

(19)



(11)

EP 3 574 719 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

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

20.04.2022 Bulletin 2022/16

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):

H05H 1/54 (2006.01) F03H 1/00 (2006.01)

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):

H05H 1/54

(21) Numéro de dépôt: **18705434.1**

(22) Date de dépôt: **30.01.2018**

(86) Numéro de dépôt international:

PCT/FR2018/050205

(87) Numéro de publication internationale:

WO 2018/138458 (02.08.2018 Gazette 2018/31)

(54) **SYSTEME DE GENERATION D'UN JET PLASMA D'IONS METALLIQUES**

SYSTEM ZUR ERZEUGUNG EINES PLASMASTRAHLS VON METALLIONEN

SYSTEM FOR GENERATING A PLASMA JET OF METAL IONS

(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**

• **LUNDIN, Daniel**

91300 Massy (FR)

• **BALLAGE, Charles**

91440 Bures Sur Yvette (FR)

(30) Priorité: **30.01.2017 FR 1750750**

(74) Mandataire: **Marks & Clerk France**

Immeuble "Visium"

22, avenue Aristide Briand

94117 Arcueil Cedex (FR)

(43) Date de publication de la demande:

04.12.2019 Bulletin 2019/49

(73) Titulaire: **Centre National de la Recherche**

Scientifique -

CNRS

75016 Paris (FR)

(56) Documents cités:

US-A- 4 328 667

US-A1- 2003 033 797

US-A1- 2005 174 063

US-A1- 2009 066 256

(72) Inventeurs:

• **MINEA, Tiberiu**

75016 Paris (FR)

• **PETTY, Thomas**

92340 Bourg La Reine (FR)

• **"Power Sources", PRODUCT ENGINEERING,,**

vol. 35, no. 16, 3 août 1964 (1964-08-03), page 75,

XP001442551,

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 3 574 719 B1

Description

[0001] La présente invention concerne un système de génération d'un jet plasma. On connaît des systèmes de génération de plasma d'un métal à partir d'un bloc solide de ce métal. De tels systèmes sont utilisés pour déposer un revêtement métallique sur un substrat, en particulier un revêtement en couche mince. Ces systèmes produisent essentiellement des vapeurs métalliques neutres, c'est à dire des atomes de métal dont seulement une partie est ionisée.

[0002] Par exemple, un tel système comprend une chambre à vide dans laquelle est placé un bloc de métal qui est porté à un potentiel positif pour devenir une anode, une cathode qui génère des électrons, et un substrat destiné à recevoir un revêtement de ce métal. Le système comprend en outre une série d'aimants qui sont destinés à guider les ions métalliques formés par vaporisation du métal.

[0003] Dans un tel système, les électrons émis en faisceau par la cathode sont attirés par le bloc de métal formant anode. Sous l'effet du bombardement par les électrons de ce faisceau et de l'élévation locale et intense de température qui en résulte, une partie du bloc fond et se transforme en gaz métallique. Les atomes de ce gaz sont alors partiellement ionisés par le flux d'électrons émis par la cathode et forment un plasma d'ions positifs de métal et d'électrons. Ces ions métalliques positifs sont accélérés vers la cathode et vers le substrat qui est également placé à un potentiel négatif. La cathode est généralement de forme annulaire, de telle sorte que les ions, guidés par la série d'aimants disposés autour du trajet entre le bloc de métal et le substrat, passent au travers de la cathode et impactent le substrat afin d'y former un revêtement métallique.

[0004] Un tel système présente cependant des inconvénients.

[0005] En effet, l'émetteur d'électrons est placé sur le trajet du flux d'ions métalliques, et est donc progressivement endommagé par ce flux, notamment à cause d'un dépôt indésirable d'ions métalliques qui se forme sur l'émetteur. La durée de vie de l'émetteur, et par voie de conséquence du système de génération de plasma, est donc réduite.

[0006] De plus, l'utilisation d'aimants, nécessaire pour former un flux concentré et directionnel d'ions métalliques (plasma), complexifie le système de génération du plasma. En outre, un dispositif de refroidissement des aimants doit être intégré au système pour éviter que les aimants soient chauffés au-dessus de leur température de Curie sous l'influence du plasma. Des exemples de systèmes et procédés pour la génération d'un jet plasma sont divulgués en:

US 2003033797;

US 4328667 et

"POWER SOURCE", product engineering, vol.35, no.16, p.75; 6 août 1964.

[0007] La présente invention vise à remédier à ces inconvénients.

[0008] L'invention vise à proposer un système de génération d'un jet plasma comprenant des ions métalliques qui soit apte à générer un flux directionnel, dont la durée de vie soit améliorée, dont la fabrication soit simplifiée, et qui fonctionne sans aimants.

[0009] Ce but est atteint grâce au fait que le système de génération d'un jet plasma comprend un tube en matériau isolant électriquement contenant un métal sous forme solide à température ambiante et une anode en contact avec ce métal, un générateur connecté à l'anode apte à créer un potentiel électrique positif au niveau de cette anode, un élément de chauffage apte à chauffer une partie du métal à une température de chauffage T_c suffisante pour vaporiser cette partie du métal, une source d'électrons située à l'extérieur du tube et hors de l'axe longitudinal du tube, et étant apte à générer un flux d'électrons capable d'ioniser la vapeur du métal pour former des ions métalliques, de telle sorte que les ions métalliques ainsi produits sont aptes à être repoussés et ainsi accélérés par ce potentiel et éjectés hors du tube par l'extrémité aval du tube, et étant neutralisés pour une partie par des électrons afin de former un flux de plasma, le système fonctionnant sans aimants, sans grille d'accélération.

[0010] Grâce à ces dispositions, on simplifie le système de génération d'un jet plasma car on n'utilise pas d'aimants pour diriger le flux de plasma. En effet, c'est la distribution spécifique du champ électrique à l'intérieur et à proximité du tube qui dirige le plasma.

[0011] De plus, la source d'électrons étant située à l'extérieur du tube et hors de son axe longitudinal, n'est pas endommagée par le faisceau de plasma. La durée de vie du système de génération de plasma est donc augmentée.

[0012] Avantageusement, le métal utilisé possède une masse atomique supérieure ou égale à celle de l'or ou possède une température de fusion inférieure ou égale à celle de l'or.

