



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
04.07.2007 Bulletin 2007/27

(51) Int Cl.:
H01J 35/10^(2006.01) H01J 35/14^(2006.01)
H01J 35/26^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **06127095.5**

(22) Date de dépôt: **22.12.2006**

(84) Etats contractants désignés:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI SK TR
Etats d'extension désignés:
AL BA HR MK YU

(30) Priorité: **03.01.2006 FR 0650007**

(71) Demandeur: **Alcatel Lucent**
75008 Paris (FR)

(72) Inventeurs:
• **Bernard, Roland**
74540 Viuz-la-Chiésaz (FR)
• **Barthod, Benoît**
74730 Naves-Parmelan (FR)

(74) Mandataire: **Sciaux, Edmond**
Alcatel Lucent
Intellectual Property & Standards
54 rue La Boétie
75008 Paris (FR)

(54) **Source compacte à faisceau de rayons X de très grande brillance**

(57) Un dispositif d'émission de rayons X selon l'invention comprend une pompe à vide (1) dont l'enveloppe périphérique étanche (1f) contient une cathode (3) d'émission de flux d'électrons (4), une anode tournante (2), montée en bout d'arbre (1e) de la pompe à vide (1), et un dispositif de collection (5) collectant un faisceau émis de rayons X (6). On réduit ainsi considérablement l'encombrement de la source de rayons X, et, grâce à la rotation très rapide et stable de l'anode tournante (2) solidaire du rotor (1a) de la pompe à vide (1) on réalise une source à très grande brillance. On peut en outre déplacer axialement l'anode tournante (2) pour compenser l'usure qu'elle subit par l'impact du faisceau incident d'électrons (4) provenant de la cathode (3).

Selon l'invention, le dispositif comprend en outre au moins un élément refroidisseur fixé au stator de pompe à vide ou à l'enveloppe périphérique étanche en regard de l'une des faces radiales principales de l'anode tournante pour absorber l'énergie thermique de rayonnement émise par l'anode tournante en fonctionnement.

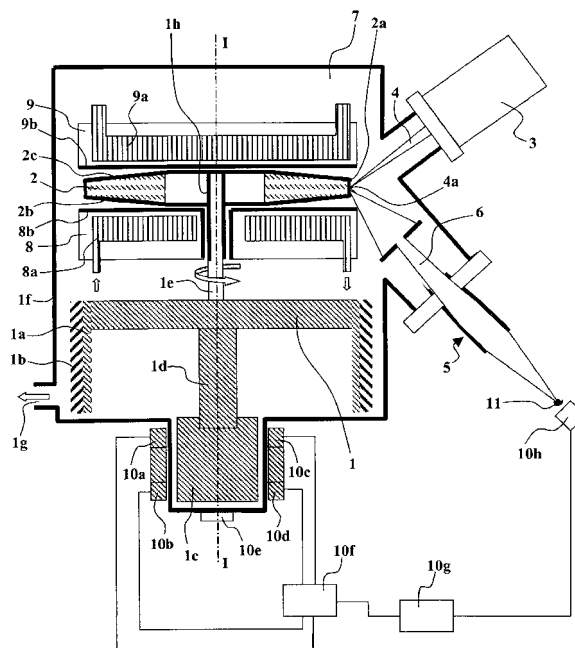


FIG. 1

Description

[0001] La présente invention concerne les dispositifs à anode tournante permettant de générer un faisceau de rayons X.

[0002] On connaît déjà, comme décrit par exemple dans le document EP-0 170 551, un dispositif radiologique comportant un tube radiogène à anode tournante. Le tube radiogène comprend une enceinte sous vide, limitée par une paroi étanche, et dans laquelle est disposée une cathode adaptée pour générer un flux d'électrons. Dans l'enceinte sous vide se trouve également une anode tournante, entraînée en rotation autour d'un axe de rotation par un rotor à paliers magnétiques. L'anode tournante reçoit sur sa périphérie le flux d'électrons provenant de la cathode, et émet ainsi des rayons X qui sont dirigés vers une sortie. Les paliers magnétiques sont pilotés de façon à déplacer le rotor le long de son axe de rotation, et de façon à déplacer ainsi l'anode tournante, en réponse à un capteur de position du faisceau de rayons X en sortie, pour maintenir fixe la position du faisceau de rayons X en sortie. On supprime ainsi l'influence néfaste des déplacements parasites de l'anode tournante pouvant résulter notamment des dilatations thermiques ou des déformations de certains éléments du dispositif.

[0003] Les dispositifs émetteurs de rayons X à anode tournante actuellement connus sont relativement encombrants, car, outre l'anode tournante et son dispositif d'entraînement en rotation dans une enceinte à vide, ils nécessitent une pompe à vide externe pour la génération et l'entretien du vide dans l'enceinte à vide.

[0004] En outre, les moyens connus d'entraînement en rotation des anodes tournantes génèrent des vibrations qui limitent les possibilités d'utilisation dans certaines applications telles que la microscopie électronique, le contrôle de cristallisation des polymères, la mesure de petites structures ou de multicouches dans la fabrication de semi-conducteurs.

[0005] En outre, les générateurs de rayons X à anode tournante actuellement utilisés sont coûteux, et réclament beaucoup de maintenance. De plus, la brillance de la source est insuffisante, et il y a un intérêt à augmenter cette brillance pour améliorer la focalisation du rayonnement sur de petits échantillons.

[0006] La présente invention vise tout d'abord à réduire l'encombrement ainsi que le coût des dispositifs de génération de rayons X à anode tournante.

[0007] Un autre but de l'invention est de réduire les vibrations résultant de la mise en rotation de l'anode tournante.

[0008] Un autre but de l'invention est d'augmenter la brillance de la source de rayons X, en réduisant simultanément les conséquences de l'usure inévitable de l'anode tournante soumise à un faisceau d'électrons puissant.

[0009] Un autre but de l'invention est d'augmenter la durée de vie de l'anode tournante dans une telle source

de rayons X à grande brillance.

[0010] Pour atteindre ces buts ainsi que d'autres, l'invention met à profit l'observation selon laquelle les pompes à vide de type moléculaire, turbomoléculaire ou hybride sont devenues actuellement des dispositifs entraînés à très grande vitesse, avec des vitesses de rotation pouvant dépasser 40 000 tours par minute, sans vibrations sensibles.

