble propulseur plasmique à effet Hall selon un mode de réalisation.

Fig. 3

[0043] [Fig. 3] La figure 3 représente schématiquement une vue en coupe du circuit magnétique du dispositif de propulsion plasmique à effet Hall sans le corps de support de la figure 2.

Fig. 4

[0044] [Fig. 4] La figure 4 représente schématiquement une vue en coupe du circuit magnétique du dispositif de propulsion plasmique à effet Hall selon un autre mode de réalisation sans le corps de support de la figure 2.

Description des modes de réalisation

[0045] On décrira ci-après un dispositif d'éjection d'ions à effet Hall selon un mode de réalisation appliqué à un propulseur plasmique à effet Hall.

[0046] En référence à la figure 2 et à la figure 3, le dispositif de propulsion à effet Hall 100 selon un mode de réalisation est décrit ci-dessous.

[0047] Le dispositif de propulsion 100 comprend un corps de support 110 et un circuit magnétique 120.

[0048] Le corps de support 110 présente une forme de révolution autour d'un axe longitudinal AA'. Le corps 110 comprend une paroi externe annulaire 112, une paroi interne annulaire 113 et un fond 114 reliant les deux parois. La paroi externe 112 et la paroi interne 113 sont agencées coaxialement autour de l'axe longitudinal AA'. Les parois externe et interne et le fond forment un canal annulaire 111. Le circuit magnétique 120 est reçu dans le canal annulaire 111.

[0049] L'ensemble propulseur comprend une première extrémité 102 ayant une ouverture annulaire et une seconde extrémité 103.

[0050] Le dispositif de propulsion comprend un circuit d'alimentation en gaz propulsif 104 positionné dans une partie inférieure du corps de support 110. La direction d'injection du gaz est représentée par une flèche à l'entrée du circuit sur la figure 2. Le dispositif de propulsion comprend un ou plusieurs trous d'entrée de gaz 105 formés dans le fond du canal annulaire reliés au circuit d'alimentation en gaz ionisable 4. Le gaz est introduit dans le canal annulaire 111 à travers les trous d'alimentation en gaz. Le gaz propulsif peut être par exemple du xénon, argon, krypton apte à être ionisé. A titre d'exemple, sur la figure 2, deux trous d'alimentation 105 sont représentés.

[0051] Une paroi protectrice extérieure 126 et une paroi protectrice intérieure 127 sont disposées dans le canal annulaire 111, respectivement face à la paroi externe annulaire 112 et à la paroi interne annulaire 113. Ces parois protectrices 126 et 127 sont typiquement réalisées dans un matériau céramique et protègent les parois annulaires externe 112 et interne 113 de l'érosion.

[0052] Selon un autre mode de réalisation, une source de matière propulsive solide peut être utilisée au lieu d'un gaz. Le circuit d'alimentation en gaz 4 est dans ce cas remplacé

par un ergol solide placé dans ou en amont du canal d'accélération. La matière solide est chauffée pour directement passer en phase vapeur (par sublimation du matériau) afin que les particules soient ensuite ionisées et accélérées dans le canal.

[0053] Au sens de la présente divulgation, le terme « amont » et « aval » est défini par rapport au sens d'écoulement normal du gaz qui est dans le même sens que l'éjection des ions, de l'amont vers l'aval à travers l'espace annulaire 140 délimité par les parois protectrices extérieure 126 et intérieure 127.

[0054] Au sens de la présente divulgation, le terme « interne » désigne une partie du dispositif proche de l'axe longitudinal central AA' tandis que le terme externe désigne une partie du dispositif plus éloignée de l'axe longitudinal central AA'.

[0055] Le dispositif de propulsion à effet Hall comprend également un circuit magnétique 120 configuré pour générer un champ magnétique radial dans le canal annulaire 111, dont l'intensité est maximale à proximité de la première extrémité du canal annulaire, à savoir au niveau de l'ouverture annulaire du dispositif 102.

[0056] Le circuit magnétique 120 est formé par une pluralité d'éléments à forte susceptibilité magnétique positive 121A, 12B, 121C, 124A, 124B et une pluralité d'éléments magnétiques générateurs de champ magnétique 122, 123 agencés dans le canal annulaire 111 et configurés pour générer la barrière magnétique radiale dans le canal annulaire 111. Les éléments magnétiques sont agencés de manière concentrique autour de l'axe central longitudinal AA' pour former une chambre annulaire d'ionisation et d'accélération 140 dans le canal annulaire 111 du corps de support 110.

[0057] Les éléments à forte susceptibilité magnétique positive 121A, 12B, 121C, 124A, 124B et les éléments magnétiques générateurs de champ magnétique 22, 23 sont conçus pour former un circuit magnétique apte à générer le champ magnétique radial dans la chambre d'ionisation 140, dont l'intensité dans la direction axiale (parallèle à AA') est maximale à proximité de la première extrémité 102, au niveau de l'ouverture annulaire. Les éléments à forte susceptibilité magnétique positive sont sélectionnés et conçus pour guider et assurer la continuité des lignes de champ magnétique.