[0013] Le système selon l'invention peut fonctionner avec un métal dont la température de fusion est plus faible que d'autres métaux, car le système n'utilise pas de faisceau d'électrons concentré dont la caractéristique est de chauffer très fortement le métal et donc de l'évaporer trop rapidement, contrairement aux systèmes existants.

[0014] Avantageusement, l'élément de chauffage entoure la partie aval du tube.

[0015] Avantageusement, le tube est en céramique, assurant l'isolation électrique et thermique.

[0016] Avantageusement, l'anode est distincte du métal contenu dans le tube.

[0017] Avantageusement, la source d'électrons comprend l'élément de chauffage.

[0018] Avantageusement, la source d'électrons comprend un émetteur externe d'électrons distinct de l'élément de chauffage.

[0019] L'invention concerne également un procédé de génération de plasma, qui comprend les étapes suivantes :

- (a) On fournit un tube en matériau isolant électriquement, contenant un métal sous forme solide à température ambiante et une anode en contact avec ce métal, un générateur électrique connecté à cette anode, et une source d'électrons située à l'extérieur du tube,
- (b) On applique un potentiel électrique positif au niveau de l'anode à l'aide du générateur,
- (c) On chauffe une partie du métal à une température de chauffage T_c suffisante pour vaporiser cette partie du métal,
- (d) On ionise la vapeur de métal ainsi produite par les électrons émis par la source d'électrons, pour former des ions métalliques qui sont accélérés par ce potentiel et éjectés hors du tube par l'extrémité aval du tube après avoir été pour une partie neutralisés par des électrons émis par ladite source d'électrons, afin de former un flux de plasma, le procédé n'utilisant pas d'aimants, pas de grille d'accélération, et pas de gaz en tant que source initiale de matière à ioniser.

[0020] Par exemple, le générateur fournit un courant électrique continu.

[0021] Par exemple, le générateur fournit des impulsions générant un courant électrique.

[0022] L'invention sera bien comprise et ses avantages apparaîtront mieux, à la lecture de la description détaillée qui suit, d'un mode de réalisation représenté à titre d'exemple non limitatif. La description se réfère aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une vue en coupe longitudinale du système selon l'invention.
- la figure 2 est une vue en coupe longitudinale d'un autre mode de réalisation du système selon l'invention,
- la figure 3 est un graphe montrant l'évolution en fonction du temps de certaines quantités lorsque le système selon l'invention fonctionne avec une série d'impulsions électriques.

[0023] Dans la description qui suit les termes "intérieur" et "extérieur" indiquent la région à l'intérieur et à l'extérieur du tube, respectivement. Les termes « amont » et « aval » désignent les parties du tube et du cylindre de métal par rapport au sens de circulation des ions dans le tube.

[0024] Comme représenté en figure 1, le système selon l'invention comporte un tube 10, qui contient un cylindre en métal 20 qui fournit les atomes métalliques immédiatement ionisés par la forte densité de courant d'électrons dont l'expulsion hors du tube constitue le jet plasma. Dans la description qui suit, ce métal est appelé

« métal plasma » afin de le distinguer d'autres métaux utilisés dans le système.

[0025] Le tube 10 est réalisé en un matériau dont la température de fusion est supérieure à la température de fusion T_f du métal plasma 20. Par exemple le tube 10 est en céramique. Cette céramique est par exemple un oxyde d'aluminium, ou un nitrure de bore.

[0026] Le tube 10 est isolant électriquement.

[0027] Un élément de chauffage 40 entoure au moins la partie aval 12 du tube 10. Cet élément de chauffage 40 est alimenté par une source de chauffage 42. Par exemple l'élément de chauffage 40 entoure tout le tube 10. L'élément de chauffage est par exemple un filament enroulé autour du tube 10 de façon hélicoïdale pour former une spire.

[0028] Le système selon l'invention comporte également une source d'électrons 60.

[0029] Cette source d'électrons est nécessaire pour équilibrer la charge positive des ions émis par le métal plasma 20, de telle sorte que les particules émises par le système et servant à la propulsion soient globalement électriquement neutres, en aval du cylindre.

[0030] Par « globalement » électriquement neutre, on entend que le flux qui sort du tube est un mélange d'ions positifs et d'électrons et d'atomes, formant un plasma. La neutralité du jet plasma permet ainsi de préserver son fort caractère directionnel.

[0031] Dans un premier mode de réalisation, l'élément de chauffage 40 émet des électrons, et est donc la totalité de la source d'électrons 60. Cela est le cas lorsque l'élément de chauffage 40 est un filament. Ce filament est par exemple en tungstène.

[0032] L'élément de chauffage 40 étant la seule source d'électrons 60, la fabrication du système est simplifiée, puisque le système ne comprend pas de source d'électrons distincte.

[0033] Dans ce mode de réalisation, l'élément de chauffage 40 est une cathode (chargée négativement).

[0034] Selon un second mode de réalisation, l'élément de chauffage 40 n'émet pas d'électrons. Dans ce cas, une source d'électrons 60 distincte de l'élément de chauffage 40, et externe au tube 10, est nécessaire. Cette situation est représentée sur la figure 2. L'élément de chauffage 40 est un anneau qui entoure la partie aval 12 du tube 10.

[0035] La source d'électrons 60 est un émetteur externe 62, qui est une cathode située à proximité de l'extrémité aval 15 de la partie aval 12 du tube 10, ou un générateur d'arc.

[0036] L'émetteur externe 62 est la seule cathode du système. Dans ce cas, l'élément de chauffage 40 est par exemple réalisé en un matériau tel qu'un alliage Ni-Cr (par exemple le Nichrome[®]), un alliage Fe-Cr-Al (tel que le Kanthal[®]), ou un cupronickel.

[0037] Selon un troisième mode de réalisation, à la fois l'élément de chauffage 40 et l'émetteur externe 62 sont une cathode. La source d'électrons 60 est alors constituée de l'élément de chauffage 40 et de l'émetteur ex-

terne 62.

[0038] Dans tous les cas, la source d'électrons est située à l'extérieur du tube 10 et hors de l'axe longitudinal du tube 10.

[0039] Dans le cas d'une cathode chauffée indirectement, l'élément de chauffage 40 est par exemple réalisé en un matériau tel que l'hexaborure de lanthane, l'hexaborure de cérium, ou des mélanges d'oxydes de barium, de strontium, et de calcium.