[0011] L'idée selon l'invention est alors d'utiliser la pompe à vide elle-même à la fois pour générer le vide dans l'enceinte à vide du générateur de rayons X, et pour produire la rotation de l'anode tournante.

[0012] Ainsi, l'invention propose un dispositif pour l'émission de rayons X, comprenant :

- une enceinte sous vide, limitée par une paroi étanche,
- une pompe à vide, raccordée à l'enceinte sous vide pour y générer et entretenir un vide, comportant un stator, un rotor et des moyens d'asservissement du rotor permettant sa rotation stable à très haute vitesse, le stator, le rotor et les moyens d'asservissement étant contenus dans une enveloppe périphérique étanche qui constitue elle-même tout ou partie de la paroi étanche de l'enceinte sous vide,
- une cathode, dans l'enceinte sous vide, adaptée pour générer un flux d'électrons,
- une anode tournante, dans l'enceinte sous vide, entraînée en rotation autour d'un axe de rotation (I-I), et recevant sur sa périphérie le flux d'électrons provenant de la cathode pour émettre des rayons X vers une sortie, l'anode étant solidaire du rotor de la pompe à vide et disposée coaxialement avec le rotor,

[0013] Selon l'invention, le dispositif comprend en outre au moins un élément refroidisseur fixé au stator de pompe à vide ou à l'enveloppe périphérique étanche en regard de l'une des faces radiales principales de l'anode tournante pour absorber l'énergie thermique de rayonnement émise par l'anode tournante en fonctionnement.

[0014] De préférence, on prévoit au moins deux éléments refroidisseurs disposés respectivement en regard de l'une et l'autre des faces radiales principales de l'anode tournante.

[0015] Grâce à cette combinaison, le dispositif est beaucoup plus compact et on minimise son encombrement total. On réduit simultanément son coût, puisqu'un seul dispositif en rotation assure à la fois la génération et le maintien du vide et l'entraînement en rotation de l'anode tournante. On profite des grandes qualités de stabilité et d'absence de vibrations de la pompe à vide. Simultanément, la grande vitesse de rotation de la pompe à vide permet de donner à l'anode tournante une grande vitesse de rotation, permettant à l'anode tournante de supporter une plus grande énergie de faisceau d'électrons et d'émettre un faisceau de rayons X à plus grande brillance.

[0016] Dans un souci de produire un dispositif émet-

teur de rayons X à très grande brillance, on projette sur l'anode tournante un faisceau d'électrons à grande énergie. Mais cela produit un échauffement rapide de l'anode tournante. Il est alors utile d'isoler thermiquement la pompe à vide vis-à-vis de l'anode tournante, afin d'éviter son propre échauffement et sa dégradation. Compte tenu de la vitesse de rotation de la pompe, il est impossible d'utiliser un mode de refroidissement par circulation d'eau dans un arbre creux car des problèmes d'étanchéité au niveau de la connexion entre la partie rotative et la partie fixe apparaissent. La chaleur apportée à l'anode par le faisceau de rayons X doit donc être évacuée de préférence uniquement par rayonnement. Il est également impératif de transmettre une très faible quantité de chaleur au rotor de la pompe, pour éviter son échauffement, qui combiné avec les contraintes dues à la vitesse de rotation très élevée, engendrerait alors une détérioration du matériau dont il est constitué (alliage d'aluminium en général) et une destruction de la pompe. Dans un souci de réduire l'échauffement parasite de la pompe à vide, et de limiter l'usure de l'anode tournante, il est indispensable de prévoir des moyens favorisant le transfert de chaleur de l'anode tournante vers l'extérieur pendant son fonctionnement.

[0017] Il est donc nécessaire d'avoir la plus grande surface d'émission de la chaleur sur l'anode d'une part, et d'autre part de refroidir les zones en regard de ces surfaces émissives et de protéger le rotor de la pompe du rayonnement de chaleur émis par l'anode. Ce problème est résolu par l'utilisation d'un élément refroidisseur placé en regard de l'anode, constitué d'un matériau possédant une bonne conductivité thermique, comme le cuivre ou l'aluminium par exemple. Cet élément est refroidi soit directement par une circulation d'un fluide refroidissant à l'intérieur de l'élément, soit par contact de l'élément avec un tube dans lequel circule un fluide refroidissant, ce tube étant soit inséré dans l'élément, soit en contact avec sa surface.

[0018] Par ailleurs, il est également nécessaire de protéger les utilisateurs, mais aussi le rotor de la pompe turbomoléculaire des rayons X émis par l'anode, afin éviter la détérioration du matériau soumis à la fois à une température et à des contraintes mécaniques élevées, mais également à un flux de rayons X très important. Une solution préférée consiste alors à modifier l'élément refroidisseur se trouvant entre l'anode et la pompe, de façon à ce qu'il assure à la fois la fonction de barrière thermique et de barrière aux rayons X. De même, un élément refroidisseur situé du côté opposé de l'anode peut contribuer également à l'absorption des rayons X émis par l'anode, et constituer de ce fait une barrière aux rayons X vis à vis de l'extérieur de l'enceinte.

[0019] Avantagusement l'élément comprend un corps en cuivre ou en acier inoxydable d'une épaisseur suffisante pour absorber le flux de rayons X émis. Ce corps peut prendre la forme d'un anneau, d'un disque ou d'une plaque, et permet ainsi de laisser un passage entre l'anode et la pompe turbomoléculaire, notamment au ni-

veau du rotor, pour permettre à la pompe d'assurer le pompage de l'enceinte au niveau de l'anode. Ce passage se situe de préférence à la périphérie du disque ou de l'anneau.

[0020] Dans le cas d'un faisceau d'électrons d'une énergie de 50 keV frappant une cible en tungstène, la quantité de rayons X émis à 25 cm de la cible est de l'ordre de $2.1.10^{10} \mu\text{Sv/h}$. Afin de respecter un niveau de radioprotection inférieur à $0.7 \mu\text{Sv/h}$, un niveau d'atténuation de 3.10^{-11} est nécessaire. Par exemple cette atténuation est obtenue lorsque les rayons X traversent une épaisseur d'aluminium de 164 mm. Avantagusement, on utilisera un corps en cuivre d'une épaisseur comprise entre 8 et 13 mm ou un corps en acier inox d'une épaisseur comprise entre 14 et 19 mm, afin de combiner la fonction de refroidissement (bonne conductibilité thermique) et de radioprotection.