[0058] Le dispositif de propulsion comprend un ou plusieurs éléments magnétiques de compensation magnétique 130 agencé(s) dans le circuit magnétique 120 et conçu(s) pour compenser au moins une fraction du moment magnétique résiduel généré par le circuit magnétique 120. Les éléments magnétiques de compensation 130 sont positionnés dans le circuit magnétique 120 de sorte qu'ils soient plus éloignés de la première extrémité 102 que les éléments magnétiques générateur de champ magnétique 122, 123. Ils sont

positionnés à proximité du fond du canal annulaire de manière à ne pas affecter les lentilles magnétiques formées au niveau de la première extrémité du dispositif.

[0059] Selon un mode de réalisation, les éléments magnétiques générateurs de champ magnétique 122, 123 et les éléments magnétiques de compensation 130 peuvent présenter une forme annulaire continue. Cette forme continue annulaire est particulièrement adaptée pour un dispositif de propulsion de petite taille.

[0060] Selon un autre mode de réalisation, les éléments magnétiques générateurs de champ magnétique 122, 123 et les éléments magnétiques de compensation 130 sont formés par une pluralité d'éléments magnétiques discrets positionnés circonférentiellement par rapport à l'axe longitudinal AA'. Ils se présentent par exemple sous la forme de segments d'arc.

[0061] L'utilisation d'éléments magnétiques de compensation discrets permet d'ajuster plus facilement le volume des aimants de compensation nécessaire pour compenser le moment magnétique résiduel. Ils sont plus adaptés pour un dispositif de propulsion de grande taille.

[0062] Les éléments magnétiques générateurs de champ magnétique 122, 123 et les éléments magnétiques de compensation 130 peuvent être des bobines magnétiques. Alternativement, ils peuvent être des aimants permanents.

[0063] Selon un exemple de réalisation tel qu'illustré sur la figure 3, le circuit magnétique 120 comprend une partie externe et une partie interne. La partie externe comprend trois éléments externes à forte susceptibilité magnétique positive 121A, 121B, 121C, un élément générateur de champ magnétique externe 122, et un élément magnétique de compensation 130 agencés contre la paroi externe du canal annulaire 111 qui est visible sur la figure 2. La partie interne comprend deux éléments internes à forte susceptibilité magnétique positive 124A, 124B et un élément générateur de champ magnétique interne 123 agencés contre la paroi interne du canal annulaire 111. Les éléments magnétiques de compensation 130 sont maintenus en position entre deux éléments externes à forte susceptibilité magnétique positive 121A, 121C et agencés dans le circuit magnétique de manière à être plus éloigné de la première extrémité 102 formant la sortie d'éjection d'ions que l'élément générateur de champ magnétique externe 122. Les éléments à forte susceptibilité magnétique positive qui sont par exemple réalisés dans un matériau en fer doux, s'attirent naturellement aux autres éléments du circuit magnétiques que sont les aimants permanents.

[0064] La polarisation de chaque aimant permanent est choisie de manière à créer des lignes de champ magnétique 106, assurant le confinement des électrons fournis par la cathode 108 dans la barrière magnétique 106 ou « lentille magnétique » produite au niveau de la première extrémité du canal annulaire, comme illustré sur la figure 3.

[0065] Selon un exemple de réalisation, le propulseur comprend un circuit électrique comportant une anode annulaire 109 située sur le fond du canal annulaire et une cathode 108 creuse située à l'extrémité amont ouverte du canal. La cathode 108 est orientée en direction de la première extrémité 102 afin d'éjecter des électrons en direction de l'axe principal AA' et de la zone située en aval de la première extrémité. Lorsqu'une tension est appliquée entre la cathode et l'anode, un champ électrique est généré dans la chambre d'ionisation 140 et s'étend axialement par rapport l'axe longitudinal AA'.

[0066] Selon un autre exemple de réalisation du circuit magnétique et en référence à la figure 4, le circuit magnétique 220 comprend une partie externe et une partie interne. La partie externe comprend un élément externe supérieur à forte susceptibilité magnétique positive 221B, un élément externe inférieur à forte susceptibilité magnétique positive 221C et un élément générateur de champ magnétique externe 222 agencés contre la paroi externe du canal annulaire 111 qui est visible sur la figure 2. L'élément générateur de champ magnétique externe 222 est interposé entre les deux éléments externes supérieur et inférieur 221B, 221C et proche de la première extrémité 202 formant la sortie d'éjection d'ions. La partie interne comprend un élément interne supérieur à forte susceptibilité magnétique positive 224B, un élément interne inférieur à forte susceptibilité magnétique positive 224A et un élément générateur de champ magnétique interne 223 agencés contre la paroi interne du canal annulaire 111. L'élément générateur de champ magnétique interne 223 est interposé entre les deux éléments internes supérieur et inférieur 224B, 224A et proche de la première extrémité 202 formant la sortie d'éjection d'ions. L'élément externe inférieur à forte susceptibilité magnétique positive 221C de la partie externe du circuit magnétique comprend un logement adapté pour recevoir un élément magnétique de compensation 230.