[0040] Alternativement, dans le cas d'une cathode chauffée directement, l'élément de chauffage 40 est entouré par un isolant électrique.

[0041] Le système comporte une anode 30 (chargée positivement) qui est en contact avec le métal plasma 20 lorsque ce métal est sous forme solide. L'anode 30 est donc en contact avec le métal plasma 20 situé dans le tube 10.

[0042] Selon un mode de réalisation, illustré en figure 1, l'anode 30 est distincte du métal plasma 20 et est située à l'intérieur du tube 10. L'anode 30 est réalisée en un matériau conducteur qui reste solide pendant le fonctionnement du système de génération d'un jet plasma. Ainsi, l'anode 30 est un métal avec une température de fusion largement supérieure à celle du métal plasma 20. Par exemple, l'anode est en tungstène, tantale, molybdène, rhénium, ou un alliage de ces métaux.

[0043] L'anode 30 est un fil qui s'étend au centre du cylindre de métal plasma 20, de son extrémité amont à son extrémité aval.

[0044] Un générateur électrique 50 est connecté à l'anode 30 et maintient le potentiel électrique positif à l'anode 30.

[0045] L'anode 30 peut avoir une géométrie quelconque, par exemple un ou plusieurs fils noyés dans le métal plasma 20, ou une grille noyée dans le métal plasma 20, ou une grille qui tapisse la face interne du tube 10. Quelle que soit sa géométrie, l'anode 30 est toujours en contact avec le métal plasma 20, ce qui permet de maintenir l'arrivée du flux d'électrons dans le métal plasma 20.

[0046] Ce mode de réalisation présente l'avantage que le potentiel électrique est maintenu sur le métal plasma 20 même lorsqu'une partie du métal plasma 20 passe en phase liquide.

[0047] Un autre avantage est qu'en cas de formation de gouttelettes de métal en aval du cylindre de métal plasma 20 pendant sa vaporisation partielle, la connexion électrique à l'anode 30 est toujours réalisée. En effet ces gouttelettes sont susceptibles de perturber cette connexion électrique.

[0048] Alternativement, l'anode 30 est formée par le métal plasma 20 lui-même.

[0049] Par l'expression « anode en contact avec le métal », on couvre le mode de réalisation où l'anode est un élément distinct du métal et en contact avec le métal, et le mode de réalisation où l'anode est formée par le métal.

[0050] Avantageusement, l'alimentation du cylindre en métal plasma 20 s'effectue en continu, c'est-à-dire que

le cylindre 20 coulisse dans le tube 10 de l'amont vers l'aval de telle sorte que son extrémité aval solide se situe toujours sensiblement à la même position dans le tube 10 au fur et à mesure où le métal plasma 20 situé au niveau de l'extrémité aval 15 du tube 10 est vaporisée. Par exemple le cylindre en métal plasma 20 est fourni à partir d'une bobine.

[0051] Le métal plasma 20 est solide à température et pression ambiantes (environ 20°C, 1 atmosphère). Le système de génération de plasma selon l'invention utilise de préférence un métal plasma 20 dont la masse atomique est supérieure ou égale à celle de l'or (dont la masse atomique est de 197), ou dont la température de fusion est inférieure ou égale à celle de l'or (1064°C).

[0052] Par exemple les métaux plasmas sont choisis parmi le plomb (masse atomique de 207, température de fusion de 327°C), le bismuth (masse atomique de 208, température de fusion de 271°C), l'étain (température de fusion de 232°C), le zinc (température de fusion de 420°C), le tellure (température de fusion de 450°C), l'indium (température de fusion de 156°C), le thallium (masse atomique de 204, température de fusion de 303°C).

[0053] Avantageusement, la température de fusion du métal plasma 20 est inférieure à 500°C.

[0054] Avantageusement, le métal plasma 20 a une masse atomique supérieure ou égale à celle de l'or, et une température de fusion est inférieure ou égale à celle de l'or.

[0055] L'utilisation de métaux avec une masse atomique élevée présente plusieurs avantages.

[0056] En effet, d'une part ces métaux présentent une température de fusion plus faible que d'autres métaux.

[0057] La température de chauffage nécessaire pour fondre ces métaux, qui est au maximum de l'ordre de la température de fusion T_f du métal, est alors moins élevée, ce qui permet de s'affranchir d'un dispositif de refroidissement du tube 10.

[0058] De plus, la puissance nécessaire pour chauffer le métal plasma 20 et produire les ions est plus faible, ce qui signifie une dépense d'énergie plus faible. Dans le jet plasma généré par le système selon l'invention, les seuls ions sont des ions métalliques.

[0059] D'autre part, le système selon l'invention peut être utilisé dans un système de propulsion de véhicule spatial. En effet, l'éjection du plasma génère un moment pouvant servir à la propulsion (voir ci-dessous la description des systèmes de propulsion). Ainsi, plus le métal plasma 20 présente une masse atomique élevée (en particulier si elle est supérieure à celle du xénon (de masse atomique 131), plus l'impulsion générée lors de l'expulsion de ce métal est supérieure à celle générée lorsque le xénon est utilisé, pour le même état d'ionisation.

[0060] En outre, un métal avec une masse atomique élevée présente un premier potentiel d'ionisation plus faible que d'autres matériaux. Par exemple, il est de 6.1 eV pour le thallium, de 7.4 eV pour le plomb, et de 9.2 eV pour l'or, ce qui est plus faible que le potentiel d'ionisation du xénon (12.1 eV). Ainsi, la probabilité d'ioniser

ces métaux est plus élevée que celle d'ioniser le xénon.

[0061] De plus, un métal avec une masse atomique élevée présente une probabilité plus élevée d'être doublement ionisé, c'est-à-dire qu'il perd deux électrons pour former des ions métalliques. Ainsi, à puissance d'alimentation électrique égale, un ion de ce métal est davantage accéléré que les ions ne perdant qu'un seul électron, tel que généralement le cas pour le Xénon. Par exemple, les potentiels de double ionisation du plomb (15 eV), du thallium (20,4 eV) et de l'or (20,2 eV) sont inférieurs au potentiel de double ionisation du Xénon (21 eV).

[0062] L'invention concerne également un procédé de génération de plasma, dont le fonctionnement est décrit ci-après.