[0021] Le ou les éléments refroidisseurs peuvent avantagusement comporter un circuit interne de refroidissement parcouru par un fluide caloporteur qui évacue vers l'extérieur l'énergie calorifique.

[0022] On peut favoriser encore l'extraction d'énergie calorifique de l'anode tournante en prévoyant que les surfaces opposées du ou des éléments refroidisseurs et de l'anode tournante sont revêtues d'une couche de matériau à haute émissivité, tel que le nickel noir ou le chrome noir, ou encore une céramique.

[0023] Un moyen supplémentaire pour favoriser l'extraction d'énergie calorifique de l'anode tournante est de prévoir une anode en matériaux et structure aptes à supporter des températures plus élevées, associée à des moyens d'isolation thermique à grande efficacité vis-à-vis de la pompe à vide. Il en résulte que l'anode tournante présente en surface une température accrue qui favorise le rayonnement et donc le transfert de chaleur vers le ou les éléments refroidisseurs.

[0024] Egalement, pour améliorer la capacité de refroidissement, les surfaces opposées du ou des éléments refroidisseurs et de l'anode tournante peuvent être dentelées de manière concentrique, augmentant la surface de rayonnement.

[0025] Des moyens d'isolation thermique peuvent en outre être interposés entre l'arbre du rotor et l'anode tournante elle-même portée par l'arbre. De tels moyens d'isolation thermique peuvent comprendre, par exemple, une couche de céramique réalisée sur la surface correspondante de l'arbre. La céramique est moins conductrice de la chaleur que les métaux constituant l'arbre et l'anode tournante, réalisant ainsi une barrière qui freine la propagation d'énergie thermique vers la pompe à vide. Ce moyen d'isolation est simple et efficace, et, grâce à la dureté de la céramique, ne dégrade pas la stabilité de l'anode tournante.

[0026] En alternative, les moyens d'isolation thermique peuvent comprendre une bague isolante ou peu conductrice de la chaleur, de préférence par exemple une bague en acier inoxydable. Bien que l'acier inoxydable soit un moins bon isolant thermique que la céramique, il

possède en revanche de meilleures caractéristiques mécaniques. Une autre solution consisterait à intercaler entre l'anode et le rotor, une bague en inox supportant les contraintes mécaniques les plus élevées, associée à deux bagues en céramique enserrant l'anode et assurant son maintien.

[0027] La présence d'un gaz approprié dans l'atmosphère intérieure de la pompe à vide entre les surfaces opposées des éléments refroidisseurs et de l'anode tournante peut favoriser encore, par convection, l'extraction d'énergie calorifique de l'anode. Des moyens seront prévus pour limiter la propagation du gaz vers la zone traversée par le flux d'électrons entre la cathode et l'anode tournante.

[0028] De préférence, la pompe à vide sera de type pompe moléculaire, turbomoléculaire ou hybride, permettant l'obtention d'une grande vitesse de rotation et la réalisation d'un vide poussé. La brillance de la source de rayons X peut ainsi être augmentée.

[0029] De préférence, l'anode tournante peut être une pièce rapportée en bout d'un arbre coaxial du rotor. L'anode tournante peut ainsi être une pièce interchangeable, aisément remplacée après usure.

[0030] En pratique, l'anode tournante peut avoir la forme générale d'un disque, sa surface périphérique constituant au moins une cible qui reçoit le flux d'électrons provenant de la cathode. Une telle structure est simple et peu encombrante.

[0031] En cours de fonctionnement, l'impact du faisceau d'électrons sur la surface périphérique de l'anode tournante provoque son usure progressive. Il peut en résulter une variation dimensionnelle de l'anode tournante, et donc une déviation et/ou un défaut de focalisation du faisceau de rayons X en sortie du dispositif. Pour réduire ce phénomène, on peut prévoir, selon l'invention, des moyens pour déplacer le rotor le long de son axe de rotation, modifiant ainsi la zone d'impact du faisceau d'électrons sur la périphérie de l'anode tournante.

[0032] En pratique, le rotor peut être sollicité par des paliers magnétiques pilotés par une électronique de commande de paliers, l'ensemble déterminant la position axiale et la position radiale du rotor dans le stator. L'électronique de commande de paliers peut être adaptée pour modifier volontairement au moins la position axiale du rotor le long de son axe de rotation.

[0033] En particulier, l'électronique de commande peut être adaptée pour modifier la position axiale du rotor en fonction de l'usure de l'anode tournante, pour déplacer une zone usée de l'anode tournante à l'écart de la zone d'impact du faisceau d'électrons.

[0034] Selon une autre possibilité, en alternative ou en complément, l'électronique de commande peut déplacer en va-et-vient le rotor le long de son axe de rotation pendant le fonctionnement, déplaçant ainsi la zone d'impact du faisceau d'électrons sur une surface périphérique plus étendue de l'anode tournante, et répartissant ainsi l'usure sur une plus grande surface.

[0035] Selon une autre possibilité, la surface périphé-

rique de l'anode tournante peut être constituée de plusieurs bandes annulaires adjacentes, constituées chacune de matières distinctes, pour être adaptées chacune à la production de rayons X selon une énergie déterminée distincte. L'électronique de commande de paliers permet alors de déplacer axialement le rotor pour placer sous le faisceau incident d'électrons une bande annulaire choisie correspondant à l'application envisagée.

[0036] Selon une autre possibilité, l'électronique de commande de paliers peut être en outre adaptée pour modifier volontairement la position radiale du rotor afin de rattraper l'usure de l'anode tournante et de maintenir ainsi, à travers un dispositif de collection, la focalisation du faisceau de rayons X sur une zone de convergence précise en sortie.

[0037] Une autre fonction que l'on peut remplir par modification de la position radiale du rotor est de déplacer le point focal pour modifier dans le temps la zone d'impact du rayonnement X sur le dispositif de collection et augmenter ainsi la durée de vie du dispositif de collection.

[0038] Grâce aux améliorations des propriétés d'un tel dispositif, l'invention prévoit son utilisation comme source de rayons X dans un système de contrôle de cristallisation, ou comme source de rayons X dans un microscope à rayons X dans la fenêtre de l'eau, ou comme source de rayons X pour la mesure de petites structures ou de multicouches dans la fabrication de semi-conducteurs.