[0067] Dans le cas où l'élément magnétique de compensation 230 présente une forme continue annulaire autour de l'axe longitudinal AA', le logement est formé par une gorge continue réalisée dans l'épaisseur de l'élément externe inférieur 221C. La dimension et la forme de la gorge sont adaptées pour recevoir l'élément magnétique de compensation.

[0068] Dans le cas où l'élément magnétique de compensation 230 est formé d'une pluralité d'éléments magnétiques discrets positionnés circonférentiellement par rapport à l'axe longitudinal AA', le logement est formé d'une pluralité de gorges réalisées dans l'épaisseur de l'élément externe inférieur 221C pour recevoir chacune un élément magnétique discret.

[0069] Selon la présente divulgation, l'élément de compensation magnétique 130 est configuré pour compenser le moment magnétique résiduel résultant de l'ensemble des éléments magnétiques formant le circuit magnétique 120 du dispositif de propulsion.

[0070] L'élément de compensation magnétique 130 est agencé dans le circuit magnétique 120 de manière à ne pas perturber les lignes de champ magnétique 106 formées par le circuit magnétique à proximité de la première extrémité 102, au niveau de la sortie du canal. En effet et afin de garder les mêmes performances entre un propulseur magnétique compensé et non compensé, il est essentiel de garder des topologies magnétiques similaires avec et sans compensation magnétique 130.

[0071] Le volume de l'élément de compensation magnétique est déterminé de sorte que le moment magnétique résiduel résultant de l'ensemble des éléments magnétiques formant le circuit magnétique 120 du propulseur soit au moins inférieur à 0.1 $A.m^2$.

[0072] Le procédé de calcul du volume de l'ensemble des aimants de compensation est décrit ci-dessous.

[0073] Dans une première étape E1, le moment magnétique résiduel (total) est calculé comme l'intégrale de l'aimantation (la densité volumique de moment magnétique) dans le volume de l'ensemble des éléments magnétiques, qu'ils soient sources ou conducteurs du champ associé.

[0074] Dans une deuxième étape E2, le moment magnétique résiduel est calculé pour l'ensemble des éléments magnétiques formant le circuit magnétique initial.

[0075] Dans une troisième étape E3, le volume total d'aimant(s) nécessaire(s) à la compensation du moment magnétique est estimé.

[0076] Dans une quatrième étape E4, le moment magnétique résiduel (total) est calculé en intégrant le(s) aimant(s) de compensation magnétique dans le circuit magnétique initial.

[0077] Dans une cinquième étape E5, les étapes E2 à E4 sont répétées de sorte que le moment résiduel du circuit global du propulseur soit au moins inférieur à 0.5 $A.m^2$ et idéalement inférieur à 0.1 $A.m^2$.

[0078] Selon une forme de réalisation, les aimants de compensation peuvent être réalisés dans un matériau magnétique tel que les alliages néodyme-fer-bore, samarium-cobalt ou avec des ferrites durs dits hexaferrites.

[0079] Le fait d'intégrer directement l'élément magnétique de compensation dans le circuit magnétique a permis d'améliorer la compacité du dispositif de propulsion à effet Hall par rapport aux solutions connues.

[0080] Les éléments magnétiques de compensation étant placés à proximité des éléments magnétiques générateurs de champ magnétique, et en particulier en contact thermique via une pièce commune ayant une bonne conductivité thermique, par exemple sur la figure 3, via l'élément à forte susceptibilité magnétique positive externe 121A, ils subissent donc les

mêmes conditions thermiques de fonctionnement que les éléments magnétiques générateurs de champ magnétique et leur rémanence évolue de manière identique à celle des éléments magnétiques générateur de champ magnétique, permettant ainsi de compenser efficacement le moment magnétique résiduel du circuit magnétique, quelle que soit la température des éléments magnétiques générateurs de champ magnétique. De ce fait, la compensation du moment magnétique résiduel reste optimale quel que soit l'état thermique du dispositif.

[0081] À titre d'exemple, des calculs de moments magnétiques résiduels (MMR) ont été réalisés pour deux conditions thermiques et dans deux situations magnétiques (avec une compensation magnétique externe ou incluse au circuit magnétique, tel que décrit précédemment).

[0082] Dans une première situation avec une compensation magnétique externe (et donc avec des températures différentes entre le circuit magnétique et le(s) aimant(s) de compensation), le moment magnétique évolue de -14 $mA.m^2$ (pour un circuit magnétique et des aimants de compensation à 20°C), jusqu'à +126 $mA.m^2$ pour un circuit magnétique à 200°C et des aimants de compensation à 20°C.