[0063] Le cylindre de métal plasma 20, sous forme solide, est placé dans le tube 10. Le métal plasma 20 est ensuite chauffé par l'élément de chauffage 40, alimenté par la source de chauffage 42, à une température de chauffage Tc suffisante pour vaporiser l'extrémité aval du cylindre de métal plasma 20. La température de chauffage Tc est donc bien supérieure à la température ambiante. Simultanément, le métal plasma 20 est placé à un potentiel positif non nul par le générateur 50 (soit directement, soit par l'intermédiaire de l'anode 30 en contact avec le métal plasma 20).

[0064] Le gaz métallique, produit de cette vaporisation, est ionisé par les électrons émis par la source d'électrons 60 (qui est soit l'élément de chauffage 40, soit l'émetteur externe 62, soit l'ensemble des deux). Ces ions métalliques sont repoussés par le cylindre de métal 20 car ils sont de même charge positive, et sont accélérés vers l'extrémité aval 15 du tube 10. Ces ions métalliques, qui forment un plasma, entrent en outre en collision avec les électrons émis par la source d'électrons 60 de telle sorte que le flux plasma 70 émis par le tube 10 à son extrémité aval 15 est pour partie un flux de particules métalliques électriquement neutres, pour partie un flux d'ions métalliques, pour partie un flux d'électrons. La direction de propagation du flux 70 est indiquée par une flèche sur les figures 1 et 2.

[0065] Ainsi, les ions métalliques sont accélérés puis éjectés du tube 10, et pendant leur éjection une partie de ces ions métalliques est neutralisée par collision avec les électrons émis par la source d'électrons 60. Ces ions métalliques qui sont neutralisés sont transformés en particules métalliques électriquement neutres.

[0066] Le système selon l'invention ne comporte pas de grille d'accélération des ions, contrairement aux propulseurs HC (voir ci-dessous). En effet, ces grilles sont inutiles car les ions sont repoussés par l'anode et accélérés sous une tension positive suffisamment élevée (voir explication ci-dessous). Ainsi, la fabrication du système est simplifiée.

[0067] Le système selon l'invention ne comporte pas d'aimants, contrairement aux propulseurs HE (voir ci-dessous). Le système n'utilise donc pas de champ magnétique généré par des aimants pour agir sur les électrons, ou sur les ions éjectés du métal. Le système est

donc plus simple et moins coûteux à fabriquer.

[0068] Le système selon l'invention est par conséquent plus compact que d'autres systèmes selon l'art antérieur. Par exemple, la longueur du système est de l'ordre de 10 cm, et son diamètre est inférieur à 1 cm, par exemple égal à 0,5 cm.

[0069] Le tube 10 étant chauffé lorsque le système fonctionne, les particules de vapeur métallique qui auraient pu se déposer sur la surface interne de la partie aval du tube 10 seront aisément vaporisées et se décolleront de la surface lors d'un futur fonctionnement. Ainsi, le tube 10 n'est pas encrassé par des dépôts.

[0070] Avantageusement, le système selon l'invention fonctionne en courant continu généré par le générateur 50, ce qui évite l'interférence avec les composants électroniques éventuellement situés à proximité du système qui pourrait se produire si l'on utilise de la radiofréquence ou des hautes fréquences.

[0071] Le potentiel fournit à l'anode 30 par le générateur 50 est de l'ordre de plusieurs centaines de Volts. L'intensité du courant est de l'ordre de 1 Ampère et plus, pouvant atteindre par exemple 5A ou plus en mode impulsif.

[0072] Alternativement, le système fonctionne avec une série d'impulsions électriques (courant pulsé), à l'aide d'un générateur d'impulsions. Ce mode de fonctionnement présente l'avantage de fournir une poussée plus élevée dans le cas où le système selon l'invention est utilisé dans un système de propulsion de véhicule spatial (voir ci-dessous). Le générateur d'impulsions est alimenté par le générateur 50. Les essais réalisés par les inventeurs montrent que l'on peut atteindre un courant stable de 2 A (Ampères) avec un saut de tension moyen de 2 kV (kiloVolts), ce qui donne une puissance à chaque impulsion de 4 kW (kiloWatts) par impulsion. La durée de l'impulsion est variable entre 10 et quelques centaines de μ s. Dans l'exemple de fonctionnement donné en figure 3, la durée de l'impulsion est de 40 μ s (microsecondes) environ. La courbe référencée S représente le signal de l'impulsion (en Volts), la courbe référencée V représente le potentiel de décharge à l'anode (en kiloVolts), la courbe référencée I représente le courant de décharge à l'anode (en Ampères). La durée de l'impulsion est de 40 μ s (microsecondes), l'unité sur l'axe des abscisses de la figure 3 étant en μ s.

[0073] Cette puissance génère une poussée qui est bien supérieure à celle obtenue avec les propulseurs HE, pour une masse embarquée équivalente (voir ci-dessous).

[0074] De plus, l'utilisation des générateurs d'impulsions de plus grande puissance permet en plus d'augmenter le courant, donc le jet plasma, de réaliser d'ionisations multiples, très utiles dans le cas où le système serait utilisé pour un tel objectif.

[0075] De plus, le système permet le transfert efficace de moment aux ions lourds, d'autant plus grand que la tension appliquée à l'anode est grande.

[0076] Contrairement aux systèmes de l'art antérieur

qui utilisent exclusivement une source d'électrons externe (cathode) et pour lesquels il se forme un arc entre la cathode et l'anode, le système selon l'invention ne fonctionne pas en régime d'arc standard. Au contraire, la tension fournie initialement est de l'ordre de plusieurs milliers de Volts, et se maintient à quelques centaines de Volts après formation de l'arc (phénomène de rupture ou claquage). La valeur élevée de ce voltage (tension) même après claquage (comparé au régime d'arc standard où le voltage est inférieur à 100 Volts), est due à la formation en sortie aval du tube 10 d'une sphère de plasma dont la surface est la frontière de l'onde de choc générée par l'expansion du flux d'ions dans le vide. Ainsi, cette frontière est fortement chargée électriquement, ce qui contribue à accélérer les ions métalliques éjectés par le cylindre de métal plasma 20. Pour distinguer ce mode de fonctionnement de l'arc standard, il sera nommé « arc anomal ».

[0077] C'est ce fonctionnement particulier du système de d'accélération selon l'invention qui permet de s'affranchir de l'utilisation de grilles d'accélération des ions dans le cas où le système selon l'invention est utilisé dans un système de propulsion de véhicule spatial (voir ci-dessous).