[0039] D'autres objets, caractéristiques et avantages de la présente invention ressortiront de la description suivante de modes de réalisation particuliers, faite en relation avec les figures jointes, parmi lesquelles :

- la figure 1 est une vue schématique de côté en coupe longitudinale d'un dispositif de génération de rayons X selon un mode de réalisation de la présente invention, et
- la figure 2 est une vue de côté partielle en coupe longitudinale d'un dispositif de génération de rayons X selon un second mode de réalisation de la présente invention.

[0040] Le dispositif illustré sur la figure 1 comprend une pompe à vide 1, de type moléculaire, turbomoléculaire ou hybride, une anode tournante 2, une cathode 3 générant un faisceau d'électrons 4, et un dispositif de collection 5 qui recueille et conditionne le faisceau de rayons X 6 produit par le dispositif.

[0041] La pompe à vide 1 est constituée, de façon connue en soi, d'un rotor 1a mobile en rotation autour d'un axe I-I dans un stator 1b, entraîné en rotation par un moteur 1c, et maintenu en position par des paliers ou roulements 10a, 10b, 10c, 10d et 10e schématiquement illustrés.

[0042] Les paliers ou roulements 10a-10e, peuvent être des structures habituellement utilisées dans les pompes à vide, par exemple des roulements à bille ou à aiguille, des paliers lisses, des paliers à gaz, ou des pa-

liers magnétiques. Ces derniers permettent des rotations rapides à plus de 40 000 tours par minute, sans vibration, avec une stabilité contrôlée de l'ordre du micron.

[0043] Le rotor 1a est raccordé au moteur 1 c par un arbre moteur 1d.

[0044] L'anode tournante 2 est solidaire du rotor 1 a de la pompe 1, disposée coaxialement avec le rotor 1a. En pratique, l'anode tournante 2 est une pièce rapportée en bout d'un arbre 1e coaxial du rotor 1a.

[0045] Les éléments aspirants de la pompe à vide 1, tels que le rotor 1a, le stator 1b et l'arbre 1d, sont contenus dans une enveloppe périphérique étanche 1f, pouvant être en partie constituée par le stator 1b, et munie d'une sortie d'évacuation 1g par laquelle sont refoulés les gaz pompés.

[0046] L'enveloppe périphérique étanche 1f de la pompe entoure également l'anode tournante 2, et constitue elle-même au moins une partie de la paroi étanche d'une enceinte sous vide 7 dans laquelle se propagent le faisceau d'électrons 4 et le faisceau de rayons X 6. L'enceinte sous vide 7 contient pour cela l'anode tournante 2, ainsi que la cathode 3, et le dispositif de collection 5. Le faisceau d'électrons 4 produit par la cathode 3 se propage dans le vide, depuis la cathode 3, et vient frapper la surface périphérique 2a de l'anode tournante 2, produisant le faisceau de rayons X 6 qui se propage vers le dispositif de collection 5.

[0047] Le dispositif de collection 5 peut être contenu dans une enceinte sous vide 7 monobloc. En alternative, le dispositif de collection 5 peut être contenu dans une partie rapportée sur l'enceinte sous vide 7.

[0048] Dans la réalisation illustrée sur la figure 1, la surface périphérique 2a de l'anode tournante 2 est cylindrique, coaxiale avec l'axe I-I. La cathode 3 est orientée de façon que le faisceau incident d'électrons 4 soit incliné par rapport à l'axe I-I, ce qui produit un faisceau émis de rayons X 6 également incliné.

[0049] En alternative, la surface périphérique 2a d'anode tournante qui reçoit le faisceau d'électrons 4 peut être une portion périphérique d'une face radiale 2b ou 2c de l'anode tournante 2.

[0050] Dans sa portion d'extrémité portant l'anode tournante 2, l'arbre 1 e est recouvert d'une couche 1h thermiquement isolante, de sorte que l'anode tournante 2 est au contact de la couche 1h assurant une isolation thermique. Cette couche 1h peut notamment comprendre une bague en acier inoxydable.

[0051] De part et d'autre de l'anode tournante 2, dans le sens axial, on dispose conformément à la présente invention un premier élément refroidisseur 8 et un second élément refroidisseur 9, tous deux fixés au stator 1b ou corps de pompe, ou à l'enveloppe périphérique étanche 1f de la pompe, en regard de l'une des faces radiales principales 2b ou 2c de l'anode tournante 2, laquelle est sous forme d'un disque. Les éléments refroidisseurs 8 et 9 sont à proximité des faces radiales principales 2b et 2c de l'anode tournante 2, et reçoivent l'énergie thermique de rayonnement émise par l'anode tournante 2 en

fonctionnement.

[0052] Les éléments refroidisseurs 8 et 9 comportent un circuit interne de refroidissement, respectivement 8a et 9a, parcouru par un fluide caloporteur qui évacue vers l'extérieur l'énergie calorifique reçue de l'anode tournante 2.

[0053] L'élément refroidisseur 8 est revêtu d'une couche 8b de matériau à haute émissivité, par exemple du nickel noir ou du chrome noir, mais aussi certaines céramiques. Il en est de même de l'élément refroidisseur 9 qui est revêtu d'une telle couche 9b.

[0054] De même, les faces radiales principales 2b et 2c de l'anode tournante 2 peuvent être revêtues chacune d'une couche de matériau à haute émissivité. On augmente ainsi le transfert d'énergie calorifique par rayonnement depuis l'anode tournante 2 vers les éléments refroidisseurs 8 et 9, favorisant le refroidissement de l'anode tournante 2.

[0055] L'élément refroidisseur 8 comprend un corps annulaire en cuivre de 10,5 mm d'épaisseur qui sert de barrière aux rayons X et les empêche de parvenir à l'extérieur de l'enceinte. On pourrait remplacer l'anneau de cuivre par un anneau d'acier inoxydable de 16,5 mm d'épaisseur.

[0056] De même l'élément refroidisseur 9 comprend un corps en forme de plaque ou de disque en cuivre de 10,5 mm d'épaisseur qui sert de barrière aux rayons X et les empêche de parvenir à l'extérieur de l'enceinte. On pourrait aussi bien remplacer le disque en cuivre par un disque d'acier inoxydable de 16,5 mm d'épaisseur. Toutefois la paroi de l'enceinte à vide est habituellement réalisée en acier inoxydable afin d'assurer la protection de l'environnement extérieur en cas de défaillance de la pompe. Dans le cas où l'élément refroidisseur 9 est fixé à cette paroi, la paroi elle-même contribue à la fonction de barrière à l'égard des rayons X. L'épaisseur de matériau permettant une protection totale de l'extérieur vis-à-vis des rayons X est alors calculée en tenant compte de la combinaison de l'élément refroidisseur 9 et de la paroi, afin de permettre d'atteindre le niveau d'atténuation requis.