[0083] Dans une seconde situation avec une compensation magnétique incluse au circuit magnétique (et donc des températures similaires entre le circuit magnétique et le(s) aimant(s) de compensation), le moment magnétique évolue de -1 $mA.m^2$ (pour l'ensemble des éléments magnétiques à 20°C) à -28 $mA.m^2$ (pour l'ensemble des éléments magnétique à 200°C).

[0084] A noter que la valeur positive ou négative du MMR n'est pas nécessairement à considérer dans la « compensation magnétique » car le signe du MMR correspondra au sens de rotation du satellite (sur lequel est monté le propulseur à effet Hall) en orbite autour de la terre. De manière générale, la valeur limite du MMR dépend du type de mission pour lequel le satellite est destiné, mais il est généralement considéré comme étant satisfaisant d'obtenir un MMR inférieur à 100 $mA.m^2$ afin de limiter les effets du champ magnétique terrestre. En comparant ces deux cas, on remarque que la compensation ne pourra pas être aussi optimale que si tous les éléments magnétiques du propulseur sont dans les mêmes conditions thermiques.

[0085] Si les éléments magnétiques de compensation opèrent à des conditions de températures différentes des éléments magnétiques générateurs de champ magnétique, les étapes de calcul précédemment décrite doivent idéalement être réalisées en prenant en considération les propriétés des matériaux, notamment leurs propriétés magnétiques, à une température typique d'un fonctionnement du propulseur, de manière à minimiser le moment

résiduel lorsque le propulseur sera en opération. Alternativement, le calcul pourrait avoir pour objectif la minimisation du moment magnétique du propulseur lorsqu'il n'est pas en utilisation, ce qui peut représenter la plus grande part de sa durée de vie. Il serait également possible de choisir de minimiser le moment résiduel pour une température intermédiaire entre la température en fonctionnement et la température à l'arrêt, de manière à minimiser la perturbation globale, durant la vie du propulseur, par exemple en pondérant la température par la part de temps de vie passé à ladite température.

[0086] Lors de l'implémentation d'un tel propulseur dans les satellites, il n'est plus nécessaire de calculer le moment magnétique résiduel en incluant le circuit magnétique du propulseur, permettant ainsi de simplifier le processus d'implémentation du propulseur dans le satellite. Le propulseur est auto-compensé. Le moment magnétique résiduel du satellite peut donc être calculé et compensé indépendamment du choix et de la position du propulseur et avant l'installation du dispositif de propulsion.

[0087] La solution technique proposée dans la présente divulgation est particulièrement adaptée pour compenser le moment magnétique résiduel résultant du circuit magnétique d'un propulseur plasmique à effet Hall utilisant des aimants permanents. Toutefois, la solution technique proposée peut être appliquée à d'autres types de propulseurs, notamment le propulseur électrothermique tel que le propulseur Arc-jets, le propulseur magnétoplasmadynamique, le propulseur à grilles, le propulseur ECR, le propulseur à arc sous vide, ou Vacuum Arc Thruster en terminologie anglaise qui fait partie des systèmes de propulsion à stockage solide.

REVENDICATIONS

[Revendication 1] Dispositif de propulsion à effet Hall (100) comprenant :

- un corps de support (110) s'étendant entre une première extrémité (102) et une seconde extrémité (103), ledit corps comportant une paroi externe annulaire (112) et une paroi interne annulaire (113) agencées coaxialement autour d'un axe longitudinal AA' pour former un canal annulaire (111), ladite première extrémité (102) présentant une ouverture annulaire formant une sortie d'ions;
- un circuit magnétique (120) agencé dans le canal annulaire (111) et configuré pour générer une barrière magnétique radiale dans le canal annulaire, à proximité de la première extrémité du canal (102);
- au moins un élément magnétique de compensation magnétique (130) agencé dans ledit circuit magnétique et configuré pour compenser au moins une fraction d'une valeur absolue du moment magnétique résiduel généré par ledit circuit magnétique (120).

[Revendication 2] Dispositif selon la revendication 1, dans lequel le circuit magnétique (120) comprend au moins un élément à forte susceptibilité magnétique positive (121A, 121B, 121C, 124A, 124B) et au moins un élément magnétique générateur de champ magnétique (122, 123) configurés pour générer ladite barrière magnétique radiale, ledit au moins un élément magnétique de compensation (130) étant positionné dans le circuit magnétique (120) de sorte qu'il soit plus éloigné de la première extrémité (102) que ledit au moins un élément magnétique générateur de champ magnétique (122, 123).

[Revendication 3] Dispositif selon la revendication 1 ou 2, dans lequel ledit au moins un élément magnétique de compensation magnétique (130) présente une forme annulaire continue.

[Revendication 4] Dispositif selon la revendication 1 ou 2, dans ledit au moins un élément magnétique de compensation magnétique (130) comprend une pluralité d'éléments magnétiques discrets positionnés circonférentiellement par rapport à l'axe longitudinal AA'.