[0078] Avantageusement, une fois le plasma généré depuis le cylindre de métal 20 comme expliqué ci-dessus, il est possible sous certaines conditions d'éteindre la source de chauffage 42 alors que l'arc anomal continue à fonctionner. En effet, les ions métalliques sont naturellement repoussés par l'anode, et en régime stationnaire le plasma s'autoentretient avec un chauffage entretenu par le courant de décharge (i.e., les électrons du plasma qui rejoignent l'anode), surtout pour des régimes de courant élevé. Ainsi la formation d'un arc anomal pérenne dans le vide est entretenue entre la cathode et l'anode. Dans ce cas on utilisera un émetteur d'électrons externe 62 comme source d'électrons uniquement pour émettre des électrons servant à neutraliser le plasma d'ions vers l'extrémité aval 15 du tube 10.

[0079] Avantageusement, lorsque l'arc anomal est entretenu, on peut faire fonctionner la cathode sans chauffage additionnel. Ce mode de fonctionnement du système de génération de plasma présente l'avantage qu'en régime stationnaire la source d'électrons 60, en l'espèce l'émetteur externe 62, peut fonctionner à une puissance électrique consommée plus faible.

[0080] Avantageusement, le système (et le procédé) de génération de plasma selon l'invention est utilisé dans un système de propulsion d'un véhicule spatial, l'éjection du plasma servant à la propulsion de ce véhicule.

[0081] Pour la propulsion dans l'espace d'un véhicule spatial, tel un satellite, on connaît les propulseurs à effet Hall (ou propulseur HE (« Hall Effect Thruster »)). Ce propulseur comporte un espace annulaire avec un fond à une extrémité, et ouvert à l'autre extrémité, dans lequel un champ magnétique est établi. Une cathode, qui émet des électrons, est située à l'extrémité ouverte de l'espace annulaire souvent fonctionnant avec une alimentation en

gaz (cathode creuse). Le fond de l'espace annulaire constitue une anode, au travers de laquelle sont injectés des atomes de xénon ou un autre gaz propulsif, stocké souvent sous forme liquéfiée. Les électrons émis par la cathode sont piégés à l'entrée de l'espace annulaire par le champ magnétique, où ils s'accumulent, une partie des électrons poursuivant leurs trajets vers l'anode. Les atomes de gaz propulsif sont ionisés par collision avec les électrons dans l'espace annulaire, et accélérés par le champ électrique en direction de l'extrémité ouverte de cet espace. En sortie de cet espace, les ions sont neutralisés en traversant le nuage d'électrons et éjectés hors de l'espace sous forme d'un plasma à charge nulle. L'éjection de ce plasma fournit la propulsion au véhicule spatial.

[0082] Pour diminuer le poids du système de propulsion, on cherche à en diminuer la taille. Or cette diminution implique une augmentation du champ magnétique pour conserver le même rendement, ce qui implique une consommation en énergie supplémentaire, et souvent le besoin d'un système de refroidissement des aimants afin de ne pas dépasser la température de Curie ou l'emploi d'électroaimants très consommateurs d'énergie.

[0083] Il a alors été développé des systèmes de propulsion fonctionnant sans champ magnétique, en particulier le propulseur à cathode creuse (ou propulseur HC (« Hollow Cathode Thruster »)).

[0084] Dans le propulseur HC, un gaz est injecté au travers d'un tube (cylindre creux) formant l'anode, dont la surface interne est recouverte d'un matériau qui émet des électrons lorsqu'il est chauffé (émission thermoionique). Ainsi, le chauffage du tube entraîne une ionisation du gaz lors de son passage au travers du tube. Les ions ainsi formés sont ensuite accélérés par la différence de potentiel entre l'anode et la cathode qui est située à l'extrémité du tube qui est opposée à celle par laquelle le gaz est injecté.

[0085] Le propulseur HC présente des inconvénients.

[0086] En effet, le propulseur HC fonctionne avec une différence de potentiel faible (30 V environ) et donc une poussée intrinsèque faible. Accélérer davantage les ions afin d'obtenir une poussée supérieure requiert des voltages (tension) de plusieurs centaines de volts, ce qui implique l'utilisation de grilles polarisées. Ces grilles sont placées en aval du tube. Ceci complexifie le système de propulsion. De plus ces grilles, étant soumises au flux des ions accélérés, s'usent, ce qui diminue leur efficacité à long terme.

[0087] Ainsi, en utilisant dans le système de propulsion un système de génération d'un jet plasma tel que décrit ci-dessus et dans lequel c'est le flux 70 de plasma qui propulse le véhicule spatial, on simplifie le système de propulsion car il n'est pas nécessaire de déposer un revêtement d'un matériau supplémentaire, source d'électrons, sur la face interne du tube. En effet, la source d'électrons est située à l'extérieur du tube.

[0088] Selon l'invention, la source initiale (matériau précurseur) de matière pour les ions (matière à ioniser)

n'est, à température ambiante, pas un gaz, ni un liquide, mais un solide. En d'autres termes, le matériau précurseur qui est utilisé par le système selon l'invention avant le début de son fonctionnement, donc avant le chauffage de ce matériau précurseur, est un métal solide.

[0089] L'utilisation d'un métal solide comme source initiale de matière pour les ions et non d'un gaz tel que le xénon ou d'un liquide permet de simplifier la fabrication et de diminuer la masse (embarquée) du système de propulsion puisqu'il n'est plus nécessaire d'utiliser des conteneurs pressurisés de gaz avec un contrôle de température, et les équipements associés (tuyaux de circulation du gaz, valves).

[0090] Le potentiel d'accélération des ions du système de propulsion est supérieur à celui des propulseurs HC et les ions sont accélérés sous un voltage suffisamment élevé (voir explication ci-dessus), ce qui permet de s'affranchir de l'utilisation de grilles polarisées et donc de diminuer le poids du système, et ce qui en augmente l'efficacité.

[0091] Le système fonctionne donc sans grilles d'accélération.

[0092] Le système fonctionne sans aimants donc sans champ magnétique, contrairement aux propulseurs HE. Le système est donc plus simple et moins coûteux à fabriquer.