[0057] De préférence, on prévoit en outre des moyens pour déplacer le rotor 1a le long de son axe de rotation I-I. On comprend qu'un tel déplacement axial du rotor 1a provoque le même déplacement axial de l'anode tournante 2, et réalise une modification de la zone d'impact 4a du faisceau d'électrons 4 sur la surface périphérique 2a de l'anode tournante 2.

[0058] Par exemple, le rotor 1a peut être sollicité par des paliers magnétiques 10a à 10e, schématiquement représentés, pilotés par une électronique de commande de paliers 10f, l'ensemble déterminant la position axiale et la position radiale du rotor 1a dans le stator 1b.

[0059] Les paliers magnétiques tels qu'habituellement utilisés dans les pompes à vide comprennent une pluralité de pôles magnétiques indépendants, répartis sur le bâti et sur l'arbre de la pompe à vide, et dont le champ magnétique est généré par des bobines alimentées par

l'électronique de commande de paliers en fonction de signaux provenant de capteurs de position également répartis entre le bâti et l'arbre de la pompe à vide.

[0060] On peut piloter la position du rotor selon cinq axes, comprenant l'axe longitudinal et quatre axes radiaux contenus dans les plans de deux sections droites différentes. Mais il est aussi possible de piloter le rotor, au moyen d'électroaimants associés à une électronique de commande, seulement selon certains axes axiaux ou radiaux dits « actifs », alors que d'autres axes dits « passifs », contrôlés par des aimants permanents, ne nécessiteront aucun pilotage.

[0061] Dans les pompes à vide habituelles, l'électronique de commande de paliers est programmée pour maintenir les plus constantes possibles les positions axiale et radiale du rotor 1a dans le stator 1b.

[0062] Selon l'invention, dans un premier mode de réalisation, les éléments radiaux 10a à 10d des paliers magnétiques, qui assurent normalement le positionnement radial du rotor 1a, maintiennent constante cette position radiale. Simultanément, les éléments axiaux 10e des paliers magnétiques, qui assurent le positionnement axial du rotor, sont agencés de façon que l'électronique de commande de paliers 10f puisse modifier volontairement la position axiale du rotor 1a le long de son axe de rotation I-I. On comprend que l'on modifie pour cela la consigne de position axiale reçue par l'électronique de commande de paliers 10f, ladite consigne de commande étant générée par un circuit de commande 10g.

[0063] Selon un second mode de réalisation, en alternative ou en complément, l'électronique de commande de paliers 10f peut également commander les éléments radiaux 10a à 10d des paliers magnétiques, pour modifier volontairement la position radiale du rotor 1a dans le stator 1b. On modifie ainsi pour cela la consigne de position radiale, générée par le circuit de commande 10g.

[0064] Quant à lui, le circuit de commande 10g peut générer les consignes de position axiale et/ou radiale en fonction d'informations reçues de capteurs disposés sur les autres organes du dispositif de l'invention.

[0065] Par exemple, on peut prévoir un capteur d'usure 10h permettant de détecter l'usure de la surface périphérique 2a de l'anode tournante 2, et le signal reçu de ce capteur d'usure 10h est utilisé par le circuit de commande 10g pour déplacer la zone usée d'anode tournante à l'écart de la zone d'impact 4a du faisceau d'électrons 4, par un déplacement axial de l'anode tournante 2.

[0066] Selon une autre possibilité, le circuit de commande 10g et l'électronique de commande de paliers 10f peuvent déplacer en va-et-vient le rotor 1a le long de son axe de rotation I-I pendant le fonctionnement. Il en résulte que l'on déplace ainsi la zone d'impact 4a du faisceau d'électrons 4 sur une surface périphérique de l'anode tournante 2, répartissant ainsi l'usure sur une plus grande surface, et réduisant simultanément l'usure locale de chaque partie de surface périphérique 2a de l'anode tournante 2.

[0067] En alternative ou en complément, on peut pré-

voir des moyens pour modifier la position et/ou l'orientation de la cathode 3, modifiant ainsi la zone d'impact 4a du faisceau d'électrons 4 sur la zone périphérique 2a de l'anode tournante 2.

[0068] L'anode tournante 2 peut être entièrement constituée d'un même matériau. En alternative, elle peut être constituée d'un matériau de base qui est localement revêtue du matériau nécessaire à la formation des rayons X selon sa surface périphérique 2a. Le matériau de base doit posséder des caractéristiques mécaniques et thermiques compatibles avec les contraintes de fonctionnement de l'anode, comme par exemple l'aluminium, le cuivre, l'acier inoxydable, le titane ou le carbure de silicium, sans que cette liste soit limitative. La surface périphérique 2a de l'anode tournante 2 peut être de préférence en un matériau tel que le cuivre, le molybdène, le tungstène, l'oxyde de béryllium, l'aluminium anodisé, la céramique oxyde ou tout autre oxyde, sans que cette liste soit limitative. Le matériau sera choisi en fonction de l'énergie nécessaire pour l'application à laquelle est destinée la source de rayons X. Le cuivre permet la formation de rayons X à 8 keV. Le molybdène permet la formation de rayons X à 17 keV.

[0069] On pourra trouver intérêt à réaliser l'anode tournante 2 en métal, le métal pouvant contribuer à mieux répartir et évacuer l'énergie thermique produite par l'impact du faisceau d'électrons 4, en comparaison des oxydes qui conduisent mal la chaleur à haute température. Autrement dit, le métal contribue à évacuer la chaleur dans toute l'anode tournante 2, en évitant que l'énergie thermique reste localisée sur la zone d'impact 4a du faisceau d'électrons 4.

[0070] Les éléments refroidisseurs 8 et 9 peuvent avantageusement être réalisés en métal bon conducteur de la chaleur, par exemple le cuivre.