[Revendication 5] Dispositif selon l'une des revendications 2 à 4, dans lequel ledit au moins un élément à forte susceptibilité magnétique positive comprend une pluralité d'éléments externes à forte susceptibilité magnétique positive (121A, 121B, 121C) agencés contre la paroi externe annulaire (112), ledit élément magnétique de compensation magnétique (130) étant maintenu en position entre deux éléments externes à forte susceptibilité magnétique positive (121A, 121C).

[Revendication 6] Dispositif selon l'une des revendications 2 à 4, dans lequel ledit au moins un élément à forte susceptibilité magnétique positive comprend une pluralité d'éléments externes à forte susceptibilité magnétique positive (221C, 221B) agencés contre

la paroi externe annulaire, au moins un élément externe (221C) parmi la pluralité d'éléments externes à forte susceptibilité magnétique positive étant muni d'un logement adapté pour recevoir ledit au moins un élément magnétique de compensation (230).

[Revendication 7] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 6, dans lequel ledit au moins un élément de compensation magnétique est réalisé en matériau choisi parmi les matériaux suivants : néodyme-fer-bore, samarium-cobalt ou hexaferrites.

[Revendication 8] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel ledit au moins élément magnétique de compensation (130) se présente sous la forme d'une bobine magnétique ou d'un aimant permanent.

[Revendication 9] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 8, comprenant en outre un circuit d'alimentation de gaz (104) configuré pour injecter un gaz ionisable dans le canal annulaire (111).

[Revendication 10] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 9, comprenant en outre un circuit électrique configuré pour générer un champ électrique dans une partie du canal annulaire (111), ledit circuit électrique comprenant une anode annulaire (109) agencée à l'intérieur du canal annulaire et au moins une cathode (108) agencée en dehors du canal annulaire, à proximité de la première extrémité du canal annulaire (102).

[Revendication 11] Dispositif selon l'une des revendications 1 à 10, dans lequel ledit au moins un élément magnétique de compensation magnétique (130) est configuré de sorte que la valeur absolue du moment magnétique résiduel du circuit est au moins inférieure à 0,1A.m² sur une plage de température comprise entre 50 °C et 250 °C.