[0093] Le système selon l'invention est par conséquent plus compact que d'autres systèmes selon l'art antérieur. Par exemple, la longueur du système est de l'ordre de 10 cm, et son diamètre est inférieur à 1 cm, par exemple égal à 0,5 cm.

[0094] Le système selon l'invention peut également être utilisé pour d'autres applications, telles que la production d'ions lourds multichargés pour des accélérateurs de particules, ou pour la fusion thermonucléaire par ions lourds. Le système selon l'invention remplace ainsi avantageusement les systèmes existants de production d'ions lourds, qui utilisent des champs magnétiques.

[0095] Dans les accélérateurs, les impulsions fournies par le générateur sont d'une haute puissance, de l'ordre de plusieurs centaines de kV.

Revendications

1. Système de génération d'un jet plasma, 2. comprenant un tube (10) en matériau isolant électriquement contenant un métal (20) sous forme solide à température ambiante et une anode (30) en contact avec ledit métal (20), un générateur électrique (50) connecté à ladite anode (30) apte à créer un potentiel électrique positif au niveau de ladite anode (30), un élément de chauffage (40) apte à chauffer une partie dudit métal (20) à une température de chauffage T_c suffisante pour vaporiser ladite partie du métal (20), une source d'électrons (60) située à l'extérieur du tube (10) et hors de l'axe longitudinal du tube (10), et étant apte à générer un flux d'électrons capable

de ioniser la vapeur dudit métal pour former des ions métalliques, de telle sorte que les ions métalliques ainsi produits sont aptes à être repoussés et ainsi accélérés par ledit potentiel et éjectés hors dudit tube (10) par l'extrémité aval (15) dudit tube (10), et étant neutralisés pour une partie par des électrons émis par ladite source d'électrons (60) afin de former un flux (70) de plasma.

2. Système de génération d'un jet plasma selon la revendication 1, dans lequel ledit métal (20) possède une masse atomique supérieure ou égale à celle de l'or, ou possède une température de fusion inférieure ou égale à celle de l'or.

3. Système de génération d'un jet plasma selon la revendication 1 ou 2, dans lequel ledit élément de chauffage (40) entoure la partie aval (12) dudit tube (10).

4. Système de génération d'un jet plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel ledit tube (10) est en céramique.

5. Système de génération d'un jet plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel l'anode (30) est distincte du métal (20) contenu dans ledit tube (10).

6. Système de génération d'un jet plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel ladite source d'électrons (60) comprend ledit élément de chauffage (40).

7. Système de génération d'un jet plasma selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel ladite source d'électrons (60) comprend un émetteur externe d'électrons (62) distinct dudit élément de chauffage (40).

8. Système de propulsion pour un véhicule spatial comprenant un système de génération d'un jet plasma selon l'une quelconque des revendications précédentes, l'éjection dudit plasma servant à la propulsion.

9. Procédé de génération d'un jet plasma **caractérisé en ce qu'il** comprend les étapes suivantes :

- (a) On fournit un tube (10) en matériau isolant électriquement, contenant un métal (20) sous forme solide à température ambiante et une anode (30) en contact avec ledit métal (20), un générateur (50) connecté à ladite anode (30), et une source d'électrons (60) située à l'extérieur du tube (10) et hors de l'axe longitudinal du tube (10),
- (b) On applique un potentiel électrique positif au

niveau de ladite anode (30) à l'aide dudit générateur (50),

(c) On chauffe une partie dudit métal (20) à une température de chauffage T_c suffisante pour vaporiser ladite partie du métal (20),

(d) On ionise la vapeur dudit métal ainsi produite par les électrons émis par ladite source d'électrons (60), pour former des ions métalliques qui sont accélérés par ledit potentiel et éjectés hors dudit tube (10) par l'extrémité aval (15) dudit tube (10), et étant pour une partie neutralisés par des électrons émis par ladite source d'électrons (60), afin de former un flux (70) de plasma.

10. Procédé de génération d'un jet plasma selon la revendication 9, dans lequel ledit générateur (50) fournit un courant électrique continu.

11. Procédé de génération d'un jet plasma selon la revendication 9, dans lequel ledit générateur (50) fournit des impulsions générant un courant électrique.

Patentansprüche

1. System zum Erzeugen eines Plasmastrahls, umfassend eine Röhre (10) aus elektrisch isolierendem Material, welches ein Metall (20) enthält, welches bei Raumtemperatur fest ist, und eine Anode (30) in Kontakt mit dem Metall (20), einen elektrischen Generator (50), welcher mit der Anode (30) verbunden ist, welcher in der Lage ist, ein positives elektrisches Potenzial auf Höhe der Anode (30) zu erzeugen, ein Heizelement (40), welches in der Lage ist, einen Teil des Metalls (20) auf eine Heiztemperatur T_c zu erhitzen, welche ausreicht, um den Teil des Metalls (20) zu verdampfen, eine Elektronenquelle (60), welche sich außerhalb der Röhre (10) und außerhalb der Längsachse der Röhre (10) befindet, und in der Lage ist, einen Elektronenfluss zu erzeugen, welcher in der Lage ist, den Dampf aus dem Metall zu ionisieren, um Metallionen dergestalt zu bilden, dass die so hergestellten Metallionen in der Lage sind, durch das Potenzial abgestoßen und dadurch beschleunigt und aus der Röhre (10) durch das vorgelagerte Ende (15) der Röhre (10) ausgeworfen zu werden, und welche zu einem Teil durch Elektronen neutralisiert werden, welche durch die Elektronenquelle (60) abgegeben werden, um einen Plasmafluss (70) zu bilden.

2. System zum Erzeugen eines Plasmastrahls nach Anspruch 1, wobei das Metall (20) eine Atommasse aufweist, welche größer als die oder gleich derjenigen von Gold ist, oder eine Schmelztemperatur aufweist, welche kleiner als die oder gleich derjenigen von Gold ist.

3. System zum Erzeugen eines Plasmastrahls nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Heizelement (40) den vorgelagerten Teil (12) der Röhre (10) umgreift.

5 4. System zum Erzeugen eines Plasmastrahls nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Röhre (10) aus Keramik besteht.

10 5. System zum Erzeugen eines Plasmastrahls nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Anode (30) sich von dem in der Röhre (10) enthaltenen Metall (20) unterscheidet.

15 6. System zum Erzeugen eines Plasmastrahls nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Elektronenquelle (60) das Heizelement (40) umfasst.