[0071] Dans un mode de réalisation particulier, la surface périphérique 2a de l'anode tournante 2 peut être constituée de plusieurs bandes annulaires adjacentes de matières distinctes adaptées chacune à la production de rayons X selon une énergie déterminée distincte. Par exemple, on peut prévoir une première bande annulaire en cuivre, une seconde bande annulaire en molybdène. L'électronique de commande de paliers 10f permet alors de déplacer axialement le rotor pour placer sous le faisceau incident d'électrons 4 une bande annulaire choisie. En plaçant la bande annulaire de cuivre sous le faisceau d'électrons 4, on pourra produire des rayons X à 8 keV, tandis qu'en plaçant la bande annulaire de molybdène sous le faisceau d'électrons 4, on pourra produire des rayons X à 17 keV. D'autres propriétés des rayons X peuvent être obtenues par exemple avec des bandes en d'autres matières telles que l'acier inoxydable, l'inconel.

[0072] L'anode tournante 2 peut être symétriquement usinée, de manière à pouvoir être retournée complètement une fois usée.

[0073] Dans le mode de réalisation illustré sur la figure 2, on retrouve les principaux éléments constitutifs du dispositif de l'invention, à savoir l'anode tournante 2 montée

en bout de l'arbre 1e, le premier élément refroidisseur 8, le second élément refroidisseur 9, et la surface périphérique 2a de l'anode tournante 2.

[0074] Dans ce mode de réalisation, les surfaces en regard 8b et 9b des éléments refroidisseurs 8 et 9 et les surfaces radiales principales 2b et 2c de l'anode tournante 2 sont dentelées de manière concentrique, formant une succession de nervures annulaires concentriques à profil triangulaire, de manière à augmenter la surface d'échange de refroidissement par rayonnement.

[0075] En considérant à nouveau la figure 1, on comprend qu'une usure de la surface périphérique 2a de l'anode tournante 2 tend à déplacer la zone d'impact 4a du faisceau d'électrons 4 vers le rotor 1a, ce qui simultanément tend à déplacer dans le même sens la zone de convergence 11 du faisceau de rayons X 6 émis. Ainsi le capteur d'usure 10h, placé comme illustré sur la figure 1, détecte le déplacement de la zone de convergence 11. Pour rattraper cette usure, l'électronique de commande de paliers 10f peut être adaptée pour modifier volontairement la position radiale du rotor 1a, vers la droite sur la figure 1, pour rattraper l'usure de l'anode tournante 2 et maintenir ainsi la focalisation du faisceau de rayons X sur la zone de convergence 11 précise en sortie. Pour cela, on peut détecter un éventuel déplacement de la zone de convergence 11 en sortie, par le capteur d'usure 10h, et envoyer le signal ainsi produit au circuit de commande 10g qui pilote l'électronique de commande de palier 10f afin de déplacer radialement le rotor 1a et l'anode tournante 2 dans le sens réduisant ce déplacement de zone de convergence 11.

[0076] On prévoit en bout de l'arbre 1e un dispositif de connexion électrique permettant la polarisation de l'anode tournante 2 et l'évacuation du courant électrique résultant de l'impact du faisceau d'électrons 4. Ce dispositif peut être une structure conductrice par contact glissant. En alternative, la conduction électrique peut être assurée en prévoyant, entre au moins une partie de l'anode tournante 2 et une partie fixe conductrice, une zone de décharge électrique dans un gaz conducteur.

[0077] Sur la figure 2, l'anode tournante 2 est en forme de disque dont les extrémités sont légèrement inclinées pour diriger le faisceau de rayons X vers le dispositif de collection 5.

[0078] Le fonctionnement des pompes turbomoléculaires repose sur une vitesse périphérique des aubes de l'ordre de la vitesse thermique des molécules, soit plusieurs centaines de mètres par seconde. Ainsi, l'utilisation de la technologie des pompes à vide pour faire tourner l'anode tournante 2 permet une rotation à très haute vitesse de la surface périphérique 2a de l'anode tournante 2, avec un asservissement très précis et une absence quasi-totale de vibrations. La rotation très rapide de l'anode tournante 2 permet d'augmenter la puissance du faisceau d'électrons 4 incident, réalisant ainsi une source de rayons X à très grande brillance.

[0079] De préférence, on rapproche la cathode 3 au plus près de la surface périphérique 2a de l'anode tour-

nante 2, et on positionne le dispositif de collection 5 également au plus près de la surface périphérique 2a de l'anode tournante 2. De la sorte, on augmente encore la compacité de la source de rayons X, on améliore la capacité de convergence du faisceau de rayons X émis en améliorant ainsi le flux sur un échantillon placé dans la zone de convergence 11, et on réduit les pertes.

[0080] On réalise ainsi une source à rayons X compacte, sans vibrations, qui délivre un faisceau monochromatique de grande brillance focalisé sur une zone de convergence 11 de très petite taille.

[0081] Grâce aux qualités d'une telle source de rayons X, on peut envisager son application dans des domaines jusqu'à présent inexploités.

[0082] Selon un premier domaine, le dispositif peut être utilisé comme source de rayons X dans un système de contrôle de cristallisation. A cet égard, la petite taille de la source de rayons X selon l'invention permet d'envisager son utilisation comme moyen de contrôle systématique de la cristallisation de protéines. Un tel contrôle, actuellement fait avec des sources à anode tournante coûteuses et encombrantes, peut être réalisé plus aisément avec une source de rayons X selon l'invention, qui produit un faisceau de grande intensité avec des propriétés bien définies (pureté spectrale, divergence et stabilité). La détection par rayons X permet ainsi de surveiller la cristallisation de manière plus précise et automatisée.

[0083] Selon une seconde application, on peut utiliser le dispositif selon l'invention comme source de rayons X dans un microscope à rayons X dans la fenêtre de l'eau. A cet égard, la microscopie dans la fenêtre de l'eau est une technique très prometteuse, mais aujourd'hui limitée car elle nécessite une source de rayonnement à synchrotron, très onéreuse, qui permet d'émettre un rayonnement X de puissance et de monochromaticité satisfaisante. Le coût de ces sources de rayonnement empêche leur développement. Avec une source de rayons X selon l'invention, on peut atteindre une puissance de rayons X suffisante pour une application en microscopie dans la fenêtre de l'eau.

[0084] La présente invention n'est pas limitée aux modes de réalisation qui ont été explicitement décrits, mais elle en inclut les diverses variantes et généralisations qui sont à la portée de l'homme du métier.