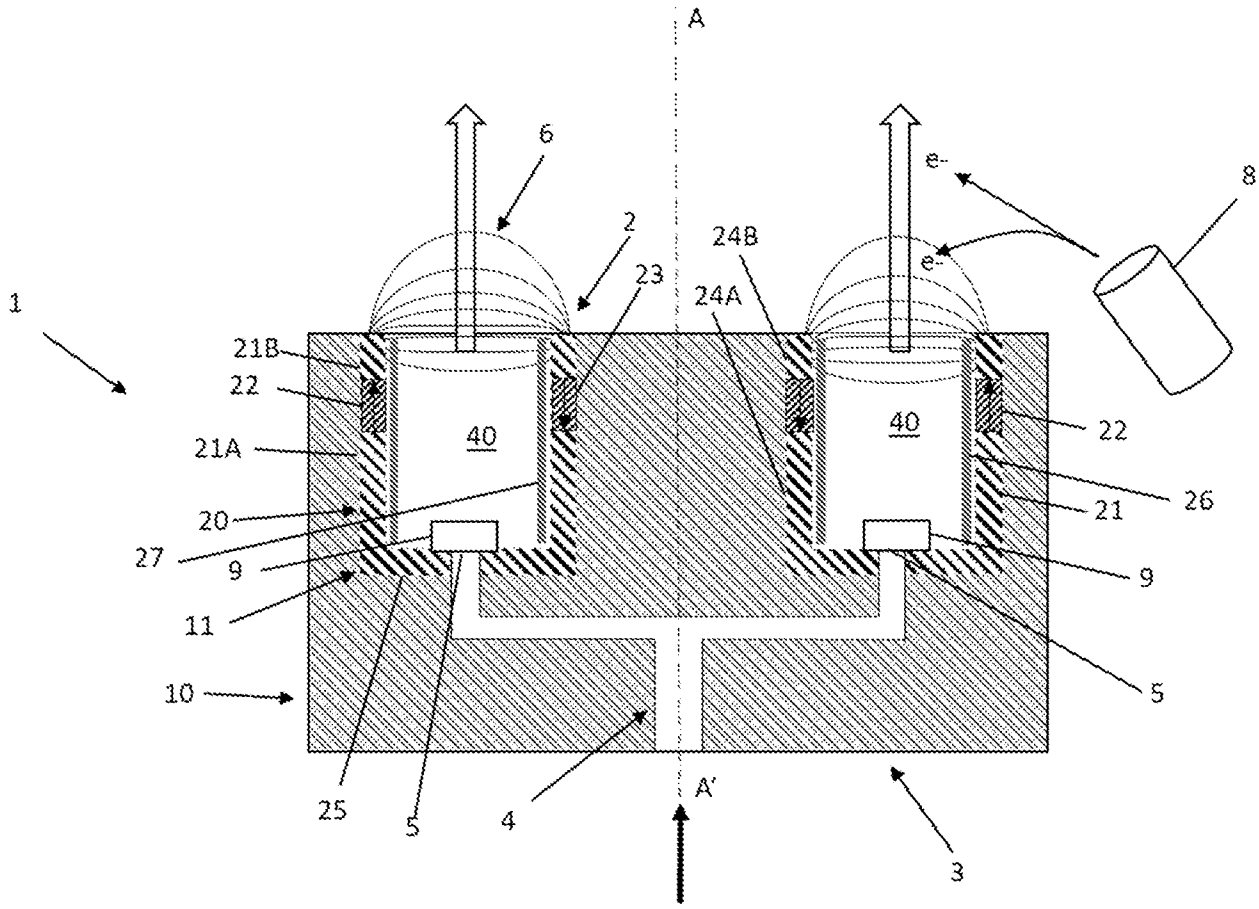

A
6
e-
8
2
24B
e-
1
23
24A
21B
22
40
40
22
21A
26
20
21
27
9
9
11
5
10
25
5
4
A'
3

FIG.1

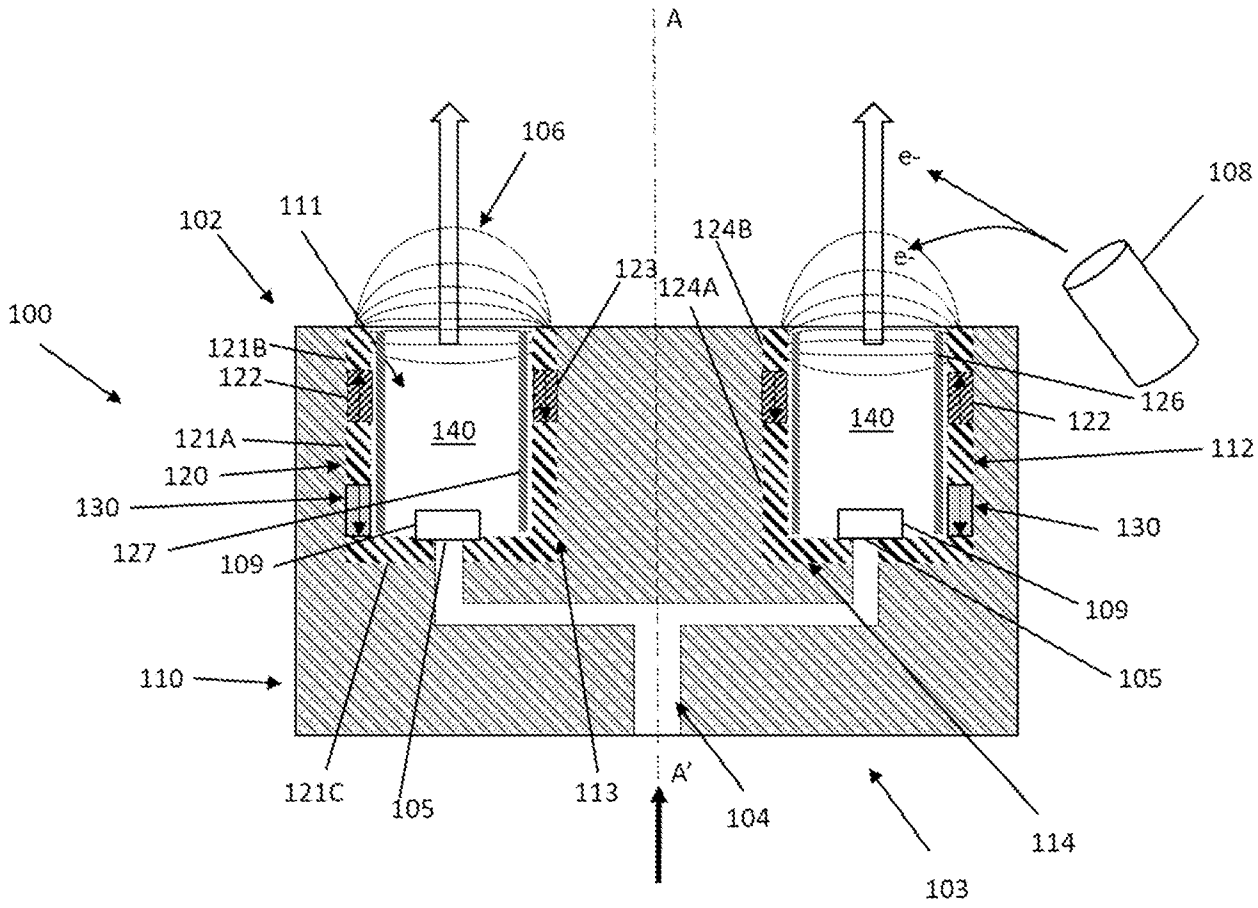

A
106
e-
108
102
111
124B
123
124A
e-
100
121B
122
140
140
126
122
121A
112
120
130
130
127
109
109
105
110
121C
105
113
A'
104
114
103