20 7. System zum Erzeugen eines Plasmastrahls nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Elektronenquelle (60) eine externe Elektronen emittierende Vorrichtung (62) umfasst, welche sich von dem Heizelement (40) unterscheidet.

25 8. Antriebssystem für ein Raumfahrzeug, umfassend ein System zum Erzeugen eines Plasmastrahls nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Auswurf des Plasmas dem Antrieb dient.

30 9. Verfahren zum Erzeugen eines Plasmastrahls, dadurch gekennzeichnet, dass es folgende Schritte umfasst:

(a) Man stellt eine Röhre (10) aus elektrisch isolierendem Material bereit, welches ein Metall (20) umfasst, welches bei Raumtemperatur fest ist, und eine Anode (30) in Kontakt mit dem Metall (20), einen Generator (50), welcher mit der Anode (30) verbunden ist, und eine Elektronenquelle (60), welche sich außerhalb der Röhre (10) und außerhalb der Längsachse der Röhre (10) befindet,

(b) Man legt ein positives elektrisches Potenzial auf Höhe der Anode (30) mithilfe des Generators (50) an,

(c) Man erhitzt einen Teil des Metalls (20) auf eine Heiztemperatur T_c , welche ausreicht, um den Teil des Metalls (20) zu verdampfen,

(d) Man ionisiert den so hergestellten Dampf des Metalls durch die durch die Elektronenquelle (60) emittierten Elektronen zum Bilden von Metallionen, welche durch das Potenzial beschleunigt und aus der Röhre (10) durch das vorgelagerte Ende (15) der Röhre (10) ausgeworfen werden, und welche zu einem Teil durch die durch die Elektronenquelle (60) emittierten Ionen neutralisiert werden, um einen Plasmafluss (70) zu bilden.

10. Verfahren zum Erzeugen eines Plasmastrahls nach Anspruch 9, wobei der Generator (50) einen elektrischen Gleichstrom bereitstellt.
11. Verfahren zum Erzeugen eines Plasmastrahls nach Anspruch 9, wobei der Generator (50) Impulse bereitstellt, welche einen elektrischen Strom erzeugen.

Claims

1. A system for generating a plasma jet, comprising a tube (10) made of electrically insulating material containing a metal (20) that is in a solid form at room temperature and an anode (30) in contact with said metal (20), an electrical generator (50) connected to said anode (30) that is capable of producing a positive electrical potential at said anode (30), a heating element (40) that is capable of heating a portion of said metal (20) to a heating temperature T_c that is sufficient to vaporize said portion of the metal (20), an electron source (60) located on the outside of the tube (10) and out of the longitudinal axis of the tube (10), and being capable of generating an electron stream that is able to ionise the vapour of said metal so as to form metal ions, such that the metal ions thus produced are capable of being repelled and thus accelerated by said potential and ejected out of said tube (10) via the downstream end (15) of said tube (10), and a portion of which being neutralised by electrons emitted by said electron source (60) so as to form a plasma stream (70).
2. The system for generating a plasma jet according to claim 1, wherein said metal (20) has an atomic mass higher than or equal to that of gold, or a melting point lower than or equal to that of gold.
3. The system for generating a plasma jet according to claim 1 or 2, wherein said heating element (40) surrounds the downstream portion (12) of said tube (10).
4. The system for generating a plasma jet according to any one of claims 1 to 3, wherein said tube (10) is made of ceramic.
5. The system for generating a plasma jet according to any one of claims 1 to 4, wherein the anode (30) is distinct from the metal (20) contained in said tube (10).
6. The system for generating a plasma jet according to any one of claims 1 to 5, wherein said electron source (60) comprises said heating element (40).
7. The system for generating a plasma jet according to any one of claims 1 to 6, wherein said electron source (60) comprises an external electron emitter (62) that

is distinct from said heating element (40).

8. A propulsion system for a space vehicle comprising a system for generating a plasma jet according to any one of the preceding claims, the ejection of said plasma generating the thrust.

9. A method for generating a plasma jet, **characterised in that** it comprises the following steps:

- (a) a tube (10) made of electrically insulating material containing a metal (20) that is in the solid form at room temperature and an anode (30) in contact with said metal (20), a generator (50) connected to said anode (30) and an electron source (60) located on the outside of the tube (10) and out of the longitudinal axis of the tube (10) are provided,
- (b) a positive electrical potential is applied to said anode (30) using said generator (50),
- (c) a portion of said metal (20) is heated to a heating temperature T_c that is sufficient to vaporise said portion of the metal (20),
- (d) the vapour of said metal thus produced is ionised by the electrons emitted by said electron source (60) so as to form metal ions that are accelerated by said potential and ejected out of said tube (10) via the downstream end (15) of said tube (10), and a portion of which being neutralized by electrons emitted by said electron source (60), so as to form a plasma stream (70).

10. The method for generating a plasma jet according to claim 9, wherein said generator (50) delivers a DC electric current.

11. The method for generating a plasma jet according to claim 9, wherein said generator (50) provides pulses generating an electric current.