Revendications

1. Dispositif pour l'émission de rayons X, comprenant :

- une enceinte sous vide (7), limitée par une paroi étanche (1f),
- une pompe à vide (1), comportant dans une enveloppe périphérique étanche (1f) un stator (1b), un rotor (1a) et des moyens d'asservissement (10a-10e) du rotor (1a) permettant sa rotation stable à très haute vitesse, et raccordée à l'enceinte sous vide (7) pour y générer et en-

tretenir un vide,

- une cathode (3), dans l'enceinte sous vide (7), adaptée pour générer un flux d'électrons (4),
- une anode tournante (2), dans l'enceinte sous vide (7), entraînée en rotation autour d'un axe de rotation (I-I), et recevant sur sa périphérie (2a) le flux d'électrons (4) provenant de la cathode (3) pour émettre des rayons X (6) vers une sortie (11),
- l'anode tournante (2) est solidaire du rotor (1a) de la pompe à vide (1), disposée coaxialement avec le rotor (1a),
- l'enveloppe périphérique étanche (1f) de la pompe à vide (1) constitue elle-même tout ou partie de la paroi étanche de l'enceinte sous vide (7),

caractérisé en ce qu'il comprend en outre au moins un élément refroidisseur (8, 9) fixé au stator (1b) de pompe à vide ou à l'enveloppe périphérique étanche (1f) en regard de l'une des faces radiales principales (2b, 2c) de l'anode tournante (2) pour absorber l'énergie thermique de rayonnement émise par l'anode tournante (2) en fonctionnement.

2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel on prévoit au moins deux éléments refroidisseurs (8, 9) disposés respectivement en regard de l'une et l'autre des faces radiales principales (2b, 2c) de l'anode tournante (2).
3. Dispositif selon l'une des revendications 1 et 2, dans lequel l'élément refroidisseur (8, 9) comprend un corps en cuivre ou en acier inoxydable d'une épaisseur suffisante pour absorber le flux de rayons X.
4. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel le ou les éléments refroidisseurs (8, 9) ont un circuit interne de refroidissement (8a, 9a) parcouru par un fluide caloporteur qui évacue vers l'extérieur l'énergie calorifique.
5. Dispositif selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel les surfaces opposées (8b, 9b, 2b, 2c) du ou des éléments refroidisseurs (8, 9) et de l'anode tournante (2) sont revêtues d'une couche de matériau à haute émissivité.
6. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les surfaces opposées (8b, 9b, 2b, 2c) du ou des éléments refroidisseurs (8, 9) et de l'anode tournante (2) sont dentelées de manière concentrique.
7. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, comportant en outre des moyens d'isolation thermique (1h) comprenant une bague en acier inoxydable interposés entre l'arbre (1e) et l'anode

tournante (2).

8. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, comprenant en outre des moyens (10e, 10f, 10g) pour déplacer le rotor (1a) le long de son axe de rotation (I-I), modifiant ainsi la zone d'impact (4a) du faisceau d'électrons (4) sur la périphérie (2a) de l'anode tournante (2).
9. Dispositif selon la revendication 8, dans lequel le rotor (1a) est sollicité par des paliers magnétiques (10a-10e) pilotés par une électronique de commande de paliers (10f) qui détermine sa position axiale et sa position radiale dans le stator (1b), l'électronique de commande de paliers (10f) étant adaptée pour modifier volontairement au moins la position axiale du rotor (1a) le long de son axe de rotation (I-I).
10. Dispositif selon la revendication 9, dans lequel l'électronique de commande (10f) modifie la position axiale du rotor (1a) en fonction de l'usure de l'anode tournante (2) pour déplacer une zone usée de l'anode tournante (2) à l'écart de la zone d'impact (4a) du faisceau d'électrons (4).
11. Dispositif selon l'une des revendications 9 et 10, dans lequel l'électronique de commande (10f) déplace en va-et-vient le rotor (1a) le long de son axe de rotation (I-I) pendant le fonctionnement, déplaçant ainsi la zone d'impact (4a) du faisceau d'électrons (4) sur une surface périphérique de l'anode tournante (2).
12. Dispositif selon la revendication 9, dans lequel la surface périphérique (2a) de l'anode tournante (2) est constituée de plusieurs bandes annulaires adjacentes de matières distinctes adaptées chacune à la production de rayons X selon une énergie déterminée distincte, l'électronique de commande de paliers (10f) permettant de déplacer axialement le rotor (1a) pour placer sous le faisceau incident d'électrons (4) une bande annulaire choisie.
13. Dispositif selon l'une des revendications 9 à 12, dans lequel l'électronique de commande de paliers (10f) est en outre adaptée pour modifier volontairement la position radiale du rotor (1a) afin de rattraper l'usure de l'anode tournante (2) et de maintenir ainsi la focalisation du faisceau de rayons X (6) sur une zone de convergence (11) précise en sortie.