FIG.2

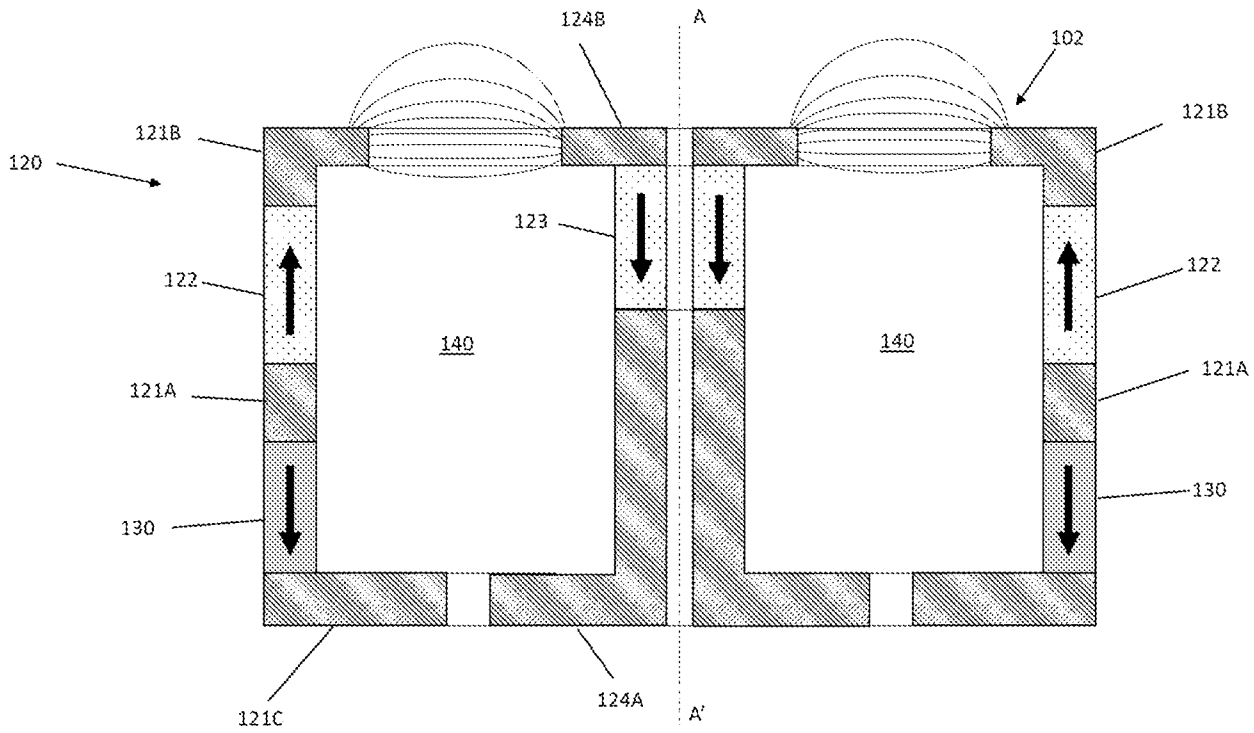


FIGURE 3

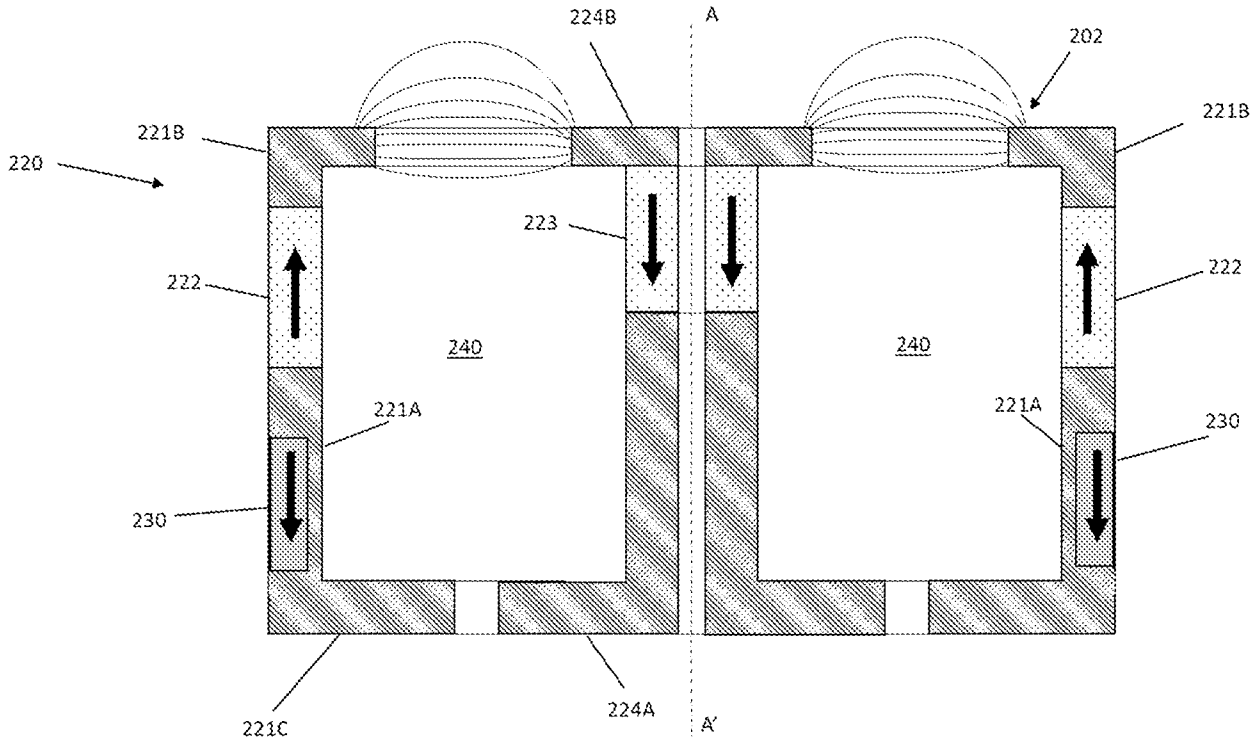


FIGURE 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/FR2024/050693

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

F03H 1/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

F03H

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2021201871 A1 (ORBION SPACE TECH INC [US]) 07 October 2021 (2021-10-07) cited in the application paragraphs [0020] - [0027], [0031]; figures 2, 3 paragraphs [0038], [0039]; figures 4-7 paragraphs [0047] - [0051]; figure 9	1-11
A	DE SORIA-SANTACRUZ M ET AL. "An Approach to Magnetic Cleanliness for the Psyche Mission" *2020 IEEE AEROSPACE CONFERENCE, IEEE,* 07 March 2020 (2020-03-07), pages 1-15 DOI: 10.1109/AERO47225.2020.9172801 XP033812988 cited in the application pages 7, 8	1-11
A	LUDOVICO LORELLO ET AL. "Hall Thrusters With Permanent Magnets: Current Solutions and Perspectives" *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE.*, US, Vol. 46, No. 2, 13 December 2017 (2017-12-13), pages 239-251 DOI: 10.1109/TPS.2017.2772332 ISSN: 0093-3813, XP055770123 the whole document	1-11

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
11 September 2024	**19 September 2024**

Name and mailing address of the ISA/EP	Authorized officer
European Patent Office **p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk** **Netherlands (Kingdom of the)** Telephone No. **(+31-70)340-2040** Facsimile No. **(+31-70)340-3016**	**Loiseleur, Pierre** Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/FR2024/050693

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO 2021201871 A1	07 October 2021	CN 113767220 A	07 December 2021
		EP 3914827 A1	01 December 2021
		RU 2766036 C1	07 February 2022
		US 2021310466 A1	07 October 2021
		US 2023279845 A1	07 September 2023
		WO 2021201871 A1	07 October 2021

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/FR2024/050693