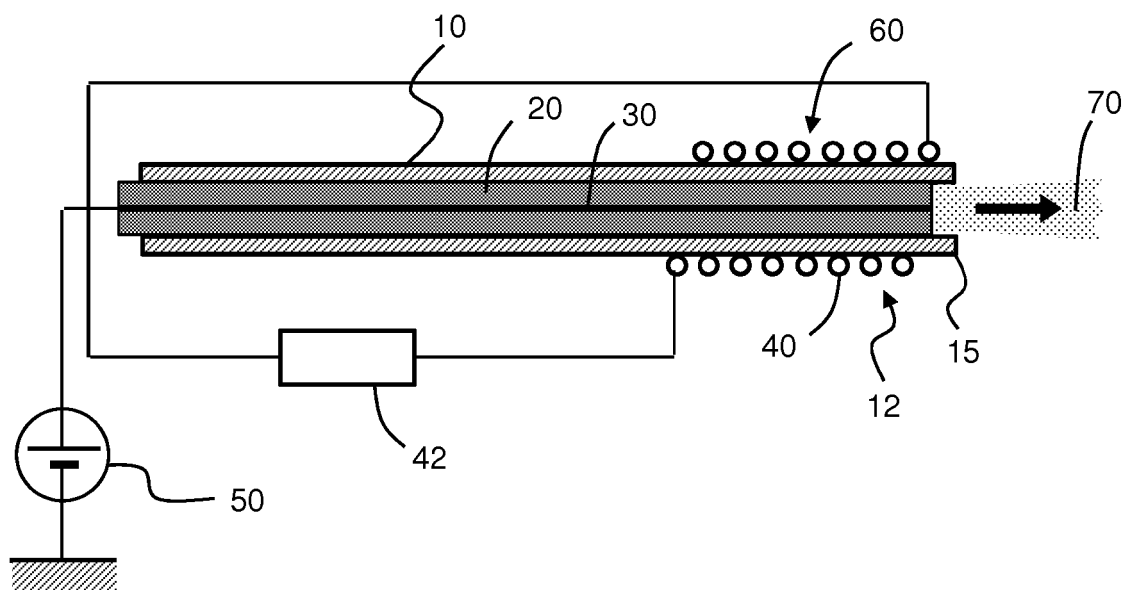


FIG. 1

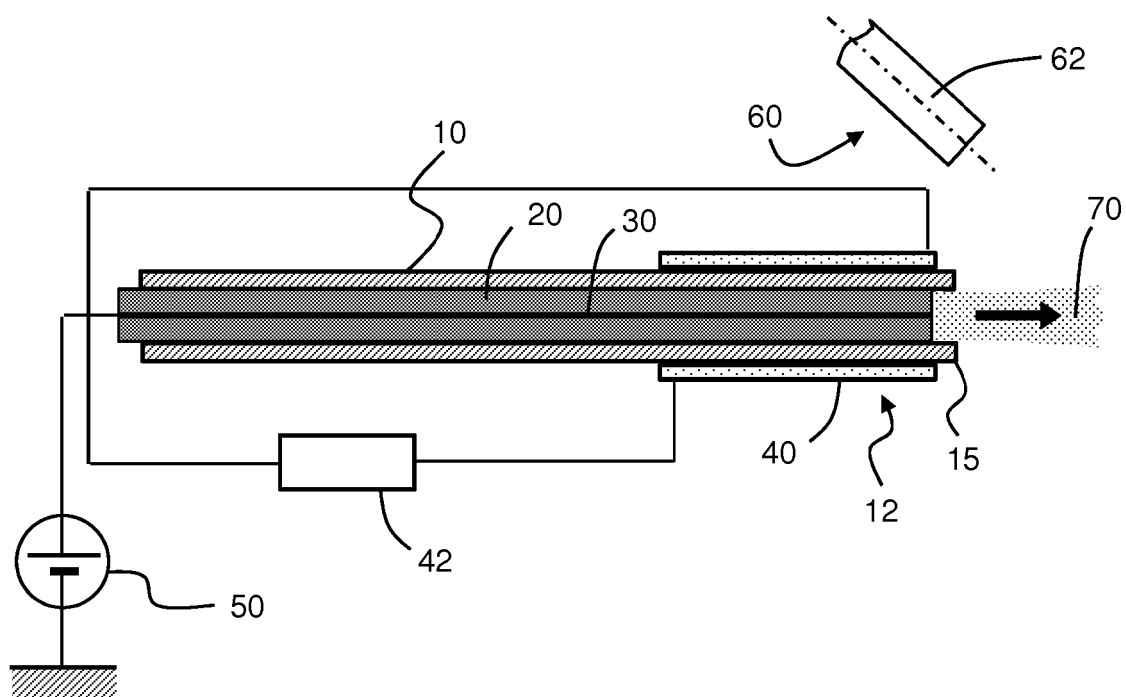


FIG. 2

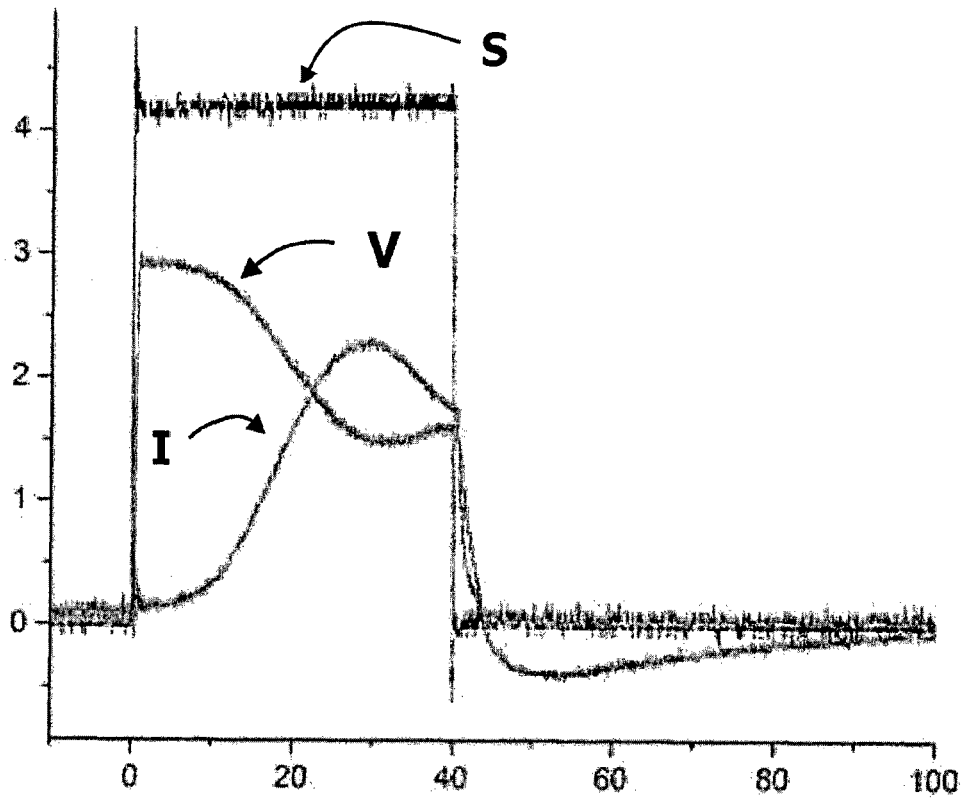


FIG. 3

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 2003033797 A [0006]
- US 4328667 A [0006]

Littérature non-brevet citée dans la description

- POWER SOURCE. *product engineering*, 06 Août 1964, vol. 35 (16), 75 [0006]