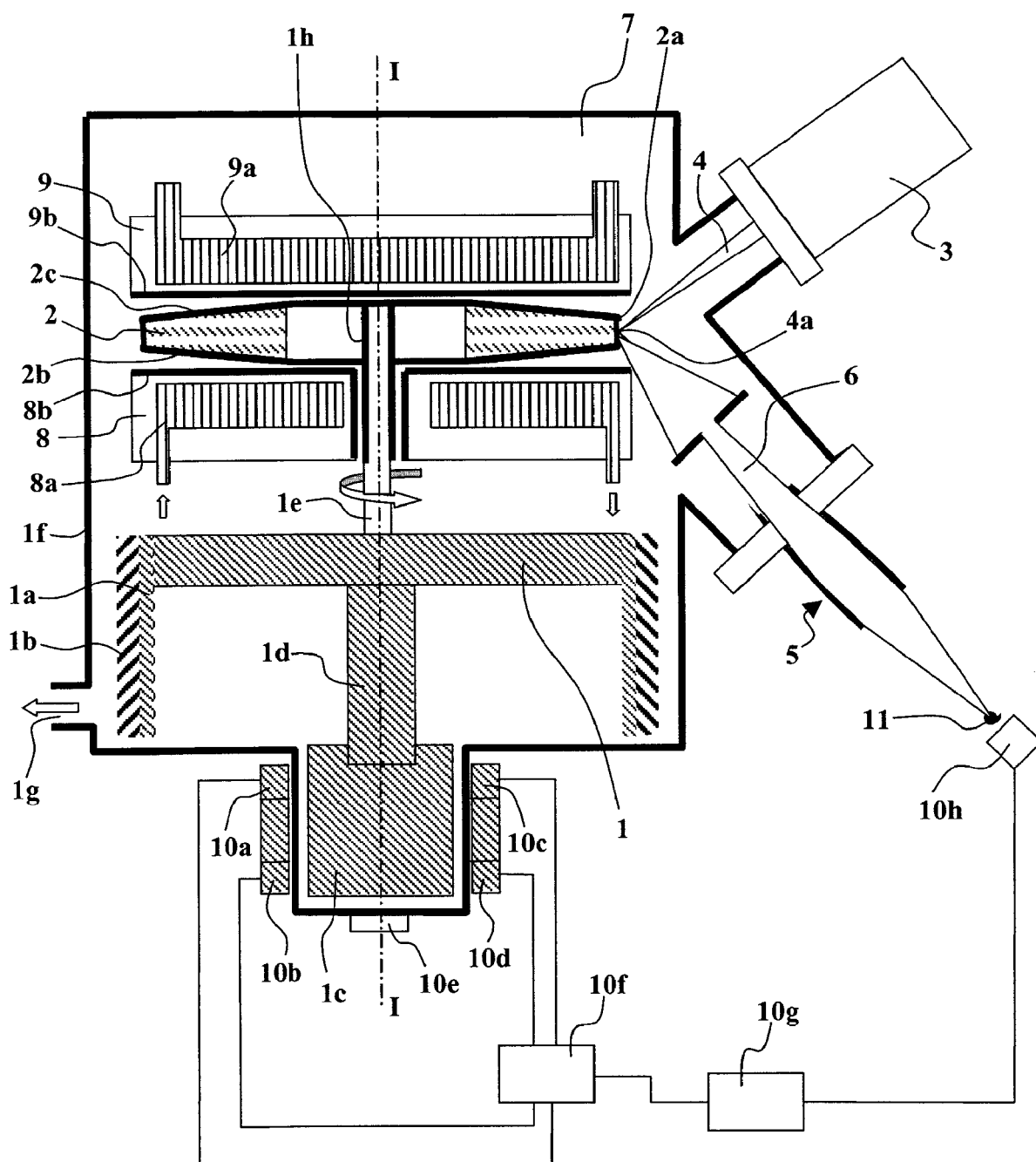


FIG. 1

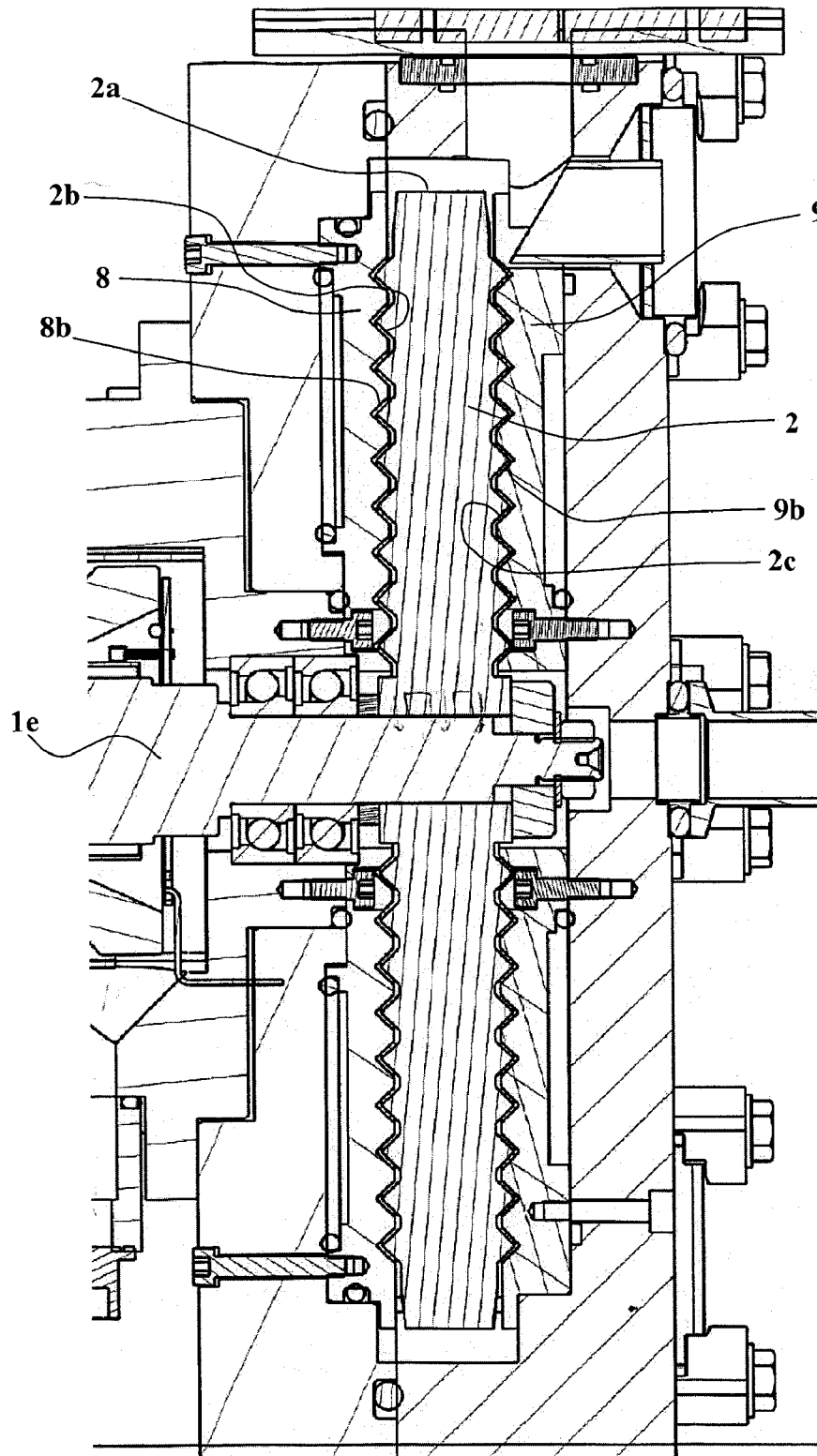


FIG. 2

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

- EP 0170551 A [0002]