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. F03H1/00
ADD.

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
F03H

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	WO 2021/201871 A1 (ORBION SPACE TECH INC [US]) 7 octobre 2021 (2021-10-07) cité dans la demande alinéas [0020] - [0027], [0031]; figures 2, 3 alinéas [0038], [0039]; figures 4-7 alinéas [0047] - [0051]; figure 9	1-11

A	DE SORIA-SANTACRUZ M ET AL: "An Approach to Magnetic Cleanliness for the Psyche Mission", 2020 IEEE AEROSPACE CONFERENCE, IEEE, 7 mars 2020 (2020-03-07), pages 1-15, XP033812988, DOI: 10.1109/AERO47225.2020.9172801 cité dans la demande pages 7, 8	1-11

	-/--	

[x] Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

[x] Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée
"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
"X" document particulièrement pertinent;; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
"Y" document particulièrement pertinent;; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
11 septembre 2024	19/09/2024

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale	Fonctionnaire autorisé
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Loiseleur, Pierre

2

Formulaire PCT/ISA/210 (deuxième feuille) (avril 2005)

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	LUDOVICO LORELLO ET AL: "Hall Thrusters With Permanent Magnets: Current Solutions and Perspectives", IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE., vol. 46, no. 2, 13 décembre 2017 (2017-12-13), pages 239-251, XP055770123, US ISSN: 0093-3813, DOI: 10.1109/TPS.2017.2772332 le document en entier -----	1-11

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°
PCT/FR2024/050693

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2021201871 A1	07-10-2021	CN 113767220 A	07-12-2021
		EP 3914827 A1	01-12-2021
		RU 2766036 C1	07-02-2022
		US 2021310466 A1	07-10-2021
		US 2023279845 A1	07-09-2023
		WO 2021201871 A1	07-10-2021